

6H-SiC wafer의 결정성 및 전기적 특성

김화목, 임창성*, 오근호

한양대학교 세라믹공학과, 서울, 133-791

*한양대학교 세라믹공정연구센터, 서울, 133-791

Crystallinity and electrical properties of 6H-SiC wafers

Hwa Mok Kim, Chang-Sung Lim* and Keun Ho Auh

Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**Ceramic Processing Research Center (CPRC), Hanyang University, Seoul 133-791, Korea*

요 약 승화법에 의한 6H-SiC 단결정의 최적 성장조건을 설정하여 고품질의 6H-SiC 단결정을 성장하였다. 성장된 결정의 직경은 약 33 mm, 길이는 약 11 mm였다. 성장된 결정을 절단하여 연마한 후 광학현미경을 이용하여 연마된 SiC wafer의 micropipe density와 planar defect density를 측정한 결과, micropipe density는 400개/cm²이었고 planar defect density는 50개/cm²이었다. 이 6H-SiC wafer와 기판으로 사용된 Acheson 결정의 결정성을 비교하기 위하여 Raman 분광법과 double crystal X-ray diffraction 분석법이 사용되었다. 이 분석에 의해 승화법에 의해 성장된 6H-SiC wafer가 Acheson seed보다 결정성이 우수하였다. Hall effect 측정법에 의해 불순물이 첨가되지 않은 6H-SiC wafer의 전기적인 특성을 측정하였으며 그 결과 캐리어 농도는 $3.91 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 이었고, n-type이었다.

Abstract 6H-SiC single crystals were successfully grown by the sublimation method and the optimum growth conditions were established. The grown SiC crystals were about 33 mm in diameter and 11 mm in length. The micropipe density of the polished SiC wafers was 400/cm², and the planar defect density was 50/cm². Raman spectroscopy and DCXRD analysis were used to examine the crystallinity of Acheson seeds and the 6H-SiC wafers. As a result, the crystallinity of the 6H-SiC wafers was better than that of Acheson seeds. For examination of the electrical properties of the undoped 6H-SiC wafers Hall

measurements were applied. According to the measurements the carrier concentration was estimated to be $3.91 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ and doping type of the undoped 6H-SiC wafers was n-type.

1. 서 론

최근 첨단 산업의 급속한 발달로 인하여 기존의 실리콘을 기반으로 사용하는 반도체 소자는 여러 응용분야에서 그 한계를 드러내고 있다[1]. 이러한 상황에서 화합물 반도체는 실리콘 반도체의 한계를 극복할 수 있는 새로운 반도체 재료로 각광을 받고 있으며, 이에 대한 연구가 급속히 진전되고 있다. 화합물 반도체 재료로는 GaAs, GaP, InP, GaN, SiC 등이 있으며, 고속, 고주파, 고출력 및 고온환경에서 실리콘에 비해 우수한 특성을 나타낸다. 그러나, 화합물 반도체와 실리콘 반도체를 비교할 때, 소자의 이용에 있어서 재료의 특성, 소자의 효율성을 고려할 때 화합물 반도체가 유리하지만, 경제성과 공정기술의 수준을 비교할 경우에는 실리콘 소자 쪽이 실리적이고 범용적이다. 따라서, 화합물 반도체 소자는 실리콘 소자의 단점을 보완하는 형태로 발전되어 왔다. 예를 들면, 광 특성을 이용한 레이저 다이오드, 발광 다이오드, 초고속 및 초고주파 특성을 이용한 MESFET, HEMT 및 바랙터, 믹서 다이오드를 비롯하여 인공위성용 태양전지에 내방사성이 강한 화합물 반도체가 이용되고 있다. 특히, 고도의 정확성, 내환경성이 요구되는 군사분야에서 화합물 반도체소자가 각광을 받고 있다.

