

고밀도 평판형 유도결합 BCl_3/SF_6 플라즈마를 이용한 GaAs/AlGaAs와 InGaP 반도체의 선택적 식각에 관한 연구

유승열 · 류현우 · 임완태 · 이제원[†] · 조관식 · 전민현 · 송한정 · 이봉주* ·
고종수** · 고정삼** · S. J. Pearton***

인제대학교 나노공학부/나노기술 응용연구소
*한국 기초과학 지원연구원 핵융합 연구개발 사업단
**부산대학교 기계공학부

***Department of Materials Sci. and Eng., University of Florida

Study of Selective Etching of GaAs over AlGaAs and InGaP Semiconductors in High Density Planar Inductively Coupled BCl_3/SF_6 Plasmas

Seungryul Yoo, Hyunwoo Ryu, Wantae Lim, Jewon Lee[†], Guan Sik Cho, Minhyon Jeon, Hanjung Song, Bongju Lee*, Jong Soo Ko**, Jeung Sang Go** and S. J. Pearton***

School of Nano Eng./ Institute of Nano-Technology Applications, Inje Univ. Gimhae,
Gyungnam, 621-749, Korea (ROK)

*National Fusion R&D Center, Korea Basic Science Institute(KBSI)

**Department of Mechanical Eng., Pusan National Univ.

***Department of Materials Sci. and Eng., University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA

(2005년 1월 25일 받음, 2005년 3월 3일 최종수정본 받음)

Abstract We investigated selective dry etching of GaAs over AlGaAs and InGaP in high density planar inductively coupled BCl_3/SF_6 plasmas. The process parameters were ICP source power (0-500 W), RF chuck power (0-30 W) and gas composition (60-100% BCl_3 in BCl_3/SF_6). The process results were characterized in terms of etch rate, selectivities of GaAs over AlGaAs and InGaP, surface morphology, surface roughness and residues after etching. BCl_3/SF_6 selective etching of GaAs showed quite good results in this study. Selectivities of GaAs (GaAs:AlGaAs ~ 36:1, GaAs:InGaP ~ 45:1) were superior at 18 $\text{BCl}_3/2\text{SF}_6$, 20 W RF chuck power, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr. Addition of (5-15%) SF_6 to BCl_3 produced relatively high selectivities of GaAs over AlGaAs and InGaP during etching due to decrease of etch rates of AlGaAs and InGaP (boiling points of etch products: $\text{AlF}_3 \sim 1300^\circ\text{C}$, $\text{InF}_3 > 1200^\circ\text{C}$ at atmosphere) at the condition. SEM and AFM data showed slightly sloped sidewall and somewhat rough surface (RMS ~ 9 nm). XPS study on the surface of processed GaAs proved a very clean surface after dry etching. It shows that planar inductively coupled BCl_3/SF_6 plasmas could be a good candidate for selective dry etching of GaAs over AlGaAs and InGaP.

Key words ICP, GaAs, AlGaAs, InGaP, selective etching.

1. 서 론

현재 III-V 화합물 반도체 재료는 각종 전자소자 및 광소자에 널리 응용되고 있다.¹⁻⁸⁾ 특히 음성, 영상 등 다양한 신호를 디지털 방식으로 고정·휴대·차량용 수신기에 제공함으로써 CD나 DVD 급의 고품질, 고음질 방송을 제공하는 서비스인 디지털 멀티미디어 방송(Digital Multimedia Broadcasting, DMB)이 등장하게 되어 그 중

요성이 더욱 높아지고 있다. 높은 선택적 식각률을 가지는 GaAs/AlGaAs와 GaAs/InGaP 구조의 반도체들은 GaAs 기반의 소자 제조공정에 많이 이용되고 있다. 특히 GaAs/AlGaAs/GaAs 구조를 가진 고속전자 이동도 트랜지스터(High Electron Mobility Transistors, HEMTs)의 게이트 리세스(recess) 식각이나 이중접합 양극성 트랜지스터(Heterojunction Bipolar Transistors, HBTs)의 에미터 메사(mesa) 식각공정은 GaAs 기반 반도체 소자 및 시스템 제조공정시 핵심기술의 대표적인 예이다.⁹⁻¹²⁾ 반도체 제조공정에 있어서 식각공정은 습식이나 건식 식

