한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 36, No. 5, 2003.
<연구논문>

BCl_3 기반 가스를 이용한 GaAs의 고밀도 평판형 유도결합 플라즈마 식각

임완태[a], 백인규[a], 유승열[a], 이제원[a*], 조관식[a], 전민현[a], S. J. Pearton[b]

[a]인제대학교 나노공학부/나노기술 응용연구소
[b]Department of Materials Sci. and Eng., University of Florida, Gainsville, FL 32611, USA

High Density Planar Inductively Coupled Plasma Etching of GaAs in BCl_3-based Chemistries

Wantae Lim[a], Inkyoo Baek[a], Seungryul Yoo[a], Jewon Lee[a*], Guan Sik Cho[a], Minhyun Jeon[a], S. J. Pearton[b]

[a]School of Nano Engineering/Institute of Nano-Technology Applications, Inje University, Gimhae, Kyoung-Nam, 621-749, Korea (ROK)
[b]Department of Materials Sci. and Eng., University of Florida, Gainsville, FL 32611, USA

(Received 25 August 2003 ; accepted 30 September 2003)

Abstract

평판형 유도결합 플라즈마 식각장비(inductively coupled plasma etcher)를 이용하여 각종 공정조건들에 따른 GaAs의 식각특성을 연구하였다. 공정변수들은 ICP 소스파워(0-500 W), RIE 척파워(0-150 W), 가스종류(BCl_3, BCl_3/Ar, BCl_3/Ne) 및 가스혼합비였다. BCl_3 가스만을 이용하여 GaAs를 식각한 경우보다 25%의 Ar이나 Ne 같은 불활성 기체를 혼합한 15BCl_3/5Ar, 15BCl_3/5Ne 가스를 이용한 경우의 식각률이 더 우수한 것을 확인하였다. 그리고 50% 이하의 Ar이 혼합된 BCl_3/Ar의 경우는 높은 식각률 (>4,000 Å/min)과 평탄한 표면(RMS roughness : <2 nm)을 얻을 수 있었지만 지나친 양(>50%)의 Ar의 혼합은 오히려 표면을 거칠게 하거나 식각률을 떨어뜨리는 결과를 가져왔다. 그리고 20 sccm BCl_3, 100 W RIE 척파워, 300 W ICP 소스파워, 공정압력이 7.5 mTorr인 조건에서의 GaAs의 식각결과는 아주 우수한 특성(식각률: ~ 4,000 Å/min, 우수한 수직측벽도: >87°, 평탄한 표면: RMS roughness : ~0.6 nm)을 나타내었다.

Keywords : ICP (유도 결합 플라즈마), GaAs, Dry etching (건식 식각)

1. 서 론

최근 미세구조의 크기가 sub-마이크론 이하까지 감소됨에 따라 높은 식각 균일도와 빠르고 정확한 식각률을 요구하는 공정 기술이 점점 더 중요한 문제로 부각되고 있다[1-5]. 낮은 압력에서 고밀도 전하를 갖는 플라즈마의 특성연구가 반도체 제조공정에서 큰 관심을 가지게 되어 현재 활발하게 진행되고 있다. 전자가속 공명장치(electron cyclotron resonance)를 이용한 식각공정은 높은 이온밀도와 낮은 이온에너지를 발생시켜 식각률을 높일 수 있지만 플라즈마 매칭이 어렵고, 마그넷을 통해 가속된 이온이 반응기내의 샘플에 국부적으로 영향을 미쳐 식각균일도가 떨어진다는 단점이 있다[6-10]. 이러한 결과는 결국 소자의 전기적인 특성을 저하시킬 수 있다[11-13]. 따라서 이온밀도와 이온에너지를 독립적으로 조절할 수 있고 소자의 식각균일도가 우수한 고밀도 유도결합 플라즈마 장비(ICP etcher system)를 이용한 공정기술 개발이 더욱 선호되고 있다[14-17]. 평판형 유도결합 플라즈마 장비는 실린더형 유도결합 플라즈마(cylindrical ICP) 장비보다 플라즈마 소스의 형태를 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다. 특히 본

*Corresponding author. E-mail : jwlee@inje.ac.kr

연구에 사용된 평판형 유도결합 플라즈마 장비는 RIE 척파워 인가없이 낮은 ICP 소스파워(<300 W)에서도 플라즈마의 발생이 쉬워 전기적인 손상(항복전압 감소, 컨덕턴스 감소)에 민감한 화합물 반도체 소자 식각공정개발에 큰 관심을 불러 일으키고 있다.

