Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 26, No. 4 (2016) 145-149
http://dx.doi.org/10.6111/JKCGCT.2016.26.4.145

p-ISSN 1225-1429
e-ISSN 2234-5078

Parametric study of inductively coupled plasma etching of GaN epitaxy layer

Byoung Su Choi, Hae Li Park* and Hyun Cho*,†

Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Gyeongnam 50463, Korea
**Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

(Received August 1, 2016)
(Revised August 17, 2016)
(Accepted August 19, 2016)

Abstract The effect of process parameters such as plasma composition, ICP (Inductively Coupled Plasma) source power and rf chuck power on the etch characteristics of GaN epitaxy layer was studied. Cl_2/Ar ICP discharges showed higher etch rates than SF_6/Ar discharges because of the higher volatility of $GaCl_x$ etch products than GaF_x compounds. As the Ar ratio increases in the Cl_2/Ar ICP discharges, the etch anisotropy was enhanced due to the improved physical component of the etching. For both plasma chemistries, the GaN etch rate increased continuously as both the ICP source power and rf chuck power increased, and a maximum etch rate of 251.9 nm/min was obtained at $13Cl_2$/2Ar, 750 W ICP power, 400 W rf chuck power and 10 mTorr condition.

Key words GaN etching, Inductively coupled plasma, Cl_2/Ar and SF_6/Ar, Etch rate, Anisotropy

GaN epitaxy 층의 식각특성에 미치는 공정변수의 영향

최병수, 박해리*, 조현*,†

부산대학교 나노융합기술학과, 경남, 50463
*부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 부산, 46241

(2016년 8월 1일 접수)
(2016년 8월 17일 심사완료)
(2016년 8월 19일 게재확정)

요 약 플라즈마 조성, ICP source power, rf chuck power 등의 공정변수가 GaN epitaxy층의 식각특성에 미치는 영향을 조사하였다. GaF_x 화합물 보다 더 높은 휘발성을 가지는 $GaCl_x$ 식각 생성물 형성이 가능한 Cl_2/Ar 플라즈마가 SF_6/Ar 플라즈마보다 더 높은 식각속도를 나타내었다. 또한, Cl_2/Ar 플라즈마에서 Ar 비중이 증가함에 따라 물리적 식각 기구 활성화로 인해 식각 이방성이 향상됨을 확인하였다. 두 가지 플라즈마 조성 모두에서 ICP source power와 rf chuck power가 증가함에 따라 식각속도가 지속적으로 증가함을 확인하였고, $13Cl_2$/2Ar, 750 W ICP power, 400 W rf chuck power, 10 mTorr 조건에서 최고 251.9 nm/min의 식각속도를 확보하였다.

1. 서 론

III-족 질화물 반도체는 대표적인 wide bandgap 화합물 반도체로서 직접 천이형의 밴드갭 구조를 가져 자외선으로부터 적외선 영역에 걸친 폭넓은 발광대역의 조절이 가능하고, Si, GaAs 등의 기존 반도체 재료보다 구조적 및 열적 안정성이 더 우수한 특성을 나타낸다. III-족 질화물 반도체의 대표적 물질인 GaN는 3.2~3.4 eV의 밴드갭 에너지와 육방정 wurtzite 구조를 가진다. Full coldor display 구현에 필수적인 청색 영역의 발광특성을 나타내므로 발광다이오드(light emitting diodes, LEDs), 레이저 다이오드(laser diodes, LDs) 등의 발광 및 수광소자로 응용이 가능하여 LED TV, 스마트폰, 스마트 패드 등 다양한 디스플레이 기기의 후면발광소자(back light unit, BLU)의 여기 광원으로 널리 활용되고 있다[1-5].

