

광전소자 응용을 위한 무극성 6H-SiC 기판의 특성

Characterization of Non-polar 6H-SiC Substrates for Optoelectronic Device Applications

여임규¹, 이태우¹, 최정우³, 서정두³, 구갑렬³, 이원재^{2,a}, 신병철², 김영희⁴
(Im-Gyu Yeo¹, Tae-Woo Lee¹, Jung-Woo Choi³, Jung-Doo Seo³, Kap-Ryeol Ku³, Won-Jae Lee^{2,a},
Byung-Chul Shin², and Young-Hee Kim⁴)

Abstract

The present research was focused to investigate the quality of non-polar SiC substrates grown by a conventional PVT method for optoelectronic applications. The half part of the PVT-grown 6H-SiC crystal boules was sliced along a-direction and m-direction to extensively analyze non-polar planes and then remaining part of that was sliced along the basal plane to produce wafers. The non-polar SiC m-plane and a-plane exhibited apparent peaks around $2\theta=120^\circ$ ((3-300) plane) and $2\theta=60^\circ$ ((11-20) plane), respectively. FWHM values of m-plane measured along a-direction and c-direction were 60 arcsec and 57 arcsec respectively, a-plane measured along m-direction and c-direction were 41 arcsec and 51 arcsec respectively. The typical absorption spectra of SiC crystals indicated that each of SiC crystals were the 6H-SiC with fundamental absorption energy of about 3.04 eV. Non-polar planes contained no micropipe on etched surface. The carrier concentration and mobility of non-polar SiC wafers have estimated by Raman spectrum. It was observed that the carrier mobility is low in the area far from seed crystal with compared to other places.

Key Words : SiC, Sublimation, MPD(Micropipe density), Non-polar, Piezoelectric

1. 서론

Blue light-emitting diodes (LEDs), violet laser diodes 같은 광전소자들은 질화물 c-plane 기판위에 소자로 응용되어 이미 상품화 되어 왔다. 그러나 2축-질화물 재료들은 wurtzite 구조를 가지므로 c-plane에 평행한 자연적인 극성을 띠 뿐만 아니라 결정 내부 stress로 인한 압전현상 또한 나타나는 내부 전기장을 형성하게 된다[1]. 이렇게 생성

된 내부 전기장은 전자와 홀의 재결합 효율을 감소시키고 소자 응용 시 red-shift의 원인이 되곤 한다. 또한 c-plane(0001)의 경우 잉곳의 길이방향으로 생성되는 micropipe가 존재하므로 추 후 소자의 기판으로 응용 시 치명적인 문제를 야기할 수 있기 때문에[2], c-axis에 수직인 방향으로 성장시켜 micropipe 생성을 억제하는 방법이 제안되었다[3]. 그 결과 최근 들어 m-plane(1-100), a-plane(11-20)같은 무극성을 띠는 기판 위에 소자를 만드는 방법이 각광을 받고 있는 추세다. 그리고 무극성 기판 위에 LED 소자를 제조한다는 것 또한 보고된 바 있다[4,5].

그러므로 광전소자 응용 시 일반적인 c-plane 기판 대신에 m-, a-plane 같은 무극성 기판을 이용하면 6H-, 4H-SiC MOSFETs내의 반전 층에 높은 channel mobility를 구현할 수 있으므로[6], 소자로 응용 시 매력적인 기판 재료가 된다(그림 1). 그러

1. 동의대학교 나노공학과
(부산시 부산진구 엄광로 995)
2. 동의대학교 전자세라믹스센터
3. (주)Crysbond
4. 요업기술원 세라믹·건재본부/환경재료팀
a. Corresponding Author : leewj@deu.ac.kr
접수일자 : 2009. 3. 23
1차 심사 : 2009. 4. 13
심사완료 : 2009. 4. 22

나 m-plane SiC 기판위의 m-plane GaN의 경우 높은 밀도의 전위와 적층결함을 가지므로 무극성 SiC 기판의 광범위한 특성 분석은 필수 불가결하다.

따라서 본 연구에서는 일반적인 승화법을 이용하여 성장된 무극성 SiC 단결정 기판의 특성에 대해 조사했다.

