

Cl₂/O₂ 가스에 의한 크롬 박막의 식각 특성 고찰

The Etching Characteristics of Cr Films by Using Cl₂/O₂ Gas Mixtures

박희찬*, 강승열**, 이상균**, 최복길***, 권광호****

(Hee-Chan Park*, Seung-Youl Kang**, Sang-Kyun Lee**, Bok-Gil Choi***, Kwang-Ho Kwon****)

Abstract

We investigated the etching characteristics of chromium films by using Cl₂/O₂ gas mixtures with electron cyclotron resonance plasma. In order to examine the chemical etch characteristics of Cr films by using Cl₂/O₂ gas plasma, we obtained the etch rate with various gas mixing ratios. By X-ray photoelectron spectroscopy, the surface reaction on the chromium films during the etch was examined. From narrow scan analyses of Cr, Cl, and O, it was confirmed that a chromium oxychloride (CrCl_xO_y) layer was formed on the surface by the etch using Cl₂/O₂ gas mixtures. We observed a new characteristic emission line during the etch of chromium films using Cl₂/O₂ gas mixtures by an optical emission spectroscopy. It was found that the peak intensity of this emission line had a tendency compatible with the etch rate. The origin of this emission line was discussed in detail. At the same time, the etched profile was also examined by scanning electron microscope.

Key Words : Cr, optical emission spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, Cl₂/O₂, Electron Cyclotron Resonance Plasma

1. 서 론

크롬(Cr)은 반사율이 높고, 열 팽창 계수가 낮은 등의 장점으로 인하여, 마스크 패턴의 재료로서 적합한 특성을 지니고 있어서 포토 리소그래피의 마스크 패턴 등에 널리 이용되고 있다. 한편 field emission display(FED), thin film transistor-liquid crystal display(TFT-LCD)의 전극 재료[1-3]로도 크게 각광 받고 있는데, 이는 낮은 비저항과 습식 식

각에 의한 패턴의 형성이 용이하기 때문이다. 이들 공정에서 Cr을 습식 식각하기 위하여, ceric ammonium nitrate, perchloric acid 및 DI water의 혼합액을 이용하고 있다. 그러나 IC의 패턴 크기가 감소됨에 따라, quartz plate상에 더 미세한 패턴의 형성을 요구하고 있다. 특히, FED소자에서 Cr게이트 상에 형성되는 홀은 sub-micron이하의 미세 패턴 형성 및 뛰어난 식각 단면을 요구하고 있다. 이러한 특성을 만족시키기 위해서는 Cr의 건식 식각 기술의 개발이 요구된다.

지금까지, Cr의 건식 식각 기술은 거의 연구되지 않았다. 특히 과거의 연구 결과는 식각 by-product에 관하여 거의 연구되지 않았다[4]. 본 연구에서는, Cl₂/O₂가스를 이용하는 Cr박막의 식각 과정에서 일어나는 식각 기구를 조사하였다. 일반적으로 식각 기구를 조사하기 위해서는 X-ray photoelectron spectroscopy(XPS)[5-7] 및 optical emission

* : 국방과학연구소 종합시험단

** : 한국전자통신연구원 회로소자연구소

*** : 공주대학교 정보통신공학부

**** : 한서대학교 전자공학과

(충청남도 서산시 해미면 한서대학교,

Fax : 041-660-1414

E-mail : khkwon@hanseo.ac.kr)

2001년 5월 29일 접수, 2001년 6월 22일 1차심사완료

2001년 7월 2일 2차심사완료

spectroscopy(OES)가 많이 이용되고 있으며, 이들을 통하여 식각 표면 반응 및 식각 by-product를 조사하고자 하였다.

