

BCl₃/Ne 혼합가스를 이용한 III-V 반도체의 고밀도 유도결합 플라즈마 식각

High Density Inductively Coupled Plasma Etching of III-V Semiconductors in BCl₃/Ne Chemistry

백인규, 임완태, 이제원*, 조관식

(In Kyoo Baek, Wan Tae Lim, Je Won Lee*, and Guan Sik Cho)

Abstract

A BCl₃/Ne plasma chemistry was used to etch Ga-based (GaAs, AlGaAs, GaSb) and In-based (InGaP, InP, InAs and InGaAsP) compound semiconductors in a planar Inductively Coupled Plasma (ICP) reactor. The addition of the Ne instead of Ar can minimize electrical and optical damage during dry etching of III-V semiconductors due to its light mass compared to that of Ar. All of the materials exhibited a maximum etch rate at BCl₃ to Ne ratios of 0.25-0.5. Under all conditions, the Ga-based materials etched at significantly higher rates than the In-based materials, due to relatively high volatilities of their trichloride etch products (boiling point GaCl₃ : 201 °C, AsCl₃ : 130 °C, PCl₃ : 76 °C) compared to InCl₃ (boiling point : 600 °C). We obtained low root-mean-square(RMS) roughness of the etched surface of both AlGaAs and GaAs, which is quite comparable to the unetched control samples. Excellent etch anisotropy (> 85°) of the GaAs and AlGaAs in our PICP BCl₃/Ne etching relies on some degree of sidewall passivation by redeposition of etch products and photoresist from the mask. However, the surfaces of In-based materials are somewhat degraded during the BCl₃/Ne etching due to the low volatility of InCl_x.

Key Words : ICP, Dry etching, Compound semiconductor

1. 서론

III-V 화합물 반도체의 건식식각 공정은 레이저에서부터 이중집합 트랜지스터까지 다양한 종류의 소자응용에 지속적인 관심을 불러 일으키고 있다 [1-25]. 높은 aspect ratio의 비아(via) 홀 식각과 선택적 mesa 식각 같은 공정이 더욱 중요하게 여겨짐에 따라 이온밀도와 이온과 중성자(neutral)의

비를 조절할 수 있는 고밀도 플라즈마 (High Density Plasma, HDP) 시스템의 개발에 연구가 집중되어 왔다[1,15]. 현재 가장 많이 쓰이고 있는 HDP 시스템은 웨이퍼의 대구경화가 가능하고 플라즈마 발생이 쉬운 유도결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 식각 장비이다 [1,18]. 지금까지 III-V 화합물 반도체를 건식 식각 하는데 사용된 대부분의 ICP 장비는 실린더형 유도결합 플라즈마 (Cylindrical ICP) 식각장비였다. 하지만 최근에는 이러한 CICP 보다 플라즈마 소스 형태를 쉽게 변화시킬 수 있고, RIE 척과 위와 ICP 소스과위를 독립적으로 조절하여 이온밀도와 이온 에너지를 조절할 수 있는 진보된 플라즈마 소스와

* : 인제대학교 나노공학과/나노 기술 응용연구소

(경남 김해시 이방동 607,

Fax: 055-320-3631

Corresponding Author : jwlee@inje.ac.kr

2003년 7월 30일 접수, 2003년 8월 27일 1차 심사완료,
2003년 10월 14일 최종 심사완료

시스템에 더욱 큰 관심을 가지고 있다. 특히 본 연구에 사용된 평판형(planar) 유도결합 플라즈마 장비는 RIE 척과위의 보조 없이 낮은 ICP 소스파워 (< 300 W)에서도 플라즈마가 쉽게 점화하였다. 따라서 평판형 유도결합 플라즈마는 낮은 이온에너지 사용을 선호하는 화합물 반도체 소자 식각이나 표면클리닝과 박막제거 같은 공정에도 아주 유용하게 이용할 수 있을 것이다. 이러한 장점 때문에 최근에는 평판형 유도결합 플라즈마 장비를 이용한 화합물 반도체 소자 식각을 더욱 선호하고 있다. 일반적으로 이온보조효과를 얻기 위해 불활성 가스인 Ar을 혼합하지만 Ar은 원자 질량이 커서(40 AMU) Ar 이온의 물리적 충돌에 의해 전기적 손상에 민감한 III-V 화합물 반도체의 건식 식각시 소자의 성능을 저하시킬 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 평면 형태의 ICP 소스인 평판형 유도결합 플라즈마 장비에 불활성 성질을 가지고 있으며 Ar에 비해 상대적으로 가벼워 혼합가스의 물리적 충돌에 의한 전기적 손상을 감소시킬 수 있는 Ne(20 AMU)을 사용하여 Ga기반 (GaAs, AlGaAs, GaSb)과 In기반 (InP, InGaP, InAs, InGaAsP) 반도체 소자들을 건식 식각 후 그 특성을 분석하였다.