이번 연구에서는 평판형 유도결합 플라즈마를 이용하여 전자소자(HBT, HEMT, MOSFET 등) 및 광소자(LED, laser 등) 구조에 널리 사용되고 있는 GaAs의 건식식각 결과를 보고할 것이다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 GaAs 웨이퍼는 Czochralski 방법을 이용하여 (100) 방향으로 성장하였고 도핑은 하지 않았다. 식각은 (주)클라이오텍과 본 연구진이 공동으로 개발하여 만든 평판형 ICP 장비(모델명 APE 510)로 하였다[18]. 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°C)을 유지하였다. 공정중에는 BCl_3 가스의 응축을 막기위해 가스 라인은 열선을 이용하여 항상 40°C 이상을 유지하였다. 실험은 1 μm 두께의 감광액(photoresist)으로 패턴된 1×1 cm^2 크기의 GaAs 샘플을 어노다이징(anodizing)된 알루미늄 캐리어 위에 진공 그리스로 고정한 상태로 진행하였다. 이때 알루미늄 캐리어는 클램프를 사용하여 고정하였고, 총 20 sccm(standard cubic centimeters per minute)의 BCl_3/Ar, BCl_3/Ne 혼합가스를 MFC(mass flow controller)를 통해 반응기내로 유입하였다. ICP 소스파워(0-500 W), RIE 척파워(0-150 W)을 변화시키며 실험하였고, 공정 중 플라즈마 상태를 in-situ로 관찰하기 위해 광학발광 분광기(Optical Emission Spectroscopy, OES)를 사용하였다. 식각 공정 후 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)과 원자력간 현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)으로 표면 분석을 하였다. 또 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)를 이용하여 식각후 표면에 남아 있는 잔류성분을 연구하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 RIE 척파워(100 W), ICP 소스파워(300 W), 공정압력(7.5 mTorr)을 고정시킨 상태에서 Ar의 혼합비(BCl_3/Ar)에 따른 GaAs의 식각률과 RMS (Root Mean Square) 표면 거칠기를 나타낸 그래프

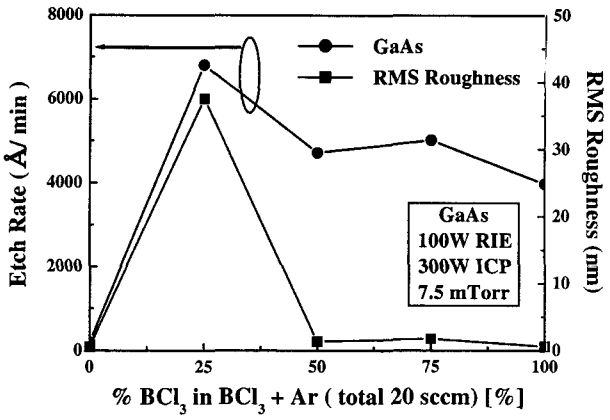

Fig. 1. Etch rates and RMS roughness of GaAs Semiconductors as a function of % BCl_3 in BCl_3/Ar discharges (100 W RIE chuck power, 300 W ICP source power, 7.5 mTorr).

