

BCl₃, BCl₃/Ar 고밀도 유도결합 플라즈마를 이용한 GaAs 와 AlGaAs 반도체 소자의 건식식각

임완태, 백인규, 이제원, 조관식, 전민현
인제대학교 나노공학부/나노기술 응용연구소

Dry Etching of GaAs and AlGaAs Semiconductor Materials in High Density BCl₃, BCl₃/Ar Inductively Coupled Plasmas

Wantae Lim, Inkyoo Baek, Jewon Lee, Guan Sik Cho and Minhyun Jeon
In-je University Eobang-dong Gimhae-si Gyeongsangnam-do (Seoul 621-749 Korea)

Abstract

We investigated dry etching of GaAs and AlGaAs in a high density planar inductively coupled plasma system with BCl₃ and BCl₃/Ar gas chemistry. A detailed process study as a function of ICP source power, RIE chuck power and BCl₃/Ar mixing ratio was performed. At this time, chamber pressure was fixed at 7.5 mTorr. The ICP source power and RIE chuck power were varied from 0 to 500 W and from 0 to 150 W, respectively. GaAs etch rate increased with the increase of ICP source power and RIE chuck power. It was also found that etch rate of GaAs in BCl₃ gas with 25% Ar addition was superior to that of GaAs in a pure BCl₃ (20 sccm BCl₃) plasma. The result was same with AlGaAs. We expect that high ion-assisted effect in BCl₃/Ar plasma increased etch rates of both materials. The GaAs and AlGaAs features etched at 20 sccm BCl₃ and 15BCl₃/5Ar with 300 W ICP source power, 100 W RIE chuck power and 7.5 mTorr showed very smooth surfaces(RMS roughness < 2 nm) and excellent sidewall. XPS study on the surfaces of processed GaAs also proved extremely clean surfaces of the materials after dry etching.

key word : ICP (유도결합 플라즈마), Dry Etching (건식식각), GaAs, AlGaAs, HDPICP (고밀도 평판형 유도결합 플라즈마)

1. 서론

최근 화합물 반도체를 이용한 전자소자 및 광소자를 제작하는데 있어서 정교한 패터닝 기술이 더욱더 중요하게 부각되고 있다[1-5]. GaAs 기반 반도체들은 무선통신이나 광통신에 사용되는 핵심 소자인 이종접합 양극성 트랜지스터(heterojunction bipolar transistors, HBTs)와 고속 전자 이동도 트랜지스터 (high electron mobility transistors, HEMTs)에 주로 사용된다[6-7]. 특히 패터닝 사이즈가 점점 미세하게 변해감에 따라 식각 후에, 높은 선택도(selectivity)와 우수한 수

직측벽도를 갖는 공정기술이 더욱 중요하게 여겨지고 있다. 고밀도 플라즈마를 이용한 기술은 HBT와 이종접합 전계 효과 트랜지스터(heterojunction field effect transistor)와 같은 소자제작에 널리 사용되는 기술이다[8-10]. 지금까지는 높은 이온밀도를 이용한 건식식각은 ECR(electron cyclotron resonance) 장비를 이용하여 연구하였다. 하지만 ECR을 이용한 공정은 대형화(scale-up)의 어려움, 무거운 마그넷(magnet), 그리고 식각 균일도가 낮다는 단점이 있다. 지금까지 발표된 연구결과에서 볼 때, 건식 식각 공정 시 높은 이온밀도와 이온 에너지는 소자에 전기

적인 손상을 가져올 수 있다고 하였다[11-13]. 이런 문제들을 해결하기 위해서 마이크로웨이브 (microwave) 소스보다 임피던스 매칭 (matching) 이 쉽고, 이온에너지도 낮으며, 식각 균일도도 우수한 RF (radio-frequency) 소스를 이용하게 되었다[14-16]. 본 연구에서는 고밀도 평판형 유도결합 플라즈마를 이용하여 ICP 소스 파워, RIE 척파워와 BCl_3/Ar 의 혼합비에 따른 GaAs 와 AlGaAs 의 식각결과들을 보고 할 것이다.

