

평판형 고밀도 유도결합 BCl_3 플라즈마를 이용한 AlGaAs와 InGaP의 건식식각

백인규^a, 임완태^a, 유승열^a, 이제원^{a*}, 전민현^a, 박원욱^a, 조관식^a, S. J. Pearton^b

^a인제대학교 나노공학부/나노기술 응용연구소

^bDepartment of Materials Sci. and Eng., University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA

Dry Etching of AlGaAs and InGaP in a Planar Inductively Coupled BCl_3 Plasma

Inkyoo Baek^a, Wantae Lim^a, Seungryul Yoo^{a*}, Jewon Lee^a, Minhyon Jeon^a,
 Wonwook Park^a, Guan Sik Cho^a, S. J. Pearton^b

^aSchool of Nano Eng./Institute of Nano-Technology Applications, Inje Univ. Gimhae,
 Kyung-Nam, 621-749, Korea (ROK).

^bDepartment of Materials Sci. and Eng., University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA.

(Received 1 July 2003 ; accepted 14 August 2003)

요 약

BCl_3 고밀도 평판형 유도결합 플라즈마(High Density Planar Inductively Coupled Plasma)를 이용하여 AlGaAs와 InGaP의 건식식각에 대하여 연구하였다. 본 실험에서는 ICP 소스파워(0~500 W), RIE 척 파워(0~150 W), 공정압력(5~15 mTorr)의 변화에 따른 AlGaAs와 InGaP의 식각률, 식각단면 그리고 표면 거칠기 등을 분석 하였다. 또, 공정 중 OES(Optical Emission Spectroscopy)를 이용하여 in-situ로 플라즈마를 관찰 하였다. BCl_3 유도결합 플라즈마를 이용한 AlGaAs의 식각결과는 우수한 수직측벽도와(>87°) 깨끗하고 평탄한 표면(RMS roughness = 0.57 nm)을 얻을 수 있었다. 반면, InGaP의 경우에는 식각 후 표면이 다소 거칠어진 것을 확인할 수 있었다. 모든 공정조건에서 AlGaAs의 식각률이 InGaP 보다 더 높았다. 이는 BCl_3 유도결합 플라즈마를 이용하여 InGaP를 식각하는 동안 InCl_x 라는 휘발성이 낮은 식각부산물들이 형성되어 나타난 결과이다. ICP 소스파워와 RIE 척파워가 증가하면 AlGaAs와 InGaP 모두 식각률이 증가하였지만, 공정압력의 증가는 식각률의 감소를 가져왔다. 그리고 OES peak 세기는 공정압력과 ICP 소스파워의 변화에 따라서는 크게 변화하였지만 RIE 척파워에 따라서는 거의 영향을 받지 않았다.

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

1. 서 론

AlGaAs/GaAs와 InGaP/GaAs 구조의 건식식각은 금속 반도체 전계효과 트랜지스터(MESFETs), 이중 접합 양극성 트랜지스터(HBTs), 고속전자 이동도 트랜지스터(HEMTs), 발광다이오드(LEDs), 레이저 등과 같은 GaAs 기반소자 제작에 있어서 매우 중요하다¹⁻⁷⁾. InGaP/GaAs는 AlGaAs/GaAs 구조에 비

해서 신뢰성, 잡음, 에너지효율 면에서 우수한 특징을 나타내고 있다⁸⁾. 현재까지 습식이나 건식식각 기술을 이용하여 InGaP/GaAs 구조의 반도체를 연구해 오고 있지만 평판형 유도결합 플라즈마를 이용하여 식각한 결과는 거의 찾아볼 수 없었다. ICP 소스파워의 변화는 기판상 이온에너지에 거의 독립적으로 플라즈마 밀도를 변화시킬 수 있다. 또한 ICP 소스는 낮은 압력에서 고밀도 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 특히 본 연구에 사용된 평판형 고밀도 유도결합 시스템은 낮은 ICP 소스파워(<400

