

The effect of PVT process parameters on the resistance of HPSI-SiC crystal

Jun-Hyuck Na, Min-Gyu Kang, Gi-Uk Lee, Ye-Jin Choi, Mi-Seon Park, Kwang-Hee Jung, Gyu-Do Lee*, Woo-Yeon Kim* and Won-Jae Lee†

Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

*KC Industrial, Jincheon 27850, Korea

(Received February 6, 2024)

(Revised March 11, 2024)

(Accepted March 14, 2024)

Abstract In this study, the resistance characteristics of semi-insulating SiC single crystals grown using the PVT method were investigated, considering the purity level of SiC source powders used in PVT growth and the cooling procedure after crystal growth. Two β -SiC powders with different purities were employed, and the cooling rate after growth was adjusted to achieve various resistance values. 4-inch HPSI-SiC ingots were grown using the PVT method, utilizing SiC powders with low nitrogen concentration and relatively high nitrogen concentration. These ingots were then subjected to different cooling procedures to modify the cooling rate. Transmission/absorption spectra and crystal quality of the grown crystals were analyzed through UV/VIS/NIR spectroscopy and X-ray rocking curve analysis, respectively. Additionally, electrical properties were investigated through non-contact resistivity analysis to identify the dominant factors influencing resistivity properties.

Key words HPSI-SiC, Intrinsic point defects, Resistivity, PVT

PVT 공법의 공정 변수가 고순도 반절연 SiC 단결정의 저항에 미치는 영향

나준혁, 강민규, 이기욱, 최예진, 박미선, 정광희, 이규도*, 김우연*, 이원재†

동의대학교 신소재공학과, 부산, 47340

*KC 인더스트리얼, 진천, 27850

(2024년 2월 6일 접수)

(2024년 3월 11일 심사완료)

(2024년 3월 14일 게재확정)

요약 본 연구에서는 SiC(Silicon Carbide) 분말의 순도와 결정 성장 후 냉각 속도를 제어하여 PVT(Physical Vapor Transport) 방법으로 성장한 4인치 HPSI(High-Purity Semi-Insulating)-SiC 단결정의 저항 특성을 조사하였다. 순도가 다른 2개의 β -SiC 분말을 사용하였고, 성장 후 냉각 속도를 조절하여 다양한 저항값을 얻었다. 성장된 결정의 투과/흡수 스펙트럼 및 결정 품질은 각각 UV/VIS/NIR 분석과 XRD Rocking curve 분석을 이용하였으며, 비접촉 비저항 분석을 통해 전기적 특성을 조사하여 비저항 특성에 우세한 영향을 미치는 주요 요인을 확인하였다.

1. 서론

최근 대부분의 디지털 기기는 무선통신을 적용하고 있으며 이러한 무선통신에 적용되는 기술에는 RF(Radio Frequency)가 있다. 특히 최첨단 기술인 5G 분야에 활발히 사용되기 때문에 기술 고도화가 이뤄지고 있으며, 그에 따라 RF 분야의 반도체 기술 역시 개발이 필요한 상황이다. GaN(Gallium Nitride)는 우수한 열전도 특성,

높은 항복 전압, 우수한 전자 이동성을 가지고 있어 높은 스위칭 주파수 효율성을 필요로 하는 RF소자에 적합하다. 무선통신 시스템 장치의 경우 전력이 가장 중요한 핵심 역할을 하게 되는데, GaN 반도체와 같은 전력 반도체가 적합하며 개발에 주목하고 있다. 하지만 GaN 벌크 단결정 성장은 매우 높은 온도와 압력이 필요하여 실질적으로 대구경화 기술 구현이 어렵다. 이러한 이유로 이종기판을 이용한 epitaxial 성장에 의존하고 있으며 대표적으로는 Si(Silicon)이나 Sapphire 기판이 사용되고 있다. 그러나 GaN간의 격자 부정합과 열팽창 계수 차이로 인해 고성능 소자를 제작하지 못하며 가장 큰 문제로

†Corresponding author
E-mail: leewj@deu.ac.kr

발열 또한 심해져 기존 Si 기반의 GaN 소자의 경우 별도의 냉각 시스템이 필요하다. 반면에 열전도율이 높은 SiC(Silicon Carbide)를 기판으로 사용하면 열전달을 크게 향상시켜 발열 문제를 해결할 수 있다. 이러한 특성 차이 때문에 기존 RF 시장에서 Si 기반 LDMOS(Laterally Diffused MOSFET)를 GaN on SiC MOSFET으로 대체가 가능할 것으로 예상하고 있다[1].