이다. 100% BCl_3(20 sccm BCl_3)를 사용한 경우보다 BCl_3에 75% 이하의 Ar이 혼합된 경우 GaAs의 식각률이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 하지만 100% Ar(20 sccm Ar)을 사용한 경우는 식각이 거의 되지 않았다. 이 결과로부터 GaAs 반도체 소자 식각시 BCl_3에 불활성 기체인 Ar이 혼합됨으로써 GaAs의 화학적인 식각(BCl_3가 electronegative 가스이므로) 을 보조해주는 역할을 하여 GaAs의 식각률을 증가시킨다는 것을 알 수 있었다. 50% 이하의 Ar 혼합은 식각후 표면 거칠기 정도의 저하없이 GaAs의 식각률을 증가시켰으며 플라즈마의 안정에도 기여하였다. 하지만 75% Ar이 혼합된 가스의 경우는 소자의 식각률은 상당히 높았지만(~7,000 Å/min) 반응성 BCl_3 가스에 Ar 이온 보조효과가 너무 과다하여 식각후 GaAs 표면이 거칠어졌다 (RMS 표면거칠기 : 37.56 nm). 이러한 결과는 결국 소자에 전기적인 손상(damage)을 유발할 수도 있다. 따라서 소자의 식각률도 높이면서 특성훼손을 줄일 수 있는 최적의 가스 혼합비를 찾는 것이 아주 중요한 문제다. 위와 같은 공정조건에서 Ne의 혼합비(BCl_3/Ne)에 따른 GaAs의 식각공정 역시 50% 이하의 Ne이 혼합된 경우는 GaAs의 식각률과 RMS 표면 거칠기가 우수하였고 지나친 양의(>50%) Ne이 혼합된 경우는 식각이 거의 되지 않거나 식각표면이 매우 거친 Ar 경우와 비슷한 결과를 나타내었다.

RIE 척파워를 100 W, 공정압력을 7.5 mTorr로 고정시킨 상태에서 20 sccm BCl_3, 15BCl_3/5Ar, 15BCl_3/5Ne 가스를 사용하여 ICP 소스파워에 따른 GaAs의 식각률과 자기 유도된(self-induced)-dc 바이어스 데이터를 그림 2에 나타내었다. ICP 소스파워가 0-500 W로 변하면 반응기내의 플라즈마 밀도가 증가

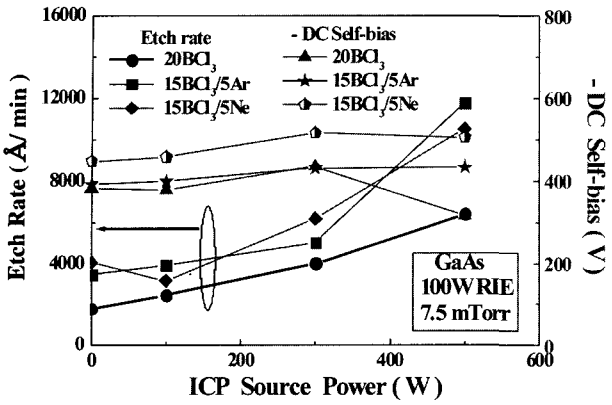

Fig. 2. Etch rates and negatively induced dc self-bias of GaAs semiconductor as a function of ICP source power in 20 BCl_3, 15BCl_3/5Ar, 15BCl_3/5Ne (100 W IRE chuck power, 7.5 mTorr).

하여 GaAs의 식각률을 증가시켰다. 특히 ICP 소스 파워가 300에서 500 W로 증가하면 GaAs의 식각률도 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 플라즈마 이온밀도의 증가는 공정중 광학발광 분광기(OES)를 이용하여 In-situ로 확인하였다(그림 4). 이때, ICP 소스파워가 증가해도 자기 유도된 - dc 바이어스는 거의 변화하지 않았다.