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

W)에서 RIE 척파워 인가 없이도 플라즈마를 발생하고 유지할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 일반적으로 건식 식각하는 동안 RIE 척파워가 증가하면 높은 에너지를 가진 이온이 샘플에 충돌하여 소자의 성능을 감소시킬 수 있다⁹⁻¹⁸⁾. 이런 문제점은 나노 사이즈의 소자제작에 있어서 더욱 중요한 문제로 여겨질 것이다. 특히 III-V 화합물 반도체 소자들은 이온 에너지에 의한 전기적인 손상¹⁹⁾(항복 전압 감소, 컨덕턴스 감소)에 매우 민감하기 때문에 현재 우리는 공정 시 매우 낮은 RIE 척파워를 이용한 플라즈마 공정에 대해 주목하고 있다.

OES를 이용하여 in-situ로 플라즈마의 특성분석을 하는 것은 매우 실용적이고 흥미로운 분야이다. OES 장비는 타 분석장치에 비하여 간단하며 플라즈마 진단시 공정에 아무런 영향을 주지 않는다는 장점을 가지고 있다²⁰⁾. 본 연구에서는 BCl₃ 고밀도 평판형 유도결합 플라즈마를 이용하여 AlGaAs와 InGaP의 식각결과와 OES data 분석에 대해 보고할 것이다.

2. 실험 방법

연구에 사용된 식각장비는 (주)클라이오텍과 본 연구팀이 공동으로 개발하여 만든 평판형 ICP 시스템(Cliotek's APE510)이었다²¹⁾. RIE 척 부분과 ICP 소스에는 각각 13.56 MHz의 RF 전원이 독립적으로 연결되어 있고 열 교환기를 이용하여 공정 온도는 실온(25°C)을 유지하였다. 총 가스 유입량은 20 sccm, 공정시간은 3분으로 고정시킨 상태에서 ICP 소스파워, RIE 척파워, 공정압력을 변화시키면서 실험하였다. 모든 실험은 1 μm 두께의 감광액(photoresist, PR)으로 패턴된 1×1 cm² 크기의 Al_{0.2}Ga_{0.8}As와 In_{0.5}Ga_{0.5}P 샘플을 어노다이징 된 알루미늄 캐리어 위에 진공 그리스로 붙여서 사용하였다. 또, 공정이 끝난 후 표면을 연구하기 위해 패턴되지 않은 AlGaAs, InGaP bare 샘플도 함께 넣어서 실험하였다. 공정중에는 BCl₃ 가스의 응축을 막기 위해 가스 라인에 열선을 이용하여 항상 40°C 이상을 유지하였다.

공정이 끝난 후 아세톤으로 PR을 제거한 후 표면두께 측정기(Alpha step 200, Tencor Instrument)를 이용하여 식각 깊이를 측정하였고, SEM(Scanning Electron Microscopy : S-4200, Hitachi)과 AFM(Atomic Force Microscopy, MultimodeTM, Digital Instrument)으로 식각단면, 표면 거칠기(RMS roughness) 등의 특성분석을 하였다. 그리고 플라즈마 상태를 관찰하기 위해 OES 장비도 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 20 sccm BCl₃, 100 W RIE 척파워, 공정압력을 7.5 mTorr로 고정시킨 상태에서 ICP 소스파워에 따른 AlGaAs와 InGaP의 식각률과 자기 유도된 (self-induced) -dc 바이어스를 나타낸 그래프이다. ICP 소스파워가 증가함에 따라 AlGaAs와 InGaP의 식각률은 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 AlGaAs의 경우는 0 W ICP 소스파워(100 W RIE 척파워만을 인가한 경우)에서도 식각률이 ~1,600 Å/min인 반면, InGaP의 경우에는 식각되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이때 기판의 온도는 25°C였다. 이 결과는 낮은 RIE 척파워를 인가하여 InGaP를 식각하기 위해서는 최소한의 ICP 소스파워(>100 W)가 필요하다는 것을 말해준다. 위와 같은 공정조건에서 300 W ICP 소스파워를 인가한 경우 InGaP의 식각률이 1,500 Å/min으로 증가하였다. 일반적으로 InGaP/GaAs 소자 식각공정시 1,000~2,000 Å/min의 식각률은 매우 이상적이다. 왜냐하면 소자의 구조특징상 InGaP 층은 3,000 Å 미만이기 때문에 조절이 가능한 적당한 공정시간을 확보하는 것도 중요하기 때문이다. 한편 ICP 소스파워가 증가해도 자기 유도된(self-induced) -dc 바이어스는 크게 변하지 않았다.