2. 실험

본 실험에 사용된 GaAs, InP, InAs 웨이퍼는 Czochralski 방법을 이용하여 (100) 방향으로 성장하였고 도핑은 하지 않았다. $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ 과 $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 는 각각 금속유기 분자선 에피택시 (Metal Organic Molecule Beam Epitaxy, MOMBE)와 금속유기 화학기상증착 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)법을 이용하여 GaAs 기판위에 격자정합 시켜 $1\mu m$ 두께로 성장하였다. InGaAsP ($\lambda = 1.55\mu m$)는 MOMBE 방법으로 InP 기판위에 $1\mu m$ 두께로 성장하였다. 이때 에피층 역시 도핑하지 않았다.

식각은 ㈜ 클라이오텍과 본 연구진이 공동으로 개발하여 만든 평판형 ICP 장비 (모델명APE 510)로 하였다[26]. RIE 척(최대파워 600 W)과 ICP 소스(최대파워 1,200 W)에는 각각 13.56 MHz의 RF 전원이 연결되어 있고, 공정온도는 열 교환기를 이용하여 실온 ($25\text{ }^{\circ}C$)을 유지하였다. 공정 중에는 BCl_3 가스의 응축을 막기 위해 가스 라인에 열선

을 이용하여 항상 $40\text{ }^{\circ}C$ 이상을 유지하였다. 연구에 사용된 ICP 장비의 웨이퍼 척 사이즈는 4인치 용이었다. $1\mu m$ 두께의 감광액 (photoresist)으로 패턴된 $1\times 1\text{ cm}^2$ 크기의 샘플들을 어노다이징 (anodizing)된 알루미늄 캐리어 위에 진공 그리스로 고정된 상태로 실험하였다. 이때 알루미늄 캐리어는 클램프를 사용하여 고정하고, 총 20 sccm (standard cubic centimeters per minute)의 BCl_3/Ne 혼합가스를 MFC (mass flow controller)를 통해 반응기내로 유입하였다. ICP 소스파워 (0 - 500 W), RIE 척과위 (0 - 150 W)를 변화시키며 실험하였고, 공정 중 플라즈마 상태를 in-situ 로 관찰하기 위해 광학발광 분광기 (Optical Emission Spectroscopy, OES)를 사용하였다. 식각 공정 후 전자주사현미경 (scanning electron microscopy, SEM)과 원자힘 현미경 (atomic force microscopy, AFM)으로 표면 분석을 하였다.

3. 결과 및 토론

그림 1은 ICP 소스파워 (300 W), RIE 척과위 (100 W), 공정압력 (7.5 mTorr)을 고정시킨 상태에서 BCl_3 비율에 따른 GaAs, AlGaAs, InGaP, GaSb(위) 와 InP, InSb, InGaAsP (아래)의 식각률을 보여주고 있다. BCl_3 에 Ne을 혼합하면 처음에는 식각률이 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 실험 중에 광학분광기를 이용하여 Cl peak의 강도를 실시간으로 분석한 결과 BCl_3 에 Ne을 혼합하였을 때 순수한 BCl_3 플라즈마에서보다 전반적으로 Cl peak의 세기가 증가하는 것을 알 수 있었다. 하지만 BCl_3 의 비율이 25 - 50 % 이하가 되면 반응기내의 Cl의 밀도가 감소하여 화학적인 식각성분이 줄어들게 되어 식각률이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 또, In을 포함하지 않은 반도체는 In을 포함하는 반도체 보다 식각률이 거의 10배 이상 높았다. 이 결과는 상온에서 BCl_3/Ne 유도결합 플라즈마를 사용하여 In기반반도체 소자 식각시 $InCl_3$ 라는 휘발성이 낮은(끓는점: $600\text{ }^{\circ}C$) 식각 부산물이 형성되기 때문이다. 따라서 Cl_2 -기반 플라즈마를 이용하여 In을 포함하는 반도체 소자 식각시 식각률을 증가시키고 표면에 과도한 양의 Cl 패시베이션 (passivation)을 막기 위해서는 웨이퍼 온도를 $130\text{ }^{\circ}C$ 까지 올려주어야 한다.

