

Cl₂-Ar 혼합가스를 이용한 GST 박막의 유도결합 플라즈마 식각

Etching Characteristics of GST Thin Films using Inductively Coupled Plasma of Cl₂/Ar Gas Mixtures

민남기¹, 김만수¹, Shutov Dmitriy², 김성일³, 권광호^{1,a}
(Nam-Ki Min¹, Mansu Kim¹, Shutov Dmitriy², Sungihl Kim³, and Kwang-Ho Kwon^{1,a})

Abstract

In this work, the etching characteristics of Ge₂Sb₂Te₅(GST) thin films were investigated using an inductively coupled plasma (ICP) of Cl₂/Ar gas mixture. To analyze the etching mechanism, an optical emission spectroscopy (OES) and surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) were carried out. The etch rate of the GST films decreased with decreasing Ar fraction. At the same time, high selective etch rate over SiO₂ films was obtained and the selectivity over photoresist films decreased with increasing the Ar fraction. From XPS results, we found that Te halides were formed at the etching surface and Te halides limited the etch rate of the GST films.

Key Words : GST, ICP, Etching, OES, XPS

1. 서론

최근에 상변화 물질을 광 메모리 디스크[1,2]와 전기적 메모리 소자[3-5]의 데이터 저장물질로 활용하기 위한 많은 연구가 진행 중에 있다.

Ag-In-Sb-Te와 Ge-Sb-Te 같은 다양한 물질이 상변화 재료로 활용되고 있다. 특히 Ge₂Sb₂Te₅(GST) 재료는 상변화 속도가 빠르고 상변화가 일어날 때 조성 변화 없이 안정적인 순환성을 나타내어, phase-change random access memory (PRAM)에 적합한 재료중의 하나로 각광받고 있다[6]. 한편 PRAM의 성능은 식각 공정의 최적화에 달려 있으며, 특히 set 저항의 증가는 식각 공정의 최적화

에 달려있는 것으로 알려져 있다[2]. 그러나 지금까지 GST박막의 식각에 관한 연구결과는 제한적으로 발표되었다. Huai-Yu Cheng는 20% 농도의 질산 용액을 이용한 습식 식각에 관한 연구 결과를 발표하였다[7]. 이러한 습식 식각 기술은 나노 사이즈의 GST 박막의 패터닝이 불가능 할 뿐만 아니라, GST 박막이 결정 구조인 경우, 습식 식각의 균일성을 확보할 수 없는 문제가 있다. 또한 Ik Hyun Park은 Cl₂/Ar 가스를 이용하여, GST 박막을 ICP 식각 장비를 활용하여 식각 하고 그 결과를 발표하였다[8]. 이들은 주로 공정 변수에 따른 식각 속도와 식각 단면의 변화를 고찰하였으나, 플라즈마 특성 혹은 표면 반응에 대한 분석은 수행되지 않았다. 그 결과 GST 박막의 식각 기구는 거의 설명되지 않고 있으나, GST 박막의 식각 공정을 최적화하기 위해서는 식각 기구에 대한 해석이 선행되어야 하는 것은 자명한 일이다.

따라서 본 연구에서는 optical emission spectroscopy (OES) 분석을 통해 Cl radical 특성 변화를 추출하고, X-ray photoemission spectroscopy (XPS) 분석을 통해 식각 표면 반응을 조사하였으며, 이들 결과를 토대로, 식각 기구를 해석하였다.