이중, SiC 단결정에 대한 연구는 전세계적으로 선진국 즉, 미국, 일본, 그리고 유럽 몇 개국이 주도적으로 앞서 나아가고 있는 실정이다[2-4]. 이제 까지 알려진 SiC의 반도체적인 물성은 실리콘 및 GaAs보다 고온에서

동작 가능한 내열성이 우수하다는 점과 bandgap이 커서 큰 breakdown 전압을 가지므로 인한 고전압 인가특성 및 낮은 결핍 전류(low leakage current)를 가지기 때문에 소자에서의 전력 전환효율이 좋다[5].

이러한 점으로 부터 SiC wafer를 사용한 소자는 소위 '극한 상황'-예를 들면, 고온환경, 방사선 노출환경, 고전압, 고주파 인가시 소자내부 발열환경-에 잘 적응하여 정확하게 동작하고, 반영구적으로 정밀한 제어가 가능하다는 것이 제 3세대 반도체 기판재료로 잠재력이 있어 각광 받게 되었다. 최근 들어 이러한 SiC 재료의 특성을 이용하여 선진국에서는 HDTV 방송신호 송신용 Transmitter 소자를 개발하였다[6]. 또한 500 W급의 power transistor와 1.5 kW amplifier module를 목표로 개발 중에 있다. GE사[7]는 SiC flame sensor를 제작하였는데, 이것은 SiC UV photodiode(6H-SiC)와 SiC signal diode로 구성되어 탄화수소 불꽃의 UV 방출 스펙트럼과 SiC의 전기적, 광학적 특성이 잘 맞기 때문에 만들어진 소자이다. Benz사[8]는 SiC 압력센서를 3C-SiC로 제조하였으며 연소실에 적용된다. 그러나 이것의 주된 용도는 내연기관과 항공기 엔진에 응용될 예정이며, 이를 위해 계속적으로 개발 중에 있다. 특히, 미국의 CREE사는 SiC 단결정을 직접 생산, 판매하여 거의 세계 전역에 걸쳐 그 판매망을 독점하다시피 하고 있다.

그러나, 아직 실리콘 wafer의 경우처럼 대구경의 wafer의 생산이 불가능하여 직경 35 mm 정도의 wafer가 상용화 단계에 있으며, 곧 2인치 wafer의 상용도 가능하게 될

예정이다. 또한, SiC 단결정 내부에 존재하는 결함들의 제어가 어렵고 아직은 완벽한 무결함의 wafer가 생산 불가능한 상태여서 이에 대한 연구가 계속적으로 진행 중이다[9-11].

본 연구에서는 승화법으로 6H-SiC 단결정을 성장하여 절단 및 연마공정을 거쳐 wafer화하고 광학현미경으로 wafer의 내부 결함밀도를 측정하였다. 또한, Acheson seed와 wafer간의 결정성을 비교하고 불순물이 첨가되지 않은 undoped wafer의 전기적인 특성을 측정하였으며, 성장된 6H-SiC wafer의 결정성 및 전기적 특성을 평가함으로써 반도체 소자의 기판재료로의 사용 가능성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 6H-SiC wafer 제작

최적의 조건으로 성장된 6H-SiC 단결정을 diamond cutter를 이용하여 절단하였다. Diamond cutter는 diamond wheel의 직경이 5인치 두께는 0.5 mm 이었다. 절단된 결정의 표면을 연마하기 위해 diamond slurry를 사용하여 단면 연마기에서 연마하였다. 연마순서는 먼저 절단된 결정의 면을 고르게 하기 위해 황삭(lapping)을 한 후, diamond slurry 30 μm →3 μm →1 μm 의 순으로 연마하였다. 이렇게 하여 직경 33 mm, 두께 300 μm 인 6H-SiC 단결정 wafer를 제작하였다.

2.2. 내부결함 관찰

연마된 6H-SiC wafer의 내부결함을 관찰하기 위하여 광학현미경을 이용하였다. Wa-

fer 내부결함 관찰에는 주로 투과모드를 사용하여 관찰하였으며, 광학현미경 관찰에 의해 wafer 내부에 존재하는 micropipe와 planar defect의 형상 및 결함밀도를 관찰하였다.