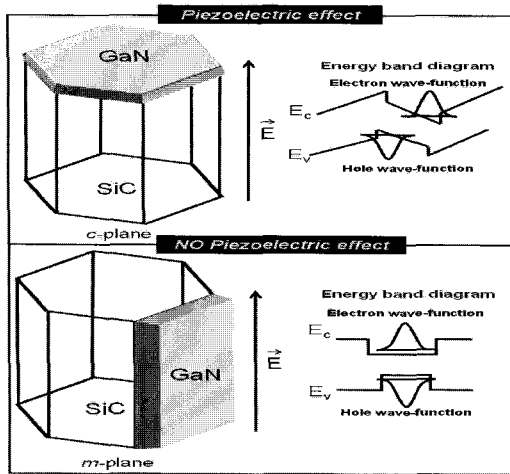


그림 1. 무극성 기판위의 GaN의 응용.
Fig. 1. Application of GaN on non-polar substrate.

2. 실험

본 연구에서는 수직 구조의 승화성장로(그림 2)에서 6H-SiC(0001) 기판(Crysbond社)을 seed crystal로 사용하여 단결정을 성장 시켰다.



그림 2. 실리콘 카바이드 성장용 수직로.
Fig. 2. A vertical furnace for the silicon carbide growth.

원료는 100~200 nm 실리콘 카바이드 나노 분말을 사용하였고, 성장 압력은 40~60 mbar, 성장온도는 상부 도가니 2100~2300 °C, 하부 도가니 2200~2400 °C를 적용 하였고, 도가니 내부의 온도 구배 범위는 15~20 °C/cm로 적용하였다. 그리고 성장 전 1500 °C에서 baking 공정을 실시하여 실리콘 카바이드 분말 및 도가니, 단열재 등에 포함되어 있던 불순물을 제거한 후 성장을 실시하였다. 온도 측정은 단열재 내부에 hole을 뚫은 후 pyrometer를 수직으로 상·하부에 장착하여 측정하였고, 99.999 %의 Ar gas 분위기를 조성하여 단결정 잉곳을 얻었다. 그림 3에 성장 공정 및 조건을 나타내었다.

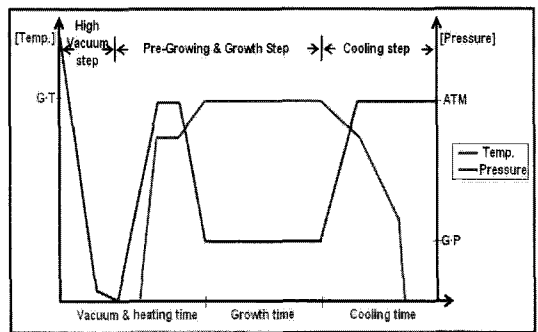


그림 3. PVT법의 공정 흐름 도표.
Fig. 3. Process flow chart of PVT method.

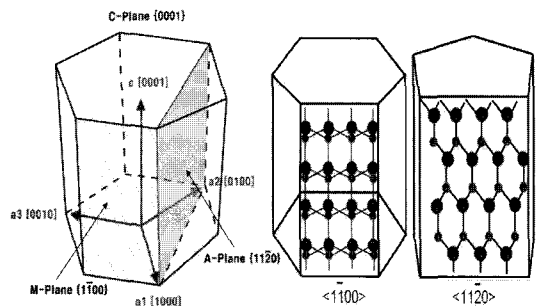


그림 4. 다양한 면의 개략도.
Fig. 4. Schematic of various planes.

성장된 단결정 잉곳은 m-plane(1-100), a-plane(11-20)으로 diamond wire saw를 이용하여 slicing 하였고, 남은 부분 또한 비교를 위해 c-plane(0001)으로 slicing 하였다. m-plane(1-100), a-plane(11-20)

으로 slicing한 개략도를 그림 4, 5에 나타내었다. slicing된 인곳은 diamond slurry를 사용하여 양면 polishing을 하였고, 양면 polishing이 끝난 wafer는 고분해능 XRD(PAN-alytical社)를 이용하여 회절 패턴 및 결정질을 분석하였으며, UV-Visible Spectroscopy을 이용하여 흡수/투과율을 측정하였고, 여러 전위와 적층결합의 분포를 조사하기 위해 480 °C molten KOH 용액에 5분간 etching한 후 광학현미경의 노말스키(nomarski)모드를 이용하여 분석하였다. 마지막으로 Raman spectroscopy을 측정된 결과를 바탕으로 carrier concentration과 mobility를 계산하였다.

