

Fabrication and characterization of tilted R-plane sapphire wafer for nonpolar a-plane GaN

Jin Ki Kang and Young Jin Kim[†]

Department of Materials Science & Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

(Received July 8, 2011)

(Revised July 15, 2011)

(Accepted July 22, 2011)

Abstract Tilt angle of r-plane wafer is a one of the important factors related with the quality of the GaN epi, so the fine control of the tilt angle is important for the growing of high quality non-polar a-GaN epi. We prepared the R-plane sapphire wafers with slight tilt angles for nonpolar a-plane GaN. The target tilt angles of α and β were 0, -0.1 , -0.15 , -0.2 , -0.4 , -0.6° and -0.1 , 0 , 0.1° , respectively. The tilt angles of sliced R-plane sapphire wafers were measured by x-ray and the statistical evaluation of reliability of tilt angles of wafers were performed. The tolerance of the tilt angle was $\pm 0.03^\circ$. R-plane sapphire wafers have relatively large distributions of BOW and TTV data than c-plane sapphire wafers due to the large anisotropy of R-plane. As the tilt angle α was increased from -0.1 to -0.6° , the step widths and heights were decreased from 156 nm to 26 nm and 0.4 nm to 0.2 nm, respectively. The growth and qualities of GaN epi seems to be largely affected by the change of step structure of R-plane sapphire wafers with tilt angle.

Key words Sapphire wafer, Nonpolar GaN, Tilted angle, Slicing, DMP, CMP

경사각을 갖는 비극성 a-GaN용 R-면 사파이어 기판의 제조 및 특성

강진기, 김영진[†]

경기대학교 재료공학과, 수원, 442-760

(2011년 7월 8일 접수)

(2011년 7월 15일 심사완료)

(2011년 7월 22일 게재확정)

초 록 비극성 a-GaN의 성장 시 기판의 경사각은 GaN epi의 품질을 결정하는 중요한 변수로서 양질의 a-GaN 성장을 위해서는 R-면 기판의 경사각이 정밀하게 제어된 기판이 요구된다. 본 연구에서는 R-면 기판의 경사각 α 와 β 의 목표값이 각각 0, -0.1 , -0.15 , -0.2 , -0.4 , -0.6° 와 -0.1 , 0 , 0.1° 인 절단기판을 제조하였다. 절단기판의 경사각을 x-ray를 이용하여 측정하고 통계적인 분석을 통해 기판의 경사각 제어공정에 대한 신뢰성을 평가하였으며, R-면 기판의 경사각의 공차는 $\pm 0.03^\circ$ 의 값을 가졌다. R-면 기판은 상대적으로 큰 이방성에 의해 c-면 기판에 비해 휨(BOW)과 두께편차(TTV)가 상대적으로 큰 분포를 갖는 것으로 나타났다. AFM을 이용하여 기판 표면을 관찰한 결과, 측정된 R-면기판의 step 높이는 0.2~0.4 nm로 거의 일정한 값을 가졌으며 step 너비는 경사각 α 가 증가함에 따라 156 nm에서 26 nm로 감소하였으며 이와같은 R-면 기판의 step 구조의 변화는 epi 성장에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

1. 서 론

현재 상용화되어 있는 GaN계 LED용 기판재료로는 c-면 사파이어 기판이 가장 널리 이용되고 있으나, c-면 GaN 발광층은 자발분극(spontaneous polarization)과 압전분극에 의해 내부양자효율의 저하되어[1, 2] 고휘도

LED 응용에 있어서 제한이 되고 있으며 이를 근본적으로 해결하기 위해서 비극성(non-polar) GaN LED를 성장하기 위한 시도가 이루어져 왔다[3-10].

Wurtzite 결정구조를 갖는 GaN계 화합물은 c-면 사파이어를 사용하여 (0001) 결정면 위에 성장되는데 c-축으로 우선 배향된 Wurtzite 결정의 non-centrosymmetric(c-축 방향을 따라 위쪽은 Ga 원자, 아래쪽은 N 원자로 이루어진 형태) 특성 때문에 자발분극을 가지게 된다. 또한 이중접합 구조를 형성할 때 GaN과 사파이어 간의 큰 격자상수의 차이, 같은 c-축 배향성을 가진다는 특성

[†]Corresponding author

Tel: +82-31-249-9766

Fax: +82-31-249-9775

E-mail: yjkim@kyonggi.ac.kr

으로 인한 응력이 발생하여 압전분극도 함께 생기며, 질화물의 압전계수는 매우 큰 값을 가지므로 작은 변형에도 매우 큰 분극을 초래할 수 있다[1, 10]. 분극으로 유발된 정전기장은 양자우물 구조의 에너지 밴드 구조를 변화시켜 전자와 정공의 분포를 왜곡시키고, 빛을 만드는 전자와 정공들의 적절한 재결합을 방해한다. 이러한 현상은 소자의 전기적·광학적 특성에 커다란 영향을 미치는데, 전자와 홀의 공간적 분리로 인한 내부양자 효율 저하의 원인이 되고, 문턱 전압을 높이는 등의 악영향을 미치게 되며, 이것이 기존의 극성 c-면 GaN의 발광효율의 한계이다[1, 10].