[†]E-Mail : jwlee@inje.ac.kr

각공정을 통해 지금까지 많은 연구가 되어왔다.¹³⁾ 하지만, 평판형 유도결합 플라즈마 시스템을 이용한 GaAs/AlGaAs와 GaAs/InGaP 구조의 건식식각 공정에 관한 연구결과는 많이 알려지지 않았다. 소자 제작시 높은 선택도도 중요하지만 소자의 전기적인 손상(damage) 또한 중요한 요소로 작용한다. 이번 실험에서는 GaAs의 선택도를 높이면서 소자의 전기적인 손상을 가급적 낮출 수 있는 상황을 설정하여 실험 하는데 그 초점을 맞추었다. 따라서 본 논문에서는 장비시스템 구조가 비교적 간단하면서 이온밀도와 이온에너지를 독립적으로 조절이 가능하며, 미세패터닝 기술이 용이한 평판형 유도결합 플라즈마 시스템을 이용하여 ICP 소스파워, RF 척파워와 BCl₃/SF₆ 가스혼합비에 따른 GaAs/AlGaAs 및 GaAs/InGaP 구조 반도체의 선택적 건식식각 공정 후 그 결과에 대해 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 AlGaAs와 InGaP 샘플은 각각 금속유기 화학기상증착법 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)과 금속유기 분자선 증착법(Metal Organic Molecular Beam Epitaxy, MOMBE)을 이용하여 GaAs 기판위에 격자정합 시켜 1 μm 두께로 에피성장하였다. 이때 AlGaAs는 Al을 20% 포함하고 있는 Al_{0.2}Ga_{0.8}As이고 InGaP는 In을 50% 포함하는 In_{0.5}Ga_{0.5}P이다. 각 샘플들은 1 μm 두께의 감광액을 도포하여 패턴한 후, 어노다이징된 4인치 캐리어위에 올려놓고 실험하였다. 또, 공정이 끝난 후 표면을 연구하기 위해 패턴되지 않은 AlGaAs, InGaP 샘플도 함께 넣어서 실험하였다. 챔버 베이스 압력은 cold cathode 게이지, 공정압력은 baratron 게이지로 측정하였고, 샘플 기판의 공정온도는 열교환기를 이용하여 항상 실온(25°C)을 유지하였다. 또한 공정중 BCl₃ 가스의 응축을 막기 위해 가스라인은 열선을 사용하여 40°C 이상을 유지하였다. 공정조건은 평판형 ICP 소스파워, RF 척파워, BCl₃/SF₆의 혼합비이고 공정 후 적절한 식각깊이를 얻기 위하여 전체 공정시간은 3분으로 하였고, 공정압력은 7.5 mTorr로 고정하였다. 또, 공정중 광학발광 분광기(OES)를 사용하여 플라즈마를 in-situ로 분석하였다. 공정후 표면두께측정기(alpha-step 200, Tencor), FE-SEM(S-4300 SE, Hitachi), AFM(XE-100, PSIA), XPS를 사용하여 식각률과 식각후 특성분석을 하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 RF 척파워를 20 W, ICP 소스파워를 300 W, 공정압력을 7.5 mTorr로 고정시킨 상태에서 BCl₃와 SF₆

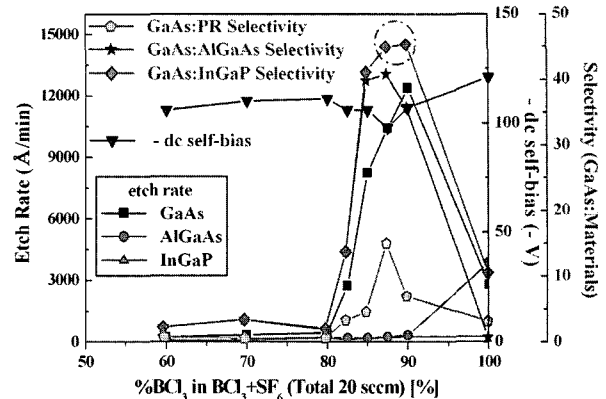


Fig. 1. Etch rates of GaAs, AlGaAs and InGaP, and selectivities of GaAs over AlGaAs and InGaP as a function of BCl₃ percentage in BCl₃/SF₆ discharges (20 W RF chuck power, 300 W ICP source power, 7.5 mTorr).