2. 실험

본 실험을 위하여 5-inch, (100) 실리콘 웨이퍼가 사용되었으며, 기판 실리콘 상에 plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD)법으로 약 300nm의 산화막을 증착하였다. 산화막위에 전자 빔 증착법에 의하여 Cr박막을 증착하였으며, 이때 Cr박막의 두께는 약 200nm정도였다. Cr의 식각을 위하여, Plasma Quest사의 magnetic multipolar electron cyclotron resonance(ECR)을 이용하였다. 기판 홀더의 온도는 8°C로 유지되었으며, 식각 압력은 60mTorr, microwave power는 600watts, dc-bias는 200volts로 설정하였다. 본 실험에서는 화학적인 표면 반응의 변화에 따른 식각 특성의 변화를 조사하기 위하여, 기판에 인가되는 dc-bias 전압을 일정하게 유지하였다. 식각 반응 가스에 의한 식각 특성의 변화를 관찰하기 위하여, Cl_2/O_2 가스의 혼합비를 변화시켰으며, 이때 전체 유량은 80sccm으로 고정하였다. Cr의 식각 속도를 측정하기 위해 우선 감광막을 패터닝하고, 이 감광막 패턴을 이용하여 Cl_2/O_2 가스 플라즈마로 Cr박막을 식각하였다. 감광막 strip용액을 이용하여 감광막을 제거하여, 식각된 부분과 남은 부분의 단차를 이용하여 식각 속도를 측정하였다. 식각 단차는 Tencor Instruments사의 Alpha-step 300 profiler를 이용하였으며, 식각 단면은 SEM을 이용하여 분석하였다.

Cr박막 표면의 조성 변화를 분석하기 위하여, VG Scientific ESCALAB 200R XPS를 이용하였으며, 260watts의 Al K α (1486.6eV)의 소스를 사용하였다. 표면 조성의 정량화 및 chemical binding energy를 조사하기 위하여 narrow scan이 수행되었으며, 이때 pass energy는 20eV였다. 플라즈마내에서 etch product 및 etchant와 같은 chemical species의 특성을 조사하기 위하여, 식각 공정 중 optical emission spectroscopy(OES)분석이 수행되었다. 이때 사용된 OES는 Princeton Applied Research사의 EG&G 1460 optical multichannel analyzer(OMA)이며, 1024 channel linear diode array를 이용하여, 350nm에서 875nm사이의 파장에 대해 스펙트럼이 추출되었다. Stray light 및 검출기 잡음에 기인한 background spectrum을 제거한 후, 특정 원자나 분자에 의해 방

출되는 피크 크기를 추출하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Cl_2/O_2 가스의 혼합비에 따른 Cr박막의 식각 속도 변화를 나타내었다. Cl_2 가스만을 이용하여

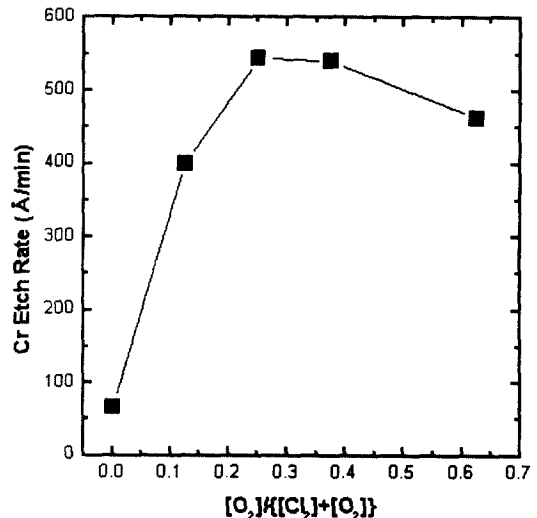


그림 1. 식각 가스 변화에 따른 Cr의 식각 속도 변화.

Fig. 1. Etch rates of Cr films with various gas-mixing ratios.

식각하는 경우, 식각 속도는 약 60Å/min이었으며, 이는 다른 Cl_2/O_2 혼합 가스에 비하여 크게 낮음을 알 수 있다. 그림을 살펴보면, O_2 가 10% 첨가되는 경우, 식각 속도는 급격하게 증가됨을 보이며, 속도는 산소가 20%-40% 범위에서, 최대 식각 속도를 보이며, 40%이상에서는 식각 속도는 감소함을 알 수 있다. 염소 혹은 산소와 결합하여 이루어진 Cr 화합물 중에서, $CrCl_3$ 및 Cr_2O_3 가 화학적으로 안정하며, 이들의 녹는 점(melting point)은 각각 1152°C 및 2435°C로 알려져 있다[8,9]. 그러므로 Cl_2 나 O_2 만을 이용하여 Cr을 식각하는 경우, 이들과 결합하여 형성되는 $CrCl_3$ 및 Cr_2O_3 의 증기압(vapor pressure)이 낮아 식각 속도는 낮을 것으로 예상되며, 이는 그림에 나타난 결과를 잘 설명해 준다. 이에 반하여 Cl_2/O_2 혼합 가스를 사용하는 경우, 식각 속도는 크게 향상됨을 보인다. 본 실험에서 dc-bias를 일정하게 유지하였기 때문에 이온에 의한 physical bombardment효과는 동일하다. 따라서 그림 1은 Cl_2/O_2 혼합 가스 플라즈마와 Cr이 반응하여, volatile