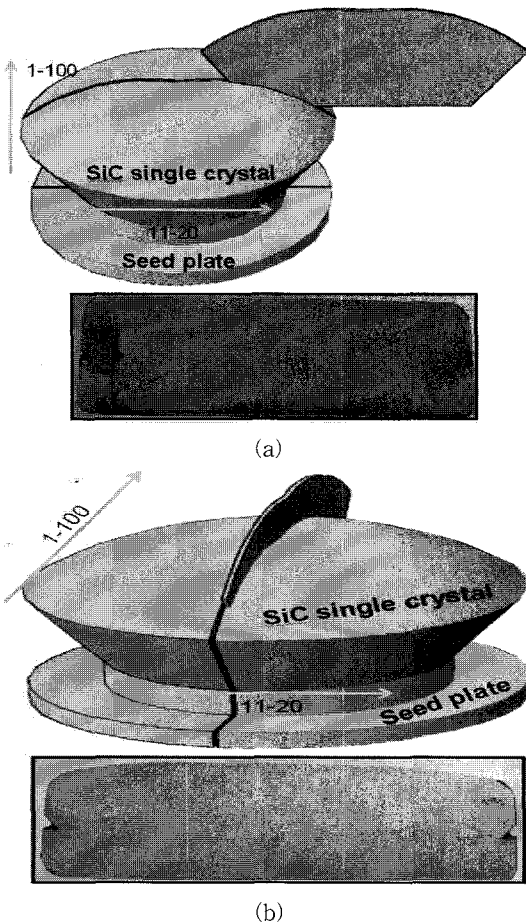


그림 5. 무극성 SiC의 개략도 및 사진.

- (a) 절단된 m면
- (b) 절단된 a면

Fig. 5. Schematic and image of non-polar SiC.

- (a) m-plane sliced
- (b) a-plane sliced

3. 결과 및 고찰

일반적으로 6H-SiC 단결정(0001)의 XRD 회절 패턴은 35.6° (006)면 75.3° (0012)면에 주 peak가 나타나며 주 peak 사이에 등간격으로 5개의 작은 peak를 나타낸다. 그러나 무극성인 m-plane은 2 theta=120° (3-300), a-plane은 2 theta=60° (11-20)면에 주 peak가 관찰 되었다(그림 6). 결정질을 분석하기 위해 Rocking curves를 측정 하였으며 m-plane의 경우 a, c축 방향으로 각각 입사하여 60 arcsec, 57 arcsec, c-plane은 49 arcsec의 반치폭(FWHM)값을 얻었고(그림 7), a-plane의 경우도 동일한 방법으로 m, c축 방향으로 각각 입사하여 41 arcsec, 51 arcsec, c-plane은 46 arcsec의 반치폭 값을 얻었다(그림 8).

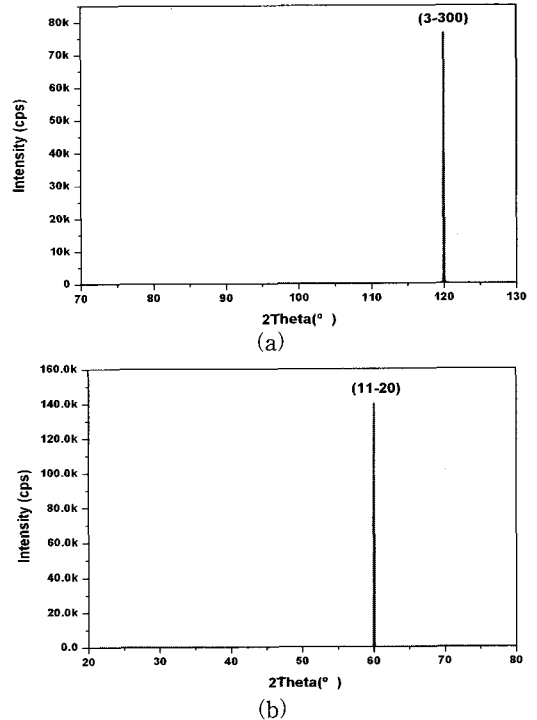


그림 6. 무극성 SiC면의 Theta-2Theta 주사.

- (a) m면(3-300)
- (b) a면(11-20)

Fig. 6. Theta-2Theta scan of non-polar SiC planes.

- (a) m-plane(3-300)
- (b) a-plane(11-20)

흡수/투과율의 비교분석을 위해 절단된 c-, m-, a-plane을 각각 측정하였다(그림 9). 일반적으로

6H-SiC의 흡수 에너지 밴드갭은 3.04 eV를 가지는 것으로 알려져 있다[7].

