

# 강유전체 박막의 식각 기술 현황

김창일  
(중앙대학교 전자전기공학부)

## 1. 서 론

반도체 소자의 제조 기술의 급속한 발달과 함께 전자회로 및 부품에 대한 미세화, 고집적화, 및 고속화에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 시대적 기술 환경의 변화에 따라 전자 부품에 있어서도 보다 우수한 전기적, 구조적 특성을 갖는 박막 소자에 대한 연구 개발이 이루어지게 되었다. 특히 멀티미디어 사회를 실현하려는 전략 디바이스로서 강유전체 박막을 이용한 DRAM (dynamic random access memory) 및 FRAM (ferroelectric random access memory)의 반도체 소자가 급속히 부각되고 있으며, 이에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다.

Giga bit급 DRAM의 반도체 소자의 실현을 위해서는 기억 소자용 캐패시터를 위한 축적 전하량의 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 전하량을 확보하기 위하여 DRAM에서는 BST ( $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ), BTO ( $BaTiO_3$ ), STO ( $SrTiO_3$ ) 박막 등과 FRAM에서는 SBT ( $Sr_{1-x}Bi_xTa_2O_9$ ), PZT ( $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ ), LiNbO<sub>3</sub>, YMnO<sub>3</sub>, BaMgF<sub>4</sub> 박막등의 유전상수가 큰 강유전체 박막을 채용한 capacitor를 제작하는 것이다[1-3]. 이러한 강유전체 박막이 강유전 특성을 지니기 위해서는 perovskite 상의 결정 구조를 이루어야 한다. Sol-gel법에 의해 제작된 PZT 박막의 경우 pyro-chlore상에서 perovskite상으로의 변환이 nucleation에 의해 조절되는 것으로 보고되고 있다. Perovskite상으로의 변환률의 제한 단계는 nucleation 이기 때문에 heterogeneous nucleation site의 역할이 중요하다. 이러한 상변이 현상은 하부 전극 등에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다[4]. 이러한 결과들은 우수한 강유전체나 메모리 소자에 사용되는 고유전율의 캐패시터 박막을 형성하기 위해서는 뛰어난 결정성과 barrier 역할을 할 수 있는 재

료를 전극 재료로 사용하여야 한다. 실용적인 강유전체 재료는 산화물로서 그 박막의 형성은 수 백 °C에서 수행되고, 박막의 형성 중, 고 에너지의 산소 원자에 의하여 기판 표면이 산화될 가능성이 크기 때문에 하부 전극에는 산화가 어려운 금속, 산화하여도 산화물이 도전성을 갖는 금속, 혹은 도전성 산화물 등의 물질이 사용된다. 따라서 강유전체 박막이 perovskite 상의 결정 구조를 형성하기 위해서는 capacitor 전극 재료로 사용되는 물질은 결정성이 우수하고 표면이 산화되지 않아야 한다. 이러한 전극 재료로는 SrMoO<sub>3</sub>, Pt, Pd, CeO<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등이 거론되고 있다. 따라서 강유전체 박막의 특성은 대부분 이들 전극 재료 위에 형성된 막에서 조사되고 있다[5-8].

그러므로, 강유전체 박막을 Giga bit 급 DRAM과 고밀도 FRAM에 적용하기 위해서는 적절한 식각 속도를 확보하고, 마스크로 감광막을 사용하여, 수직 식각 형상을 얻을 수 있는 강유전체 박막과 전극의 식각기술의 확보가 절실히 요구되고 있다. 최근 BST, SBT와 PZT등의 강유전체 박막 식각과 Pt 식각에 관한 연구가 수행되고 있으나, 아직 초보적인 단계에 머물러 있으며, 다른 전극 또는 barrier 물질의 식각 연구는 전무하다. 본 논문에서 강유전체 물질과 전극재료의 플라즈마 식각에 대한 기술 현황에 대하여 알아 보고자 한다.