SiC 기판 중에서도 GaN on SiC 소자에 적용가능한 반절연 SiC 기판은 비저항이 높아 마이크로파 주파수에서 작동하는 많은 소자 및 회로에 대한 핵심 요구 사항인 낮은 유전 손실을 만족한다. 반절연 SiC 기판은 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 보다 큰 비저항을 가져야 하며, 높은 비저항으로 인해 기판에서 epitaxial층이나 소자를 쉽게 분리할 수 있다. 또한 복잡하고 비싼 추가적인 절연 기술이 필요치 않아 비용절감에 있어서 이점이 있다[2]. 이러한 반절연 SiC는 바나듐(Vanadium)을 SiC에 도핑하여 고저항을 구현하는 VDSI-SiC(Vanadium Doped Semi-Insulating SiC)가 있으며[3], 또 다른 방법으로는 고순도 SiC 분말을 사용하여 잔류 불순물을 최소화하고 진성 점결함을 발생시켜 밴드갭 내에 deep trap이 형성되어 비저항을 구현하는 HPSI-SiC(High-Purity Semi-Insulating SiC)가 있다[4]. 그러나 VDSI-SiC의 경우 바나듐이 도핑되지 않은 자유 영역이 전도성을 가지므로 소자의 비절연성이 나타나며, $1,000^\circ\text{C}$ 이상의 온도에서 낮은 전기적 활성화 상태를 보여준다[5]. 또한 성장 중 바나듐의 승화속도가 SiC 보다 빠르기 때문에 성장한 잉곳의 국부적인 영역만 반절연 특성을 나타내 수율 저하의 문제가 있다.

본 연구에서는 SiC 분말의 순도 수준과 점결함의 농도가 HPSI-SiC 저항특성에 미치는 영향을 조사하였다. 순도가 다른 2개의 β -SiC 원료를 사용하였고 성장 후 $2,000^\circ\text{C}$ 이상에서 열처리를 하여 진성 점결함을 생성하였다. 이후, 냉각 속도를 조절하여 진성 점결함의 농도를 제어함으로써 다양한 저항값을 얻었다[6]. SiC 분말 수준을 알아보기 위해 SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)와 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)

분석을 수행하였다. 성장된 결정은 UV/Vis/NIR 투과도를 통해 의도치 않은 불순물 도핑의 유무를 확인하였고, XRD(X-ray diffractometer)로 결정다형 및 결정성 분석과 V_C (Carbon vacancy, 탄소 공백)의 농도로 인해 나타난 결정성을 확인하였다. 또한, SiC 분말 순도 및 V_C 농도로 나타난 저항 특성 간의 상관관계를 이해하기 위해 비접촉 비저항 측정 분석을 통해 체계적으로 조사하였다.

2. 실험 방법

PVT 공정변수에 따른 HPSI-SiC 단결정의 비저항 특성을 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 실험에서 설정한 PVT 공정 변수로는 SiC 분말 순도, 성장 후 냉각 속도 총 두 가지로 설정하여 실험은 총 4번의 실험으로 이루어졌다. 실험 ①과 ②는 중순도 SiC 원료를 사용하였고, 실험 ③과 ④는 고순도 SiC 원료를 사용하였다. 또한, 냉각 속도가 저항 값에 미치는 영향을 살펴보기 위해 원료의 순도는 고정한 후 냉각속도를 달리하였는데 실험 ①과 ③의 냉각속도는 $9^\circ\text{C}/\text{min}$, 실험 ②와 ④의 냉각속도는 $17^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 진행하였다. 이는 Table 1에도 나타나있다. 모든 실험의 상용화 4인치 4H-SiC wafer를 종자정으로 사용하였으며 Si면(0001)이 위로 향하게 종자정 홀더에 부착하였다. Figure 1은 실험에 사용된 K사의 SiC 분말이다. 두 분말 모두 $2500 \mu\text{m}$ 의 입도 사이즈를