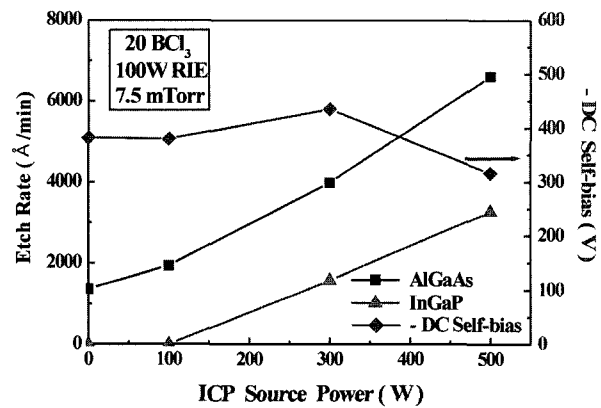


Fig. 1. Etch rates of AlGaAs and InGaP as a function of planar ICP source power at 20 BCl₃, 100 W RIEchuck power and 7.5 mTorr.

그림 2는 20 sccm BCl₃, 300 W ICP 소스파워, 공정압력을 7.5 mTorr로 고정시킨 상태에서 RIE 척파워에 따른 AlGaAs와 InGaP의 식각률과 자기 유도된 (self-induced) -dc 바이어스를 나타낸 그래프이다. AlGaAs와 InGaP 모두 RIE 척파워가 증가함에 따라 식각률이 증가하였다. 이 그래프에서 주목할만한 특징은 0 W RIE 척파워를 인가한 경우, 즉

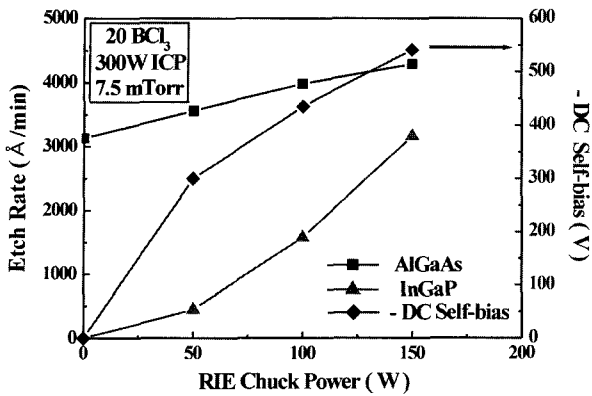


Fig. 2. Etch rates of AlGaAs and InGaP as a function of RIE chuck power at 20 BCl₃, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

낮은 (300 W) ICP 소스파워만으로도 AlGaAs의 식각률이 3,100 Å/min로 높은 식각 결과를 나타내었다는 것이다. 일반적으로 이온밀도는 ICP 소스파워, 이온에너지는 RIE 척파워에 의해 조절된다²²⁾. 따라서, 플라즈마 식각시 이온에너지의 증가는 소자에 전기적인 손상을 초래하므로 RIE 파워를 인가하지 않은 0 W RIE 척파워에서도 높은 식각률을 얻을 수 있었던 AlGaAs의 식각결과는 손상(전기적, 광학적)에 민감한 화합물 반도체 식각 시 아주 유용하게 이용될 수 있을 것이다. InGaP의 경우에는 RIE 척파워가 0~150 W로 변하면 식각률이 0~3,100 Å/min로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그림 1과 그림 2에서 알 수 있듯이 모든 공정조건에서 AlGaAs의 식각률이 InGaP의 경우보다 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 BCl₃ 플라즈마를 이용하여 InGaP을 건식식각하는 동안 AlGaAs(AlCl₃ 끓는점: 183°C, GaCl₃ 끓는점: 201°C, AsCl₃ 끓는점: 130°C)의 경우 보다 상대적으로 휘발성이 낮은 InCl₃(끓는점: 600°C)라는 식각부산물물이 형성되어 나타난 결과이다. 또, 낮은 휘발성은 식각 후 거친표면을 초래한다는 문제점도 가지고 있다²³⁾.