## 2. 플라즈마 식각 및 식각 장치

### 2.1 강유전체 박막 및 전극 재료의 플라즈마 식각

건식식각 기술의 개발은 식각 가스와 식각 물질의

어야 한다. 일반적으로 반응성이 우수하여 대부분의 식각공정에 이용되고 있는 가스로는 F, Cl, Br, I 등으로 이루어진 할로젠족 화합물이다. 강유전체 박막 및 전극 재료의 구성 원소와의 결합하여 형성되는 halogen 화합물들은 Table 1에 나타난 것과 같이 melting point와 boiling point가 매우 높다. 이러한 현상은 이들 화합물을 식각 표면에서 이탈시키기 위해서는 이온 충돌에 의한 물리적 식각이 부가되어야 함을 예측할 수 있다. 따라서 식각 변수들과 플라즈마 특성과의 상관 관계를 참고로 하여 강유전체 및 전극 물질의 식각시 표면에서 이탈되는 비휘발성 식각 부산물을 효과적으로 제거하고 이온 충돌에 의한 손상을 감소시킬 수 새로운 플라즈마원에 대한 연구가 필요하다.

Table1. 할로젠 화합물의 녹는점과 끓는점

Atom	Halogen-Compound	Melting-Point(°C)	Boiling-Point(°C)	Atom	Halogen-Compound	Melting-Point(°C)	Boiling-Point(°C)
Ba	BaF <sub>2</sub>	1368	2260	Pt	PtF <sub>6</sub>	61.3	-
	BaCl <sub>2</sub>	962	1560		PtCl <sub>4</sub>	370	-
	BaBr <sub>2</sub>	875	1835		PtBr <sub>4</sub>	180	-
Sr	SrF <sub>2</sub>	1477	2460	Pd	PdF <sub>2</sub>	952	-
	SrCl <sub>2</sub>	834	1250		PdCl <sub>2</sub>	679	-
	SrBr <sub>2</sub>	657	-		PdBr <sub>2</sub>	250	-
Bi	BiF <sub>3</sub>	725	900	Au	AuF <sub>3</sub>	300	-
	BiCl <sub>3</sub>	230	447		AuCl	289	-
	BiBr <sub>3</sub>	218	453		AuBr <sub>3</sub>	165	-
Pb	PbF <sub>4</sub>	600	-	Ir	IrF <sub>3</sub>	-28	-
	PbCl <sub>4</sub>	-15	-		IrCl <sub>3</sub>	763	-
	PbBr <sub>4</sub>	-	-		IrBr <sub>3</sub>	-	-
Zr	ZrF <sub>4</sub>	932	-	Ru	RuF <sub>3</sub>	600	-
	ZrCl <sub>4</sub>	437	-		RuCl <sub>3</sub>	500	-
	ZrBr <sub>4</sub>	450	-		RuBr <sub>3</sub>	400	-
Ti	TiF <sub>4</sub>	1200	1400	Ce	CeF <sub>4</sub>	600	-
	TiCl <sub>4</sub>	-25	136		CeCl <sub>3</sub>	817	-
	TiBr <sub>4</sub>	-39	230		CeBr <sub>3</sub>	733	1457

Onishi 등은 고 밀도 ECR(electron cyclotron resonance)을 이용하여 PZT와 Pt 식각을 수행하였다[9-11]. 그러나, ECR은 균일한 플라즈마를 유지하기 어려운 문제점이 있어 차세대 식각장비로 적합하지 않은 것으로 판단된다. 기존의 반도체 식각공정에 널리 이용되고 있는 RIE (reactive ion etching)은 플라즈마 밀도가 낮아 식각속도가 너무 느리고,

플라즈마 내에서 평균자유 행정거리가 짧아 수직 식각 형상을 얻기 어려운 단점이 있다[12-14]. 이러한 단점을 보완하기 위해 연구되고 있는 플라즈마 원이 ICP (inductively coupled plasma)이다. ICP는 고밀도 플라즈마에 의한 식각종의 생성율을 향상시키고 하부전극에 가해지는 rf 전력에 의해 이온의 충돌 에너지를 적절히 조절하여 식각 반응을 증대시킬 수 있는 특징을 가지고 있다[15]. 또한 고진공(수 mTorr) 하에서 플라즈마가 형성되어 이온의 평균 자유 행정 거리가 증대되어 수직한 식각 단면을 얻을 수 있다. 따라서 ICP에 의한 건식 식각기술의 개발이 강유전체 박막 및 전극재료의 가공에 가장 적합한 것으로 판단된다.