비극성 기판을 사용하여 성장된 a-면 또는 m-면의 GaN 에피층은 c-축이 표면과 평행하게 성장이 되어서 극성을 띠지 않게 됨으로써 분극현상에 의한 내부양자효율을 획기적으로 증가시킬 수 있다. 그러나, 비극성 GaN은 성장속도의 이방성이 커서 LED 소자에 응용 가능한 양질의 에피층을 성장시키기 어렵다는 문제점을 갖고 있으며 이를 해결하기 위한 많은 시도가 이루어져 왔다. 그 중 하나로 경사각을 가지는 R-면 사파이어를 기판으로 이용하여 비극성 GaN의 결정성과 표면 거칠기를 향상시키기 위한 연구들이 진행되어 왔다[2-10]. 현재까지의 연구결과 기판의 경사각이 GaN 에피 성장에 큰 영향을 미치며 이는 기존 사파이어 c-면 기판의 경우 특정 경사각을 갖는 것과 유사한 경향으로 생각된다[1-4]. 그러나, 기존의 연구에서 경사각의 범위와 오차범위가 커서 경사각이 미치는 영향을 명확히 밝히는 데는 한계가 있으며 사파이어 기판의 경사각과 표면의 pit 형성에 관한 상관관계와 메커니즘에 대한 체계적인 연구는 상대적으로 많이 진행되지 않았는데 이는 에피 성장에 필요한 R-면 기판의 수급제한에 기인하는 부분이 있다. 양질의 비극성 GaN 에피 성장을 위해서는 양질의 기판이 반드시 요구되지만 LED용 R-면 기판은 현재 연구 개발 단계에 있으며, 고품질의 R-면 기판을 구하기 어려우며, 가공 특성 및 품질기준에 대한 연구 또한 거의 보고된 바 없다[11].

본 연구에서는 기존의 연구결과 양질의 a-plane GaN epi 성장에 적합한 것으로 보고된 (-)tive α 의 경사각을 갖는 R-면 기판을 제작하여 기판의 경사각 분포 및 기판의 주요 특성인 휨(BOW), 두께편차(TTV) 등을 측정하고 통계적인 평가와 기존 c-면 기판과의 비교분석을 통해 R-면 기판의 가공 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 기판의 경사각에 따른 표면형상의 변화를 AFM을 이용하여 분석하였다.

2. 실험방법

사파이어 결정의 결정구조와 사파이어를 LED 기판재

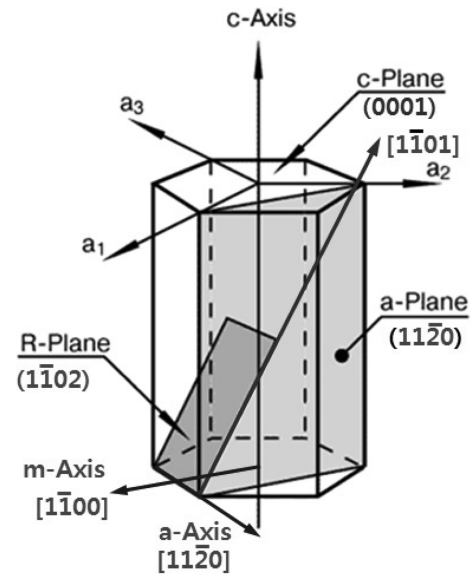


Fig. 1. Indices of some directions and planes of sapphire crystal.