GaN는 청색 발광 특성 외에 기존 Si 반도체에 비해 3배 정도 큰 밴드갭 에너지와 더 우수한 온도 안정성을 활용하여 kV 영역대의 높은 절연파괴전압과 빠른 스위

†Corresponding author
E-mail: hyuncho@pusan.ac.kr

www.kci.go.kr

칭 속도 제공이 가능한 특성을 활용한 전력 반도체 소자로도 응용되고 있다. 기존 Si 기반 전력 반도체 소자에 비해 스위칭 손실과 온도-저항 손실이 낮아 30 % 이상의 에너지 절감이 가능하여 고출력, 고전력용 전력 반도체 소자로의 응용이 계속적으로 확대되고 있는 추세이다. 특히 최근에 전 세계적으로 많은 관심이 집중되고 있는 전기자동차용 저중량 고효율 인버터 모듈(peak power output ~55 kW, 중량 3.9 Kg 이하)용 GaN 전력반도체 개발이 진행되고 있다[6-8].

GaN 광소자 및 전력반도체 소자 제조를 위해서는 이종 기판 상에 성장된 GaN epitaxy 층에 수십 나노미터에서 수 마이크로미터 높이의 이방성 구조를 형성하는 것이 필수적이다. 그러나 GaN 특유의 구조적 및 화학적 안정성으로 인해 습식 식각 공정 공정은 적용이 불가능하고, ion milling, reactive ion etching과 같은 기존 플라즈마 식각공정은 식각속도가 낮아서 공정효율성 문제를 안고 있다. 이에 반해 물리적 식각 요소 및 화학적 식각 요소를 동시에 활용할 수 있는 고밀도 플라즈마 식각(high density plasma etching)은 ion damage를 제어하면서 높은 식각속도와 정밀도로 고이방성 구조물을 형성하는 것이 가능하다[9-11].

본 연구에서는 대표적인 고밀도 플라즈마 식각기술인 유도결합 플라즈마(inductively coupled plasma, ICP) 식각기술을 GaN epitaxy층 식각에 적용하였고, 플라즈마 조성, ICP source power, rf chuck power 등의 공정변수가 GaN 식각속도, 표면조도 및 이방성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험 과정

본 연구의 시편으로는 metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD)법으로 sapphire 기판 위에 성장된 c-축 방향, 두께 ~500 nm의 GaN epitaxy 박막을 사용하였다. 플라즈마 식각은 planar type 유도결합 플라즈마 식각장치를 이용하여 진행하였다. ICP source의 주파수는 13.56 MHz, 최고 용량 1000 W이며, 시편은 13.56 MHz, 최고 450 W의 rf chuck power 인가가 가능한 chuck 위에 위치한 Si carrier wafer 위에 장착하였다. 식각 중 온도 증가로 인한 시편의 변형 또는 손상 방지를 위하여 He 가스로 chuck을 냉각하였다. 두 가지의 혼합가스(Cl_2/Ar 및 SF_6/Ar)를 플라즈마 식각 공정가스로 사용하였고, 총 유량은 15 sccm, 압력은 10 mTorr로 유지하였다. 시편은 AZ 5214 photoresist를 mask로 사용하여 패터닝하였다. 식각 후 stylus profilometery, AFM, FE-SEM 등의 분석 장비를 이용하여 식각속도, 표면조도, 식각 이방성 등을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 Cl_2/Ar 및 SF_6/Ar 유도결합 플라즈마에서 플라즈마 조성이 GaN epitaxy층의 식각속도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 동일한 조성비율과 인가 파워 조건하에서 Cl_2/Ar 플라즈마가 SF_6/Ar 플라즈마보다 더 높은 식각속도를 나타냄을 알 수 있다. 이는 두 가지 플라즈마 내에서 진행된 해리반응(dissociation reaction)에 의해 생성된 염소(Cl) 또는 불소(F) radical과 GaN 표면 간 반응을 통해 생성되는 주요 식각 반응물인 $GaCl_x$ (b.p. 201°C)가 GaF_x(b.p. ~1000°C)에 비해 더 높은 휘발성을 가짐으로 인해 표면으로부터 더 용이하게 제거되기 때문이다. 또한, Ar 가스의 비중이 증가함에 따라 식각속도가 지속적으로 증가하였다. Ar 가스 비중이 증가하게 되면 플라즈마 내에 존재하는 Ar^+ 이온의 밀도가 증가하게 되고, 증가된 Ar^+ 이온들은 시편 표면에 생성된 식각반응물 제거 효율에 직접적인 영향을 미치는 이온포격효과(ion bombardment effect) 증진을 수반함으로써 식각속도가 증가하게 된다.