혼합비에 따른 GaAs, AlGaAs, InGaP의 식각률과 AlGaAs와 InGaP에 대한 GaAs의 선택도를 나타내고 있다. 5-15%의 SF₆가 혼합된 BCl₃/SF₆ 플라즈마 조건에서 GaAs의 선택도가 높은 결과를 나타내었다(GaAs:AlGaAs~최대 40, GaAs:InGaP~최대 45). BCl₃에 5-15% 이하의 SF₆ 가스의 혼합은 GaAs 반도체의 경우에는 이온보조 효과(ion assisted effect)로 식각률을 증가시켰지만 AlGaAs와 InGaP 반도체의 경우에는 공정 중 휘발성이 낮은 식각부산물(b.p: AlF₃ ~ 1300°C, InF₃ > 1200°C)을 형성함으로써 식각(AlGaAs ~ 350 Å/min, InGaP ~ 270 Å/min)이 거의 되지 않았다. 위와 같은 조건에서는 낮은 RF 파워(20 W)로 인해 이온에너지가 낮기 때문에 화학적 식각(chemical etching)이 지배적이다. 15% 이상의 SF₆ 플라즈마에서는 GaAs, AlGaAs, InGaP 모두 식각이 거의 되지 않았다. 특히 18BCl₃/2SF₆ 플라즈마 조건에서는 화학적으로 표면도 깨끗하였으며 GaAs에 대한 식각 선택비(GaAs : AlGaAs ~ 36, GaAs : InGaP ~ 45, chemically clean surface)도 가장 좋았다.

18BCl₃/2SF₆, ICP 소스파워를 300 W, 공정압력을 7.5 mTorr로 고정시킨 상태에서 RF 척파워에 따른 GaAs, AlGaAs, InGaP의 식각률, GaAs의 선택도, 자기 유도된-dc 바이어스를 Fig. 2에 나타내었다. RF 척파워가 0-20 W로 증가함에 따라 반도체 샘플들의 식각률과 선택도가 증가하였다. 선택도의 증가는 AlGaAs, InGaP 반도체의 식각률 증가보다 GaAs의 식각률 증가가 더 높았기 때문이다. 하지만 20-30 W의 RF 척파워에서는 GaAs 대 AlGaAs의 선택도는 거의 변화가 없었고, InGaP의 경우는 오히려 감소하였다. RF 척파워가 증가함에 따라 -dc 바이어스가 증가하여 챔버내에 이온에너지를 증가시켰다. 따라서 증가하는 이온에너지 때문에 물리적인 식각이 서서히 증가하여 샘플들의 식각률이 증가한 것으로 사

료된다. 이 결과로부터 이온에 의한 소자의 손상(damage) 또한 증가한다는 것을 추론할 수 있었다. Fig. 3은 ICP 소스파워에 따른 샘플들의 식각률, GaAs의 선택도, 자기 유도된 -dc 바이어스를 나타내고 있다. 200 W 이하의 ICP 소스파워에서는 모든 샘플들이 식각되지 않았다. 18BCl₃/2SF₆, 20 W RF 척파워, 7.5 mTorr의 조건에서는 최소 200 W 이상의 ICP 소스파워가 인가되어야 샘플들이 식각되기 시작하였고, ICP 소스파워가 300 W 이상에서는 GaAs의 식각률이 매우 높았다(Fig. 3). 특히 500 W의 ICP 소스파워에서는 GaAs 대 InGaP의 선택도가 60으로 가장 높았다. 본 연구에 사용된 AlGaAs 샘플은 Al을 20% 포함하는 Al_{0.2}Ga_{0.8}As이고 InGaP 샘플은 In을 50%로 포함하는 In_{0.5}Ga_{0.5}P으로 조성비가 서로 다르다는 것을 밝힌다. 일반적으로 Al과 In을 포함하는 화합물 반도체가 F 기반의 공정가스와 만나면 휘발성이 낮은 식각 부산물(AlF₃, InF₃ 등)을 형성하여 식각률이 매우 낮다고 알려져 있다. 따라서, AlGaAs와 InGaP 반도체들

에서 Al과 In의 함유량에 따라 식각률이 달라질 수 있다. 그 결과 InGaP의 식각률이 AlGaAs의 식각률보다 전반적으로 낮아서 InGaP에 대한 GaAs의 선택도가 AlGaAs에 대한 GaAs의 선택도보다 더 높은 결과를 보여주었다고 판단된다.