## 2.2 플라즈마 식각 장치

### 2.2.1 RIE (Reactive Ion Etching)

반도체 제조공정에서 가장 널리 사용되어온 장치가 RIE 이고, 그림 1은 전형적인 RIE 식각 장치의 구조도이다. 낮은 압력에서 일정한 간격으로 유지되어 있는 두 전극판에 고주파를 인가하고, rf가 인가된 전극에 웨이퍼를 장착하여 식각이 진행된다. 일반적으로 RIE 식각 장비는 높은 공정 압력에서 구동되며, 플라즈마 밀도가 10<sup>9</sup>cm<sup>3</sup>으로 낮으며, 등방성 식각에 주로 이용되어진다. 이온 충돌 에너지가 비교적 높기 때문에 선폭, 선택비 및 기판 손상 등을 제어해야 하는 차세대 식각 공정에서는 이온 충돌 에너지가 기판으로 입사하는 이온과 중성 가스의 선속에 대해 독립적으로 제어되어야 한다. 이 RIE 식각 장치들은 20 mTorr 이하의 공정 압력에서는 효율적인 작동이 불가능하다.

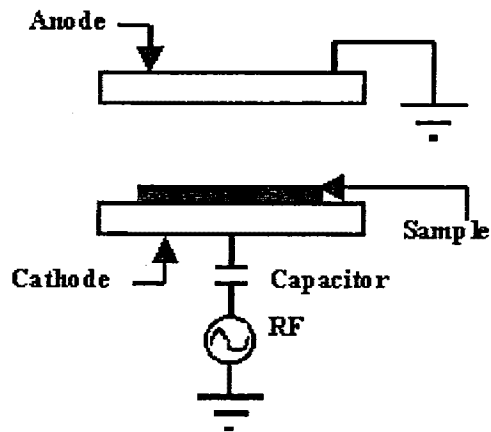


그림 1. RIE의 구조도

### 2.2.2 MERIE (Magnetically Reactive Ion Etcher)

낮은 공정 압력에서 효율적인 작동과 기관에 입사하는 이온들의 에너지를 낮추기 위해 향상된 MERIE (magnetically enhanced reactive ion etcher)라는 장비가 개발되기도 하였다. 전자가 플라즈마에서 포획되는 성질을 이용하여 전자의 충돌이 빈번하게 진행되어 플라즈마 밀도가 증가하게 된다. 그러므로, 높은 식각 속도와 비등방성 식각이 가능하다. ECR에 비하여 플라즈마 효율이 낮고, 역시 공정 압력이 높다는 단점을 가지고 있다.[16]

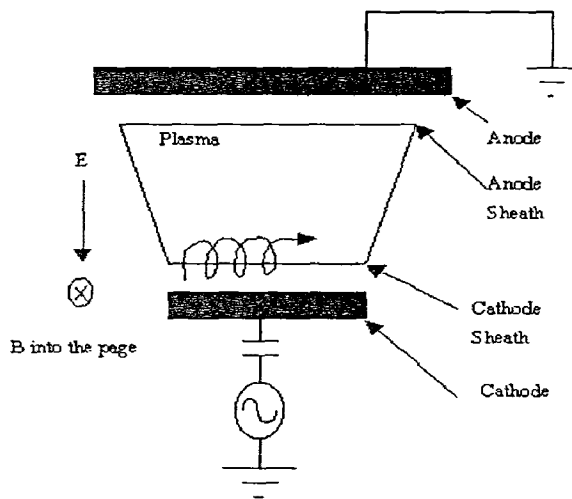


그림 2. MERIE의 구조도.