etch byproduct를 형성하고, 그 결과 Cr의 식각 속도가 크게 향상됨을 의미한다. 이러한 Cr과 Cl₂/O₂플라즈마에 의한 식각 표면 반응을 조사하기 위하여 XPS분석을 수행하였다. 그 결과 시료의 표면에서는 탄소(C), 염소(Cl), 크롬(Cr) 및 산소(O)가 검출되었다. 이들 원소의 결합상태를 조사하기 위하여, narrow scan analysis를 수행하였다.

그림 2는 식각 가스 변화에 따른 Cr 2p스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, Cl₂/O₂

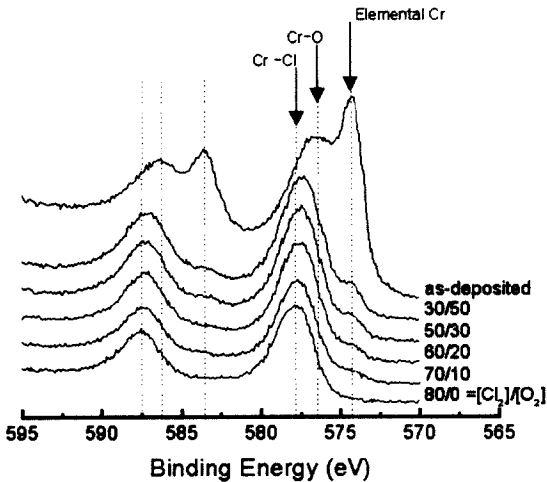


그림 2. 식각 가스 변화에 따른 Cr 2p 스펙트럼의 변화.

Fig. 2. Cr 2p spectra with various gas-mixing ratios.

플라즈마에 노출되지 않은 시료에서 4개의 피크가 검출됨을 알 수 있다. Elemental Cr의 경우, Cr 2p_{3/2}는 574.4eV에서, Cr 2p_{1/2}는 583.6eV에서 검출되고, Cr₂O₃의 경우, 576.9eV에서, Cr 2p_{1/2}는 586.7eV에서 검출되는 것으로 알려져 있다[10]. 따라서 플라즈마에 노출되지 않은 시료에서 검출되는 Cr은 elemental Cr 및 Cr₂O₃화합물을 형성하고 있음을 알 수 있다. 이는 증착된 Cr박막의 표면이 공기 중에 노출되어, 공기중의 산소와 결합하여 산화되었음을 보여준다. CrCl₃에서 검출되는 Cr 2p_{3/2}는 577.4eV에서 검출되는 것으로 알려져 있으며, 이는 Cl₂가스 플라즈마에 의해 식각된 시료의 표면에서 검출되는 Cr의 결합 에너지와 거의 일치함을 알 수 있다. 한편 O₂가스의 혼합비가 증가함에 따라, Cr-Cl결합에서 검출된 피크가 낮은 결합 에너지쪽으로 이동하여, Cr-O결합 에너지에 가까워짐을 보인다. 이는 O₂가스의 혼합비가 증가함에 따라, Cr원자가 Cl뿐만이 아

니라, O와 결합함을 보여준다. 산소의 혼합량이 증가함에 따라, 574.4eV에 형성된 피크의 변화를 살펴보면, 피크의 크기가 점점 증가함을 알 수 있다. 한편 574.4eV에서 검출되는 피크는 elemental Cr 2p_{3/2}에 해당하며, 이는 시료 표면의 반응에 의해 시료 표면에 형성되는 잔류막 아래에 위치하는, Cr에 기인한다. 본 실험에서는 동일한 take-off angle에 의해 XPS분석이 수행되었기 때문에, 574.4eV에서 형성되는 피크가 점점 증가한다는 것은 잔류막의 두께가 점점 얇아짐을 의미한다. 이는 플라즈마에서 형성되는 라디칼과 Cr에 의해 형성된 화합물이 더 쉽게 시료의 표면에서 이탈되어 나타난 결과로 해석된다.