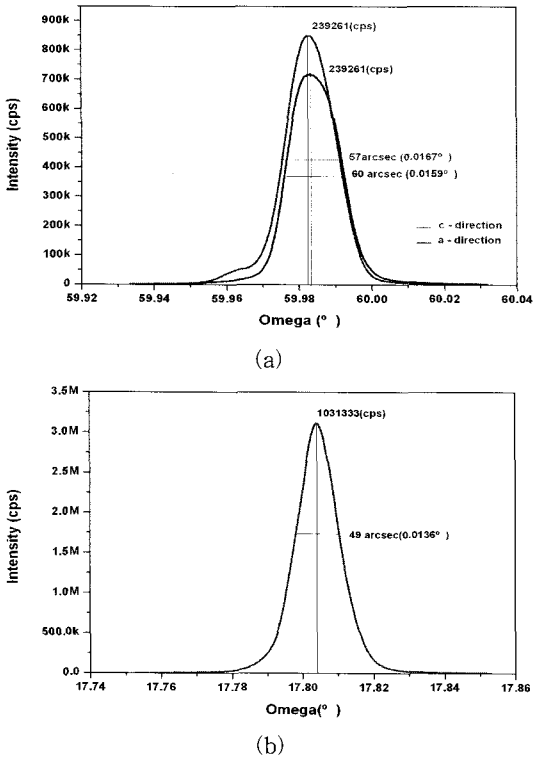


그림 7. m-plane Rocking curve.

- (a) m면, a,c-방향으로 입사
- (b) c면

Fig. 7. Rocking curve of m-plane.

- (a) m-plane, along a,c-direction
- (b) c-plane

보다 정확한 결함 분석을 위해 준비된 SiC 기판을 480 °C molten KOH 용액에 5분간 etching 한 후 광학현미경으로 관찰한 결과를 그림 10, 11에 나타내었다. etching 후 c-plane의 경우 8~30 ea/cm² MPD (micropipe density)가 관찰 되었다. 실험에 사용된 c-plane 시편의 경우 가로 1 cm 세로 2 cm 이다. 따라서 면적은 2 cm²이고, 왼쪽 그림에 5 ea의 micropipe가 관찰되었으므로 이론적으로는 1 cm²당 10 ea를 가지게 된다. 결론적으로 단위면적당 이론적 값은 20 ea/cm²가 나온다. 그러나 실질적으로 micropipe는 매우 불규칙하게 생성되므로 계산 값 보다는 육안으로 관찰하는 것이 보다 정확하다.

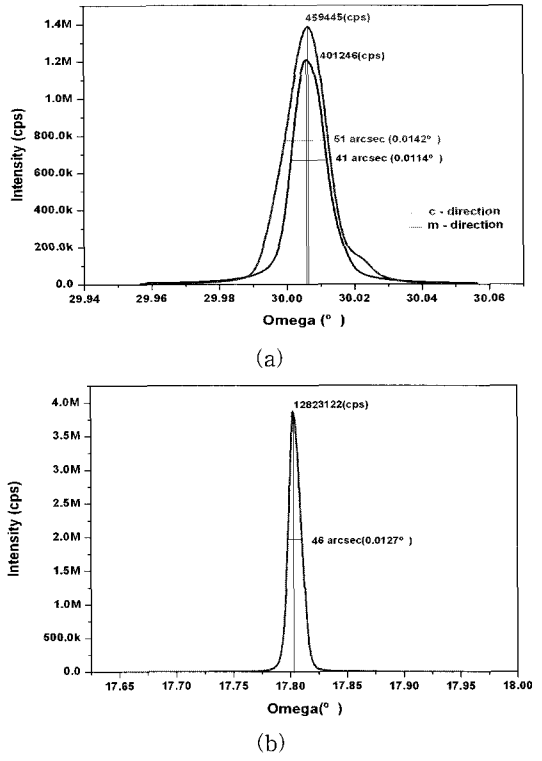


그림 8. a-plane Rocking curve.

- (a) a면, m,c-방향으로 입사
- (b) c면

Fig. 8. Rocking curve of m-plane.