2. 실험

연구에 사용된 식각장비 (모델명 No. APE510) 는 본 연구팀과 (주) 클라이오텍에서 공동으로 개발한 국산화된 평판형 ICP 이다. 자세한 장비 개략도는 이미 발표된 자료에 나와 있다[8]. 이 시스템은 고진공을 유지하기 위하여 기계식 펌프 와 터보 분자펌프로 구성되어 있다. ICP 소스 (최대 1200 W) 와 RIE 척 (최대 600 W) 에는 각각 13.56 MHz 의 RF 전원과 매칭 (matching) 네트워크가 연결되어 있다. 챔버의 베이스 압력은 cold cathode 게이지로, 공정압력은 baratron 게이지로 측정하였다. 샘플은 1 μm 두께의 PR (photo resist)로 패터닝된 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 크기의 GaAs 와 AlGaAs 를 사용하였다. 실험은 ICP 소스파워를 0 ~ 500 W, RIE 척파워를 0 ~ 150 W 로 각각 변화시키면서 하였다. 공정 가스는 20 sccm BCl_3 (100% BCl_3) 와 $15\text{BCl}_3/5\text{Ar}$ 으로 실험하였다. 전체 가스 유량은 20 sccm 으로 고정하였고, 적절한 식각 깊이를 얻기 위해서 식각 시간은 3 ~ 5분으로 하였다.

공정이 끝난 샘플은 아세톤으로 PR 을 제거한 후, Alpha step-200 을 이용하여 식각률을 측정하였다. 전자주사 현미경과 원자력간 현미경으로 식각표면 및 수직 측벽도와 표면 거칠기 등을 분석하였다. 또, XPS (x-ray photoelectron spectroscopy)를 이용하여 식각후에 반도체 표면에 남아있는 잔류 성분을 연구하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 RIE 척파워 (100 W) 를 고정시킨 상

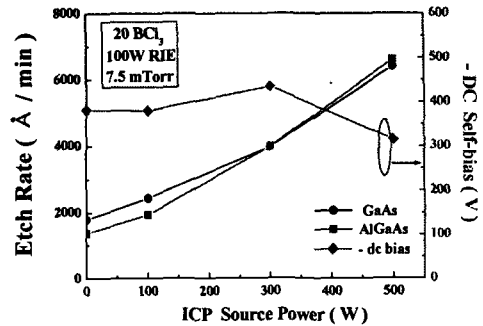


그림 1. ICP 소스파워에 따른 -dc 바이어스와 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률.

Fig. 1. GaAs and AlGaAs etch rate and -dc bias as a function of ICP source power(W) at 20 sccm BCl_3 plasma.

태에서, 20 sccm BCl_3 가스를 이용하여 ICP 소스파워에 따른 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률과 negatively induced dc 바이어스 (bias) 를 나타내었다. ICP 소스파워가 0 ~ 500 W 로 증가하면 GaAs 는 1800 ~ 6400 Å/min 로, AlGaAs 는 1400 ~ 6600 Å/min 로 식각률이 증가하였다. 식각률의 증가는 ICP 소스파워가 증가함에 따라 반응기내 플라즈마 이온 밀도의 증가로 나타난 결과이다. 위의 공정조건에서, 20BCl_3 대신 $15\text{BCl}_3/5\text{Ar}$ 플라즈마를 이용하여 GaAs 와 AlGaAs 반도체를 식각한 결과를 그림 2 에 나타내었다.

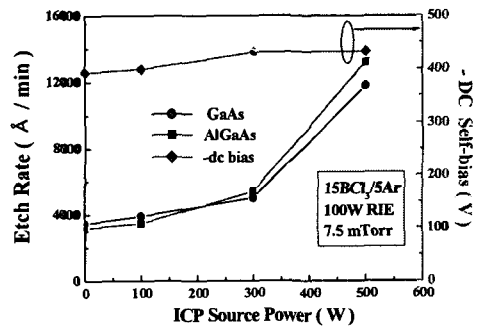


그림 2. ICP 소스파워에 따른 -dc 바이어스와 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률

Fig. 2. GaAs and AlGaAs etch rate and -dc bias as a function of ICP source power at $15\text{BCl}_3/5\text{Ar}$ plasma.