### 2.2.3 ECR (Electron Cyclotron Resonance)

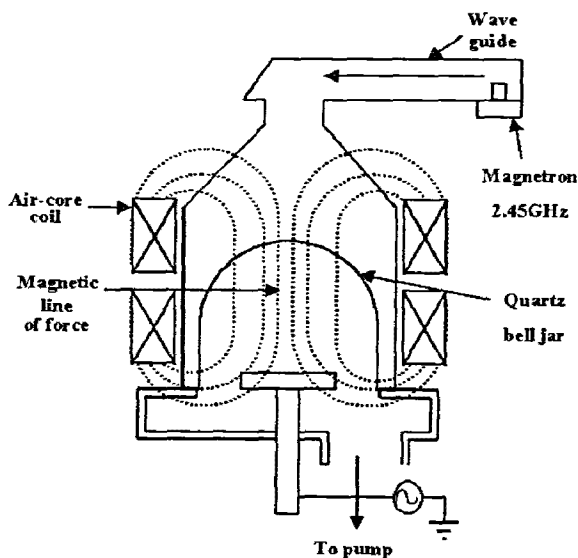


그림 3. ECR의 구조도

마이크로파를 이용한 플라즈마 방전을 이용하여 고밀도 식각 장치를 개발하였다. 그림 3은 플라즈마 식각 공정에서 사용하는 ECR 장치의 구조를 보여주고 있다[9-11]. 웨이브 가이드를 통해 플라즈마로 가해진 마이크로파의 출력은 이 공진 영역에서 자기장을 중심으로 회전 운동을 하는 전자와 공진을 일으키면서 전달된다. 이 장치의 출력 전달 특성상  $10^{-5}$  Torr 이하의 매우 낮은 압력에서도 플라즈마 발생이 가능하나, 압력이 감소함에 따라 식각의 비용이 상승하기 때문에 실제의 식각 공정에서는 전형적으로 1 mTorr에서 20 mTorr사이에서 작동한다.

### 2.2.3 ICP (Inductively Coupled Plasma)

그림 4는 유도 결합 플라즈마 식각 장치의 구조도이다. 이 장치의 가장 큰 특징은 웨이브와 플라즈마와의 출력 결합에 자기장이 요구되지 않기 때문에 가장 간단한 구조를 가지고 있다는 것이다. 위에서 제시한 ECR 플라즈마 발생 장치에 비해 출력 결합 효율의 측면에서 비교적 낮은 편이기는 하나, 자기장이 사용되지 않으므로 공간적인 균일성 확보에 큰 이점을 갖는다. 고진공에서  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 의 고밀도 플라즈마를 형성하고, rf를 이용하므로 macro wave에 대한 위험을 해소할 수 있다. RF 안테나는 실린더 장치의 측면이나 상단부에 위치되기도 한다.[12,13] 이 장치 또한, 기관 바이어스의 독립성을 가지고 기관으로 입사하는 이온의 에너지를 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나, 식각 과정에서 웨이퍼의 온도가 올라가는 문제점이 있으므로 웨이퍼의 온도를 냉각시켜주는 장치가 필요하다.

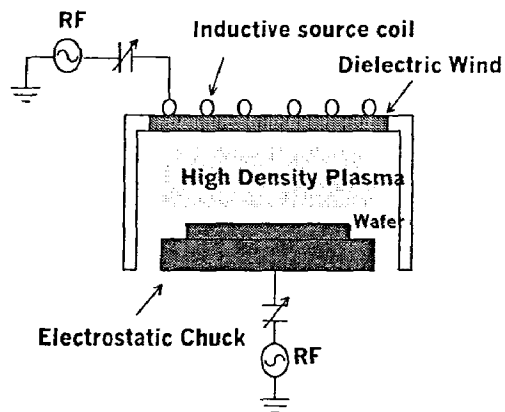


그림 4. ICP의 구조도

최근에는 12" 이상의 웨이퍼에 응용이 가능한 대면적 플라즈마 식각 장치로의 확장에 이용하기 위한 연구가 시도되고 있다. 최근에는 출력 결합의 효율성을 높이고, 공간 분포의 균일성의 향상을 위해 영구자석을 반응로의 측면에 설치하여 약한 자기장을 축 방향으로 가하기도 한다[15].