20 sccm BCl₃, 7.5 mTorr의 공정압력에서 ICP 소스파워와 RIE 척파워에 따른 OES 데이터를 그림 3에 나타내었다. ICP 소스파워가 증가함에 따라 발광하는 OES peak 세기가 점점 커지고, 특히 ICP 소스파워가 100 W에서 300 W로 변할 때는 peak 세기가 급속하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 100 W 이하의 ICP 소스파워는 Capacitively Coupled Plasma(CCP) 상태에서 고밀도 유도결합 플라즈마(ICP) 상태로 변화시키기에 충분하지 못한 파워라는 것을 의미한다. 반면 RIE 척파워의 증가는 발광하는 OES peak 세기에 거의 영향을 주지 않았다. ICP 소스파워의 증가는 반응기내의 이온밀

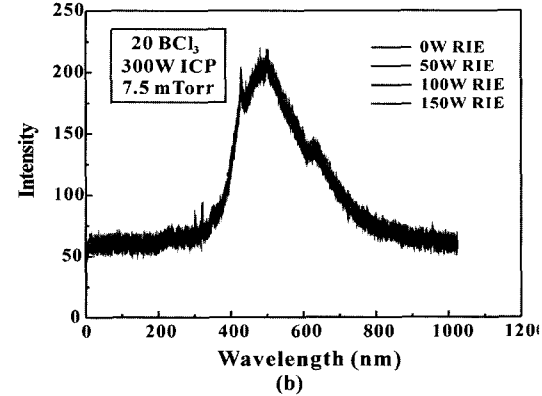
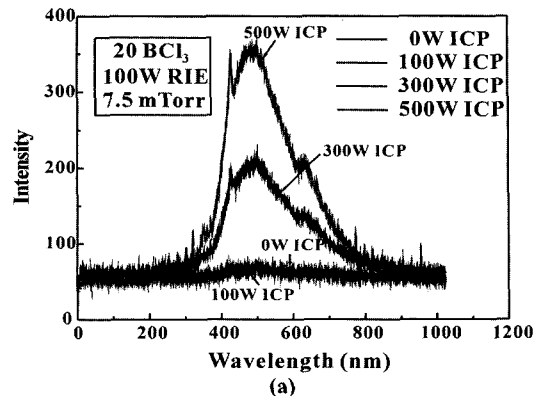


Fig. 3. OES peak intensities with different (a) planar ICP source powers and (b) RIE chuck powers at 20 BCl₃, 300 W ICP source power and 7.5 mTorr.

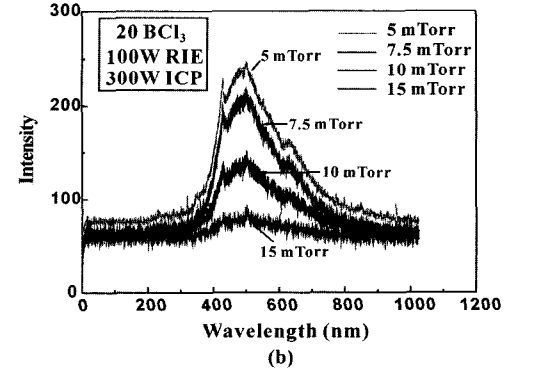
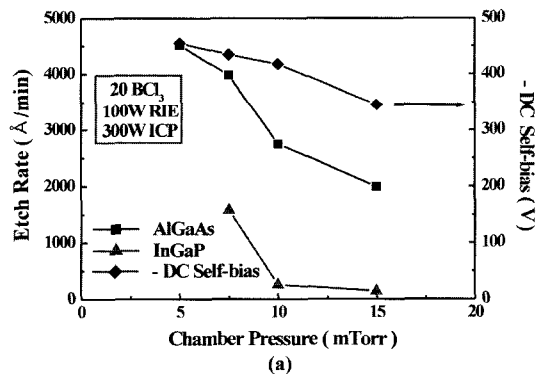


Fig. 4. (a) Etch rates and (b) OES peak intensities of AlGaAs and InGaP as a function of chamber pressure at 20 BCl₃, 100 W RIE chuck power and 300 W ICP source power.