그림 3에서는 ICP 소스파워(300 W), 공정압력(7.5 mTorr)을 고정시킨 상태에서 20 sccm BCl_3, 15BCl_3/5Ar, 15BCl_3/5Ne 가스를 사용하여 RIE 척파워에 따른 GaAs의 식각률과 자기 유도된 - dc 바이어스 데이터를 나타내었다. RIE 척파워가 0-150 W로 변하면 자기 유도된 - dc 바이어스가 증가하여 샘플에 충돌하는 이온들의 에너지를 증가시켜 식각률을 높이는 역할을 하였다. 특히 20 sccm BCl_3와 15BCl_3/5Ar 가스의 경우는 RIE 척파워를 인가하지 않고 300 W ICP 소스파워만으로도 GaAs의 식각

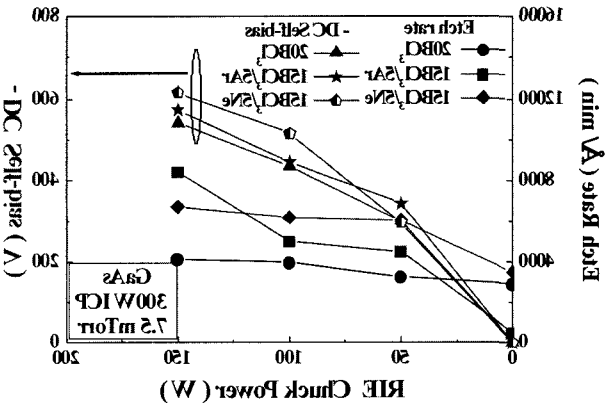

Fig. 3. Etch rates and negatively induced dc self-bias of GaAs semiconductor as a function of RIE chuck power in 20 BCl_3, 15BCl_3/5Ar, 15BCl_3/5Ne (300 W ICP source power, 7.5 mTorr).

률이 약 3000 Å/min을 나타내었다. 일반적으로 RIE 척파워는 이온에너지를 ICP 소스파워는 이온밀도를 조절할 수 있다. 따라서, 위의 결과에서처럼 0 W RIE 척파워에서는 이온에너지를 현저하게 감소시켜 전기적인 손상에 민감한 소자의 식각공정, 표면 클리닝과 같은 박막제거 공정에도 아주 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

20 sccm BCl_3 가스를 사용하고 RIE 척파워와 ICP 소스파워에 따른 OES 데이터를 그림 4에서 보여주고 있다. RIE 척파워가 증가해도 반응기내 발광하는 빛의 세기는 거의 변화가 없었다. 이 결과는 RIE 척파워가 증가해도 플라즈마 밀도에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 정성적으로 말해준다. 반면 ICP 소스파워의 변화(0-500 W)는 반응기내에 발광하는 빛의 세기에 영향을 주었다. ICP 소스파워가 0-100 W로 증가한 경우에는 빛의 세기가 거의 변화하지 않았지만 100-300 W, 300-500 W로 파워가 증가함에 따라 발광하는 빛의 세기가 점점 더 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, ICP 소스파워가 최소 100 W 이상 되어야지 비로소 고밀