### 3. 강유전체 및 전극 재료의 건식 식각

#### 3.1 PZT 박막의 식각

FRAM의 적용을 위한 PZT 박막의 식각 공정을 살펴보면, S. Yokoyama 등이 고밀도 ECR 플라즈마와  $Cl_2(30)/Ar(70)$  식각가스를 이용하여  $300^\circ C$  이상의 높은 기판온도에서 PZT/Pt/Ti/TiN/Ti 구조를 식각하였다. 온도를 높임으로써 휘발성 할로젠화금속인 식각 부산물을 얻을 수 있었고, SOG(spin on glass)를 마스크로 사용하여 120 nm/min 정도의 식각속도를 얻었고,  $80^\circ$  이상의 식각 단면을 얻었으며, 식각 부산물은 산성 용액으로 제거하였다[10]. N. Ikegami 등은 PZT 박막의 식각 메커니즘의 규명을 위하여 헬리콘 웨이브 플라즈마(helicon wave plasma)와 ECR (electron cyclotron resonance)을 이용하여  $BCl_3/Cl_2$  가스 혼합비에 따른 식각 형태의 변화와 이온 충격(bombardment)에 의한 표면의 구조적 변화를 분석하였다.  $BCl_3/Cl_2$ 의 가스 혼합에 따라 170~240 nm/min의 식각속도를 나타내었고 마스크인 감광막과의 식각 선택비는 8.4~0.69이었다고 보고하였다[17]. 한편 국내에서는 C. W. Chung과 C.hang Jung Kim은 ICP(inductively coupled plasma) 장비를 이용하여  $Cl_2/C_2F_6/Ar$  가스를 통해 PZT 막과 Pt/RuO<sub>x</sub> 막을 식각한 실험에서 70~140 nm/min의 식각속도를 얻었으며, 감광막과 PZT막의 식각 선택비는 0.5:1로 극히 낮았다. 그러나, 잔류막의 생성이 없는 깨끗한 패턴과  $70^\circ$  이상의 양호한 식각 단면을 얻었다고 보고하였다[18,19]. Tae Hyun An은 ICP 장비와 Ar/Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> 가스로 식각한 실험에서 100~240 nm/min의 식각 속도와 감광막과 PZT 막의 식각 선택비는 0.8:1이었다. 그리고, 그림에 나타난 것과 같이 Ar/BCl<sub>3</sub> 식각 조건에서 식각 형태가  $80^\circ$  이상이었다[20]. PZT 식각의 경우 공통적으로 연구의 초점이 되는 부분은, 기본적으로 식각률, 하부전극 및 마스크 재료와의 선택비, 비등

방성 식각, 등 일반적인 부분들 외에도 식각 손실 부분도 많이 고려되고 있다.

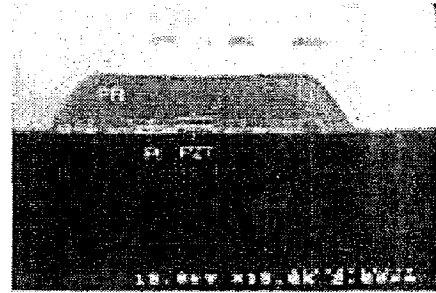


그림 5. PZT 박막의 SEM 단면사진[20]

#### 3.2 SBT 박막의 식각

SBT의 식각이 PZT보다 어렵기 때문에 아직까지 기본적인 식각 메커니즘에 관한 실험 정도도 거의 보고되고 있지 않다. S. B. Desu 등에 의한 실험에서 RIE 장비와 HCFC (hydrochlorofluorocarbon) 가스를 이용하여 130 Å/min 정도의 식각률을 얻었으며, SF<sub>6</sub> 가스를 사용하여 120 Å/min의 식각률을 얻었다[21]. W. J. Lee등은 RIE 식각 장치와 Ar/CF<sub>4</sub>/Cl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>를 사용한 실험에서 280 Å/min의 식각 속도를 획득하였다[22]. J. W. Seo등은 MEICP (magnetically enhanced inductively coupled plasma) 장비와 CHF<sub>3</sub>/Ar을 이용하여 165 nm/min의 식각 속도와  $80^\circ$  이상의 식각 형태를 획득하였다[23].