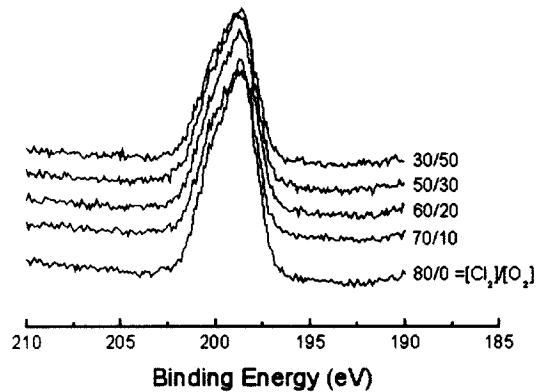


그림 3. Cl₂/O₂ 가스 혼합비에 따른 Cl 2p 스펙트럼의 변화.

Fig. 3. Cl 2p spectra with various Cl₂/O₂-gas ratios.

그림 3은 Cl₂/O₂혼합비에 따른 Cl 2p의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, Cl 2p스펙트럼은 198.5eV 및 201.1eV의 결합 에너지를 갖는 두 개의 피크로 분리될 수 있음을 알 수 있다. 이들 결합 에너지는 Cl-metal결합에 해당하며, 이는 Cl이 Cr과 결합하고 있음을 보여준다. Cl₂/O₂혼합비가 변함에도 불구하고, 피크의 위치 변화를 발견할 수 없다. 그러나 두 결합 에너지에서 발견되는 피크의 상대적인 크기는 약간 변화되었음을 알 수 있다. O₂의 혼합량이 증가함에 따라, 201.1eV 근처에서 형성되는 피크의 크기가 상대적으로 증가함을 보여준다. 두 결합 에너지에서 검출되는 피크 크기의 비는 Cl₂/O₂가 80/0sccm인 경우에는 0.72, 30/50sccm인 경우에는 0.85이다. 일반적으로 전형적인 Cl 2p_{3/2}와 Cl 2p_{1/2}의 피크 크기의 비는 약 0.5정도이다. 따라서 Cl 2p_{1/2}의 피크가 상대적으로 증가한다는 사실은 Cl 2p_{1/2} 피크

의 결합 에너지 근처에 또 다른 결합에 의한 피크가 존재함을 의미한다. 한편 metal chlorate(metal-ClxOy)에서 검출되는 Cl 2p의 결합 에너지는 metal chloride(metal-Clx)에서 검출되는 피크의 결합 에너지 보다 높다. 그러므로 O₂의 혼합량이 증가함에 따라, 201.1eV 근처에서 형성되는 피크의 상대적인 증가는 metal-ClxOy형성에 기인함을 알 수 있다.

그림 4는 Cl₂/O₂혼합비에 따른 O 1s의 스펙트럼 변화를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, Cl 2p스펙트럼에 비하여 뚜렷한 피크의 이동을 확인할 수 있다. O 1s의 피크 위치가 O₂가 첨가됨에 따라 낮은 결합에너지 쪽으로 이동함을 보여준다. 일반적으로 metal chlorate에 기인한 O 1s피크는 533eV에서 검출되는 것으로 알려져 있으며, 이는 metal oxide의 결합 에너지 531eV보다 높다. 그 결과 Cl₂가스의 혼

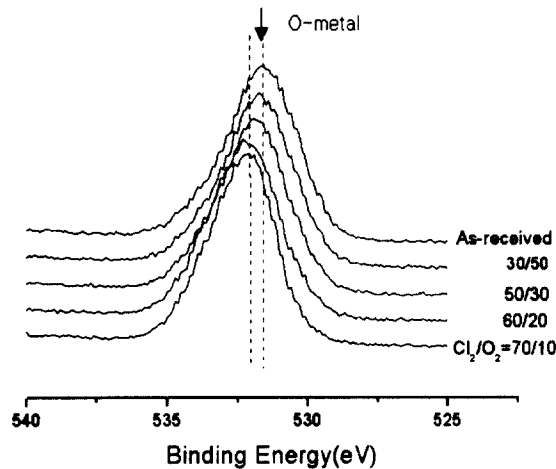


그림 4. Cl₂/O₂ 가스 혼합비에 따른 O 1s 스펙트럼의 변화

Fig. 4. O 1s spectra with various Cl₂/O₂-gas ratios.

합비가 증가함에 따라, O 1s피크는 더 높은 결합 에너지에서 검출되는 것으로 해석된다.