- (a) a-plane, along m,c-direction
- (b) c-plane

m-, a-plane의 경우는 micropipe가 관찰되지 않았다. micropipe의 경우 c축에 수직인 잉곳의 길이 방향으로 성장되기 때문에 micropipe 생성 경로와 평행한 m-, a-plane에서는 나타나지 않은 것으로 판단된다.

Raman spectroscopy를 이용하여 무극성 기판의 세 지점(seed crystal에서의 거리 9 mm, 5 mm, 1 mm) ①, ②, ③으로 지정하여 측정된 결과를 토대로 carrier concentration과 mobility값을 계산하였다. 여기 소스는 Ar+이온 레이저이고, 514.5 nm의 파장으로 실온에서 측정하였다. SiC 결정의 Si면(0001)을 z축으로 하여 직각산란 모드(SiC 결정의 z축으로 입사한 레이저 빔의 벡터와 산란되는 레이저 빔의 벡터가 서로 수직) x(y, z)y로 측정을 실시하였다. 여기서 괄호 밖 x는 입사빔의 방향, y는 산란빔의 방향, 괄호 안 y는 입사한 편광빔의

방향, z는 산란된 빛의 방향을 나타낸다. 그림 12는 6H-SiC 결정의 스펙트럼을 보여준다. TO (Transvers optics) 포논 밴드(E_{2T}), 767 cm^{-1} , 789 cm^{-1} 에 각각 위치하며, A_1T 는 788 cm^{-1} , E_1T 는 797 cm^{-1} 에 위치한다. 여기서 E_1T 는 캐리어 농도에 영향을 주지 않는다. LO(Longitudinal optics) 포논 밴드(E_{1L}), 970 cm^{-1} 에 위치한다.

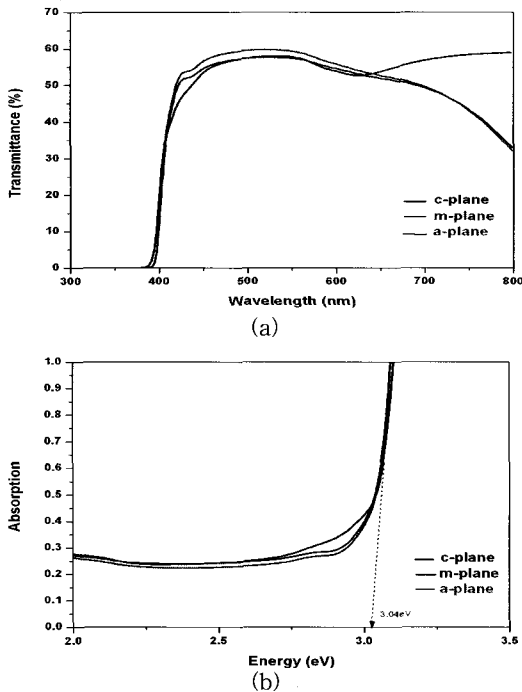


그림 9. SiC의 투과/흡수 스펙트럼
(a) 투과 스펙트럼
(b) 흡수 스펙트럼

Fig. 9. Transmittance / Absorption spectra of SiC.
(a) Transmittance spectrum
(b) Absorption spectrum

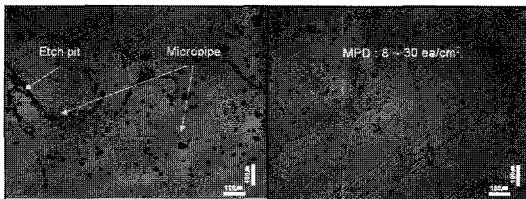
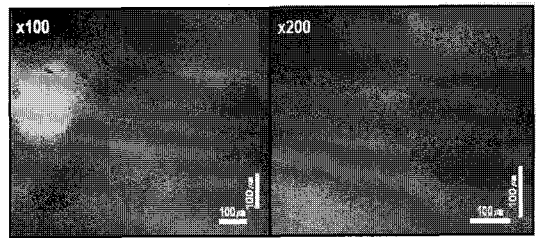
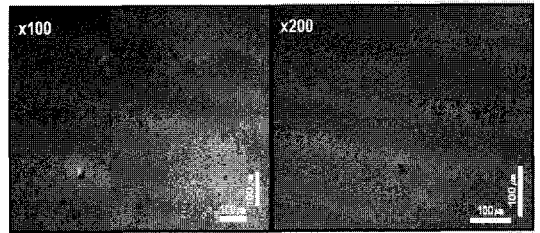


그림 10. 에칭 된 c면의 노말스키 이미지.
Fig. 10. Nomarski images of c-plane for etched surface.