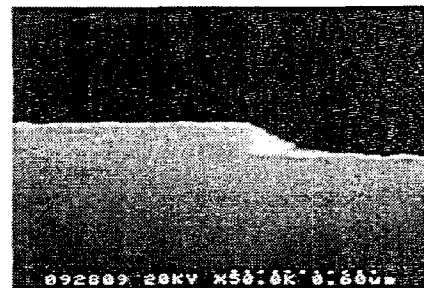


그림 6. SBT박막의 SEM 사진[23]

#### 3.3 BST 박막의 식각

BST 박막의 식각은 Tegal에서 발표한 자료에 따르면 식각률은 알려져 있지 않고 profile만을  $70^\circ$ 로 보이고 있다[24]. 국내에서는 LG에서 Ar/Cl<sub>2</sub>를 식

각 가스를 이용하여 식각률이 410nm/min, selectivity가 0.5:1를 발표하였다[25]. S. B. Kim 등은 Ar/Cl<sub>2</sub> 가스로 ICP를 이용하여 560 /mi의 식각 속도를 얻었으며, 산화막에 대한 BST의 식각 선택 비는0.43:1이었다. 그후, ICP 식각 장치와 Ar/Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> 식각 가스를 사용하여 480 /mi의 식각 속도와 65° 이상의 식각 형상을 획득 하였다[26,27]. K. P. Lee 등은 Cl<sub>2</sub>/Ar과 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar 가스와 ICP를 이용하여 ~900/min 과 100/min의 식각 속도를 각각 획득하였다.[28]

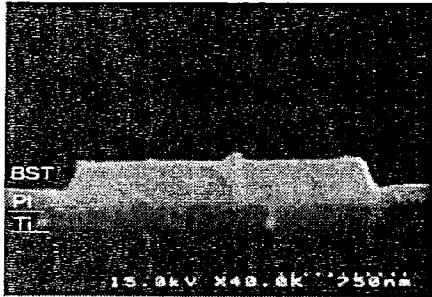


그림 7. BST 박막의 SEM 단면 사진[27]

### 3.4 Pt 및 기타 전극 재료의 식각

DRAM 및 FRAM의 전극물질로 Pt, Pd, Au, Ru, Ir, RuO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>등이 있다. Pt 박막을 강유전체 물질을 이용한 DRAM 및 FRAM의 전극물질로 사용하기 위해서는 Pt 박막의 식각 기술 확보가 반드시 필요하다. 하지만 이런 Pt 박막은 뛰어난 안정성으로 인해 다른 물질과 반응하여 휘발성 식각 부산물을 생성하지 않는다.[29,30] 지금까지 Pt 박막의 식각에 관한 연구는 Onishi 등에 의해 ECR 장비를 이용하여 300℃에서 Cl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 가스를 가지고 SOG 마스크로 공정을 수행하였다.[31] Mitsubishi에서는 magnetron RIE (reactive ion etching)장비를 가지고 50℃에서 600 W rf 전력, 200 G 자장, Ar/O<sub>2</sub> 가스와 SiO<sub>2</sub> 마스크로 공정 수행후 조사한 바를 보고하였다.[32] 또한 국내에서는 삼성전자에서 Ar/Cl<sub>2</sub> 가스를 기반으로 MERIE 장비와 ICP 장비를 사용하여 실험한 결과를 각각 보고하였다.[33,33]. J. H Ryu 등은 Ar/Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>와 ICP를 이용하여 의 142.5 nm/min 식각 속도와 75° 이상의 식각 형상을 획득하였다. SiO<sub>2</sub> 에 대한 Pt의 선택비 1.66이었다[34],

RuO<sub>2</sub>에 대한 식각은 O<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub>, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/CF<sub>3</sub>CFH<sub>2</sub> 등의 가스를 이용하여 30 nm/min의 식각 속도를 얻었으며, Cl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 가스를 이용하여 250

nm/min의 식각 속도를 얻었다[35,36]. 그의 재료에 대한 식각에 대한 연구는 전혀 보고가 되지 않고 있다.