주목할만한 특징은 ICP 소스파워가 0 ~ 500 W 로 증가할 때 GaAs 의 식각률은 3500 ~ 12000 Å/min, AlGaAs 의 식각률은 3200 ~ 13000 Å/min 으로, 즉 100% BCl₃ 가스를 사용하였을 때 보다 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률이 더욱 증가하였다는 것이다. 식각률의 증가는 Ar 혼합에 따른 이온보조 효과로, 물리적인 식각성분이 우수해져서 나타난 결과로 생각할 수 있다. 또한 BCl₃ 기반 가스를 이용한 GaAs 와 AlGaAs 반도체 소자의 건식식각 공정에서 ICP 소스파워의 증가는 식각률을 증가시키는데 매우 유용하게 이용될 것이다. 한편 negatively induced dc 바이어스는 ICP 소스파워가 500 W 까지 증가해도 거의 변화하지 않았다.

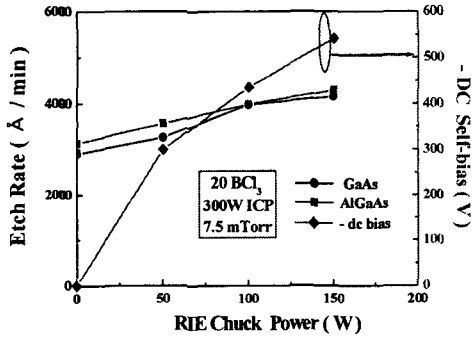


그림 3. RIE 척 파워에 따른 -dc 바이어스와 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률
Fig. 3. GaAs and AlGaAs etch rate and -dc bias as a function of RIE chuck power at 20 sccm BCl₃ plasma.

그림 3 는 ICP 소스파워 (300 W) 를 고정시킨 상태에서, 20 sccm BCl₃ 가스를 이용하여 RIE 척 파워에 따른 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률과 negatively induced dc 바이어스 (-V) 를 나타내었다. 같은 조건에서, 15BCl₃/5Ar 가스를 사용한 경우의 식각률을 그림 4 에 나타내었다. 두 경우 모두 RIE 척 파워가 증가하면 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률이 증가하였다. ICP 소스파워가 일정할 때, RIE 척 파워의 증가는 dc 바이어스의 증가와 함께 반응기내의 이온에너지를 증가시킨다. 이 결과로, 큰 가속에너지를 얻은 이온이 샘플과 충돌해서 식각률을 증가시키는 결과를 가져왔다 (그림 3 과 그림 4). 일반적으로 고밀도 유도결합 플라즈마 장

비에서 이온밀도는 ICP 소스파워, 이온에너지는 RIE 척 파워에 의해 조절되어진다. 강조하고 싶은 것은

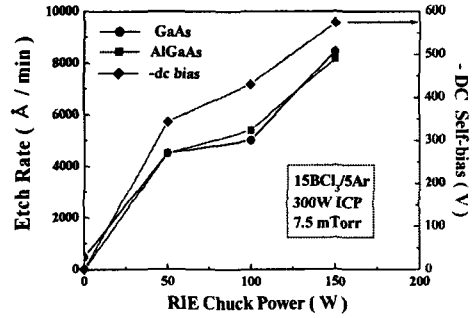


그림 4. RIE 척 파워에 따른 -dc 바이어스와 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률
Fig. 4. GaAs and AlGaAs etch rate and -dc bias as a function of RIE chuck power at 15BCl₃/5Ar plasma.

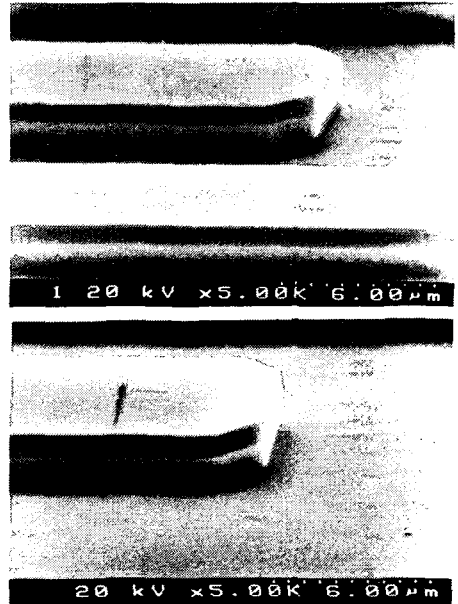


그림 5. 식각한 후 GaAs (위) 와 AlGaAs (아래) 의 SEM 사진.
Fig. 5. Scanning Electron Microscopy images of etched GaAs (upper) and AlGaAs (bottom) at 20 sccm BCl₃ plasma. PR was still intact.