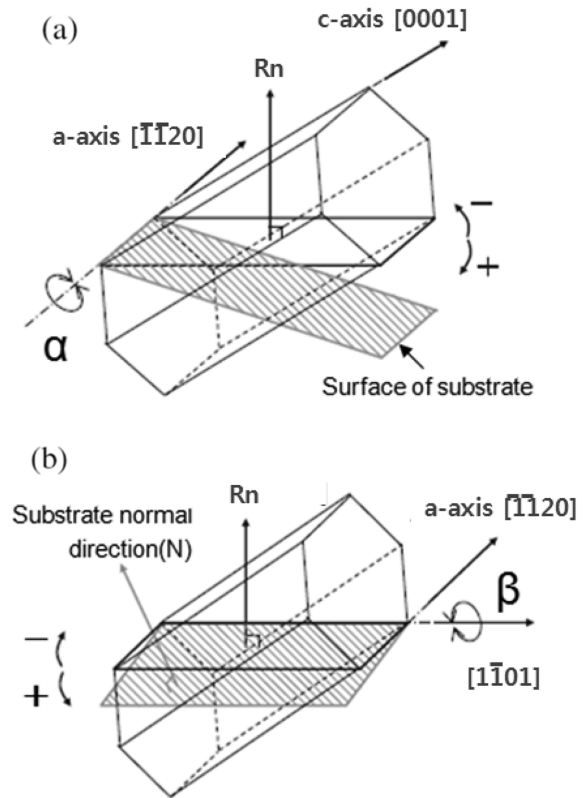


Fig. 2. Definition of tilt angle α and β .

료로 응용하는 경우에 중요한 결정면과 결정방향을 Fig. 1에 나타내었다. R-면 기판의 경사각은 Fig. 2에 표시된 α 와 β 로 정의된다. 실제 R-면 기판에 수직인 방향과 (1-102) R-면에 수직인 방향이 이루는 각도가 경사각이며, 이 경사각을 정의하기 위하여 R-면 상의 a-축 방향과 [1-101] 방향을 회전축으로 회전하였을 때 기판면이 R-면

Table 1
Tilt angle of R-plane Sapphire wafers

| Tilt angle | Target angle |
|-------------------------|----------------------------------|
| α ($^{\circ}$) | 0, -0.1, -0.15, -0.2, -0.4, -0.6 |
| β ($^{\circ}$) | -0.1, 0, 0.1 |

과 이루는 각도를 각각 경사각 α 와 β 로 정의한다[8]. a-축을 회전축으로 R-면을 c-축과의 반대방향으로 회전하였을 때를 (+) α , c-축 방향으로 회전하였을 때를 (-) α 로 정의한다. β 는 $[1\bar{1}01]$ 방향을 회전축으로 회전하였을 때 R-면과 기판면이 이루는 각도로 정의된다. 앞선 연구에 의하면 R-면 사파이어 기판에 a-GaN을 성장하는 경우에 경사각 β 에 의한 영향은 거의 없으며, 주로 경사각 α 에 의한 영향이 큰 것으로 보고되어 있다[8]. R-면 기판이 c-축 방향으로 회전된 경우인 (-)tive α 의 경사각을 가지는 기판이 양질의 a-GaN 성장에 유리한 것으로 보고되어 있다. R-면 기판의 경사각이 a-GaN의 에피성장과 품질에 미치는 영향에 대한 기존의 연구에서 경사각 α 는 -1.0~1.0(± 0.02), -0.4~0.4의 범위를 갖는다[2-10].

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 바와 같이 경사각 α 의 목표값을 0, -0.1, -0.15, -0.2, -0.4, -0.6 $^{\circ}$ 로 정하였으며, 경사각 β 는 -0.1, 0, 0.1 $^{\circ}$ 로 정하여 기판을 제작하였다. 경사각을 제어하기 위해서 경사각(α , β)이 $\pm 0.01^{\circ}$ 공차 이내에 들어가도록 평면 연삭기를 이용하여 잉곳의 양 끝단이 가동된 잉곳을 유리재질의 더미빔(dummy beam)에 에폭시를 이용하여 잉곳을 접착하고 이를 work plate에 고정시킨 후 MWS(Multi wire saw)의 work table에 장착한다. work table은 수평·수직 방향으로 회전이 가능하며 원하는 경사각 α , β 값의 제어가 가능하다. R-면 잉곳을 멀티와이어 쏘를 이용하여 특정 방위각을 갖도록 절단한 후 100매 이상의 절단기판에 대해서 경사각을 실측하여 경사각의 제어에 대한 신뢰성을 평가하였다. 절단기판은 래핑, 열처리, 에지그라인딩, 다이아몬드 폴리싱, CMP 공정 등 일반적인 기판가공 공정을 거쳐 가공하였으며, 최종 가공된 R-면 기판은 Nidek사의 표면형상 분석장치(model FT-17)를 이용하여 BOW, SORI, TTV(Total Thickness Variation) 등을 측정하여 통계프로그램인 “MINITAB”을 이용하여 공정 제어능력을 평가하였다. AFM(NanoNavi, L-trace II)을 이용하여 경사각에 따른 기판의 표면형상을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. R-면 기판의 경사각