1. 고려대학교 제어계측공학과
(서울시 성북구 안암동 5가 1)
2. Department of Microelectronic Devices & Materials Technology, Ivanovo State University of Chemistry & Technology
3. 대전대학교 IT 전자공학과
a. Corresponding Author : kwonkh@korea.ac.kr
접수일자 : 2007. 8. 24
1차 심사 : 2007. 9. 7
심사완료 : 2007. 9. 18

2. 실험

본 연구에서는 GST 박막을 식각하기 위해 고진공 하에서 고밀도 플라즈마를 형성하는 ICP 식각장비를 사용하였다[9]. 플라즈마 생성을 위해 챔버 상부에 유도 코일이 감겨져 있으며, 13.56 MHz의 RF 전원이 인가된다. 마찬가지로 하부 척에도 또 하나의 13.56 MHz의 RF 전원이 인가되어 독립적으로 식각될 박막에 수직으로 입사되는 이온의 에너지를 조절한다.

GST 박막은 4"(100) 실리콘 기판 위에 rf magnetron sputtering 방식으로 300 nm 두께로 증착하였으며, 이 때 스퍼터 장비의 증착 압력, 기저 압력, rf power는 각각 5 mTorr, 5×10^{-7} Torr, 100 W로 유지되었으며, 아르곤 분위기에서 45분 동안 증착하였다. GST 박막의 식각 가스로는 Cl₂와 Ar의 혼합가스를 이용하였다. 식각에 사용되는 Cl₂와 Ar 가스의 총 유량은 70 sccm 으로 고정하였으며, Ar 가스의 혼합비는 43 %에서 86 %까지 변화시켰다. 또한 유도코일에 인가되는 소스 전력, 하부 척에 인가되는 바이어스 전력과 공정 압력은 각각 500 W, 200 W, 4 mTorr로 고정하였다.

식각 전후의 GST 박막 조성비와 식각 특성을 알아보기 위하여 XPS 분석을 하였으며 XPS 분석을 위하여 VG scientific의 ESCALab 220-IXL을 사용하였으며 X-ray source로는 Mg K α 1253.6 eV를 이용하였다. 식각이 완료된 GST 샘플에서 Cl은 공기중에 노출되면 쉽게 휘발되므로 Cl의 특성 피크를 검출하기 위해 식각 후에 샘플 주위를 진공 상태로 유지하였다.

플라즈마내에서 chemical species의 특성을 조사하기 위하여, 식각 공정 중 OES 분석을 실시하였다. 이때 사용된 OES는 Princeton Applied Research의 EG&G 1460 optical multichannel analyzer (OMA)이며, 1024 channel linear diode array를 이용하여 광 방출 스펙트럼을 추출하였다. Stray light 및 검출기 잡음에 기인한 background spectrum을 제거한 후, 특정 원자나 분자에 의해 방출되는 피크 크기를 추출하였다.

PRAM의 구조에서 SiO₂층은 GST 박막의 하부 물질로 사용되고, 감광막의 식각 마스크 재료로 사용되므로, 이들의 식각 특성을 추출하였다. 이들의 식각 선택비를 추출하기 위하여, 2 cm \times 2 cm 크기의 GST, SiO₂ 및 감광막 시료를 동시에 식각하였으며 식각된 GST 박막의 두께는 Tencor Instrument의 Alpha step 500 surface profiler 및 Nanospec 3000 spectroscopic reflectometer를 이용하였다.

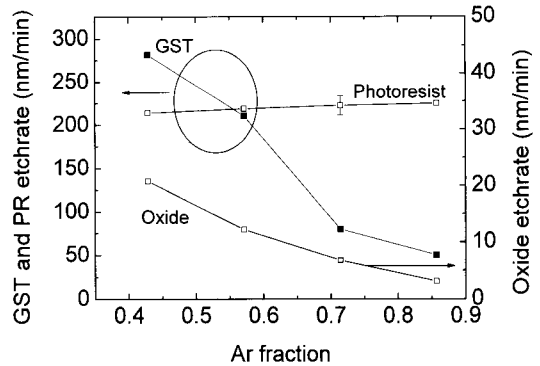


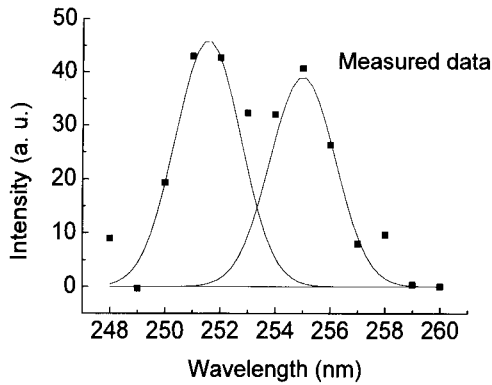
그림 1. Cl₂ 가스의 유량변화에 따른 GST 박막, SiO₂ 및 감광막의 식각 속도 비교.