것은 RIE 척 파워가 0 W 일때, 즉 순수한 ICP 소스파워 (300 W ICP) 만으로도 GaAs 와 AlGaAs 샘플 모두 거의 3000 Å/min 의 식각률을 얻을 수 있었다는 것이다 (그림 3). 즉 평판형 고밀도 유도 결합 플라즈마는 RIE 척 파워의 보조없이 ICP 소스파워만으로도 높은 식각률을 얻을 수 있기 때문에 GaAs 와 AlGaAs 같은 손상 (damage) 에 민감한 화합물 반도체소자 식각 시 아주 유용하게 이용될 수 있는 중요한 공정기술이다.

그림 5 는 20 sccm BCl₃, 300 W ICP 소스파워, 100 W RIE 척파워, 7.5 mTorr 에서 3분간 식각한 후 PR 을 지우지 않은 상태에서 찍은 GaAs (위) 와 AlGaAs (아래) 의 SEM 사진이다. 같은 조건에서, 15BCl₃/5Ar 가스를 사용하여 식각한 후에 찍은 SEM 사진 (GaAs : 위, AlGaAs : 아래) 을 그림 6 에 나타내었다. 모든 사진에서 보듯이, 식각 후 샘플들의 표면은 아주 깨끗하였으며 수직

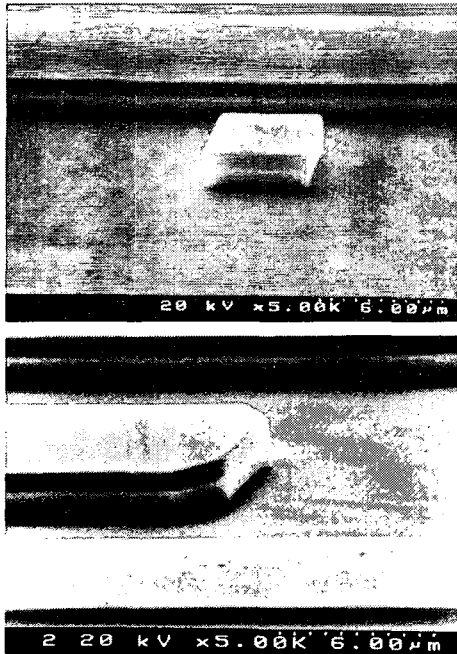


그림 6. 식각한 후 GaAs (위) 와 AlGaAs (아래) 의 SEM 사진

Fig. 6. Scanning Electron Microscopy images of etched GaAs (upper) and AlGaAs (bottom) in 15BCl₃/5Ar plasma. PR was still intact.

또한 우수한 결과임을 확인 할 수 있었다. 식각된 샘플들의 표면 거칠기를 알아보기 위해 AFM 을 측정하였다. 총 스캔 범위는 5 × 5 μm² 이었다. 25%의 Ar 이 혼합된 15BCl₃/5Ar 가스를 이용하여 식각하였을 때 모두 매우 평탄한 표면 (RMS roughness < 2 nm) 을 얻을 수 있었다 (그림 7). 이때, GaAs 와 AlGaAs 의 control 샘플의 RMS roughness 는 각각 0.39 와 0.3 nm 였다. 20 sccm BCl₃ 가스를 사용한 경우에도 아주 평탄한 표면 (GaAs : 0.56 nm, AlGaAs : 0.57 nm)을 얻을 수 있었다.