2.3. 결정성 분석

6H-SiC 단결정 성장용 기판으로 사용되는 Acheson 결정과 이 기판을 이용하여 성장된 단결정 wafer의 결정성을 분석하기 위하여 Raman 분광법과 double crystal X-ray diffraction(DCXRD) 분석법이 이용되었다. Raman 분광법에서는 광원으로 514.5 nm의 파장을 갖는 레이저를 사용하여 상온에서 50 mW의 출력으로 조사하여 이때 phonon의 생성으로 인해 발생하는 peak의 반폭치를 측정하여 결정성을 분석하였다. 또한, DCXRD 분석법으로는 Acheson 결정에 대한 rocking curve를 얻어 반폭치를 구함으로써 결정성을 평가하였다.

2.4. 전기적 특성

6H-SiC wafer의 전기적 특성평가에는 Hall effect 측정법이 응용되었으며 그 방법은 다음과 같다. 시편을 약 5 mm×5 mm의 정사각형 모양으로 자른 후, ohmic 접합을 만들기 전에 TCE, acetone, methanol, deionized water 순으로 초음파 세척기를 사용하여 세척한 다음 Ti/Au로 Fig. 1과 같은 ohmic 접합을 만들었다. Ohmic 접합을 효과적으로 하기 위해 질소 분위기에서 500℃로 10분간 annealing을 하였다. 이와 같은 방법으로 준비된 시편을 Hall effect 측정장치에 장착하여 측정하였다. 이때 비저항 ρ 는 Van der Pauw가 임의 모양의 시료에 대하여 제

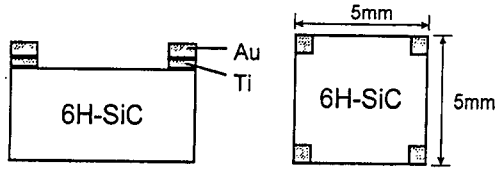


Fig. 1. Ohmic contact of 6H-SiC wafer.

산한

$$\rho = \frac{\pi d}{2 \ln 2} (R_{12,34} + R_{23,14}) \quad (1)$$

식을 따르며, 여기서 d 는 시료의 두께, $R_{ij,kl}$ 은 $B_{kl}/I_{ij}/l_{ij}$ 로 정의한다. 또 f 는 가로방향의 저항과 세로방향의 저항값의 비이며,

$$\cosh \left[\frac{\ln 2}{f} \frac{R_{12,34}/R_{23,14} - 1}{R_{12,34}/R_{23,14} - 1} \right] = \frac{1}{2} \exp(\ln 2/f) \quad (2)$$

식에서 얻을 수 있다. 또한, 이동도는

$$\mu_H = \frac{d}{B} \cdot \frac{(V_{13}^B - V_{13}^0)/I_{24}}{\rho} \quad (3)$$

이다. 여기서 V_{13}^B 과 V_{13}^0 은 시료에 수직으로 자장(B)을 걸어 주었을 때와 그렇지 않을 때 측정된 1번과 3번 단자간의 Hall 전압이다.

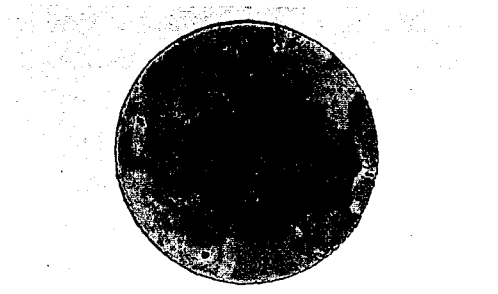
이러한 Hall 측정방법으로 SiC wafer의 비저항, 전도도, 이동도 및 캐리어 농도를 구하여 wafer의 type 및 불순물이 첨가되지 않는 undoped wafer의 캐리어 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

성장실험을 통해 얻어진 최적의 성장조건으로 6H-SiC 단결정을 성장하였으며, 성장된 결정을 절단 및 연마하여 wafer를 제작하였다. 성장된 6H-SiC 단결정 ingot 및 연마된