Table 1
Experimental conditions for semi-insulating SiC single crystal growth

Sample	SiC powder	Cooling rate after growth	Ar gas flow (Cooling)
Experiment ①	Medium-purity	$9^\circ\text{C}/\text{min}$	0.5 SLM
Experiment ②	Medium-purity	$17^\circ\text{C}/\text{min}$	5 SLM
Experiment ③	High-purity	$9^\circ\text{C}/\text{min}$	0.5 SLM
Experiment ④	High-purity	$17^\circ\text{C}/\text{min}$	5 SLM



(a)



(b)

Fig. 1. Photographs of SiC powder to be used in the experiment (a) Medium-purity SiC powder and (b) high-purity SiC powder.

Table 2
Experimental conditions for semi-insulating SiC single crystal growth

		Average	(ppm at)	(ppm wt)
High-purity powders	N concentration (at/cm ³)	2.6E+15	2.7E-02	1.9E-02
	B concentration (at/cm ³)	2.2E+15	2.3E-02	1.3E-02
Medium-purity powders	N concentration (at/cm ³)	8.8E+17	9.1E+00	6.4E+00
	B concentration (at/cm ³)	1.5E+16	1.6E-01	8.5E-02

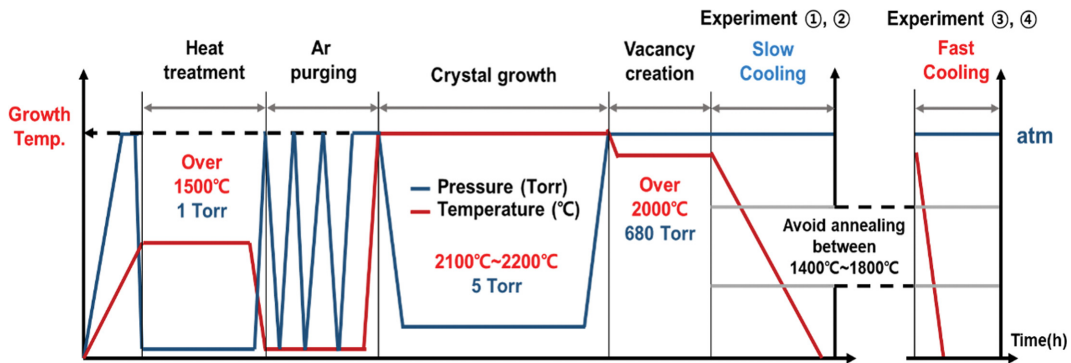


Fig. 2. The process condition for HPSI-SiC growth.

가지고 있다. SIMS 분석을 통하여 (a) SiC 분말의 질소 농도는 8.8×10^{17} at/cm³, (b) SiC 분말의 N(Nitrogen) 농도는 2.6×10^{15} at/cm³으로 나타났다. 본 실험에서는 약 100배 이상의 N 농도 차이가 나타나 (a) SiC 분말을 중순도 분말로 (b) SiC 분말을 고순도 분말로 명칭하였다. 금속 불순물 또한 ICP-MS 분석을 하여 두 분말 모두 금속 불순물의 혼입은 발생하지 않았으며 N와 B의 농도 차이가 우세한 차이점이라는 것을 확인할 수 있다. Table 2를 통해 두 분말의 구체적인 순도를 입증하였다. 성장 후 냉각 단계를 제외한 모든 성장 구간의 조건을 동일하게 진행하였으며, Fig. 2에는 실험에 적용된 PVT 성장 공정 그래프를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

SiC 분말의 순도와 성장 후 냉각 속도를 달리하여 반절연 SiC 단결정 성장 실험을 진행하였다. 총 네 가지 실험에서 분말의 순도 및 냉각 속도를 제외한 실험 조건들은 모두 동일하게 진행하였다. SiC 분말의 불순물 농도를 통해 생성되는 밴드 갭 내의 얇은 level과 성장 후 고온 열처리를 거치고 나서 냉각 속도를 조절하여 생성된 진성 점결함으로 인한 밴드 갭 내의 깊은 trap level의 상관관계 및 더욱 우세한 인자가 무엇인지 알아보기 위해 다양한 분석법들을 통해 체계적으로 조사하였다. 모든 실험의 분석 샘플은 잉곳의 표면으로부터 약 1 mm 위의 위치에서 추출하였고 wafer의 중심부로부터 20

mm² 크기의 영역에서 절단 및 가공하였다.