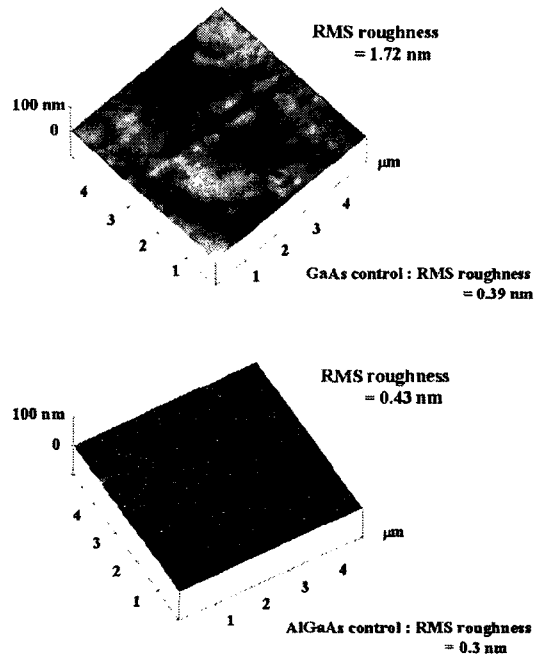


그림 7. 식각한 후 GaAs (위) AlGaAs (아래)의 AFM 사진

Fig. 7. Atomic Force Microscopy images of etched GaAs (upper) and AlGaAs (bottom) surfaces at 15BCl₃/5Ar, 100 W RIE and 300 W ICP, 7.5 mTorr.

식각 공정 후에 GaAs 와 AlGaAs 반도체 표면에 남아 있는 잔류성분을 알아보기 위하여 XPS 데이터를 분석하였다. 그림 8 은 식각을 하지 않은 GaAs control 샘플과 20 sccm BCl₃, 300 W ICP

소스파워, 100 W RIE 척파워, 7.5 mTorr 에서 3 분간 식각한 후의 GaAs 샘플의 XPS 데이터를 나타내었다. 이 데이터는 건식식각 후 GaAs 표면에 Cl_2 같은 반응성 잔류 성분이 거의 발견되지 않았다는 것을 보여주고있다. 이 결과로 고밀도 유도결합 BCl_3 플라즈마로 식각된 GaAs 반도체 표면은 화학적으로도 매우 깨끗함을 입증하였다.

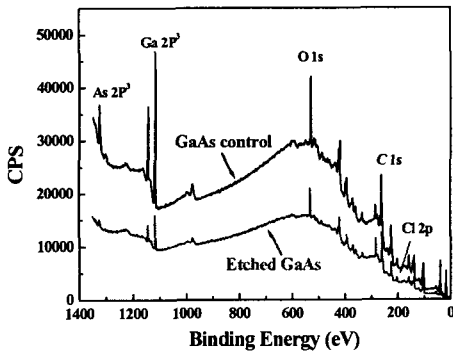


그림 8. 식각한 후 GaAs 의 XPS 데이터

Fig. 8. X-ray Photoelectron Spectroscopy data of etched GaAs surface at 20 sccm BCl_3 , 100 W RIE, 300 W ICP, 7.5 mTorr.