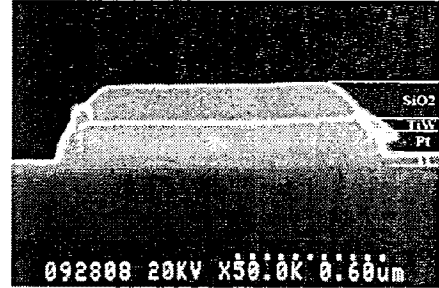


그림 8. Pt 박막의 SEM 단면사진[34]

## 4. 결 론

지금까지의 연구 동향과 그 결과를 바탕으로 고집적화를 위한 강유전체 물질의 식각 연구에 있어 고려되어야 할 문제는 크게 세 가지로 예상할 수 있다.

첫째, 강유전체 물질뿐만 아니라 어떤 재료를 식각함에 있어서 식각 mechanism 규명을 통한 적당한 식각 가스의 선택과 충분한 식각률, 좋은 선택비, 적용 가능한 식각 형상의 획득이 우선되어야 한다.

둘째, 식각 후 소자의 신뢰도(reliability)의 문제이다. 강유전체를 메모리 커패시터로써 응용할 경우 유전체막의 특성을 보존하는 것은 매우 중요하며, 실제로 플라즈마에 기인한 전하축적과 이온 충격에 의한 손상으로 인한 막 특성 저하 그리고 표면조성 변화에 의한 결함의 형성 및 그에 의한 전기적 열화 현상들은 복합화합물인 강유전체 물질의 식각에 있어서 극복되어야 문제로 떠오르고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 그 확실한 원인 규명이 필요하며, 식각 변수들과, 전극물질과의 상호 작용에 따른 전기적 특성 측정이 병행되어야 한다.