도를 증가시키는 반면 RIE 척파워의 증가는 플라즈마의 이온밀도를 조절하는데 큰 역할을 하지 않는다는 것을 그림 3으로부터 알 수 있었다.

공정압력의 변화에 따른 AlGaAs와 InGaP의 식각률, 자기 유도된 (self-induced) -dc 바이어스 그리고 OES 결과를 그림 4에 나타내었다. 공정압력이 5 mTorr에서 15 mTorr로 변할 때 -dc 바이어스와 OES peak 세기가 감소하였다. 공정압력의 증가는 발광하는 플라즈마 빛의 세기를 나타내는 peak과 이온에너지를 의미하는 자기유도된 (self-induced) -dc 바이어스가 동시에 감소함에 따라 그 영향으로 AlGaAs와 InGaP의 식각률이 떨어지는 결과를 가져왔다.

그림 5에서는 식각 후에 찍은 AlGaAs와 InGaP의 SEM 사진을 나타내었다. 이때 공정조건은 20 sccm BCl₃, 100 W RIE 척파워, 300 W ICP 소스파워, 압력은 7.5 mTorr였다. AlGaAs와 InGaP의 총 식각 깊이는 각각 1.2 μm, 0.47 μm였고, 식각 후 AlGaAs는 깨끗한 표면과 우수한 수직측벽도를(>87°) 나타낸 반면 InGaP의 경우는 다소 거친 표면과

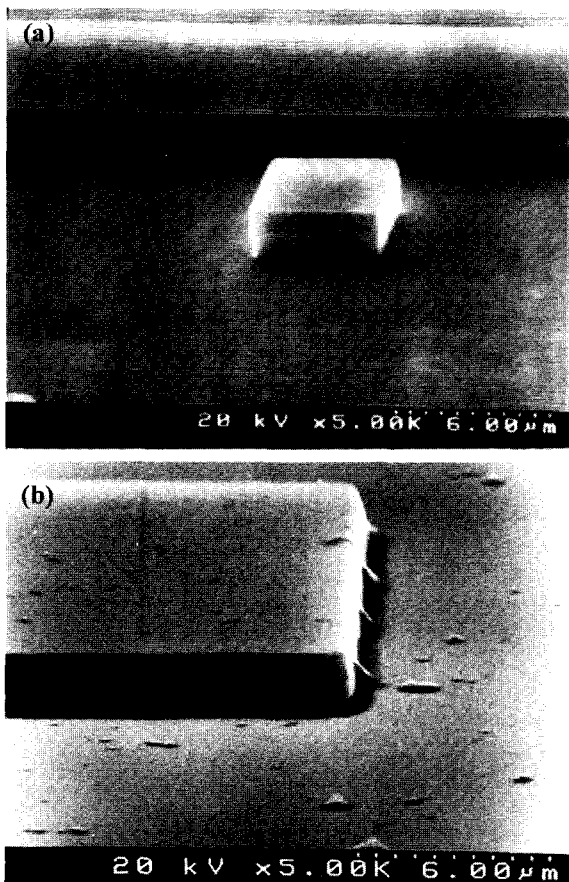


Fig. 5. SEM micrographs of (a) AlGaAs and (b) InGaP (bottom) etched at 20 BCl₃, 7.5 mTorr, 100 W RIE chuck power and 300 W ICP source power.