(a)



(b)

그림 11. 에칭 된 무극성면의 노말스키 이미지.
(a) m면 (b) a면

Fig. 11. Nomarski images of non-polar for etched surface.
(a) m-plane (b) a-plane

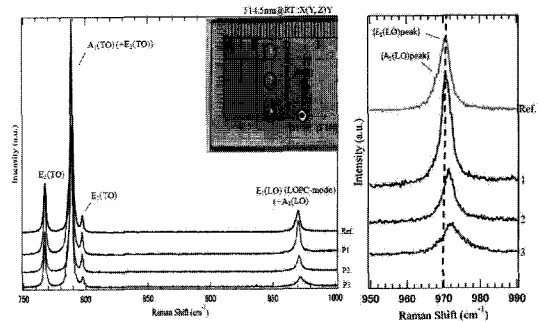


그림 12. 6H-SiC의 라만 스펙트럼.

Fig. 12. Raman sepctrum of 6H-SiC.

일반적으로 과도핑된 반도체 내부의 자유 캐리어의 출현으로 전자나 홀이 광학 포논과의 강한 반응이 발생할 수 있다. 두 가지 형태의 반응이 나타나는데 첫째가 하나의 전자나 홀의 여기와 TO 포논 사이의 결합하는 것, 두 번째가 플라즈몬 (Plasmon)과 LO 포논 사이의 결합이다. 후자를 LOPC(LO phonon Plasmon coupled)모드라고 칭하며, LOPC 모드는 과도핑된 반도체 내부의 자유 캐리어의 성질을 이해하는데 유용하다[8]. 일반적

으로 플라즈몬과 LO 포논의 결합은 carrier concentration과 관련이 있으며, carrier mobility는 플라즈몬 감쇠율과 재료의 유효질량에 의존한다.

그림 12의 오른쪽 그림에서 첫 번째 E_{1L} 피크 (도핑 되지 않은 경우, 970 cm^{-1})를 reference 피크로 두었을 때 ①, ②, ③의 순서로 E_{1L} 피크의 주파수가 고파수 영역으로 시프트하며, E_{1L} 피크의 강도가 약해진다. 또한 E_{1L} 피크의 반치폭이 넓어지는 것을 알 수 있다. 그림 12의 라만 스펙트럼을 토대로 세 지점의 carrier concentration와 mobility 값을 개선하기 위해 다음 논문의 LOPC fitting profile 및 식을 사용하였다[9]. 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 라만에 따른 전자값의 평가.
Table 1. The estimate of electric values by Raman.

	1	2	3
Peak Frequency (cm^{-1})	970.8	971.5	972.5
FWHM (cm^{-1})	3.3	3.9	6.7
Peak intensity (E_{1LO}/A_{1TO})	0.15	0.12	0.06
Carrier density ($1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)	0.5	1.3	8.1
μ (cm^2/Vs)	300	220	90

분석결과 seed crystal에서 9 mm 거리의 연녹색을 띠는 부분(①)의 carrier concentration이 다른 지역보다 상대적으로 낮게 측정되었다. 그러나 carrier mobility는 가장 빠른 것으로 측정되었다. seed crystal과 가장 가까운 1 mm 거리의 진한 녹색을 띠는 부분(③)은 이와 반대로 carrier concentration은 높고 carrier mobility는 낮게 측정되었다. 따라서 소자응용 시 mobility가 중요시 되므로 ①부분과 같은 carrier concentration을 가질 수 있도록 제어가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 승화법을 이용하여 성장된 무극성 SiC 단결정 기판의 특성에 대해 조사해 보았다. 6H-SiC(0001) seed crystal을 사용하여

성장시킨 잉곳을 m, a-plane으로 각각 slicing하여 보다 상세하게 특성을 측정하였다. m, a-plane의 회절패턴은 $2\theta=120^\circ$, $2\theta=60^\circ$ 에 나타났으며, 반치폭 값은 m-plane의 경우 a, c축에 대해 60, 57 arcsec, a-plane의 경우 m, c축에 대해 41, 51 arcsec이었다. etching후 c-plane 경우 8~30 ea/ cm^2 의 micropipe가 관찰되었으나, m, a-plane은 관찰되지 않았다. micropipe는 SiC 단결정에서만 나타나는 결함으로 소자 응용 시 많은 문제를 야기할 수 있는 요소이므로, 무극성 기판에서 micropipe가 관찰되지 않은 점은 주목할 만한 결과이다.