그림 5는 Cl₂/O₂가스를 사용하여 Cr을 식각하는 경우, optical emission spectra를 나타낸 것이다. 700nm에서 900nm사이에서 검출되는 피크는 Cl과 O에 기인한다[8-11]. 이들 피크 중에서 777.4 및 887nm에서 검출되는 피크는 산소 원자의 여기 상태(O*)에 기인하며, 이들은 3p⁵P-3s³S 및 3p³P-3s³S의 천이에 해당한다[11-14]. 낮은 식각 압력의 경우에는 Cl₂에 의한 피크가 400nm에서 600nm사이에서 검출된다. 그러나 Cl₂가스를 사용하여 추출한 스펙트럼

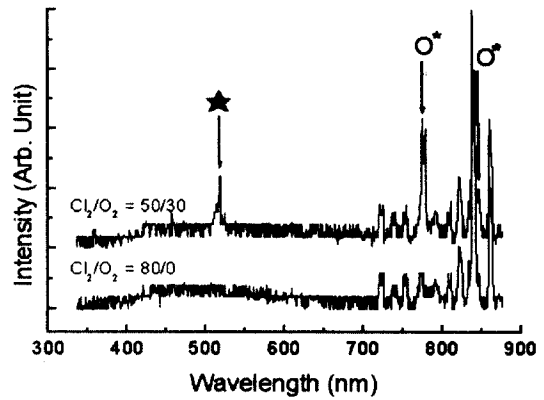


그림 5. Cl₂/O₂ 가스 조성에 따른 Cr 식각시 추출된 optical emission 스펙트럼.

Fig. 5. Optical emission spectra during etching Cr films with various Cl₂/O₂-gas ratios.

을 살펴보면, 본 실험의 압력에서는 400nm에서 600nm파장 범위 내에서 어떠한 피크도 검출되지 않았으며, 그림에 나타난 바와 같이 여기된 Cl radical에 의한 emission line이 700nm이상에서 검출되었다[14]. 한편 그림에 나타난 바와 같이 Cl₂/O₂혼합 가스를 사용하여, Cr박막을 식각하는 동안 517nm 파장에서 특성 피크가 관찰되었다. 이 피크는 Cl₂혹은 O₂가스에 의한 Cr박막의 식각 중에는 관찰되지 않았다. 또한 SiO₂막을 Cl₂/O₂가스 플라즈마로 식각하는 경우에도 관찰되지 않았다. 한편 Cr의 식각이 완료된 후, Cr 하부막 층인 산화막이 드러남에 따라, 이 피크가 사라짐을 확인하였다. 따라서 517nm의 파장에서 발견된 피크는 Cr식각과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있으며, 이 피크가 Cr식각의 etch monitor로서 사용될 수 있음을 말해준다[15].

그림 6은 Cl₂/O₂가스 혼합비에 따른 517nm의 파장에서 검출되는 피크의 크기를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, 산소의 혼합비가 증가함에 따라 피크의 크기가 증가하다가, 산소의 혼합비가 약 40% 이상에서는 다시 감소함을 보인다. 이러한 변화를 산소 혼합비 변화에 따른 Cr식각 속도 변화와 비교하여 보면, 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 즉 Cl₂/O₂ 혼합비가 변화됨에 따라, Cr의 식각 속도가 변화되고, 그 결과 517nm의 특성 피크의 크기가 변화되는 것으로 해석된다.

Cl₂혹은 O₂가스만을 이용하여, Cr박막을 식각하는 경우 Cr의 표면에서는 CrCl₃혹은 Cr₂O₃화합물이 형성되고, 이들의 증기압은 낮다. 그 결과 그림 1에서

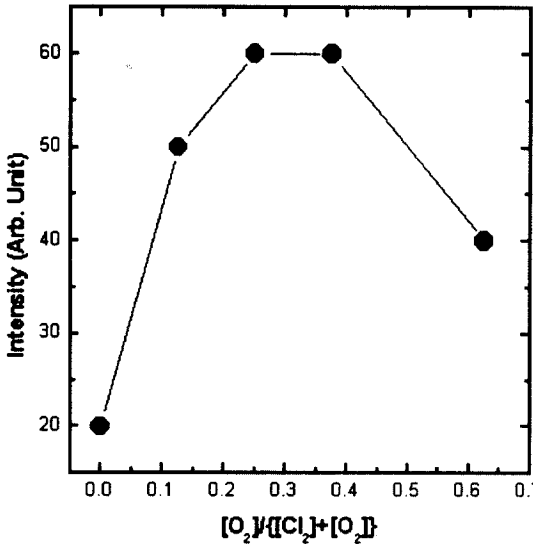


그림 6. 식각 가스 혼합비에 따른 517nm 특성 emission line의 피크 세기 변화.