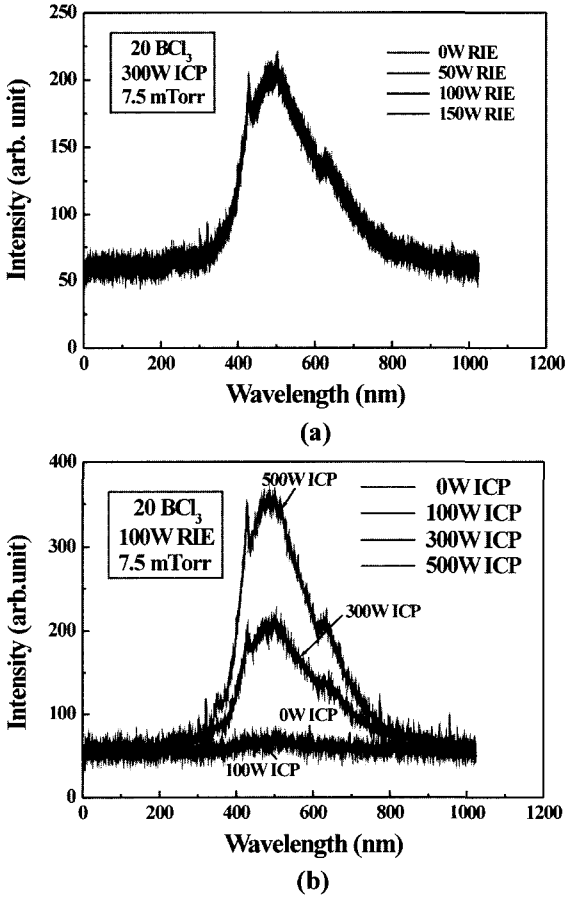

Fig. 4. OES data spectra from BCl_3 discharges as a function of (a) RIE chuck power or (b) ICP source power.

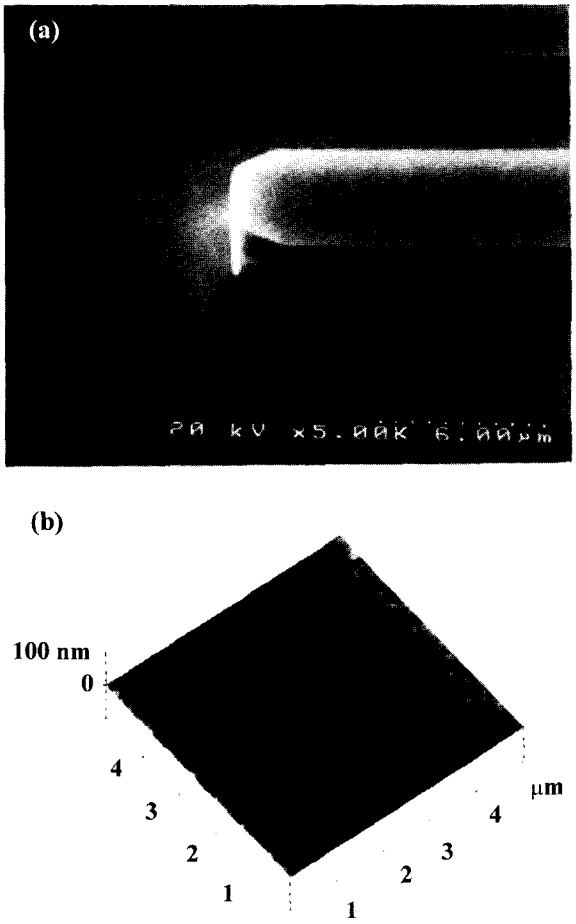

Fig. 5. (a) SEM and (b) AFM images of etched GaAs surface at 20 sccm BCl_3, 100 W RIE chuck power, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

도 유도결합 플라즈마가 발생 된다는 것을 알 수 있었다. 그림 2와 3의 식각률 데이터와 그림 4의 OES 데이터를 통해 평판형 유도결합 플라즈마 장비는 이온에너지(RIE 척파워의 변화에 따라)와 이온밀도(ICP 소스파워의 변화에 따라)를 독립적으로 조절할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

20 sccm BCl_3, 100 W RIE 척파워, 300 W ICP 소스파워, 7.5 mTorr의 공정조건에서 GaAs를 3분간 식각한 후 찍은 SEM 사진과 AFM 이미지를 그림 5에 나타내었다. 총 식각깊이는 1.2 μm이고 GaAs 대 PR의 선택도는 3.8:1을 나타내었다. 식각된 GaAs는 깨끗한 표면과 우수한 수직측벽도(>87°), 그리고 평탄한 표면(RMS roughness : 0.57 nm)을 얻을 수 있었다. 이때 식각하지 않은 GaAs의 RMS 표면 거칠기는 0.39 nm였다.