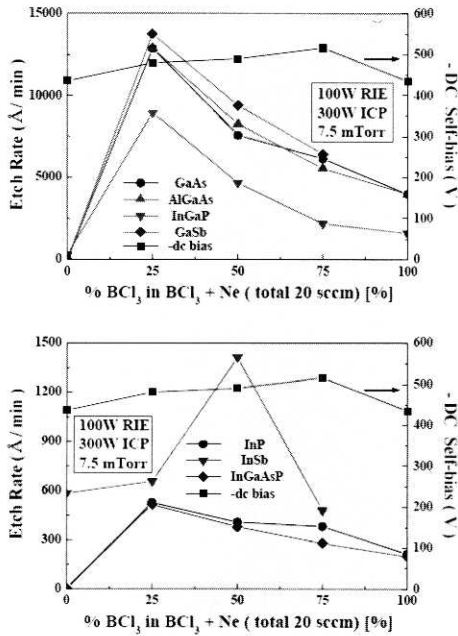


그림 1. BCl₃/Ne 플라즈마에서 % BCl₃ 에 따른 GaAs, AlGaAs, InGaP, GaSb (위)와 InP, InSb, InGaAsP (아래)의 식각률.

Fig. 1. Etch rates of GaAs, AlGaAs, InGaP, GaAs (top) or InP, InSb, InGaAsP (bottom) as a function of BCl₃ per centage in BCl₃/Ne PICP discharges.

15 BCl₃/5 Ne, 100 W RIE 척과워, 300 W ICP 소스과워, 7.5 mTorr의 공정압력에서 GaAs 을 식각한 후 관찰한 SEM 사진과 AFM 데이터를 그림 2 에 나타내었다.

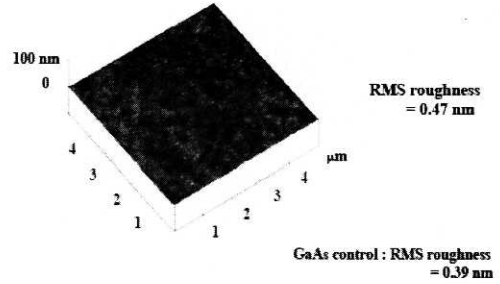
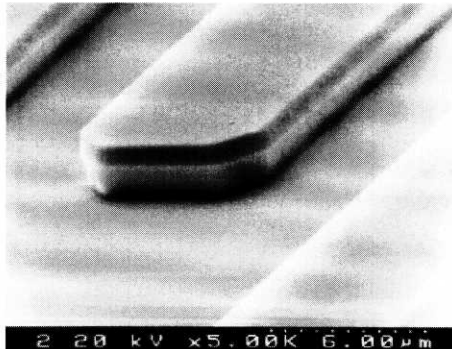


그림 2. 15BCl₃/5Ne 플라즈마로 식각 후 GaAs 의 SEM 사진과 AFM 데이터.

Fig. 2. An SEM micrograph of feature etched into GaAs (top) and an AFM of etched surface (bottom) at a 15 BCl₃/5 Ne plasma.

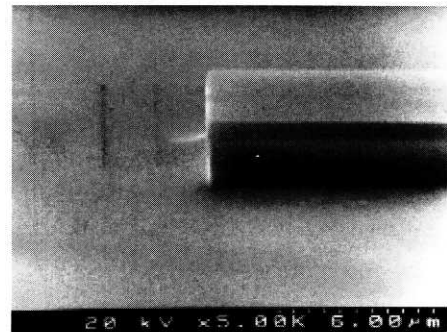
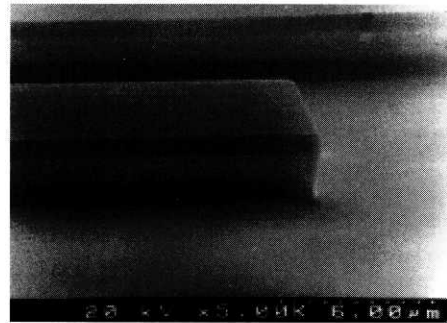


그림 3. 10BCl₃/10Ne 플라즈마를 사용하여 식각한 GaAs (위) 와 AlGaAs (아래)의 SEM 사진.

Fig. 3. SEM micrographs of features etched into GaAs(top) and AlGaAs(bottom) using a 10BCl₃/10Ne plasma.

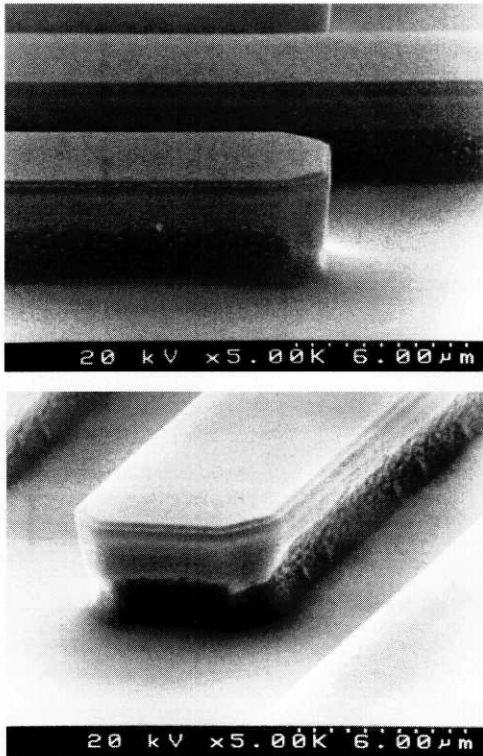


그림 4. $5\text{BCl}_3/15\text{Ne}$ 플라즈마를 이용하여 식각한 GaAs (위) 와 AlGaAs (아래) 의 SEM 사진.