Fig. 1. Etch rate of GST thin film, SiO₂ and PR as variations of Cl₂/Ar mixing ratio.

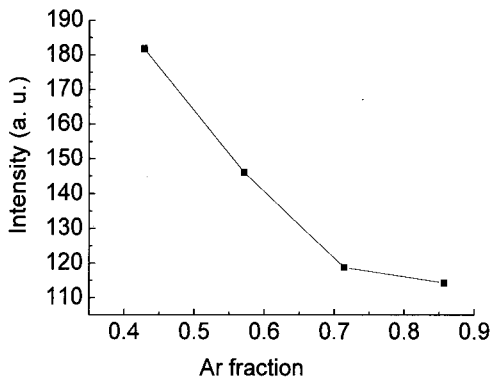
3. 결과 및 고찰

그림 1은 Cl₂/Ar 가스 혼합비에 따른 GST 박막, SiO₂ 및 감광막의 식각 속도를 나타낸 것이다. Ar 가스의 양이 늘어날수록 GST 박막의 식각 속도는 감소되었으며, Ar 가스의 혼합비가 43 - 86 %인 범위에서, 식각 속도가 278 - 51 nm/min로 단조 감소하였다. 한편 self dc bias의 경우에는 -234 V에서 -150 V로 감소함을 확인하였다. 이러한 GST 박막의 식각 속도 변화는 ion bombardment energy와 밀접한 관련이 있음을 의미한다. 산화막의 경우에는, GST 박막의 식각 속도 변화와 거의 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 본 실험 범위내에서 SiO₂의 대해 12:1이상의 높은 식각 선택비를 얻었다. 한편 감광막의 식각 속도는 Ar fraction이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 감광막과의 높은 식각 선택비를 얻기 위해서는 낮은 Ar fraction이 유리함을 보여준다.

Ar 가스 혼합비 변화에 따른 플라즈마내에서 형성되는 Cl species의 방출 세기의 변화를 조사하였다. 그림 2의 (a)는 Ar 43 %인 경우의 OES 스펙트럼을 나타낸 것이다. 본 실험에서 Cl₂/Ar 가스를 사용하였기 때문에 OES를 통해 추출되는 피크는 Ar 혹은 Cl과 관련된 피크임이 분명하다. 그런데 Ar 가스만을 사용하여 OES 스펙트럼을 추출한 결과 본 파장 영역에서는 어떤 피크도 관찰되지 않았다. 한편 Ar의 경우에는 어떤 원소와도 거의 결합을 형성하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 피크는 Cl radical 혹은 Cl 화합물에 의한 피크로 판단된다. 그림에 나타난 바와 같이, Cl species



(a)



(b)

그림 2. 가스 혼합비에 따른 Cl species 세기 변화: (a) Cl spectra deconvolution (Ar fraction = 43 %) (b) 가스 혼합비에 따른 peak area의 변화.

Fig. 2. Intensity of Cl species as variations of Cl₂/Ar mixing ratio : (a) Cl spectra deconvolution (Ar fraction = 43 %) (b) Change of peak area.