절단기판의 방위는 이후 연마공정에서 거의 변화하지

않으나, 절단공정 조건의 제어가 부적절하여 절단기판의 BOW와 TTV가 클 경우에는 후속공정인 연마공정에서 연마량이 증가하여 기판의 방위가 바뀔 수 있으므로 경사각의 제어가 어려워질 수 있다. 따라서 사파이어 기판의 방위, 즉 경사각을 제어하기 위해서는 절단공정에서 경사각을 정확히 조절해야 함은 물론 절단기판의 BOW와 TTV 등의 제어가 이루어져야 한다. R-면 잉곳은 c-면 잉곳에 비해서 이방성이 크기 때문에 절단기판의 BOW 값이 c-축 잉곳에 비해 크다는 특징을 가지며 이후 연마공정에도 영향을 미치는 것으로 나타났다[12].

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 $\alpha = -0.10^{\circ}$, $\beta = 0.00^{\circ}$ 와 $\alpha = -0.15^{\circ}$, $\beta = 0.00^{\circ}$ 의 경사각을 목표값으로 절단된 절단기판에 대한 MINITAB 분석결과이다. $\alpha = -0.10^{\circ}$ 를 목표값으로 절단한 웨이퍼 134매에 대해 측정된 경사각 α 의 평균값은 -0.11° 이고 표준편차는 0.0102 $^{\circ}$ 이다. 경사각의 가공오차를 $\pm 0.03^{\circ}$ 로 설정하였을 경우 실측된 134매는

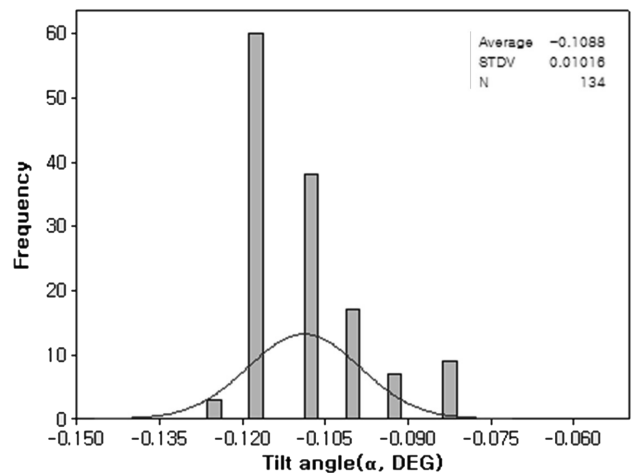


Fig. 3. Distribution of tilt angles of 134 sliced wafers (target $\alpha = -0.1^{\circ}$).

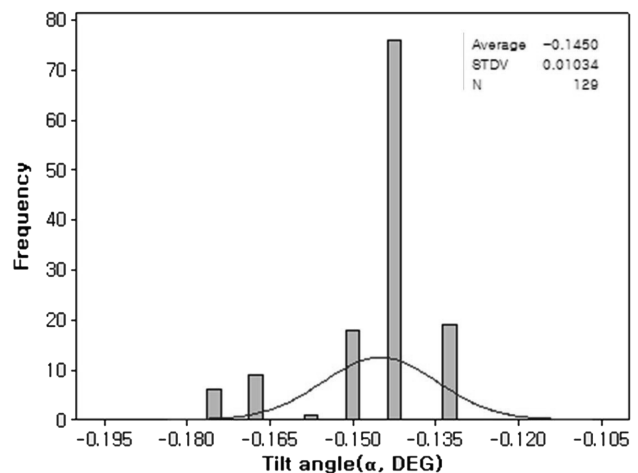


Fig. 4. Distribution of tilt angles of 129 sliced wafers (target $\alpha = -0.15^{\circ}$).

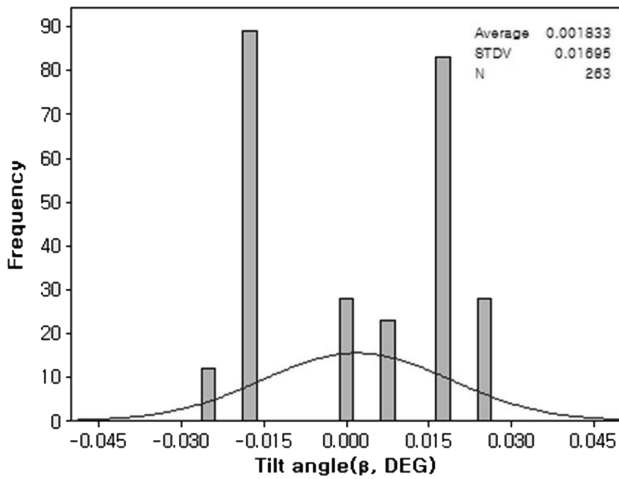


Fig. 5. Distribution of tilt angles of 263 sliced wafers (target $\beta = -0.1$).