Fig. 4. SEM micrographs of features etched into GaAs (top) and AlGaAs (bottom) using a $5\text{BCl}_3/15\text{Ne}$ plasma.

식각된 GaAs 샘플의 수직측벽도(87°)와 표면은 매우 우수한 결과를 나타내었다. 총 식각 깊이는 $1.8 \mu\text{m}$ 이고, 식각된 GaAs의 RMS 표면 거칠기는 0.47 nm 로 식각전 (0.39 nm)과 비교하였을 때 거의 변화가 없었다. 그리고 GaAs와 감광액(photoresist)의 선택도는 $\sim 3.1 : 1$ 이었다.

100 W RIE 척과워, 300 W ICP 소스파워, 7.5 mTorr 의 공정압력에서 $10 \text{ BCl}_3/10 \text{ Ne}$ (그림 3) $5 \text{ BCl}_3/15 \text{ Ne}$ (그림 4) 플라즈마를 이용하여 GaAs (위)와 AlGaAs(아래)를 식각한 후 찍은 SEM 사진을 그림 3과 4에 나타내었다. $2.3 - 3.9 \mu\text{m}$ 의 식각 깊이에도 불구하고 GaAs와 AlGaAs의 RMS 표면 거칠기는 1.2 nm 이하로 매우 평탄한 표면을 얻을 수 있었다. 그리고 GaAs 대 PR의 선택도는

$3.5 - 4.3 : 1$ 로 높은 결과를 얻었다. 식각단면 또한 우수하였지만 패터닝 형성된 표면 아랫부분에는 약간의 undercut이 일어났다. 이 결과로부터, 우리는 BCl_3 의 함유량이 적으면 PR이나 BCl_3 와 같은 식각 부산물이 벽면을 패시베이션 시킬 만큼 충분히 증착 되지 않아 undercut의 원인이 될 수 있다는 것을 알았다. 반면에 BCl_3 의 함유량이 많은 조건에서는 높은 식각률 뿐만 아니라 우수한 수직측벽도를 얻을 수 있었다.

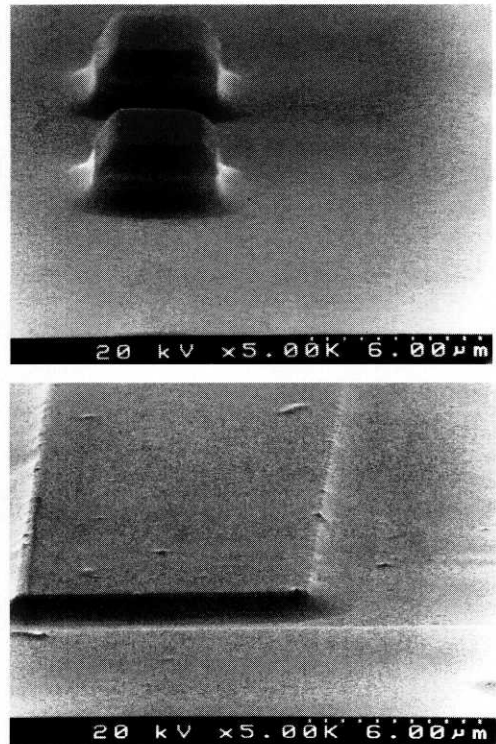


그림 5. $10 \text{ BCl}_3/10 \text{ Ne}$ 플라즈마를 사용하여 식각한 InGaP(위) 과 InP(아래)의 SEM 사진.

Fig. 5. SEM micrographs of features etched into InGaP(top) and InP(bottom) using a $10 \text{ BCl}_3/10 \text{ Ne}$ plasma.

GaAs, AlGaAs와는 대조적으로, 같은 공정 조건에서 In을 포함하는 반도체 소자들의 경우는 거친 표면과 경사진 측벽을 얻었다. 이 결과를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 5에서는 $10 \text{ BCl}_3/10 \text{ Ne}$, 그림 6에서는 $5 \text{ BCl}_3/15 \text{ Ne}$ 플라즈마에서의 InGaP (위) 과 InP(아래)의 SEM 사진을 보여주고 있다.