에서 방출된 스펙트럼은 2개의 피크로 나누어짐을 알 수 있다. 본 실험에서, OES 스펙트럼 deconvolution을 위해 피크 세기는 Gaussian 분포로 가정하였다. 2개의 피크는 각각 251.6 및 255.2 nm의 파장에서 형성됨을 확인할 수 있다. 이는 각각 Cl ⁵S₂⁰ - ³F₃ 및 Cl ⁵S₂⁰ - ³F₂ 천이에 해당한다[10]. 그림 2의 (b)는 이들 각각의 피크를 area integration 하고, 이를 합한 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Ar 가스의 혼합비가 증가함에 따라 방출 강도도 점점 감소함을 확인할 수 있다. 한편 Cl₂ 분자 결합의 해리 에너지는 2.5 eV 로 알려져 있으며, 이는 BCl₃와 같은 Cl 기반의 식각 가스에

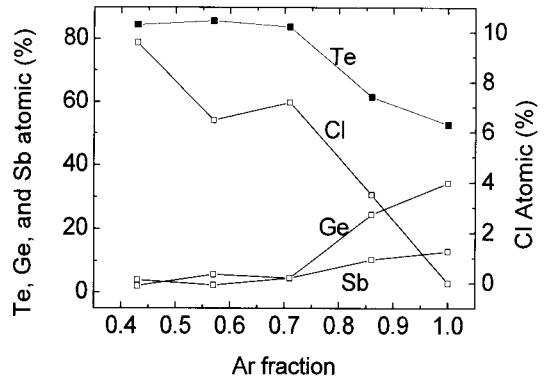


그림 3. Ar fraction에 따른 atomic% 변화.

Fig. 3. Change of atomic percentage as variations of Cl₂/Ar mixing ratio.

비해 상대적으로 낮은 해리 에너지를 가지므로 [11], 플라즈마 챔버 내에서 Cl₂ 분자는 Cl 라디칼들로 쉽게 해리될 수 있음을 의미한다. 그 결과 플라즈마 내에서 형성되는 Cl 라디칼의 농도는 그림 2의 (b)에 나타난 바와 같이 식각 가스의 혼합비에 크게 의존함을 알 수 있다. 한편 그림 1과 2를 비교하여 보면, 가스 혼합비의 변화에 따라, Cl radical intensity 변화 및 GST 박막의 식각 속도 변화는 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 GST 박막의 식각 메커니즘에 Cl 라디칼에 의한 화학적 반응이 밀접하게 관련되어 있음을 의미한다.

그림 2에서 나타난 Cl 라디칼 농도의 변화가 GST 박막의 표면 반응에 미치는 영향을 조사하기 위하여 XPS 분석을 실시하였다. 그림 3은 식각 전의 GST 박막과 식각된 GST 박막 표면의 상대적 원소 비를 나타낸 것이다. 여기서 Ar fraction이 1인 경우는 as-received GST 박막을 Ar sputtering 한 후 추출된 atomic %를 나타낸 것이다. 그림 3에서 알 수 있듯이, Ar 가스의 혼합비가 71% 이상 증가함에 따라, Ge와 Sb의 상대적 원소비는 증가하였지만 Te는 감소하였다. 한편 Ar 가스의 혼합비가 71% 이하에서는 Ar fraction이 변화되어도, Ge, Sb, Te의 상대적 원소비는 거의 변화가 없었다. Ar fraction이 낮은 경우, 즉 Cl₂ fraction이 높은 경우는 as-received GST 박막에 비하여 Te가 증가하고, Ge 및 Sb는 감소하였음을 의미한다. 이런 현상은 GST 박막을 Cl₂/Ar 혼합가스로 식각하는 경우, 반응 부산물들로 Germanium chloride (GeCl₄), antimony chloride(SbCl₅), tellurium chloride

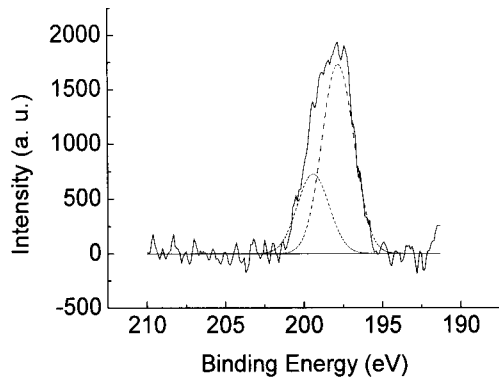


그림 4. Cl 2p 스펙트럼(Ar fraction = 43 %).
Fig. 4. Cl 2p spectrum(Ar fraction = 43 %).