Fig. 6. Peak intensities of 517nm characteristic emission line with various gas-mixing ratios.

나타난 바와 같은 낮은 식각 속도를 보인다. Cl₂/O₂ 혼합 가스에 의해 Cr이 식각되는 경우, CrCl_xO_y와 같은 etch product(예를 들면 CrCl₂O₂)를 예상할 수 있다. Chromyl chloride(CrCl₂O₂)의 증기압(= 1mmHg @ -18.4℃)은 매우 높고, 끓는 점(boiling point= 117℃) 역시 낮다[5,6]. 이는 chromyl chloride가 시료의 표면에서 쉽게 이탈됨을 의미하며, 그 결과 Cr의 식각 속도는 증가되는 것임을 알 수 있다. 한편 특성 emission line의 파장이 517nm인데, 이는 일반적으로 Cr³⁺ 이온에서 방출되는 것으로 알려져 있다 [16,17]. 앞에서 언급한 바와 같이, CrCl_xO_y etch product중에서 chromyl chloride(CrCl₂O₂)가 가장 휘발성이 크다. 그러나 chromyl chloride의 oxidation state는 +6이며, Cr⁶⁺은 가시 광선 영역의 빛을 거의 방출하지 않는 것으로 알려져 있다. 한편 Cl₂/O₂혼합 가스에 의해 Cr을 식각하는 경우, oxidation state +3을 갖는 화합물 중에는 CrCl₃, Cr₂O₃, CrClO등이 있다. 그러나 CrCl₃ 및 Cr₂O₃는 매우 높은 녹는 점 및 매우 낮은 증기압을 갖고 있어, 쉽게 시료의 표면에서 이탈되지 않는다. 그러므로 517nm에서 검출되는 특성 emission line은 oxidation state +3를 가진 etch product 중에서 CrClO화합물에 의해 방출되는 것으로 판단된다. 이는 Cl₂/O₂가스 플라즈마에 의해

Cr을 식각하는 경우, Cr은 CrClO 및 CrCl₂O₂형태로 식각됨을 말해준다.

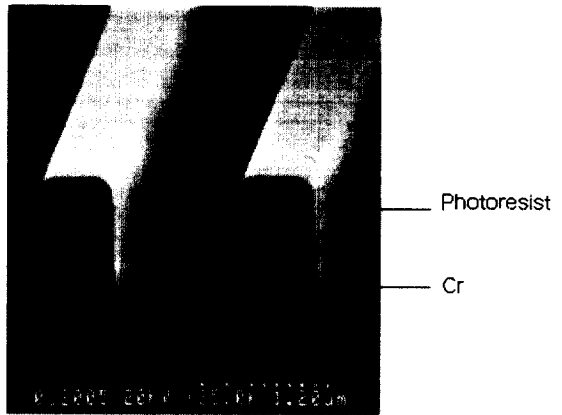


그림 7. Cl₂/O₂=50/30sccm인 조건에서 50% 과식각된 Cr의 SEM image.

Fig. 7. SEM image of 50%-overetched Cr pattern at Cl₂/O₂=50/30sccm.

그림 7은 Cr의 식각 단면을 SEM으로 관찰한 것이다. 이때 Cr박막은 감광막을 이용하여 패터닝하였고, Cl₂/O₂의 유량은 50/30sccm이었으며, Cr박막 두께의 50%가 과식각되었다. 그림을 살펴보면 식각 단면이 수직하고, 식각된 산화막의 표면이 매우 깨끗함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 ECR plasma etcher를 이용하여 Cr 박막의 식각 특성을 추출하였다. 이때 Cl₂/O₂가스를 이용하여, 가스 혼합비에 따른 식각 특성의 변화를 고찰하였다. Cr의 식각 속도는 Cl₂가스를 사용하는 경우 매우 느리게 식각되었으나, O₂가스를 첨가함에 따라 식각 속도는 급격히 증가하고, O₂가스가 40% 이상으로 첨가됨에 따라 식각 속도는 다시 감소함을 확인하였다. XPS분석 결과, Cl₂/O₂가스를 사용하여 식각하는 경우, Cr의 표면에서 chromium oxychloride (CrCl_xO_y)가 형성됨을 확인하였다.