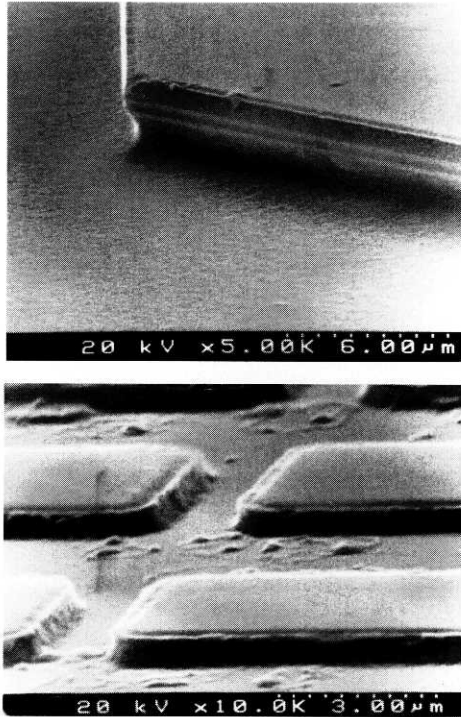


그림 6. 5BCl₃/15Ne 플라즈마를 이용하여 식각한 InGaP(위) 과 InP(아래)의 SEM 사진.

Fig. 6. SEM micrographs of features etched into InGaP (top) and InP (bottom) using a 5BCl₃/15Ne plasma.

In기반 반도체의 경우는 휘발성이 서로 다른 식각 부산물들 (InCl₃, GaCl₃, PCl₃)로 인한 선택적 손실 (preferential loss)을 가져와 그림에서처럼 경사진 식각단면을 나타내었다. 그리고 InGaP의 샘플의 undercut은 그림 3과 4에서 알 수 있듯이 1 μm 두께의 InGaP 층 아래에 있는 패시베이션 되지 않은 GaAs 기판의 식각에 의해 나타난 결과이다.

그림 7에서는 ICP 소스파워에 따른 III-V 화합물 반도체 소자의 식각률을 보여주고 있다. ICP 소스파워가 0 - 500 W로 변화하면 Cl(774.27, 798.8, 820.32, 955.45 nm)과 Ne의 이온과 라디칼 그리고 BCl₃ 분자의(350 - 650 nm) 밀도가 증가하여 Ga 기반 반도체 소자의 식각률을 증가시켰다. InCl₃의 결합에너지(39.4 kcal/mol)는 GaCl₃ (11.4 kcal/mol)보다 높아서 실온에서는 휘발되기가 어렵다. 따라서 Cl₂기반 가스들을 이용하여 In을 포함하는 반도체의 식각률을 높이기 위한 방법으로는 샘플 온도

(> 130 °C)를 올리거나 InCl₃ (녹는점 : 600 °C)보다 휘발성이 높은 I₂ (InI₃ : 210 °C) 기반 가스를 사용하여 식각하는 것이 좋다.

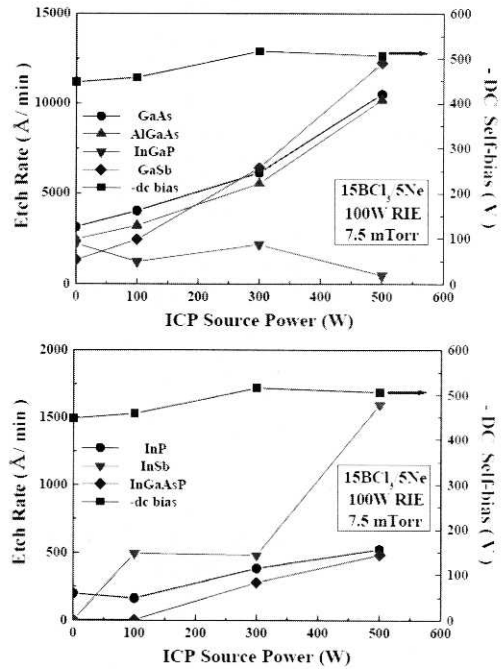


그림 7. ICP 소스파워에 따른 III-V 화합물 반도체 소자의 식각률.

Fig. 7. Etch rates of III-V compound semiconductor as a function of ICP source power at 15BCl₃/5Ne, 100 W RIE chuck power and 7.5 mTorr.

15 BCl₃/5 Ne 플라즈마를 이용하여 7.5 mTorr의 공정압력을 유지한 상태로 ICP 소스파워와 RIE 척파워에 따른 OES 데이터를 그림 8에 나타내었다. 100 W ICP 소스파워에서는 반응기내의 발광하는 빛의 세기가 0 W ICP 소스파워와의 그것과 비교하였을 때 거의 변하지 않았다. 이 조건에서는 capacitively coupled plasma (CCP) 형태가 여전히 지배적이라는 것을 말해준다. 하지만 300 W ICP 소스파워에서는 반응기에 있는 플라즈마 내에서 BCl₃ 분자 peak이 급격히 증가하고 Cl 원자 peak의 세기도 커져 inductively coupled plasma (ICP)의 특징을 나타내고 있다.