(TeCl₄)등이 예상되며, 이들GeCl₄, SbCl₅, TeCl₄의 증기압과 관련있는 것으로 판단된다. 한편 Cl의 상대적 원소비는 Cl₂ 가스의 유량이 증가에 따라 증가하였으며, 이는 그림 2에 나타난 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 그러므로 Cl 가스의 유량 증가에 따라 플라즈마내에서 Cl species들의 더 많이 형성되고, 이에 따라서 GST 박막 표면에 잔류하는 Cl species들이 점점 많아진 것으로 생각된다.

그림 4는 Ar fraction이 43 %인 조건에서 추출한 Cl 2p 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면Cl 2p 스펙트럼은 2개의 피크로 나누어짐을 알 수 있다. 이는 전형적인 Cl 2p_{3/2} 및 Cl 2p_{1/2}에 기인한 피크이다[12]. Cl 스펙트럼의 경우, Ar 가스 혼합비의 변화에도 불구하고, peak shift는 발견되지 않았다. 이는 Cl 원소의 electronegativity가 커서 일어나는 현상임을 알 수 있다.

그림 5는 Ge 2p_{3/2} 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 5의 (a)는 식각전 GST 박막을 Ar sputtering으로 약 10 nm 두께를 스퍼터링 후 추출한 Ge 2p_{3/2} 스펙트럼을 deconvolution하였다. 일반적으로 Ge-Ge homopolar bond는 1217 eV에서 검출되는 것으로 알려져 있는데 반하여, 본 실험에서는 1218.2 eV에서 피크가 검출되었다. 이는 Ge는 주로 Sb 혹은 Te 원소와 결합되어 있음을 알 수 있다[13]. 한편 1220.3 eV에서 검출되는 피크는 GeO_x(x≤2) 화합물에 기인하는 피크임을 확인할 수 있다. 이러한 산소의 존재는 O KLL Auger peak에 의해서 확인되었다. 이는 Ar sputtering에 의해 자연 산화막이 대부분 제거되었음에도 불구하고, 일부 잔존하는 산화막에 기인된 것으로 판단