Raman spectroscopy을 측정된 결과를 바탕으로 carrier concentration과 mobility를 개선하고 분석한 결과 무극성 기판의 carrier concentration은 c축의 성장 길이 방향으로 지속적으로 감소하였고 이와 반대로 mobility는 증가하였다. 따라서 무극성 기판을 소자로 응용하기 위해서는 성장 시 carrier concentration의 제어가 중요하다.

결론적으로 결정구조로 인한 기판내의 자연적·인위적인 압전현상과 주요 결함인 micropipe가 없으므로 channel mobility가 중요한 요인이 되는 광전소자 기판으로 응용 시 무극성 SiC 단결정 기판이 가지는 전기적·화학적 물성은 다양한 화합물 반도체 재료의 기판으로 응용 가치가 높을 것으로 판단된다.

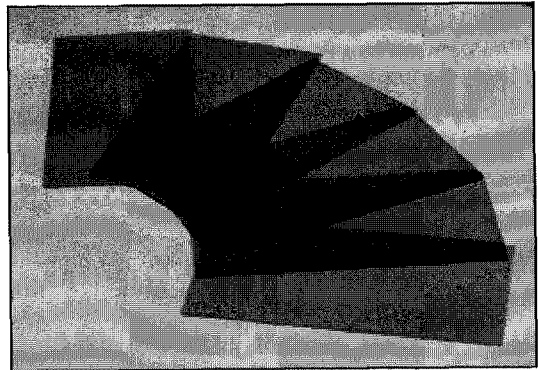


그림 13. 무극성 웨이퍼 사진.
Fig. 13. Non-polar wafer image.

감사의 글

이 논문은 2008년 에너지관리공단의 에너지자원 기술개발 사업(soft solution을 이용한 고기능성

SiC 나노분말 제조기술 개발)에 의하여 지원 되었으며, 2009년도 Brain Busan 21 사업에 의한 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B. Rau, P. Waltereit, O. Brandt, M. Ramsteiner, K. H. Ploog, J. Puls, and F. Henneberger, "In-plane polarization anisotropy of the spontaneous emission of m-plane GaN/(Al,Ga)N quantum wells", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, p. 3343, 2000.
- [2] P. G. Neudeck and J. A. Powell, "Performance limiting micropipe defects in silicon carbide wafers", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 15, p. 63, 1994.
- [3] J. Takahashi, M. Kanaya, and Y. Fujiwara, "Sublimation growth of SiC single crystalline ingots on faces perpendicular to the (0001) basal plane", *J. Crystal Growth*, Vol. 135, p. 61, 1994.
- [4] N. F. Gardner, J. C. Kim, J. J. Wierer, Y. C. Shen, and M. R. Krames, "Polarization anisotropy in the electroluminescence of m-plane InGaN-GaN multiple-quantum-well light-emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, p. 111101, 2005.
- [5] S. M. Bishop, J. S. Park, J. Gu, B. P. Wagner, Z. J. Reitmeier, D. A. Batchelor, D. N. Zakharov, Z. Liliental-Weber, and R. F. Davis, "Growth evolution and pendeo-epitaxy of non-polar AlN and GaN thin films on 4H-SiC (11-20)", *J. Crystal Growth*, Vol. 300, p. 83, 2007.
- [6] H. Yano, T. Hirao, T. Kimoto, and H. Matsunami, "High channel mobility in inversion layer of SiC MOSFETs for power switching transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, p. 2008, 2000.
- [7] R. Weingärtner, P. J. Wellmann, M. Bickermann, D. Hofmann, T. L. Straubinger, and A. Winnacker, "Determination of charge carrier concentration in n- and p-doped SiC based on optical absorption measurements", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, p. 70, 2002.
- [8] D. Olego and M. Cardona, "Raman scattering by coupled LO-phonon-plasmon modes and forbidden TO-phonon Raman scattering in heavily doped p-type GaAs", *Phy. Rev., B*, Vol. 24, No. 12, p. 7217, 1981.
- [9] H. Harima, S. Nakashima, and T. Uemura, "Raman scattering from anisotropic LO-phonon-plasmon-coupled mode in n-type 4H- and 6H-SiC", *J. Appl. Phys.*, Vol. 78, No. 3, p. 1996, 1995.