그리고, BCl₃와 Ne의 혼합가스를 사용한 유도결합 플라즈마의 경우, RIE 척파워의 증가는 반응기

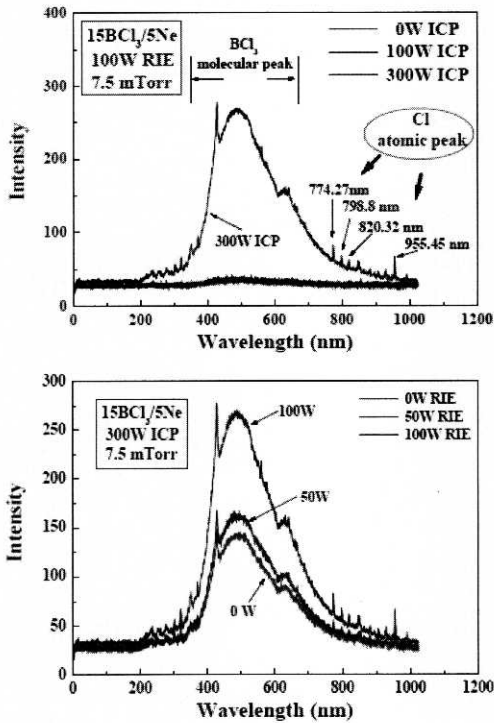


그림 8. 15BCl₃/5Ne 플라즈마의 ICP 소스파워 와 RIE 척파워에 따른 OES 데이터.
 Fig. 8. OES spectra from 15BCl₃/5Ne discharges as a function of ICP source power (top) and RIE chuck power (bottom).

내의 발광하는 빛의 세기를 증가시킨다는 흥미로운 결과를 얻을 수 있었다. 같은 공정조건에서 20 BCl₃나 15 BCl₃/5 Ar 플라즈마를 사용하여 관찰한 OES 결과에는 RIE 척파워가 증가해도 OES peak 세기는 거의 변화가 없었다. 이 결과로부터 BCl₃나 BCl₃/Ar 플라즈마에서는 RIE 척파워가 모두 sheath 내의 이온을 가속시키는데 소모되지만 BCl₃/Ne 플라즈마에서는 RIE 척파워가 모두 이온을 가속시키는데 소모된 것이 아니고 일부 에너지가 플라즈마 내에 전달되어 플라즈마의 밀도증가에도 영향을 미치는 것으로 사료된다. 또한 BCl₃/Ne 평판형 유도결합 플라즈마에서 Ne 원자들의 충돌은 BCl₃ 분자들을 여기 시키는데 아주 효과적이라는 것을 예상할 수 있다.

15 BCl₃/5 Ne, 300 W ICP 소스파워, 7.5 mTorr의 공정조건에서 RIE 척파워에 따른 III-V 화합물 반도체 소자의 식각률을 그림 9에 나타내었다.

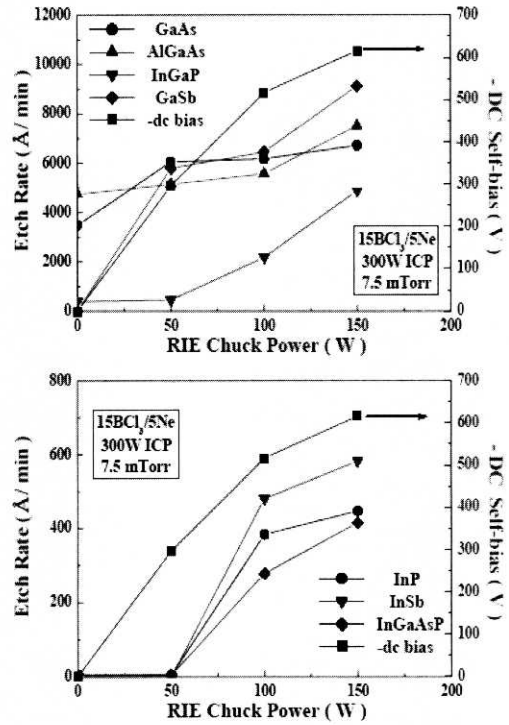


그림 9. RIE 척파워에 따른 III-V 화합물 반도체 소자의 식각률.
 Fig. 9. Etch rates of different III-V semiconductors as a function of RIE chuck power at 15BCl₃/5Ne, 300W ICP source power and 7.5 mTorr.