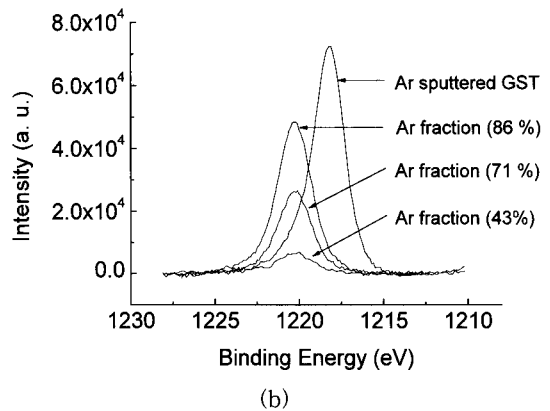
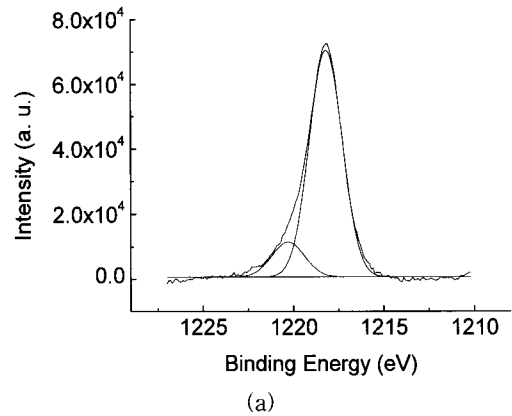
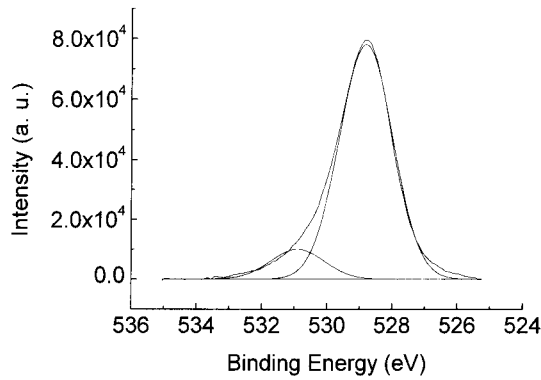
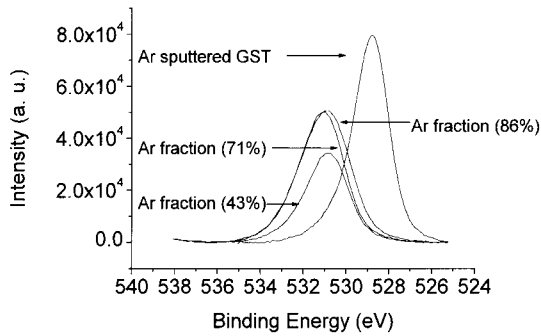


그림 5. Ge 2p 스펙트럼:
(a) Ar sputtered sample,
(b) Ar fraction에 따른 Ge 2p 스펙트럼 변화
Fig. 5. Ge 2p spectrum:
(a) Ar sputtered sample,
(b) Change of Ge 2p spectrum as variations of Cl₂/Ar mixing ratio

된다. 그림 5의 (b)는 Ar 가스 혼합비 변화에 따른 Ge 2p 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 Ar fraction이 감소할수록 Ge 스펙트럼의 세기가 감소함을 보여준다. 이는 그림 3에 나타난 결과를 설명해 준다. 이는 Germanium chloride (GeCl₄) 등의 화합물의 매우 높은 휘발성에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, GeCl₄의 증기압은 10 mmHg에서 -15 °C로 매우 높다[14]. 그 결과 Ge의 경우에는 spontaneous reaction mechanism에 의해 식각이 진행되는 것으로 판단된다. 한편 Cl₂/Ar 혼합 가스를 사용하여 식각한 시료에서는 1220.3 eV에서 대부분의 피크가 형성됨을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. Sb3d_{5/2} 스펙트럼:

- (a) Ar sputtered sample,
- (b) Ar fraction에 따른 Sb 3d_{5/2} 스펙트럼 변화

Fig. 6. Sb3d_{5/2} spectrum:

- (a) Ar sputtered sample,
- (b) Change of Sb 3d_{5/2} spectrum as variations of Cl₂/Ar mixing ratio

본 실험에서 XPS 분석을 위하여 각각의 시료를 1분 동안 식각 후 XPS 분석을 실시하였다. 이는 그림 1에 나타난 식각 속도를 감안하면 약 50 - 270 nm이상의 GST 박막이 제거되었음을 의미한다. 또한 O KLL Auger peak를 살펴본 결과, 식각된 시료에서는 거의 산소가 존재하지 않음을 확인하였다. 따라서 1220.3 eV의 binding energy에서 검출되는 피크는 주로 Cl 원소에 기인함을 알 수 있다. 이는 Cl 원소와 O 원소의 electronegativity가 거의 유사하여 나타난 결과로 해석된다.

그림 6은 Sb 3d_{5/2} 스펙트럼을 나타낸 것이다.