Fig. 4와 Fig. 5는 RF 척파워와 ICP 소스파워에 따른 OES peak 세기를 나타내고 있다. 챔버내의 이온밀도를 정성적으로 확인하기 위해 OES를 이용하여 발광하는 빛의 세기를 검출하였다. RF 척파워가 증가하면 -dc 바이어스가 증가하여 이온에너지는 증가하였지만 챔버내에 발광하는 빛의 세기는 거의 일정하여 이온밀도에는 거의 영향을 미치지 않았다는 걸 추측할 수 있었다(Fig. 2와 Fig. 4). ICP 소스파워가 증가하면 발광하는 빛의 세기는 점점 증가하여 챔버내의 이온밀도가 증가한 것으로 생각되어진다(Fig. 3과 Fig. 5). 반면, -dc 바이어스는 서서히 증가하다가 감소하여 ICP 소스파워는 이온에너지에 거

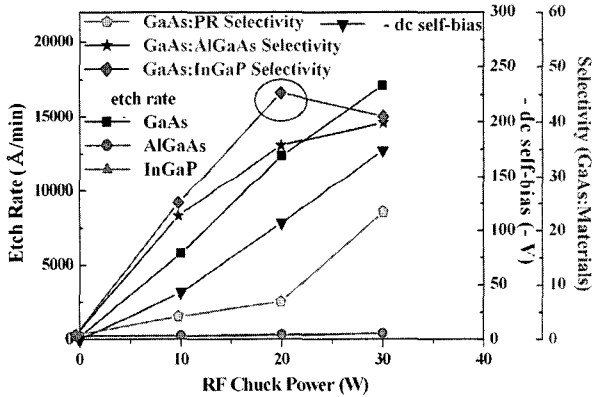


Fig. 2. Etch rates of GaAs, AlGaAs and InGaP, and selectivities of GaAs as a function of RF chuck power (18BCl₃/2SF₆, 300 W ICP source power, 7.5 mTorr).

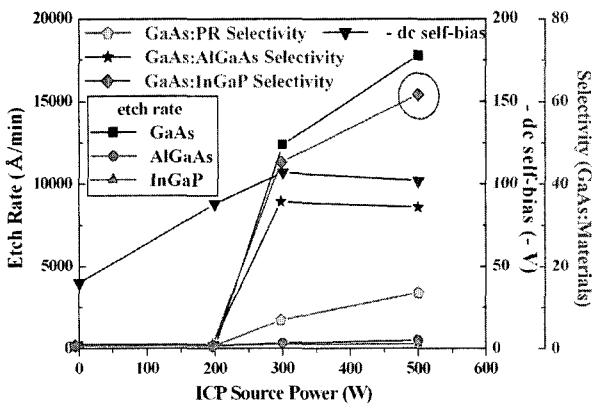


Fig. 3. Etch rates of GaAs, AlGaAs and InGaP, and selectivities of GaAs as a function of ICP source power (18BCl₃/2SF₆, 20 W RF chuck power, 7.5 mTorr)

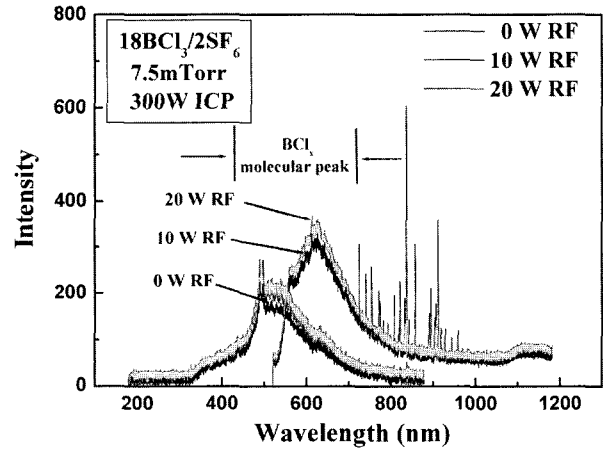


Fig. 4. OES peak intensities as functions of RF chuck power at 18BCl₃/2SF₆, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

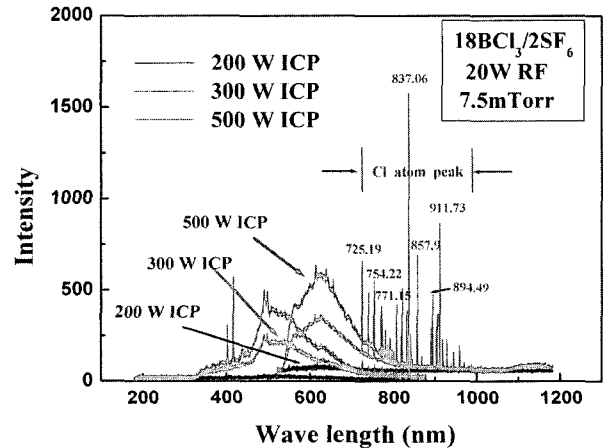


Fig. 5. OES peak intensities as functions of ICP source power at 18BCl₃/2SF₆, 20 W RF chuck power and 7.5 mTorr.