(a)



(b)

Fig. 2. 6H-SiC single crystal ingot (a) and polished wafer (b).

wafer를 Fig. 2에 나타내었다. 결정의 직경은 약 33 mm, 길이는 11 mm이었으며, 연마된 wafer의 두께는 약 300 μm 였다. 성장된 결정은 도가니 내부의 직경과 같은 크기이며, 표면양상은 도가니 내부의 수평적인 온도구배에 따라 높낮이가 서로 조금씩 다르게 성장되어 중앙부위가 높고 도가니 내벽과 맞닿는 부분에서는 결정의 성장높이가 중앙부위와 비교해서 약간 낮았다. 또한 성장표면에는 hexagonal facet면이 형성되어 있어 결정이 hexagonal 구조에서 c 축 방향으로 성장되었음을 알 수 있었다. 또한, 연마된 wafer는 중앙의 단결정부 주위로 여러 가지 다결정이 공존하여 다양한 색을 나타냈으나 전체적으로 투명하였다.

Fig. 3은 6H-SiC wafer내에 존재하는 전형적인 내부결함을 나타낸 것이다. Fig. 3

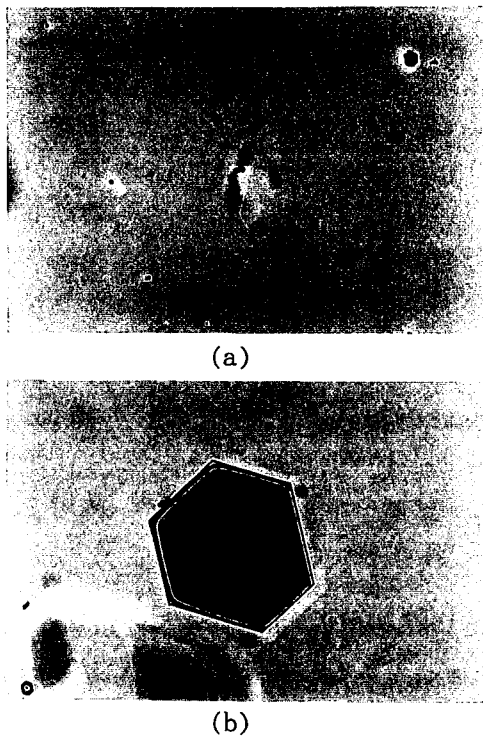


Fig. 3. Internal defects of the 6H-SiC wafer showing (a) micropipes and (b) planar defects.

(a)에서는 wafer내에 존재하는 micropipe를 나타낸 것으로 원형의 작은 점들로 관찰되었다. wafer내에 존재하는 micropipe의 크기는 대체적으로 직경이 10~30 μm 이었고, 밀도는 400개/ cm^2 이었다. Fig. 3(b)는 planar defect를 나타낸 것으로 모양은 육각 판상형이며 서로 마주보는 변이 항상 서로 평행하였고, 평균적인 planar defect의 크기는 약 200 μm 였으며 wafer내에서의 밀도는 약 50 개/ cm^2 이었다.

성장전 초기 기판으로 사용된 Acheson 결정과 성장된 6H-SiC 단결정 ingot로부터 절단해 연마한 wafer간의 결정성을 비교분석하기 위하여 Raman 분광법과 DCXRD 분석을 하였다. Raman은 FT-IR과 상호 보완적

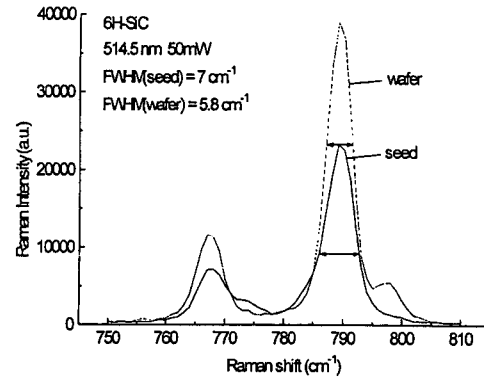


Fig. 4. Raman peak of the 6H-SiC wafer comparing to the Acheson seed.