모두 가공오차 안에 들며, 통계적인 예측을 통해 현재의 표본에 대해서 $\pm 0.03^\circ$ 의 공차조건에서 장기적으로 1.9%의 불량률이 예측되었다. Fig. 4는 $\alpha = -0.15^\circ$ 의 목표값을 갖는 절단 기관 129매에 대해 실측된 경사각의 분포도이며 평균은 -0.15° 이고 표준편차는 0.0103°이며, $\pm 0.03^\circ$ 의 공차조건에서 장기적인 전체 불량률(기대전체성능)은 0.8%로 예측된다. Fig. 5는 경사각 $\beta = 0.0^\circ$ 의 목표값을 갖는 Fig. 3, 4의 절단기관 263매에 대해서 실측된 경사각의 분포도이며 평균은 -0.002° 이고 표준편차는 0.0170°이며 $\pm 0.03^\circ$ 의 공차조건에서 장기적인 전체 불량률(기대전체성능)은 7.9%로 예측된다. 따라서 R-면 기관의 경사각을 $\pm 0.03^\circ$ 의 공차로 제어 가능함을 확인할 수 있었다.

3.2. R-면 기관의 평탄도

Nidek사의 표면형상분석 장치를 이용하여 관찰된 R-면 기관의 전형적인 표면 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 경사각의 절대값이 0~0.6°로 작은 범위를 가지기 때문에 경사각에 따른 표면형상과 평탄도의 차이는 거의 나타나지 않았다. R-면 기관과 c-면 기관의 BOW, SORI 값을 각각 1829매와 2485매의 기관에 대해서 측정한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. R-면 기관의 BOW 값은 -12.30~12.41 μm 의 범위를 가지며, 평균 BOW 값은 $-2.22 \mu\text{m}$ 를 나타내었다. 동일 가공조건을 갖는 c-면 기관의 BOW 값은 -10.99~8.10 μm 의 범위를 가지며 평균 BOW 값은 $-2.76 \mu\text{m}$ 를 나타냈다. 평균 BOW 값의 차이는 크지 않으나 상대적으로 R-면 기관의 BOW 값의 분포범위가 넓으며 이는 R-면 기관이 갖는 큰 이방성과 이에 따른 큰 절단 BOW에 기인하는 것으로 판단된다. 한편 Fig. 7에서 SORI를 비교하면, R-면 기관의 SORI data는 1.34~

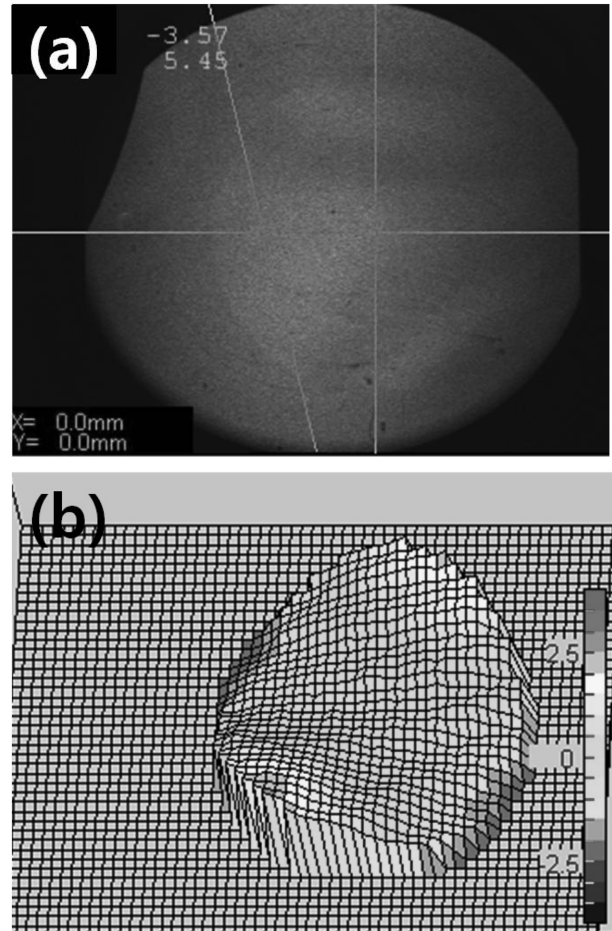


Fig. 6. Typical surface image of R-plane sapphire wafer (Nidek FT-17) (a) Fringe (b) Bird eye's view.