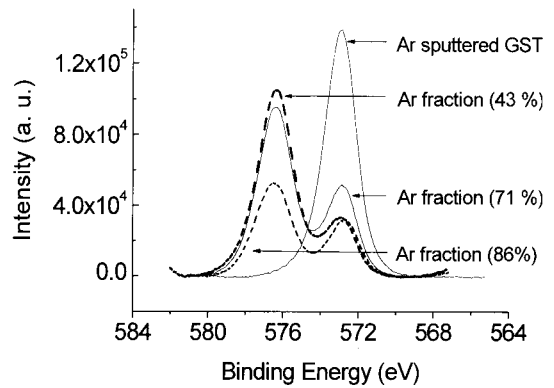


그림 7. Ar fraction에 따른 Te 3d_{5/2} 스펙트럼 변화.
Fig. 7. Change of Te 3d_{5/2} spectrum as variations of Cl₂/Ar mixing ratio.

그림 6의 (a)를 살펴보면 528.8 및 530.9 eV에서 2개의 피크가 형성됨을 알 수 있다. 이는 Sb metallic bonding 및 Sb₂O₃의 Sb 3d_{5/2}에 해당된다[12,13]. 그림 6의 (b)는 Ar 가스 혼합비 변화에 따른 Sb 3d_{5/2} 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. 한편 Ge 원소에서 나타난 바와 같이 Ar fraction이 감소함에 따라 Sb의 세기가 감소함을 보여준다. 이 현상 역시 antimony chloride의 높은 증기압에 기인하는 현상이다[14].

그림 7은 Ar fraction 변화에 따른 Te 3d_{5/2} 스펙트럼을 나타낸 것이다. Ar sputtered GST 박막에서는 Te 3d_{5/2} 피크는 572.8 eV의 binding energy에서 피크가 검출되었으며, 이는 Te metallic bonding에 해당한다[12,13]. 한편 Cl₂/Ar 가스 플라즈마에 의해 식각된 시료에서는 576.5 eV에서 다른 하나의 피크가 관찰되었으며, 이는 Te halides (여기서는 Te-Cl 화합물)에 의해 형성되는 피크로 알려져 있다. 한편 Ar fraction이 감소함에 따라, 즉 Cl₂ fraction이 증가함에 따라 Te halides에 기인한 피크가 증가함을 알 수 있다. 이는 그림 3에 나타난 결과를 잘 설명해 준다. 즉, Te atomic %의 변화는 Te halides화합물의 형성에 기인한다. 이러한 현상은 앞에서 언급한 Ge 및 Sb의 경우와는 상반된 경향을 보인다. 이는 tellurium chloride (TeCl₄) 등의 Te halides가 낮은 증기압을 갖기 때문인 것으로 판단된다[14]. Te 화합물의 낮은 증기압으로 인하여 Cl₂ fraction이 증가할 수록 식각 표면에 더 많은 Te halides가 형성된다. 한편 그림 1을 살펴보면 Cl₂ fraction이 증가함에 따라 GST 박막의 식각 속도가 증가하였다. 즉 GST 박막의 식각 속도는 Te halide의 형성과 밀접한 관련이

있음을 의미한다. 이러한 현상은 ion-bombardment desorption mechanism으로 알려져 있다[9]. 즉, 식각 표면에서 Te halide가 형성되고, 이들이 ion bombardment에 의해 쉽게 표면에서 이탈되어, 식각 속도가 증가함을 의미한다.

이상의 결과를 요약하면, GST 박막의 구성 요소인 Ge 및 Sb의 경우에는 spontaneous reaction mechanism에 의해 식각되고, Te의 경우에는 Te halide를 형성하고, 이러한 Te halide가 ion-bombardment desorption되어 식각이 진행되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서, ICP 식각 장치를 이용하여 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막을 Cl_2/Ar 가스 플라즈마로 식각하였으며, OES 및 XPS 분석장치를 이용하여 식각 기구를 고찰하였다.