마지막으로, 보다 효과적인 식각을 위한 새로운 플라즈마 소스의 개발 및 식각 가스의 개발 또한 지속적으로 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Miyasaka, Extended Abstracts of the 1995 international conference on Solid State Devices and Materials, 506-508, 1995
- [2] D. O'Neill, G. Cattalan, F. Porras, R. M. Bowman, J. M. Grego, J. Materials Science: Materials in Electronics 9. 199-205. 1998
- [3] P. Zucher, R. E. Jones, P. Y. Chu, D. J. Tayler, B. E. White, Jr. S. Zafar, B. Jiang, Y. J. T Lii, and S. J. Gillespie, IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology-Part A, 20(2) 175-181. 1997
- [4] L. L. Hench and D. D. Ulrich, In Science of Ceramic Chemical Processing, Part I Sol-Gel Science, 56. 1986
- [5] J. H. Joo, J. M. Seon, Y. C. Jeon, K. Y. Oh, J. S. Roh, and J. J. Kim, Jpn. J. Appl. Phys., L. 70, 3053-3055. 1997
- [6] D. E. Kotecki, Semiconductor International, 109-116, 1996.
- [7] H. J. Cho, C. S. Kang, C. S. Hwang, J. W. Kim, H. HORII, B. T. Lee and M. Y. Lee, Jpn. J. Appl. Phys., 36, 874-876. 1997
- [8] J. H. Ahn, W. Y Choi, W. J. Lee and H. G. Kim, J. Appl. Phys., Vol. 37, 284-289. 1998
- [9] K. Nishikawa, Y. Kusumi, T. Oomori, M. Hanazaki and K. Namaba, Jpn. J. Appl. Phys., 6102. 1993
- [10] S. Yokoyama, Y. Ito, K. Ishihara, K. Hamada, S. Ohnishi, J. Kudo, K. Sakiyama, Jpn. J. Appl. Phys., 34, 767-770. 1995
- [11] Shindo M, Hiejima S, Ueda Y, Kawakami S, Ishii N, Kawai Y, Thin Solid Films, 345(1), 130-133. 1999
- [12] C. W. Chung, J. Vac. Sci. Technol. B 16(4), 1894-1900. Jul/Aug 1998
- [13] S. B. Desu and W. Pan, Appl. Phys. Lett. 68(4), 566-568. 1996.
- [14] W. Pan, C. L. Thio and S. B. Desu, J. Mater. Res., 13(2), 362-367. 1998
- [15] K. H. Kwon, C. I. Kim, S. J. Yun and G. Y. Yeom. "The Etching Properties of Pt Thin Films by Inductively Coupled Plasma", J. Vac. Sci. Technol. A 16(5), 2772-2776. 1998.
- [16] Lindley R, Bjorkman C, Shan HC, Pu B, Doan K, Wang ZX, Solid State Technology, 40(8), 93-96. 1997
- [17] N. Ikegami, T. Matsui and J. Kanamori, Jpn. J. Appl. Phys., 35(4B),2505-2511. 1997
- [18] C. W. Chung and C. J. Kim, Jpn. J. Appl. Phys., 36(5A), 2747-2753. 1997
- [19] C. W. Chung, J. Vac. Sci. Technol., B 16(4), 1894-1900, Jul/Aug 1998
- [20] T. H. An, J.Y. Park, G. Y. Yeom, E.-G. Chang, C. I. Kim, J. Vac. Sci. Technol. A 18(4), 2000. To be published.
- [21] S. B. Desu, and W. Pan, Appl. Phys. Lett. 68(4), 566-568.1996
- [22] W. J. Lee, C. R. Cho, S. H. Kim. I. K. You, B. W. Kim, B. G. Yu, C. H Shin, H. C. Lee, Jpn. J. Appl. Phys., 38, L1428-L1431. 1999
- [23] J. W. Seo, D. H. Leea, W. J. Lee, B. G. Yu, K. H. Kwon, G. Y. Yeom, E.-G. Chang, C. I. Kim, J. Vac. Sci. Technol. A 18(4), 2000. To be published.
- [24] S. P. Deormellas , A. Cofer, Solid State Technology, 41(8). 1998
- [25] J. H. Joo , J. B. Park , Y. Kim , K. S. Lee , J. S. Lee, J. S. Roh, J. J. Kim, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2-Letters, 38(2B), L195-L198. 1999
- [26] S. B. Kim, C. I. Kim, E. G. Chang, G. Y. Yeom, J. Vac. Sci. Technol. A, 17(4), 2156-2161. 1999
- [27] S. B. Kim, Y. H. Lee, T. H. G. Y. Yeom, C. I. Kim, J. Vac. Sci. Technol. A, 18(4). 2000 To be published
- [28] K. P. Lee, K. B. Jung, A. Srivastava, D. Kumar, R. K. Singh, and S. J. Pearton, J. Electrochem. Soc., 146(10), 3778-3782. 1999
- [29] D. E. Kotecki, Semiconductor International, pp. 109-116, 1996.
- [30] S. Onishi, M. Nagata, S. Mitarai, Y. Ito, J. Kudo, K. Sakiyama, J. Electrochem. Soc.,

145(7). July 1998

- [31] H. N. Al-shareef, D. Dimos, B. A. Tuttle, and M. V. Raymond, *J. Mat. Res.*, 12(2), 347-354, 1997.
- [32] S. O. Park, C. S. Hwang, H. J. Cho, C. S. Kang, H. K. Kang, S. I. Lee, and M. Y. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35(2B), 1548-155. 1996.
- [33] C. W. Chung, and H. G. Song, *J. Electronchem. Soc.*, 144(11), November 1997.
- [34] J. H. Ryu, N. H. Kim, H. S. Kim, G. Y. Yeom, E. G. Chang, C. I. Kim, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 18(4). 2000 To be published
- [35] S. B. Desu and W. Pan, *J. Vac. Sci. Technol. B* 12, 3208-3213. 1994
- [36] 이종근, 박세근, 전자공학회논문지, 제 37권 3호, 177-181. 2000