물리적 식각 기구를 지배하는 이온포격효과 증진이 식각된 구조물의 이방성에 미치는 영향을 Fig. 2에 제시하였다. Ar 가스의 비중이 증가함에 따라 식각된 구조물의 edge line이 선명해지는 동시에 측벽 형상(sidewall profile)이 수직에 가까운 각도로 변화됨을 알 수 있다. Cl_2/Ar 플라즈마에서 Ar 가스 비중을 증가시키면 플라즈마 내에 염소 radical 밀도는 감소하는 반면에 Ar^+ 이온 밀도는 증가하게 된다. 즉, 화학적 식각 요소에 비해 물리적 식각 요소가 더 활성화됨에 따라 식각속도의 종방향 성분은 증진되는 반면에 횡방향 성분은 억제되게 된다. 그 결과 식각 이방성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 ICP source power 증가가 GaN 식각속도에

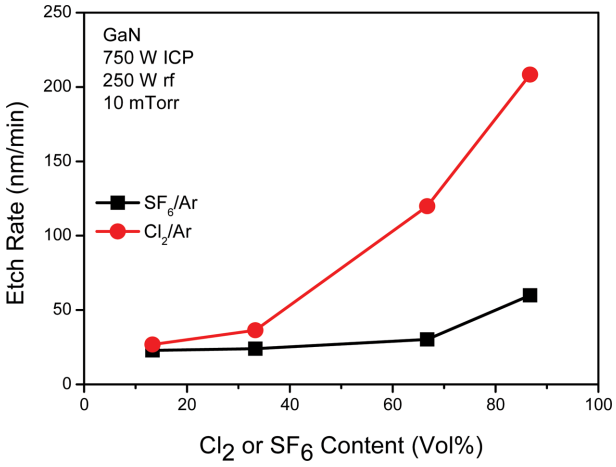

Fig. 1. GaN etch rate as a function of plasma composition in Cl_2/Ar and SF_6/Ar ICP discharges (750 W source power, 250 W rf chuck power, 10 mTorr).