20.29 μm 를 나타내었고, 평균 SORI 값은 7.23 μm 를 나타내었으며 c-면 기관의 SORI 값은 0.89~11.23 μm 를 나타내었고, 평균 SORI 값은 3.36 μm 를 나타내었다.

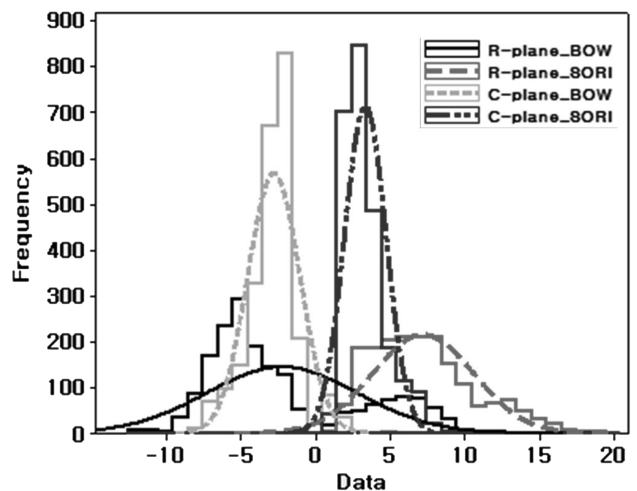


Fig. 7. Distribution of BOW and SORI data of R-plane and c-plane sapphire wafers.

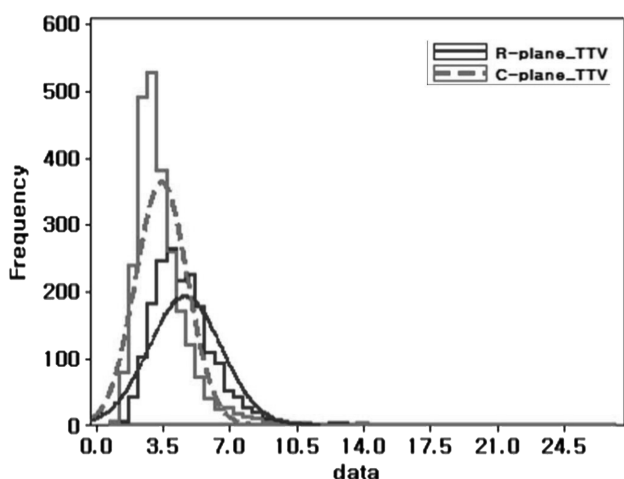


Fig. 8. Distribution of TTV data of R-plane and c-plane sapphire wafers.

BOW 값은 웨이퍼의 가운데 부분이 볼록하거나 오목한 정도를 나타내는 값으로서 두 종류 기판의 평균 BOW 값은 유사한 (-) 값을 가지며 이는 기판의 전체적인 형상이 약간 오목한 경향을 가짐을 알 수 있다. 그러나 SORI 값은 오목 볼록에 관계없이 웨이퍼의 굴곡진 정도를 나타내는 값으로서 거의 양의 값으로 표시되며 값이 클수록 굴곡 정도가 크므로 R-면 웨이퍼가 c-면 웨이퍼에 비해 굴곡이 심함을 알 수 있다. 이러한 굴곡 현상은 Nidek 측정 형상을 확인한 결과 절단 시 발생한 절단 BOW의 영향에 의한 것으로 판단된다.

R-면과 c-면 기판을 각각 1830매와 2485매에 대해서 TTV를 측정된 결과를 Fig. 8에 나타내었다. R-면 기판의 경우 1.42~27.07 μm 범위의 값을 나타내며 평균 TTV값은 4.70 μm 를 나타내었고, 유사한 공정조건에서 가공된 c-면 기판의 TTV data는 0.98~15.01 μm 범위의 값과 평균 3.45 μm 의 TTV값을 나타내었다.

두께편차 측정 결과로는 R-면 기판들의 평균 TTV는 4.70 μm , c-면 기판의 경우에는 3.45 μm 의 결과를 나타내어 R-면 웨이퍼가 c-면 에 비해 평탄도가 떨어지는 결과를 나타내고 있으나, 이 정도의 TTV 값은 기존 사용되고 있는 c-면 기판의 양산 기준 내에 포함되는 수준으로 판단된다.