그림 6에서는 RIE 척파워(100 W), ICP 소스파워(300 W), 공정압력(7.5 mTorr)을 고정시킨 상태에서 $5BCl_3/15Ar$ 가스를 사용하여 GaAs를 식각한 후 찍은 SEM 사진을 나타내고 있다. 식각후의 GaAs

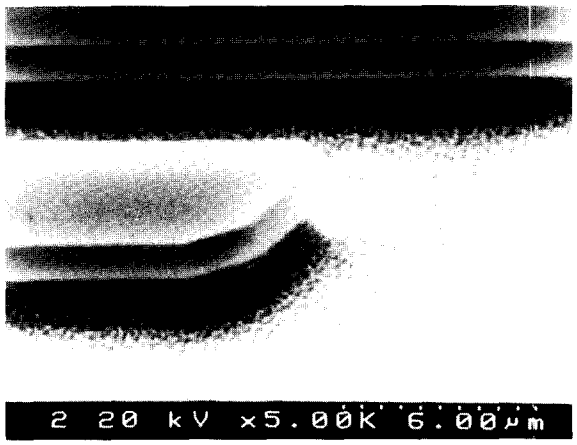

Fig. 6. SEM image of etched GaAs surface at $5BCl_3/15Ar$, 100 W RIE chuck power, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

의 표면은 매우 거칠었으며(RMS roughness : 37.56 nm) 패턴이 형성된 표면 아랫부분에 상당한 양의 언더컷(undercut)이 일어난 것을 확인할 수 있었다. BCl_3/Ar 가스를 이용한 식각공정 중에는 주로 PR이나 BCl_x와 같은 식각부산물이 식각된 표면을 패시베이션(passivation)시켜서 아주 우수한 비등방성인 특징을 지내게 된다. 주로 이러한 역할은 BCl_3 가스가 한다. 하지만 그림 6의 공정조건($5BCl_3/15Ar$)에서는 GaAs의 표면을 패시베이션 할 만큼 BCl_3 가스양이 충분하지 못하였다. 그 결과 식각된 표면이 매우 거칠었으며, 또 undercut의 원인이 되었다.

XPS를 통해 식각 후의 GaAs의 표면에 남아있는 잔류성분을 분석하였다(그림 7). BCl_3 플라즈마에 3분간 노출되었지만 식각된 GaAs의 표면에는 Cl과 같은 반응성 가스는 거의 발견되지 않았다. 따라서 식각된 GaAs 표면 역시 화학적으로도 매우 깨끗하다는 것을 입증하였다. 그리고 식각 후, GaAs 표면

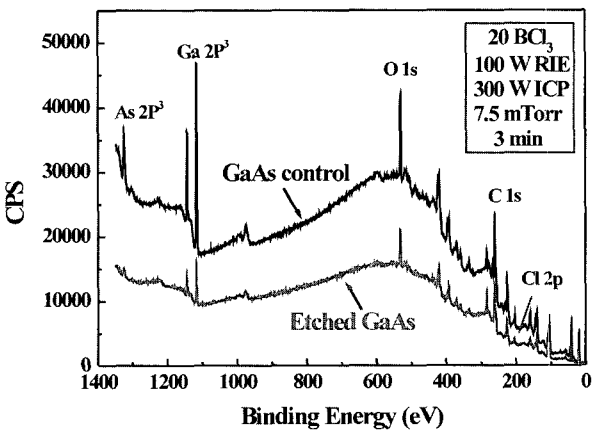

Fig. 7. XPS data of etched GaAs surface at 20 sccm BCl_3, 100 W RIE chuck power, 300 W ICP source power, 7.5 mTorr.

의 Ga과 As의 화학정량(stoichiometry)이 식각전과 비교해보았을 때 거의 변화가 없었다. 따라서 BCl_3 가스만을 사용하여 GaAs를 식각한 경우는 Ga과 As의 선택적 손실(preferential loss)을 일으키지 않고 거의 1:1의 식각률을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