www.kci.go.kr

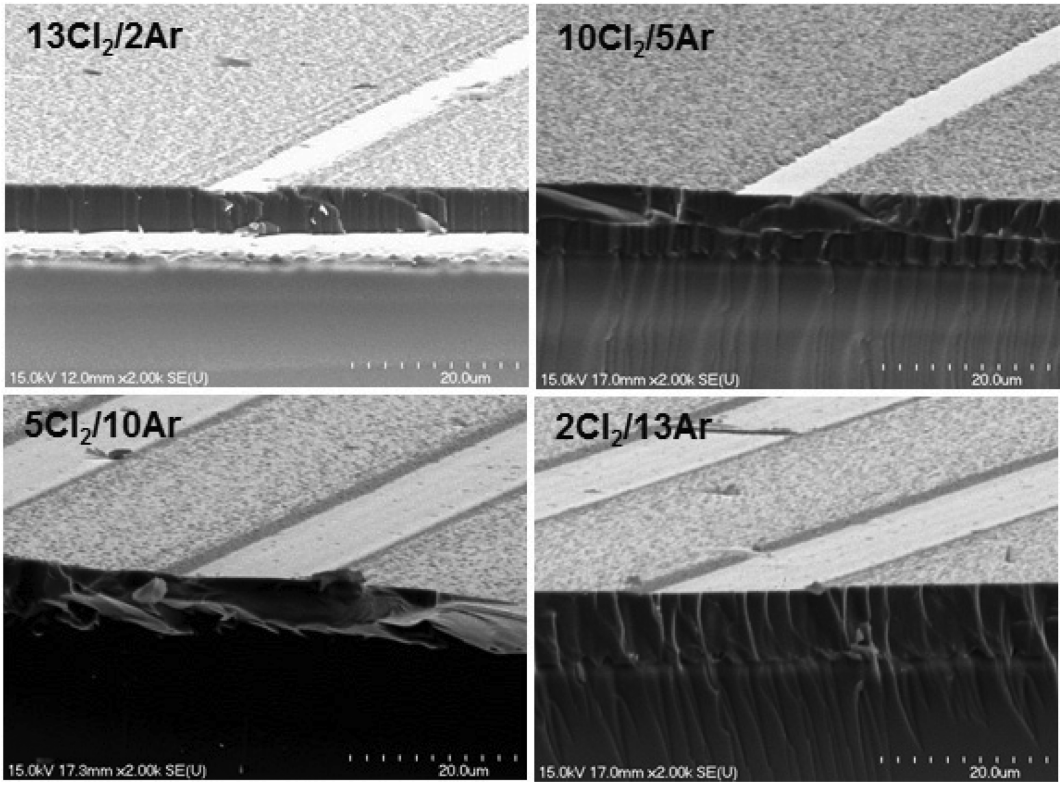

Fig. 2. SEM micrographs of features etched into GaN using Cl_2/Ar ICP discharges with different Ar contents (750 W source power, 250 W rf chuck power, 10 mTorr).

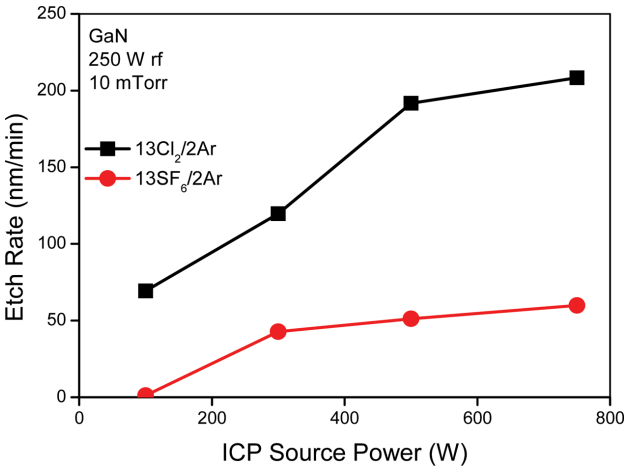

Fig. 3. GaN etch rate as a function of ICP source power in $13Cl_2$/2Ar and $13SF_6$/2Ar ICP discharges (250 W rf chuck power, 10 mTorr).

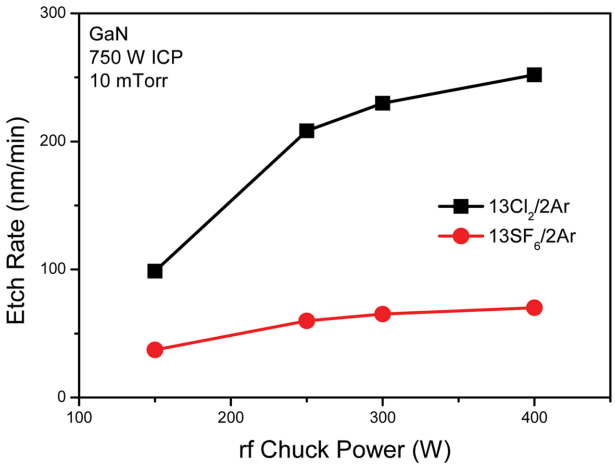

Fig. 4. GaN etch rate as a function of rf chuck power in $13Cl_2$/2Ar and $13SF_6$/2Ar ICP discharges (750 W source power, 10 mTorr).

미치는 영향을 보여주고 있다. Fig. 1에서 가장 높은 식각속도를 나타내었던 두 가지 플라즈마 조성($13Cl_2$/2Ar, $13SF_6$/2Ar)에서 ICP power가 증가함에 따라 GaN 식각속도가 계속적으로 증가함을 알 수 있다. ICP power가 증가함에 따라 해리반응이 촉진되어 플라즈마 내에 존재하는 Cl 또는 F radical의 밀도가 증가하게 된다. 증가된 radical들과 GaN 표면 원자들 간의 활발한 화학적 반응을 통한 식각 반응물($GaCl_x$ 또는 GaF_x) 생성이 증가하게 되고, 생성된 식각 반응물들은 이온포격에 의해 표면으로부터 제거되는 일련의 과정을 통해 식각속도가 증가하는 것으로 해석할 수 있다.