3.3. 경면 거칠기

Fig. 9는 경사각에 따른 R-면 기판의 AFM 관찰결과이다. R-면 기판은 step 구조를 가지며 경사각에 따라 step 구조의 변화가 관찰되었으며, Fig. 10의 AFM 영상으로부터 측정된 step 구조의 변화는 경사각 α 가 -0.12° 에서 -0.65° 로 (-)방향으로 증가함에 따라 step의 너비는 156 nm에서 26 nm, step의 높이는 0.44 nm에서 0.21

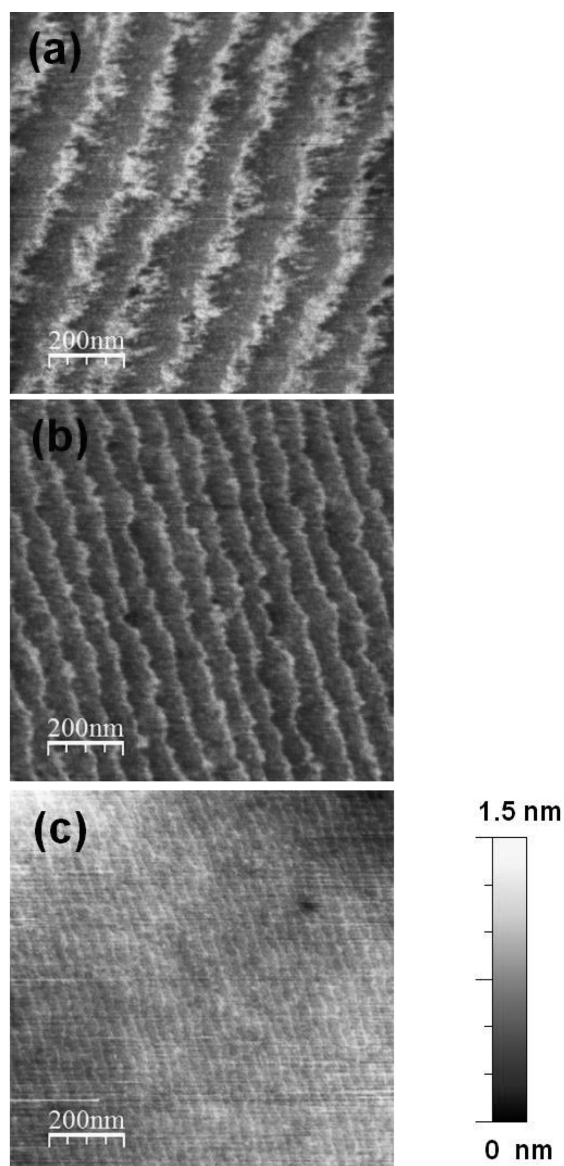


Fig. 9. AFM surface morphology of R-plane sapphire with tilt angle at (a) $\alpha = -0.1^\circ$ (b) $\alpha = -0.3^\circ$ (c) $\alpha = -0.6^\circ$.

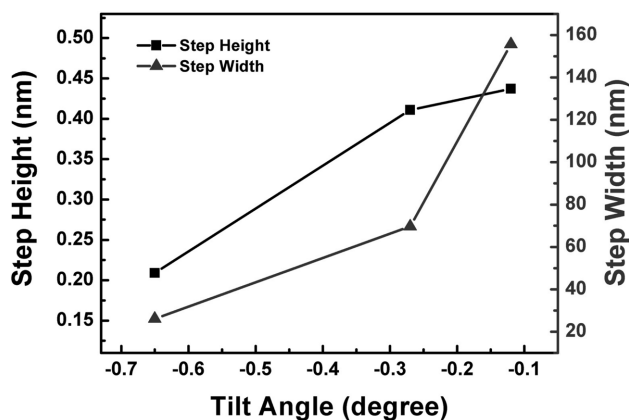


Fig. 10. Atomic step width and height of tilted R-plane sapphire substrate.

nm로 변화하였다. 경사각이 증가함에 따라 기판의 수직 방향은 c-축과 가까워지며 step 사이의 거리가 가까워진다. 그러나 step의 높이는 0.2~0.4 nm 범위에서 거의 일정한 값을 갖는다. 이는 경사각이 증가함에 따라 R-면의 면적은 거의 변화가 없는 반면에 c-면의 면적은 증가함을 의미하며, 이와 같은 경사각의 변화에 따른 R-면 기판의 step 구조의 변화는 epi 층의 성장거동 및 품질에 큰 영향을 미치며 양질의 비극성 a-GaN 성장을 위해서는 경사각의 정밀한 조절이 요구됨을 확인할 수 있었다 [13].