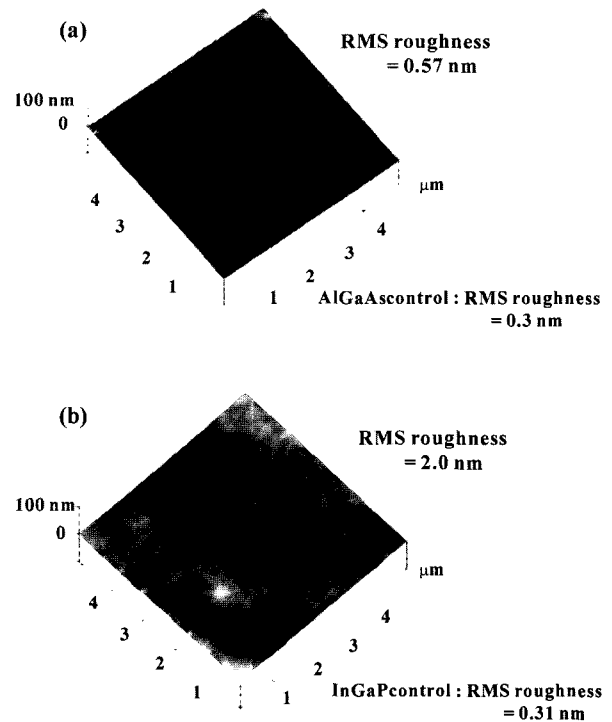


Fig. 6. AFM images of (a) AlGaAs and (b) InGaP etched at 20 BCl₃, 7.5 mTorr, 100 W RIE chuck power and 300 W ICP source power.

(RMS roughness = 2 nm) 약간의 언더컷(undercut)이 일어난 것을 확인할 수 있었다. Bare 샘플은 AFM을 이용하여 표면 거칠기를 측정하는데 사용하였다. 총 스캔 면적은 5×5 μm²이었다. 식각하기 전의 AlGaAs와 InGaP의 RMS 표면 거칠기는 각각 0.39와 0.31 nm였고, 식각 후의 RMS 표면 거칠기는 각각 0.57과 2 nm였다(그림 6). BCl₃ 플라즈마를 이용하여 화합물 반도체 소자를 식각할 때, AlGaAs 샘플은 식각 후 아주 우수한 결과를 나타낸 반면 InGaP의 경우는 여전히 휘발성이 낮은 식각부산물인 큰 문제점으로 남는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 우리는 인듐(In)을 포함하는 반도체 소자의 식각시 BCl₃에 불활성기체(He, Ne, Ar 등)를 혼합함으로써 물리적인 식각성분을 향상시켰을 경우의 In 기반 반도체소자 식각결과를 계속해서 연구할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 BCl₃ 평판형 고밀도 유도결합 플라즈마를 이용하여 AlGaAs와 InGaP의 건식식각 결과를 나타내었다. ICP 소스파워, RIE 척파워, 공정압력의 변화에 따라서 AlGaAs, InGaP 반도체의 식각률, -dc 바이어스, 식각 후 표면 그리고 OES 데

이터를 분석하였다. ICP 소스파워와 공정압력의 변화는 OES의 peak 세기에 영향을 미쳤고, RIE 척파워에 따라서는 거의 변하지 않았다. 특히 20 sccm BCl₃, 낮은 ICP 소스파워(300 W), 7.5 mTorr의 공정압력에서 RIE 척파워를 인가하지 않은 경우, AlGaAs의 식각률이 3,100 Å/min로 우수한 결과를 나타내었다. 이 결과는 전기적인 손상에 민감한 화합물 반도체 소자의 식각시 이온에너지를 최소화함으로써 우수한 식각결과를 요구하는 건식식각 공정에 유용하게 이용될 것이다. InGaP의 경우는 휘발성이 낮은 식각부산물이 여전히 문제점으로 남아서 AlGaAs 보다 식각률이 떨어지는 것을 확인하였다. ICP 소스파워와 RIE 척파워의 증가는 AlGaAs, InGaP의 식각률을 증가시켰고, 공정압력이 변하면 (5~15 mTorr) 식각률은 감소하였다. SEM, AFM을 이용한 표면분석은 AlGaAs는 매우 우수하였지만 InGaP의 경우는 다소 거칠었다.