Rf chuck power 증가에 따른 GaN 식각속도 변화를 Fig. 4에 제시하였다. Rf chuck power는 물리적 식각 요소인 이온포격에 참여하는 Ar^+ 이온들의 평균에너지를

www.kci.go.kr

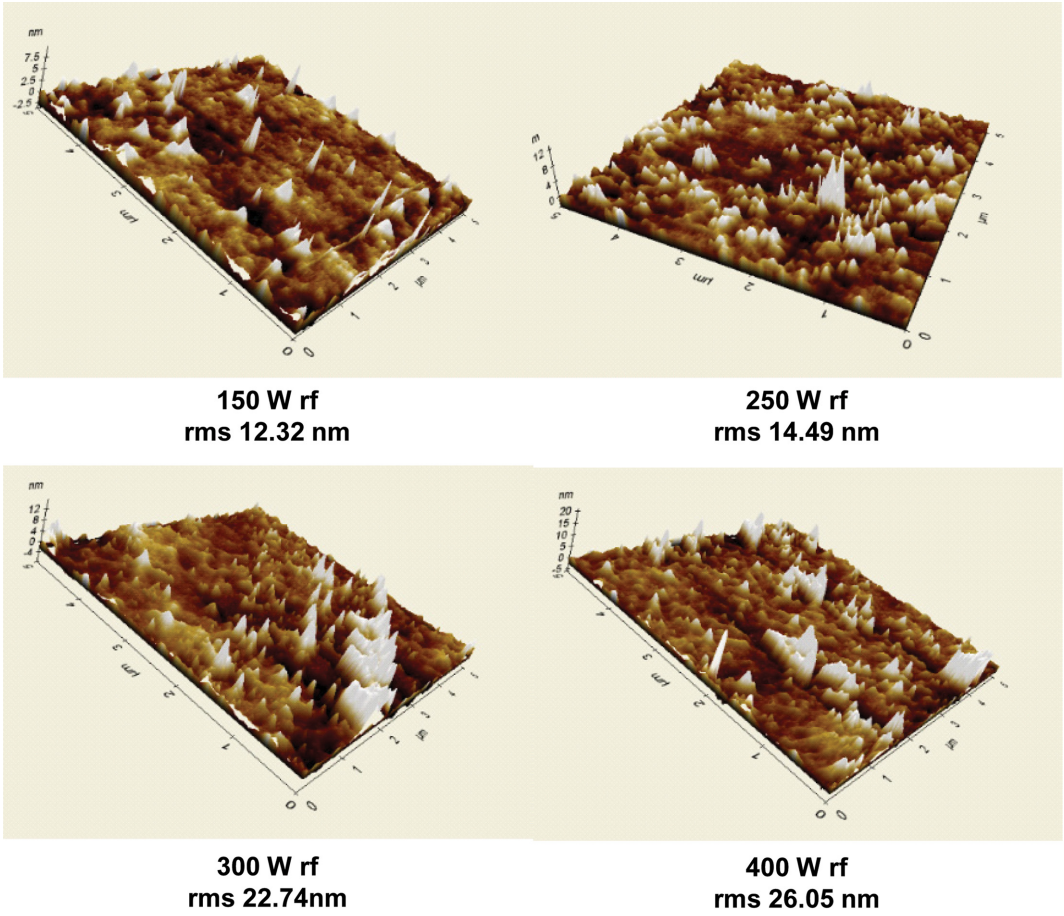

Fig. 5. AFM scan images of GaN etched in $13Cl_2/2Ar$ ICP discharges with different rf chuck powers (750 W source power, 10 mTorr).

지배하는 공정변수로서 Ar^+ 이온들의 평균에너지는 인가해준 rf chuck power에 비례하며 증가하게 된다. Rf chuck power 증가에 의해 Ar^+ 이온들이 충돌을 통해 표면에 전달하는 운동에너지가 증가함에 따라 표면에 형성된 $GaCl_x$ 또는 GaF_x 식각 반응물들이 제거되는 이온포격효과가 증진되는 과정을 통해 GaN 식각속도가 향상됨을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 $13Cl_2/2Ar$ 플라즈마가 $13SF_6/2Ar$ 플라즈마에 비해 현저히 높은 식각속도를 나타내고 있는데, 이는 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 $GaCl_x$ 식각 반응물이 GaF_x 식각 반응물보다 더 높은 휘발성을 가지기 때문에 동일한 Ar^+ 이온 에너지 조건 하에서 더 효율적으로 제거되기 때문이다.