4. 결 론

비극성 사파이어 R-면 기판의 경사각을 $\alpha = 0, -0.1, -0.15, -0.2, -0.4, -0.6^\circ$, $\beta = 0$ 을 목표값으로 가공하여 절단기판에 대한 경사각의 분포와 연마가공이 완료된 기판의 기판특성에 대한 측정/평가한 결과는 다음과 같다.

1) 절단공정의 제어를 통해서 R-면 기판의 경사각 α 와 β 를 $\pm 0.03^\circ$ 의 공차로 제어가능하였다.

2) 가공된 R-면 기판의 경사각의 절대값이 $0 \sim 0.6^\circ$ 로 작아 경사각에 따른 BOW, SORI, TTV 값이 변화는 나타나지 않았으며, R-면 기판의 큰 이방성에 의해서 c-면 기판과 비교 시 넓은 분포를 나타내었다.

3) 경사각 변화에 의해 R-면 기판의 step 구조의 형상 변화가 나타나며, α 가 증가함에 따라 step 높이는 0.2~0.4 nm로 거의 변화가 없으나, step의 너비는 156nm에서 26 nm로 크게 감소하여 R-면의 면적은 큰 변화가 없는 반면 c-면의 면적이 증가하게 되며, GaN 에피 성장에 영향을 주는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] D. Miller, T.C. Damen, A.C. Gossard, W. Wiegmann, T.H. Wood and C.A. Burrus, "Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures", *Phys. Rev. Lett.* 32(2) (1985) 1043.
- [2] P. Waltereit, O. Brandt, A. Trampert, H.Y. Grahn, J. Menniger, M. Ramsteiner, M. Reiche and K.H. Ploog, "Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes", *Nature* 406(24) (2000) 865.
- [3] M.D. Craven, S.H. Lim, F. Wu, J.S. Speck and S.P. DenBaars, "Structural characterization of nonpolar (11-20) a-plane GaN thin films grown on (1-102) r-plane sapphire", *Appl. Phys. Lett.* 81(3) (2002) 469.
- [4] B.A. Haskell and F. Wu, "Structural and morphological characteristics of planar (11-20) a-plane gallium nitride grown by hydride vapor phase epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* 83(8) (2003) 1554.
- [5] M.D. Craven, P. Waltereit, J.S. Speck and S.P. DenBaars, "Microstructural evolution of a-plane GaN grown on a-plane SiC by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* 84(8) (2004) 1281.
- [6] Masataka Imura, Akira Hoshino, Kiyotaka Nakano, Michinobu Tsuda, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano and Isamu Akasaki, "Flat (11-20) GaN thin film on precisely offset-controlled (1-102) sapphire substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.* 44(10) (2005) 7418.
- [7] X. Ni, Y. Fu, Y.T. Moon, N. Biyikli and H. Morkoc, "Optimization of (11-20) a-plane GaN growth by MOCVD on (1-10-2) r-plane sapphire", *J. Cryst. Growth* 290 (2006) 166.
- [8] Masahiro Araki, Noriaki Mochimizo, Katsuyuki Hoshino and Kazuyuki Tadatomo, "Effect of misorientation angle of r-plane sapphire substrate on a-plane GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 47(1) (2008) 119.
- [9] S.-M. Hwang, Y.G. Seo, K.H. Baik, I.-S. Cho, J.H. Baek, S. Jung, T.G. Kim and M. Cho, "Demonstration of nonpolar a-plane InGaN/GaN light emitting diode on r-plane sapphire substrate", *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 071101.
- [10] B.A. Haskell, S. Nakamura, S.P. DenBaars and J.S. Speck, "Progress in the growth of nonpolar gallium nitride", *Phys. Stat. Sol.(b)* 244(8) (2007) 2847.
- [11] Honglin Zhu, Luiz A. Tassaroto, Robert Sabia, Victor A. Greenhut, Maynard Smith and Dale E. Niesz, "Chemical mechanical polishing(CMP) anisotropy in sapphire", *Applied Surface Science* 236 (2004) 120.
- [12] J.K. Kang, J.H. Kim and Y.J. Kim, "Fabrication of R-plane sapphire wafer for nonpolar a-plane GaN", *Journal of the Microelectronics & Packaging Society* 18(3) (2011) in press.
- [13] S.H. Park, J. Park, D.-J. You, D. Moon, N. Kim, J. Kim, J. Kang, S.-M. Lee, J.-S. Kim, M.-S. Yang, T. Kim and E. Yoon, "Effects of r-plane sapphire substrate tilt angles on the growth behavior of non-polar a-plane GaN", will be published.