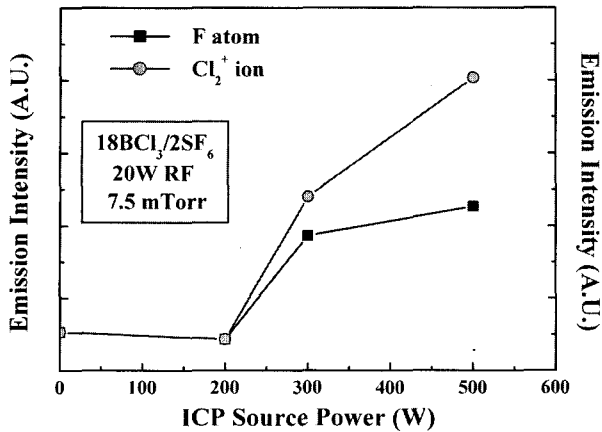


Fig. 6. OES peak intensities of F atom and Cl₂⁺ ion at 18BCl₃/2SF₆, 20 W RF chuck power, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

의 영향을 미치지 않았다. 따라서, RF 척과워는 이온에너지, ICP 소스파워는 이온밀도와 밀접한 관계가 있다는 종래의 결과를 Fig. 2-5로부터 알 수 있었다.

Fig. 6은 ICP 소스파워에 따른 F, Cl₂⁺의 peak 세기를

나타낸 그래프이다. ICP 소스파워가 0-200 W에서는 F(703.7 nm) 원자와 Cl₂⁺(430 nm) 이온 peak의 세기가 변화가 작았다. 하지만 300 W 이상의 ICP 소스파워에서는 발광하는 빛의 세기가 크게 증가하였다. 이 결과로부터 본 연구에 사용된 평판형 ICP 시스템은 최소 300 W 이상의 ICP 소스파워를 인가했을 때 비로소 유도결합 플라즈마가 발생하고, 또 F 원자와 Cl₂⁺ 이온들이 GaAs/AlGaAs와 GaAs/InGaP의 선택적 식각에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 18BCl₃/2SF₆, 20 W RF 척과워, 300 W ICP 소스파워, 7.5 mTorr의 공정압력에서 3분간 식각한 후 찍은 GaAs의 SEM 사진이다. BCl₃ 플라즈마만(20BCl₃, 20 W RF 척과워, 300 W ICP 소스파워, 7.5 mTorr)을 사용한 경우의 GaAs(총 식각깊이 8400 Å)는 SEM 사진과 AFM 데이터로부터 알 수 있듯이 평탄한 표면(RMS 표면거칠기: 1.6 nm)과 우수한 수직측벽도(vertical angle~85°)를 나타내었다(Fig. 8). 이는 GaAs 기반 반도체들의 비선택적(nonselective) 식각의 좋은 결과로 이전에 발표된 연구논문¹⁴⁾과 거의 일치하는 식각결과를 나타내었다. 하지만, 10% SF₆가 혼합된 18BCl₃/2SF₆ 플라즈마를 사