Fig. 5는 서로 다른 rf chuck power 조건에서($13Cl_2/2Ar$, 750 W ICP, 10 mTorr) 식각된 GaN 표면을 AFM으로 관찰한 결과를 보여주고 있다. 식각 이전 GaN control 시편의 rms(root-mean-square) 표면 조도는 ~7 nm이었다. Rf chuck power 증가에 비례하며 증진된 이온포격효과에 의해 식각속도는 향상된 반면에 식각된 GaN 표면은 점진적으로 거칠어지는 trade-off가 존재함을 확인하였다.

4. 결 론

Cl_2/Ar, SF_6/Ar 유도결합 플라즈마를 적용하여 GaN epitaxy 층을 식각하였고, 공정변수가 식각특성에 미치는 영향을 조사하였다. 두 가지 플라즈마 조성계 중 더 높은 휘발성을 가지는 식각 반응물을 형성하는 Cl_2/Ar 플라즈마가 더 높은 식각속도를 나타내었고, 최고 251.9 nm/min의 식각속도가 측정되었다. Cl_2/Ar 플라즈마에서 Ar 가스 비중이 증가함에 따라 물리적 식각기구 활성화를 통해 식각 구조물의 이방성이 향상되었다. ICP power 또는 rf chuck power가 증가함에 따라 $GaCl_x$, GaF_x 식각 반응물 생성에 참여하는 Cl 및 F radical 밀도 증가 또는 이온포격효과 증진에 의해 식각속도가 증가함을 확인하였다. Rf chuck power가 증가함에 따라 식각속도는 향상된 반면에 식각된 표면의 조도는 증가하였다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하

www.kci.go.kr

여 연구되었음.

References

[1] Y.C. Chiang, C.C. Lin and H.C. Kuo, “Novel thin-GaN LED structure adopted micro abraded surface to compare with conventional vertical LEDs in ultraviolet light”, Nanoscale Res. Lett. 10 (2015) 182.
[2] D. Steigerwald, S. Rudaz, H. Liu, R.S. Kern, W. Gotz and R. Fletcher, “III-V nitride semiconductors for high-performance blue and green light-emitting device”, JOM 49 (1997) 18.
[3] D. Zhu and C.J. Humphreys, “Low-cost high-efficiency GaN LED on large-area Si substrate”, CS MANTECH Conference, May, New Orleans, USA (2013).
[4] E.J. Kang, C. Huh, S.H. Lee, J.J. Jung, S.J. Lee and S.J. Park, “Improvement in light-output power of InGaN/GaN LED by formation of nanosize cavities on p-GaN surface”, Electrochem. Solid-State Lett. 8 (2005) G327.
[5] J.B. Shim and Y.K. Lee, “Growth and characterization of bulk GaN single crystals by basic ammonothermal method”, J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 26 (2016) 58.
[6] T. Uesugi and T. Kachi, “GaN power switching devices for automotive applications”, CS MANTECH Conference, May, Tempa, USA (2009).
[7] M.A. Briere, “The status of GaN-on-Si based power device development at international rectifier”, Applied Power Electronics Conference Exhibitor Presentation, March, Long Beach, USA (2013).
[8] M. Cho and Y.D. Koo, “Commercialization and research trends of next generation power devices SiC/GaN”, J. Energy Eng. 22 (2013) 58.
[9] H. Cho, K.H. Auh, J. Han, R.J. Shul, S.M. Donovan, C.R. Abernathy, E.S. Lambers, F. Ren and S.J. Pearton, “UV-photoassisted etching of GaN in KOH”, J. Electronic Mater. 28 (1999) 290.
[10] R.J. Shul, C.B. McCellan, 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 (1997) 633.
[11] Y.P. Hong, J.H. Park, C.W. Park, H.M. Kim, D.K. Oh, B.G. Choi, S.K. Lee and K.B. Shim, “Investigation of defects and surface polarity in AlN and GaN using wet chemcal etching technique”, J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 24 (2014) 196.

www.kci.go.kr