으로 분자들의 진동에너지로 분석되는 것으로, 단결정 시료의 결정성 평가도 가능하다. 이는 detect되는 phonon들의 파장별 에너지 분포가 좁은 파장영역에 존재하는가를 측정함으로써 가능하다. 즉, 각 파장별로 나온 phonon들이 만들어낸 세기 분포곡선의 반폭치 값은 결정의 결정성을 가늠해 주는 척도가 된다. Fig. 4는 성장전 초기 기판으로 사용된 Acheson 결정과 연마된 6H-SiC wafer에 대한 Raman peak을 나타낸 것이다. 광원은 514.5 nm의 레이저를 사용하였고, 상온에서 50 mW의 출력으로 조사하여 측정하였다. 이때 Acheson 결정에 대해 790 cm^{-1} 에서 특성 phonon이 생성되고, 반폭치는 7 cm^{-1} 이었다. 또한, 같은 상황에서 wafer에 대한 peak의 반폭치가 5.8 cm^{-1} 로 나타났다. Acheson 법에 의해 성장된 결정은 그 형상이 여러가지이고, 결정의 다형(polytype)의 제어가 불가능하여 일반적으로 결정성이 떨어지는 것으로 되어 있지만, 결정 내부에 micropipe나 planar defect와 같은 결함들이 존재하지 않아 품질면에서는 좋은 것으로 알려져 있다. 반폭치를 비교한 결과, Acheson 결정보다는 Acheson 결정을 기판으로 사용하여 성장된 wafer의 결정성이 더

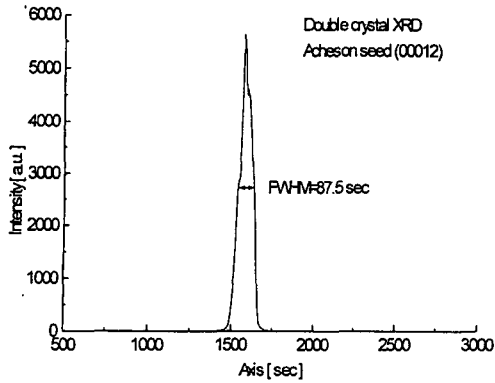


Fig. 5. Double crystal X-ray diffraction pattern of the Acheson seed.

좋은 것으로 나타났다.

결정성을 평가하는 또 하나의 방법인 DCXRD pattern을 이용하여 Acheson 결정의 rocking curve를 얻은 결과를 Fig. 5에 나타내었으며, 이때의 rocking curve의 반폭치는 87.5 sec이었다.

일반적으로 반도체 wafer가 소자재료에 사용될 때 가장 중요한 factor가 되는 wafer의 전기적 특성을 측정하는 방법에는 주로 Hall effect 측정, C-V 등이 사용되는데 가장 간단하게 측정할 수 있는 것은 Hall effect 측정이다. Hall 측정을 위해서는 측정하기 위한 재료를 5 mm×5 mm 크기의 정사각형으로 제작하여 각각의 4개의 corner에 그 재료에 적합한 금속 전극재료를 부착하여 그 재료의 비저항, 전도도, 이동도 및 캐리어 농도를 측정하게 된다. Fig.1에 나타낸 것처럼 이러한 Hall 측정을 위하여 성장된 결정을 절단후 연마하여 가로×세로가 5 mm×5 mm되게 제작한 후 정사각형 시편의 네군데 corner에 전극재료를 증착한다. 이때 전극재료로는 Ti과 Au를 사용하였으며 E-beam을 이용하여 Ti와 Au의 두께를 각각 300 Å, 2000 Å으로 증착시켰다. 이때의 증착 속도는 Ti의 경우 4.2 Å/sec, Au의 경우는