평판형 유도결합 플라즈마를 이용하여 RIE 척파워, ICP 소스파워, 가스종류 및 혼합비에 따른 GaAs의 건식식각 결과를 분석하였다. RIE 척파워와 ICP 소스파워의 증가는 GaAs의 식각률을 증가시킨다는 것을 알았다. 또, 50% 이하의 Ar을 혼합한 BCl_3/Ar 가스를 사용하여 GaAs를 식각한 경우는 평탄한 표면(<2 nm)과 높은 식각률(>4000 Å/min)을 얻을 수 있었다. 그러나 75%의 Ar이 혼합된 $5BCl_3$/15Ar 가스의 경우는 PR이나 BCl_x와 같은 식각부산물이 표면을 충분하게 패시베이션시키지 못해 undercut의 요인이 되었다. 20 sccm BCl_3, 100 W RIE 척파워, 300 W ICP 소스파워, 7.5 mTorr의 공정조건에서의 GaAs 식각결과는 평탄한 표면(RMS roughness: ~0.6 nm)과 우수한 수직측벽도(>87°)를 얻을 수 있었다. 그리고 본 연구에 사용된 PICP 장비는 RIE 척파워의 보조없이 낮은 ICP 소스파워만으로도 플라즈마를 발생시킬 수 있어 손상에 민감한 화합물 반도체 소자 식각이나 표면 클리닝, PR 제거(ashing)와 같은 공정에도 효과적으로 이용 가능 할 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. H. S. Kim, G. Y. Yeom, J. W. Lee and T. I. Kim, Thin Solid Films, 341 (1999) 180.
2. 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, Appl. Surface Science, 143 (1999) 174.
3. P. G. Jung, W. T. Lim, G. S. Cho, M. H. Jeon, J. Y. Lim, J. W. Lee, K. S. Cho, J. Korean Vacuum Society, 11 (2002) 113.
4. J. Hong, J. W. Lee, C. R. Abernathy, E. S. Lambers, S. J. Pearton, R. J. Shul and W. S. Hobson, J. of Vac. Sci. Technol., A 16 (1998) 1497.
5. J. W. Lee, K. D. Mackenzie, D. Johnson, R. J. Shul, S. J. Pearton, C. R. Abernathy and F. Ren, Solid State Electronics, 42 (1998) 1027.
6. B. H. O, J. S. Jeong, S. G. Park, Surface and Coating Technology 120 (1999) 752.
7. K. K. Ko and S. W. Pang, J. Electrochem. Soc. 142 (1995) 3945.
8. F. Ren, J. W. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, R. J. Shul, C. Constantine and C. Barratt, Semiconductor Sci. & Technol., 12 (1997) 1154.
9. K. N. Lee, J. W. Lee, J. Hong, C. R. Abernathy, S. J. Pearton and W. S. Hobson, J. of Electronic Materials, 26 (1997) 1279.
10. S. B. Lee, H. G. Park, S. H. Lee, J. Korean Institute of Electrical and Electronic Material engineer. 11 (1998) 261.
11. K. Petter, T. Kipp, Ch. Heyn, D. Heitmann and C. Schuller, Appl. Phys. Lett 81 (2002) 592.
12. R. J. Shul, A. J. Howard, C. B. Vartuli, P. A. Barnes and W. Seng, J. Vac. Sci. Technol. A 14 (1996) 1102.
13. J. W. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, F. Ren, C. Constantine and C. Barratt, Solid State Electronics, 42 (1998) 733.
14. J. W. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, F. Ren, W. S. Hobson, R. J. Shul, C. Constantine and C. Barratt, J. Electrochemical Society, 144 (1997) 1417.
15. R. R. Stradtmann, J. W. Lee, C. R. Abenathy, and S. J. Pearton, J. Electrochemical Society, 143 (1996) L119.
16. J. W. Lee, D. Hayes, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, W. S. Hobson and C. Constantine, J. of Electrochem. Soc. 144 (1997) L245.
17. J. W. Lee, R. J. Shul, G. A. Vawter, C. R. Abernathy, S. J. Pearton and Y. B. Hahn, Jpn. J. Appl. Phys., 42 (2003) 38.
18. W. T. Lim, I. K. Baek, P. G. Jung, J. W. Lee, G. S. Cho, J. I. Lee, K. S. Cho and S. J. Pearton, Korean J. Materials Research, 13 (2003) 266.