GST 박막의 식각 속도는 Ar 가스의 혼합비가 증가함에 따라 감소하였으며, Ar 가스의 혼합비가 43 %인 조건에서 278 nm/min의 식각 속도를 얻었다. SiO_2 의 식각 선택비는 12:1 이상의 높은 선택비를 얻었으며, 감광막의 선택비는 Ar 가스 혼합비가 증가함에 따라 감소함을 확인하였다. 한편 XPS 분석 결과로부터 Ge 및 Sb와 Te의 식각 기구가 다름을 확인하였다. 즉 Ge 및 Sb의 경우에는 이들의 halide가 높은 증기압을 갖고, 그 결과 spontaneous reaction mechanism에 의해 식각이 진행되었다. 이에 반해 Te의 경우에는 Te halide의 낮은 증기압으로 인하여, ion-bombardment desorption mechanism에 의해 식각이 진행됨을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] B. Hyot, L. Poupinet, V. Gehanno, and P. J. Desre, "Analysis of writing and erasing behaviours in phase change materials", *Journal of Magnetic Materials*, Vol. 249, p. 504, 2002.

[2] X. S. Miao, L. P. Shi, P. K. Tan, J. M. Li, K. G. Lim, X. Hu, and T. C. Chong, "Multispeed rewritable optical-recording method with an initialization-free phase-change disk", *Applied Optics*, Vol. 43, p. 1140, 2004.

[3] S. Lai and T. Lowery, "OUM - A 180 nm Nonvolatile Memory Cell Element Technology

For Stand Alone and Embedded Applications", *IEDM Tech Dig*, 36.5.1, 2001.

[4] S. Lai, "Current status of the phase change memory and its future", *IEDM Tech Dig.*, 10.1.1, 2004.

[5] W. Y. Cho, B.-H. Cho, B.-G. Choi, H.-R. Oh, S. Kang, K.-S. Kim, K.-H. Kim, D.-E. Kim, C.-K. Kwak, H.-G. Byun, Y. H. wang, S. Ahn, G.-H. Koh, G. Jeong, H. Jeong, and K. Kim, "A 0.18-um, 3.0-V, 64-Mb nonvolatile phase-transition random access memory (PRAM)", *IEEE Journal of solid-state circuits*, Vol. 40, No. 1, p. 293, 2005.

[6] S. Senkader and C. D. Wright, "Models for phase-change of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ in optical and electrical memory devices", *Journal of applied physics*, Vol. 95, p. 504, 2004.

[7] H. Y. Cheng, C. A. Jong, C. M. Lee, and T. S. Chin, "Wet-etching characteristics of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films for phase-change memory", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, p. 1031, 2005.

[8] H. Park, J. W. Lee, and C. W. Chung, "Integrated ferroelectrics", Vol. 80, p. 207, 2006.

[9] M. S. Kim, N.-K. Min, S. J. Yun, H. W. Lee, A. Efremov, and K.-H. Kwon, "On the Etching Mechanism of ZrO_2 Thin Films in Inductively Coupled BCl_3/Ar Plasma", *Microelectronics Engineering*, in press.

[10] R. Payling and P. Lakins, "Optical Emission Lines of the Elements", *John Wiley & Sons Ltd.*, p. 69, 2002.

[11] L. Sha and J. P. Chang, "Plasma etching selectivity of ZrO_2 to Si in BCl_3/Cl_2 plasma", *Journal of Vacuum Science Technology*, A21(6), Vol. 21, No. 6, p. 1915, 2003.

[12] J. F. Moulder, W. F. Sticke, P. E. Sobol, and K. D. Bomben, "Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy", *Physical Electronics, Inc*, 1995.

[13] H. Y. Cheng, C. A. Jong, R.-J. Chung, T.-S. C, and R.-T. Huang, "Wet etching of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films and switching properties of resultant phase change memory cells", *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 20, p. 1111, 2005.

[14] D. W. Green and J. O. Maloney, "Perry's chemical engineers' handbook", 6th ed, *McGraw-Hill, Inc*, 1984.