Table 1

Electrical properties of the 6H-SiC wafers by the Hall effect measurements

Contents	Specimen	
	SiC 01	SiC 02
Resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	64.4	65.5
Conductivity σ ($\text{mho} \cdot \text{cm}^{-1}$)	1.55×10^{-2}	1.53×10^{-2}
Mobility μ ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	300.2	300.3
Carrier concentration $n(\text{cm}^{-3})$	3.91×10^{15}	3.91×10^{15}

5.0 Å/sec이었고, 증착시킨 전극재료가 안정하게 증착되도록 하기 위하여 질소 분위기중 500°C에서 10분 동안 열처리하였다. 이러한 과정을 거쳐 제작된 6H-SiC 시편을 Hall 측정을 통하여 전기적인 특성을 측정한 결과는 Table 1에 나타내었다. 본 측정에 사용된 6H-SiC wafer는 불순물이 첨가되지 않은 즉, undoped 상태이기 때문에 캐리어 농도가 $10^{15} \sim 10^{16}/\text{cm}^3$ 정도로 예상하였고 측정에 의한 결과 예상했던 결과에 부합하는 $3.91 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 으로 나타났다. 또한, 비저항은 약 65 $\Omega \cdot \text{cm}$, 전도도는 약 $1.55 \times 10^{-2} \text{ mho} \cdot \text{cm}^{-1}$, type은 n-type이었고, 전자이동도는 약 300 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 로 나타났다. 본 측정의 결과로부터 이 실험에서 얻어진 6H-SiC wafer의 전기적인 특성은 일반적으로 지금까지 발표되었던 data와 유사한 것으로 나타나 이 wafer를 반도체 기판재료로 활용하는데 있어서 어느 정도의 가능성을 보여준 결과라 할 수 있다.

4. 결 론

승화법에 의해 6H-SiC 단결정을 성장하였으며, 성장된 결정을 절단, 연마하여 wafer를 제작하였다. 성장된 6H-SiC 단결정의 직경은 33 mm, 길이는 11 mm이었고, 단결정을 절단 및 연마하여 제작한 wafer의 직경은 33 mm, 두께는 300 μm 였다. 광학현미경 관찰을 통하여 wafer내의 내부 결함밀도를 관찰한 결과, micropipe density는 400개/ cm^2 이었고, planar defect density는 50개/ cm^2 이었다. 또한, wafer의 결정성 분석을 위해 Raman 분광법 및 DCXRD 분석법이 사용되었다. 두 분석법에 의해 결정성장 기판으로 사용된 Acheson seed와 성장된 wafer간의 결정성을 비교해 보면, Acheson 결정을 기판으로 사용하여 성장된 wafer의 결정성이 기판으로 사용된 Acheson 결정보다 더 좋은 것으로 나타났다. 또한, 성장된 wafer에 대한 Hall effect 측정을 통하여 얻어진 캐리어 농도는 $3.91 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 이었고, n-type 이었다. 이상의 결과로부터 기존의 6H-SiC wafer의 특성과 비교해 본 결과, 반도체 기판재료로의 응용이 어느 정도는 가능하다고 생각되었으며, 앞으로 고품질의 wafer 성장

을 위해 더욱 세밀한 분석이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Lande, III-V's Review 9(1) (1996).
- [2] A.G. Acheson, Engl. Pat. 17911 (1892)
- [3] J.A. Lely, Bar. Deut. Keram. Ges. 32 (1955) 229.
- [4] Yu.M. Tairov and V.F. Tsvetkov, J. Crystal Growth 52 (1981) 146.
- [5] K. Bergman, ABB Review (1996).
- [6] R. Morrow, Westinghouse Electric Corporation Press Releases (1996).
- [7] D. Brown, HITEN News (1996).
- [8] G. Krötz, *ibid.* (1996).
- [9] 강승민, 오근호, 한국결정성장학회지 5 (1995) 44.
- [10] 강승민, 오근호, *ibid.* 5 (1995) 50.
- [11] 오근호, 심광보, 임창성, *ibid.* 6 (1996) 107.