RIE 척파워의 증가는 샘플에 충돌하는 이온에너지를 증가시킬 뿐만 아니라 그림 8에서도 알 수 있듯이 BCl₃/Ne 평판형 유도결합 플라즈마에서는 그것이 플라즈마 밀도를 증가시켜 식각률을 더욱 증가시킨 것으로 예측된다. 그리고 In을 포함하는 반도체 소자의 경우는 최소 50 W 이상의 RIE 척파워가 인가되어야 이온에너지 증가와 같은 이온보조 효과에 의해 소자가 식각되기 시작한다는 것을 알 수 있었다. 특히 이번 연구에 사용된 PICP 시스템은 RIE 척파워의 보조없이 (0 W RIE 척파워) 낮은 ICP 소스파워 (< 300 W)에서도 플라즈마가 쉽게 점화하였다. 따라서 평판형 유도결합 플라즈마는 낮은 이온에너지 사용을 선호하는 화합물 반도체 소자 식각이나 표면클리닝과 박막제거 같은 공정에도 아주 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 평판형 유도결합 BCl_3/Ne 플라즈마 (PICP)를 이용하여 III-V 화합물 반도체의 건식식각 결과를 분석하였다. OES를 이용한 평판형 유도결합 BCl_3/Ne 플라즈마 peak들의 분석결과 낮은 ICP 소스파워 (< 100 W)에서는 ICP 소스파워가 증가해도(0 - 100 W) 플라즈마 밀도에 영향을 거의 주지 않았다는 것을 알 수 있었다. 그리고, PICP 시스템은 RIE 척파워의 보조없이 (즉, 0 W RIE 척파워) 낮은 ICP 소스파워(300W ICP 소스파워)만으로도 플라즈마를 발생할 수 있다는 장점을 가지고 있어서 공정에 의한 손상에 민감한 화합물 반도체 식각에 유용하게 쓰일 수 있다. 평판형 유도결합 BCl_3/Ne 을 이용한 III-V 화합물 반도체의 건식식각에서 Ga기반과 In기반의 화합물 반도체의 식각률은 BCl_3 의 혼합비가 25 - 50 %의 범위일 때 가장 높았다. 그러나 25 % 이하의 BCl_3 가 혼합된 플라즈마에서는 반응기내의 BCl_3/Ne 중 BCl_3 가스의 함유량 감소로 인한 화학적 식각 성분이 줄어들어 식각률이 감소하였다. BCl_3/Ne 평판형 유도결합 플라즈마를 이용한 건식식각 후, 특히 Ga기반 반도체의 경우는 높은 식각률 (3,000 - 11,000 Å/min), 깨끗한 표면, 우수한 수직측벽도 (> 85 °), 그리고 평탄한 표면(RMS roughness < 1 nm)을 얻을 수 있었다. 그러나, In을 포함하는 반도체 소자의 경우에는 식각 후 경사진 측벽과 다소 거친 표면을 얻었으며 그것은 상온에서 낮은 휘발성을 가지는 식각부산물인 InCl_x 때문이라고 사료된다. 따라서, BCl_3/Ne 가스를 이용한 평판형 유도결합 플라즈마 시스템은 Ga기반 III-V 화합물 반도체 소자의 플라즈마 식각 공정시 진보된 플라즈마 소스로 더욱 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지역대학 우수과학자 연구비지원(과제번호 : R05-2002-000013680-2003)에 의해 수행되었습니다. 본 연구에 기술적인 지원을 준 (주) 클라이오텍의 조국산, 정다정, 부경대학교 공동실험실습관의 류호정 박사께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] C. Youtsey and I. Adesida, "Chapter 11 in Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques", eds., R. J. Shul (Springer, Berlin, 2000).
- [2] S. J. Pearton, J. W. Lee, E. S. Lambers, C. R. Abernathy, F. Ren, W. S. Hobson, and R. J. Shul, "Comparison of dry etching technologies for III-V semiconductors in $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ plasmas", J. Electrochem. Soc. 143, p. 752, 1996.
- [3] 이수부, 박헌진, 이석현, "유도결합형 플라즈마원을 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 11권, 4호, p. 261, 1998.
- [4] J. W. Lee and S. J. Pearton, "Investigation of masking materials for high ion density Cl_2/Ar plasma etching of GaAs", Semicond. Sci. Technol. 11, p. 812, 1996.
- [5] K. Mochizuki, T. Oka, K. Ouchi, and T. Tanoue, "Reliability investigation of heavily C-doped InGaP/GaAs HBTs operated under a very high current-density condition", Solid-State Electron. 43, p. 1425, 1999.
- [6] J. W. Lee, J. Hong, C. R. Abernathy, E. S. Lambers, S. J. Pearton, W. S. Hobson, and F. Ren, " Cl_2/Ar plasma etching of binary, ternary and quaternary In-based compound semiconductors", J. Electrochem. Soc. J. Vac. Sci. Technol. B 14, p. 2567, 1996.
- [7] 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. Electrochemical Society 144, p. 1417, 1997.