4. 결론

본 연구에서는 고밀도 평판형 유도결합 플라즈마 식각 시스템을 이용하여 GaAs 와 AlGaAs 의 건식식각에 대해 분석하였다. 총 20 sccm 의 혼합 가스에서 25% Ar 이 혼합된 $15BCl_3/5Ar$ 가스를 사용하였을 때의 GaAs 와 AlGaAs 반도체의 식각률이 100% BCl_3 가스를 사용할 때 보다 증가하였다. 300 W ICP 소스파워, 100 W RIE 척파워, 7.5 mTorr 조건에서 20 sccm BCl_3 와 $15BCl_3/5Ar$ 플라즈마를 이용하여 식각한 GaAs 와 AlGaAs 반도체의 표면은 아주 평탄하였고 수직측벽도 또한 우수하였으며, 화학적으로도 매우 깨끗하다는 것을 입증하였다. 그리고, ICP 소스파워와 RIE 척파워가 증가하면 GaAs 와 AlGaAs 의 식각률은 증가한다는 것을 알 수 있었다. 본 실험 결과는 다양한 GaAs 계열의 화합물 반도체제작에 널리 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 2001년도 지방대학 육성지원(과제번호 2001-002-D00084) 과제에 의해 수행되었습니다. 본 연구에 기술적인 지원을 준 부경대 공동실습관의 류호정 박사께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] R.J. Shul, G.B. McClellan, R.D. Briggs, D.J. Rieger, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, J.W. Lee, C. Constantine and C. Barratt, "High Density Plasma Etching of Compound Semiconductors", *J. Vac. Sci. Technol. A* 15, 633, 1997.
- [2] 이병택, 박철희, 김대성, 김호성, " $BCl_3/O_2/Ar$ 유도결합 플라즈마를 이용한 InP의 건식식각에 관한 연구", *한국진공학회*, 8권, 4호 (2), 1999.
- [3] H.S. Kim, G.Y. Yeom, J.W. Lee and T.I. Kim, "A study of GaN etch mechanism using inductively coupled Cl_2/Ar plasmas", *Thin Solid Films*, 341, 180, 1999.
- [4] T. Maeda, J.W. Lee, R.J. Shul, J. Han, J. Hong, E.S. Lambers, S.J. Pearton, C.R. Abernathy and W.S. Hobson, "Inductively coupled plasma etching of III-V semiconductors in BCl_3 -based chemistries" *Appl. Surface Science*, 143, 174, 1999.
- [5] 정필구, 임완태, 조판식, 전민현, 임재영, 이재원, 조국산, "150 mm GaAs 웨이퍼의 플라즈마 식각에서 식각 깊이의 균일도에 대한 가스 흐름의 최적화 연구", *한국 진공학회지*, 11권, 2호, 2002.
- [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, "Effect of high density H_2 plasma on InGaP/GaAs and AlGaAs/GaAs HEMTs", *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, "Device Degradation During Low Temperature ECR-CVD Part I : GaAs MESFETs", *Solid State Electronics*, 42, 1027, 1998.
- [8] 임완태, 백인규, 정필구, 이제원, 조관식, 이주인, 조국산, S.J. Pearton, "BCl₃ 평판형 유도 결합 플라즈마를 이용한 GaAs 건식식각", *한국재료학회지*, 13권, 4호, 266, 2003.
- [9] J.W. Lee, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, F. Ren, W.S. Hobson, R. J. Shul, C. Constantine and C. Barratt "Inductively Coupled Plasma Etch Damage in GaAs and InP Schottky Diodes", *J. Electrochem. Society*, 144, 1417, 1997.
- [10] R.R. Stradtman, J.W. Lee, C.R. Abernathy, and S.J. Pearton, "Ar plasma-Induced Damage in AlGaAs", *J. Electrochemical Society*, Vol. 143, No. 9, L119, 1996.
- [11] F. Ren, J.W. Lee, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, R.J. Shul, C. Constantine and C. Barratt, "Hydrogenation effects during high density plasma processing of GaAs MESFETs", *Semiconductor Sci. & Technol.*, 12, 1154, 1997.
- [12] K. N. Lee, J.W. Lee, J. Hong, C.R. Abernathy, S.J. Pearton and W.S. Hobson, "Effect of ion damage on the electrical and optical behavior of p-type GaAs and InGaP", *J. of Electronic Materials*, 26, 1279, 1997.
- [13] 이수부, 박현건, 이석현, "유도결합형 플라즈마 원을 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구, 전기전자재료학회 논문지, 11권, 4호, 261, 1998.
- [14] B.H. O, J. S. Jeong, S.G. Park, "Improvement of ICP plasma with periodic control of axial magnetic field", *Surface and Coating Technology* 120-121, 752, 1999.
- [15] J.W. Lee, D. Hayes, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, W.S. Hobson and C. Constantine, "Inductively coupled Ar plasma damage in AlGaAs", *J. of Electrochem. Soc.*, 144, L245, 1997.
- [16] J.W. Lee, E.S. Lambers, C.R. Abernathy, S. J. Pearton, R. J. Shul, F. Ren, W. S. Hobson and C. Constantine, "Inductively coupled plasma etching of III-V semiconductors in Cl₂-based chemistries", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 1, 65, 1998.