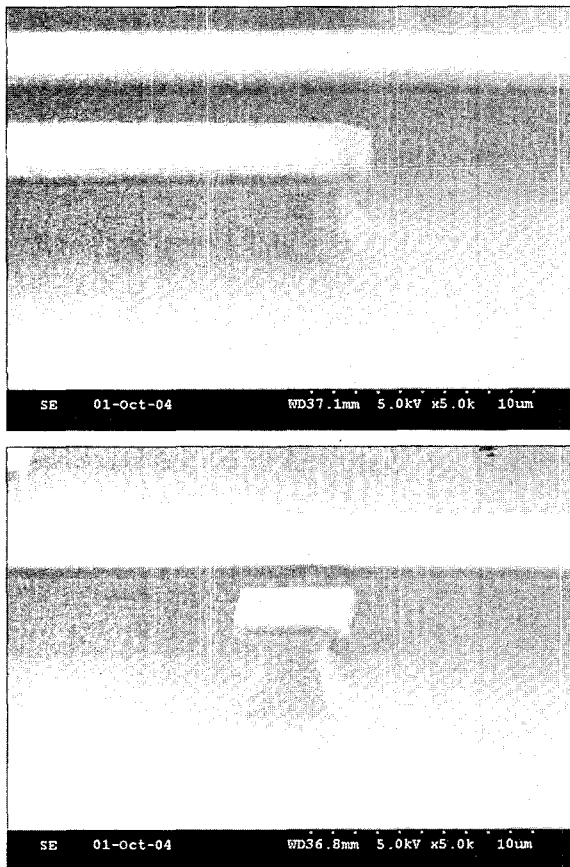


Fig. 7. SEM micrographs of etched GaAs at 18BCl₃/2SF₆, 20 W RF chuck power, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

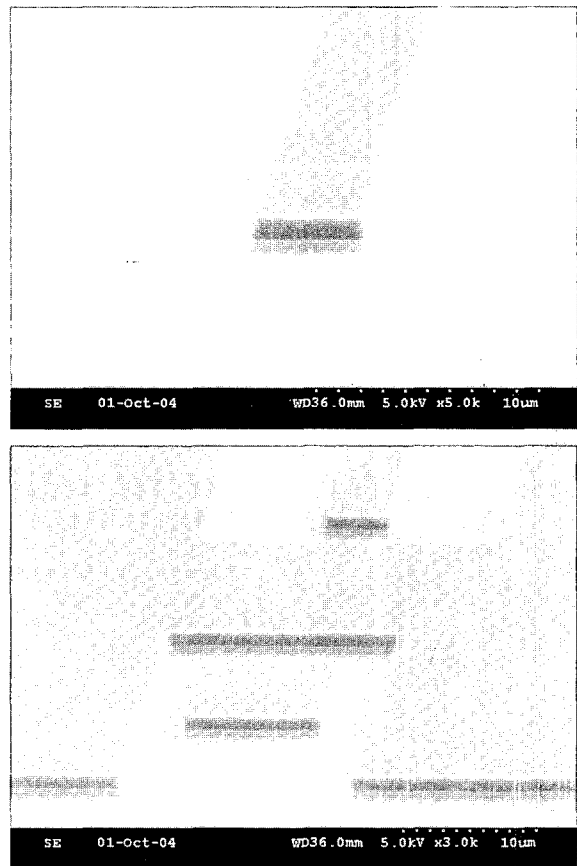


Fig. 8. SEM micrographs of etched GaAs at 20BCl₃, 20 W RF chuck power, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

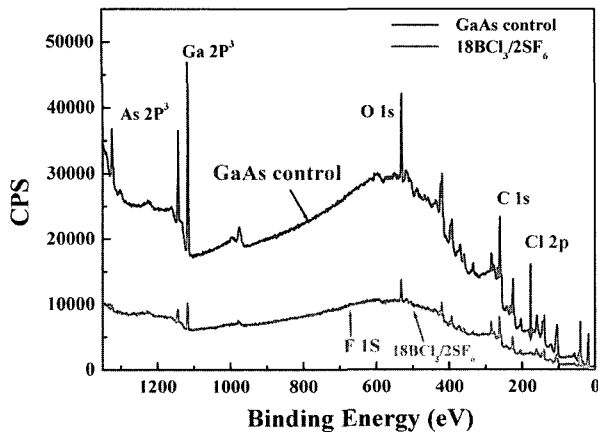


Fig. 9. XPS data of etched GaAs surface at 18BCl₃/2SF₆ plasma.

용한 경우의 GaAs 표면(총 식각깊이: 3.7 μm , RMS 표면 거칠기: 9.1 nm)은 다소 거칠었다. 이때 GaAs bare 샘플의 RMS 표면거칠기는 0.48 nm이었다. 위와 같은 조건에서 AlGaAs와 InGaP의 표면거칠기는 GaAs와 유사한 결과를 얻었다.