- [8] 김창일, 권광호, "ICP에 의한 BCl_3/Cl_2 플라즈마 내에서 Pt 박막의 식각 특성", 전기전자재료학회논문지, 11권, 10호, p. 804, 1998.
- [9] 김성대, 정석용, 이병택, 허중수, " $\text{BCl}_3/\text{H}_2/\text{Ar}$ 유도결합 플라즈마를 이용한 GaN의 건식 식각에 관한 연구", 한국재료학회지, 10권, 3호, p. 179, 2000.
- [10] R. J. Shul, G. B. McClellan, R. D. Rriggs, 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, p. 633, 1997.
- [11] J. W. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Peaton, F. Ren, C. Constantine, C. Barratt, and R. J. Shul, "Dry etch damage in inductively coupled plasma exposed GaAs/AlGaAs heterojunction bipolar transistor", Appl. Phys. Lett., 70, p. 2410, 1997.
- [12] 류재홍, 김남훈, 장의구, 김창일, "Cl₂/Ar 유도 결합 플라즈마에서 Pt 박막 식각시 N₂ 가스 첨가 효과", 대한전자공학회 논문지, 37권, 7호, p. 513, 2000.
- [13] 박준용, 김현수, 권광호, 김관호, 염근영, "유도 결합형 Ar/CH₄ 플라즈마를 이용한 ITO의 식각 특성에 관한 연구", 한국진공학회지, 8권, 4(2)호, p. 565, 1999.
- [14] 유석빈, 김남훈, 김창일, 장의구, "도핑되지 않은 비정질 실리콘의 고밀도 Cl₂/HBr 플라즈마에 의한 식각 시 나칭 효과", 전기전자재료학회논문지, 13권, 8호, p.651, 2000.
- [15] J. W. Lee, M. W. Devre, B. H. Reelfs, D. Johnson, J. N. Sasserath, F. Clayton, D. C. Hays, and S. J. Pearton, "Advanced selective dry etching of GaAs/AlGaAs in high density inductively coupled plasmas", J. Vac. Sci. Technol. A 18, p. 1220, 2000.
- [16] 김현수, 이용혁, 이재원, 김태일, 염근영, "Cl₂/H₂ 플라즈마 조건이 n-GaN 의 식각특성 및 저저항 접촉 형성에 미치는 영향", 한국재료학회지, 9권, 5호, p. 496, 1999.
- [17] R. J. Shul, G. B. McClellan, R. D. Rriggs, 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, p. 633, 1997.
- [18] 김현수, 이재원, 김태일, 염근영, "유도결합형 Cl₂계 플라즈마를 이용한 GaN 식각 특성에 관한 연구", 한국표면공학회지, 32권, 3호, p. 83, 1999.
- [19] 최익수, 이병택, 김동근, 박종삼, "Cl₂/CH₄/H₂ 혼합기체를 이용한 InP 소재의 반응성 이온에칭에 관한 연구", 한국진공학회지, 6권, p. 282, 1997.
- [20] J. W. Lee, J. Hong, E. S. Lambers, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, W. S. Hobson and F. Ren, "Plasma etching of III-V semiconductor in BCl₃ chemistries; Part I: GaAs and related materials", Plasma Chem. Plasma Phys. 17, p. 155, 1997.
- [21] T. Chino, M. Ishino, M. Kito, and Y. Maksui, Proc. 1998 Int. Conf. InP and Related Materials, p. 709, 1998.
- [22] 이병택, 박철희, 김성대, 김호성, "BCl₃/O₂/Ar 유도결합 플라즈마를 이용한 InP의 건식 식각에 관한 연구", 한국진공학회지, 8권, p. 541, 1999.
- [23] J. Hommel, D. Ottenwalder, V. Harle, F. Schneider, A. Menschig, F. Scholz and H. Schweizer, "Special angle technique with Ar/O₂ - RIBE for the fabrication of steep NM-scale profiles in InGaAsP/InP and subsequent epitaxial overgrowth", Micro-electronic Eng. 21, p. 333, 1993.
- [24] 염근영, "Cylindrical Magnetron을 이용한 실리콘의 반응성 이온 건식식각의 특성에 관한 연구", 한국재료학회지, 3권, 4호, 1993.
- [25] J. W. Lee, E. S. Lambers, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, W. S. Hobson and F. Ren., "Plasma etching of III-V semiconductors in BCl₃chemistries; Part II: InP and related compounds", Plasma Chem. Plasma Phys. 17, p. 169, 1997.
- [26] 임완태, 백인규, 정필규, 이재원, 조관식, 이주인, 조국산, S. J. Pearton, "BCl₃ 평판형 유도 결합 플라즈마를 이용한GaAs 건식식각", 한국재료학회지, 13권, 4호, 266, 2003.