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 공동실험 실습관의 류호정 박사께 감사드립니다.

참고문헌

1. T. Yoshikawa, S. Kohmoto, S. Sugimoto, K. Askawa, *Electronics and Communications in Japan, Part 2 (Electronics)*, 77 (1994) 24.
2. A. Matsutani, F. Koyama, K. Iga, *Jap. J. Appl. Phys.*, 33 (1994) 6737.
3. O. Wada, *Microelectronics Reliability*, 39 (1999) 1839.
4. K. Mochizuki, T. Oka, K. Ouchi, T. Tanoue, *Solid-State Electron.*, 43 (1999) 1425.
5. T. Low, T. Shirley, C. Hutchison, G. Essilifie, W. Whitely, B. Yeats, D. D'Avanzo, *Solid-State Electron.*, 43 (1999) 1437.
6. F. Ren, F. F. Kopf, J. M. Kuo, J. R. Lothian, J. W. Lee, S. J. Pearton, R. J. Shul, C. Constantine, D. Johnson, *Solid State Electronics*, 42 (1998) 749.
7. J. W. Lee, K. D. Mackenzie, D. Johnson, R. J. Shul, S. J. Pearton, C. R. Abernathy, F. Ren, *Solid State Electronics*, 42 (1998) 1027.
8. Shawn S. H. Hsu, Burhan Bayraktaroglu, Dimitris Pavlidis, *Solid-state Electronics*, Vol. 43, Issue 8 (August 1999) 1429.
9. R. J. Shul, S. J. Pearton, eds., *Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques* (Springer, Berlin, 2000).
10. C. Youtsey, I. Adesida, Chapter 11 in *Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques*, ed R. J. Shul (Springer, Berlin, 2000).
11. R. J. Shul, G. B. McClellan, R. D. Rriggs, D. J. Rieger, S. J. Pearton, C. R. Abernathy, J. W. Lee, C. Constantine, C. Barratt, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 15 (1997) 633.
12. J. W. Lee, M. W. Devre, B. H. Reelfs, D. Johnson, J. N. Sasserath, F. Clayton, D. C. Hays, S. J. Pearton, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 18 (2000) 1220.
13. J. W. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, F. Ren, C. Constantine, C. Barratt, R. J. Shul, *Appl. Phys. Lett.*, 70 (1997) 2410.
14. J. W. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, F. Ren, C. Constantine, C. Barratt, *Solid State Electronics*, 42 (1998) 733.
15. T. Maeda, J. W. Lee, R. J. Shul, J. Han, J. Hong, E. S. Lambers, S. J. Pearton, C. R. Abernathy, W. S. Hobson, *Applied Surface Science*, 143 (1999) 174.
16. J. W. Lee, S. J. Pearton, F. Ren, R. F. Kopf, J. M. Kuo, R. J. Shul, C. Constantine, D. Johnson, *J. of Electrochem. Soc.*, 145 (1998) 4036.
17. K. N. Lee, J. W. Lee, J. Hong, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, W. S. Hobson, *J. of Electronic Materials*, 26 (1997) 1279.
18. J. W. Lee, K. N. Lee, R. R. Stradtman, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, W. S. Hobson, F. Ren, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 15 (1997) 890.
19. S. U. Shin, C. I. Kim, E. G. Jang, *J. of KIEEME*, 14 (2001) 185.
20. J. W. Lee, K. D. Mackenzie, D. Johnson, R. J. Shul, Y. B. Hahn, D. C. Hays, C. R. Abernathy, F. Ren, S. J. Pearton, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 17 (1999) 2183.
21. W. T. Lim, I. K. Baek, P. G. Jung, J. W. Lee, G. S. Cho, J. I. Lee, K. S. Cho, S. J. Pearton, *Korean Journal of Materials Research*, 13 (2003) 266.
22. M. A. Liberman, A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons, (1994) chapter 12.
23. A. Katz, *Indium Phosphide, Related Materials Processing, Technology and Devices*, Artech House (1992).