18BCl₃/2SF₆, 20 W RF 척파워, 300 W ICP 소스파워, 압력이 7.5 mTorr인 공정조건에서 GaAs를 3분간 식각한 후 표면에 남아 있는 잔여물을 알아보기 위해 XPS 데이터를 분석하였다(Fig. 9). 플라즈마에 3분간 노출되었음에도 불구하고 GaAs 표면은 Cl과 F과 같은 반응성 잔류성분이 거의 발견되지 않았다. 이 결과로부터 평판형 고밀도 유도결합 BCl₃/SF₆ 플라즈마를 사용하여 식각한 GaAs 표면은 화학적으로도 매우 깨끗함을 입증할 수 있었다.

4. 결 론

이번 실험에서는 고밀도 평판형 유도결합 BCl₃/SF₆ 플라즈마를 이용하여 RF 척파워, ICP 소스파워, BCl₃/SF₆ 혼합비에 따른 GaAs/AlGaAs와 GaAs/InGaP 반도체들을 식각한 후 특성분석을 하였다. 특히 18BCl₃/2SF₆ 플라즈마, 20 W RF 척파워, 300 W ICP 소스파워, 공정압력이 7.5 mTorr인 조건에서는 AlGaAs와 InGaP에 대한 GaAs의 선택도(GaAs: AlGaAs의 선택도 ~36, GaAs: InGaP의 선택도 ~45)가 우수하였다. F을 포함하는 휘발성이 낮은 식각부산물(AIF₃ ~1300°C, InF₃ >1200°C)의 영향으로 AlGaAs와 InGaP의 식각률이 매우 낮았기 때문에 AlGaAs와 InGaP에 대한 GaAs의 선택도가 증가한 것으로 사료된다. 하지만 이 조건에서 식각한 후의 GaAs

표면(총 식각깊이 ~3.6 μm , RMS 표면 거칠기 ~9.1 nm)은 다소 거칠었다. 18BCl₃/2SF₆ 플라즈마에서 RF 척파워와 ICP 소스파워가 증가하면 GaAs의 식각률이 증가하여 선택도도 증가하였다. 또, RF 척파워와 ICP 소스파워는 각각 이온에너지와 이온밀도에 영향을 미친다는 것을 발광하는 빛의 세기를 검출하는 OES를 통해 정성적으로 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업(2004년)의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. T. Yoshikawa, S. Kohmoto, S. Sugimoto and K. Askawa, Electronics and Communications in Japan, Part 2 (Electronics), **77**, 24 (1994).
2. A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga, Jap. J. Appl. Phys., **33**, 6737 (1994).
3. O. Wada, Microelectronics Reliability, **39**, 1839 (1999).
4. K. Mochizuki, T. Oka, K. Ouchi and T. Tanoue, Solid-State Electron., **43**, 1425 (1999).
5. Y. J. Sung, H. S. Kim, Y. H. Lee, J. W. Lee, S. H. Chae, Y. J. Park, G. Y. Yeom, Mater. Sci. Eng., **B 82**, 50 (2001).
6. F. Ren, F. F. Kopf, J. M. Kuo, J. R. Lothian, J. W. Lee, S. J. Pearton, R. J. Shul, C. Constantine and D. Johnson, Solid State Electronics, **42**, 749 (1998).
7. J. W. Lee, K. D. Mackenzie, D. Johnson, R. J. Shul, S. J. Pearton, C. R. Abernathy and F. Ren, Solid State Electronics, **42**, 1027 (1998).
8. Shawn S. H. Hsu, Burhan Bayraktaroglu and Dimitris Pavlidis, Solid-state Electronics, **43**, Issue 8, 1429 (August 1999).
9. R. J. Shul and S. J. Pearton, eds., Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques (Springer, Berlin, 2000).
10. Y. M. Hsin, M. Y. Li, C. W. Tu and P. M. Asbeck, Journal of Crystal Growth, **188**, 355 (1998).
11. J. W. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, F. Ren, R. J. Shul, C. Constantine and C. Barratt, Solid-State Electronics, **41**(6), 829 (1997).
12. D. C. Hays, H. Cho, K. B. Jung, Y. B. Hahn, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, F. Ren, W. S. Hobson, Appl. Surface Science, **147**, 255 (1999).
13. C. S. Lin, Y. K. Fang, S. F. Chen, C. Y. Lin, M. C. Hsieh, C. C. Wang, H. K. Huang, C. L. Wu and C. S. Chang, Materials Science in Semiconductor Processing, **7**, 59 (2004).
14. W. T. Lim, I. K. Baek, P. G. Jung, J. W. Lee, G. S. Cho and S. J. Pearton, Korean J. of Materials Research, **13**(4), 266 (2003).