한편 OES분석 결과, Cl₂/O₂ 혼합가스 플라즈마를 이용하는 경우, 517nm에서 새로운 특성 피크가 형성됨을 확인하였다. 이 특성 피크는 oxidation state +3을 갖는 크롬 화합물에서 방출되는 피크로 판단되

며, 이 피크의 세기 변화는 Cr의 식각 속도 변화와 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 이러한 결과로부터, Cl_2/O_2 가스를 이용하여 Cr을 식각하는 경우, oxidation state +3을 갖는 etch product로 $CrClO$ 를 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국과학재단에서 시행한 목적기초연구과제(과제번호 : 1999-2-302-006-3)에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] S. E. Huq, M. Huang, P. R. Wilshaw, and P. D. Prewett, "Microfabrication and Characterization of Gridded Polycrystalline Silicon Field Emitter Devices", in the *Tenth International Vacuum Microelectronics Conference*, p. 412, 1997.

[2] J. W. Tsai, C. Y. Huang, Y. H. Tai, H. C. Cheng, F. C. Su, F. C. Luo, and H. C. Tuan, "Reducing threshold voltage shifts in amorphous silicon thin film transistors by hydrogenating the gate nitride prior to amorphous silicon deposition", *Appl. Phys. Lett.*, **71**, p. 1237, 1997.

[3] C. S. Chiang, C. Y. Chen, J. Kanicki, and K. Takechi, "Investigation of intrinsic channel characteristics of hydrogenated amorphous silicon thin-film transistors by gated-four-probe structure", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, p. 2874, 1998.

[4] Kwang-Ho Kwon, Seung-Youl Kang, Sang-Ho Park, Hee-Kyung Sung, Dong-Keun Kim, and Jong-Ha Moon, "Additive oxygen effects in Cl_2 plasma etching of chrome films", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 18, p. 1197, 1999.

[5] 김남훈, 권광호, 김창일, 장의구, "자장 강화 반응성 이온 건식 식각 장비를 이용한 몰리브덴 박막의 식각 특성 연구", 전기전자재료학회논문지, 13권 1호, p. 6, 2000.

[6] 안태현, 서용진, 김창일, 장의구, "고밀도 플라즈마에 의한 PZT 박막의 식각 특성 연구", 전기전

자재료학회논문지, 13권 3호, p. 188, 2000.

- [7] 서정우, 이원재, 유병곤, 장의구, 김창일, "Ar/ CHF_3 플라즈마를 이용한 SBT 박막에 대한 식각 메카니즘 연구", 전기전자재료학회논문지, 13권 3호, p. 183, 2000.
- [8] M. Windholz (Ed.), *The Merck Index*, published by Merck & Co., Inc., 1976.
- [9] D. R. Lide (Ed.), *Handbook of chemistry and physics*, 71st edition, CRC press, 1990.
- [10] J. F. Moulder, W. F. Stickle, P. E. Sobol, and K. D. Bomben, *Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy*, Perkin-Elmer Corporation, 1992.
- [11] S. Kimura, E. Murakami, K. Miyake, T. Warabisako, H. Sunami, and T. Tokuyama, "LOW TEMPERATURE OXIDATION OF SILICON IN A MICROWAVE-DISCHARGED OXYGEN PLASMA", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 132, p. 1460, 1985.
- [12] T. T. Chau and K. C. Kao, "Optical emissionspectra of microwave oxygen plasmas and fabrication of SiO_2 films", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 14, p. 527, 1996.
- [13] E. J. H. Collart, J. A. G. Baggerman, and R. J. Visser, "Excitation mechanisms of oxygen atoms in a low pressure O_2 radio-frequency plasma", *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, p. 5278, 1991.
- [14] V. M. Donnelly, "A simple optical emission method for measuring percent dissociations of feed gases in plasmas: Application to Cl_2 in a high-density helical resonator plasma", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 14, p. 1076, 1996.
- [15] S. J. Pearton, T. A. Keel, A. Katz, and F. Ren, "Optical Emission Spectroscopy of ECR Discharges for III-V Semiconductor Processing", *Semicon. Sci. Technol.*, Vol. 8, p. 1889, 1993.
- [16] J. A. Duffy, *Bonding, Energy Levels and Bands in Inorganic Solids*, Longman Scientific & Technical, 1990.
- [17] G. Blasse and B. C. Grabmaier, *Luminescent Materials*, Springer-Verlag, 1994.