Figure 3을 보면 중순도 분말을 적용한 실험 ①와 ②의 경우 잉곳에서 녹색이 나타났으며, 실험 B의 잉곳 내부에 크랙이 발생하여 wafer화 하지않고 분석샘플을 추출하였다. 실험 ①와 ② 모두 분석 샘플에서는 투명한 연두색을 나타내었다. 고순도 분말을 적용한 실험 ③, ④의 경우 투명한 wafer 색상을 나타냈으나 느린 냉각 속도를 적용한 실험 ③의 잉곳은 불투명한 색상이 나타났다. 이는 성장 후 느린 냉각 과정을 통해 잔류 Carbon 가스들이 표면에 증착되어 나타난 색상으로 유추할 수 있다.

성장 후 냉각 속도에 따라 진성 점결함 농도가 달라지게 되는데 이를 확인하기위해 Rocking curve를 통해 결정성을 분석하였다. 분석 결과는 Fig. 4에 나타내었다. FWHM(Full width at half maximum, 반치폭) 값은 실험 ①의 결과가 가장 높았으며 순차적으로 실험 ③ 실험, 실험 ④, 실험 ② 순으로 나타났다. 이는 성장 후 냉각 속도를 빠르게 하강하여 생성된 진성 점결함 또는 열충격으로 인한 열응력에 대한 영향이라고 볼 수 있다. 실험 ②의 경우 잉곳 내부에 크랙이 발생하였지만 실험 ④의 경우 잉곳에 크랙이 발견되지 않았기 때문에 진성 점결함 농도에 의해 FWHM 결과가 나타난 것으로 유추할 수 있다.

SiC 결정 다형은 온도에 따라 달라지는데 일반적으로 4H-SiC는 1,600~2,100°C, 6H-SiC는 2,300°C 이상의 고온에서 결정 다형 발생 확률이 높다고 알려져 있다[7]. 이에 따라 XRD 분석을 통해 상분석을 진행하여 성장

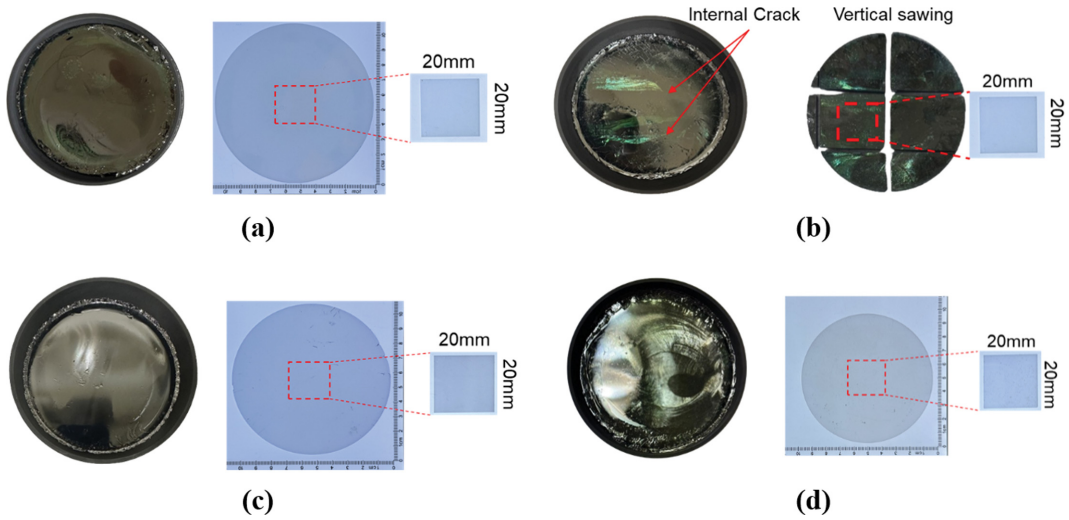


Fig. 3. Photographs of grown ingots and wafers : (a) Experiment ①, (b) Experiment ②, (c) Experiment ③, (d) Experiment ④.

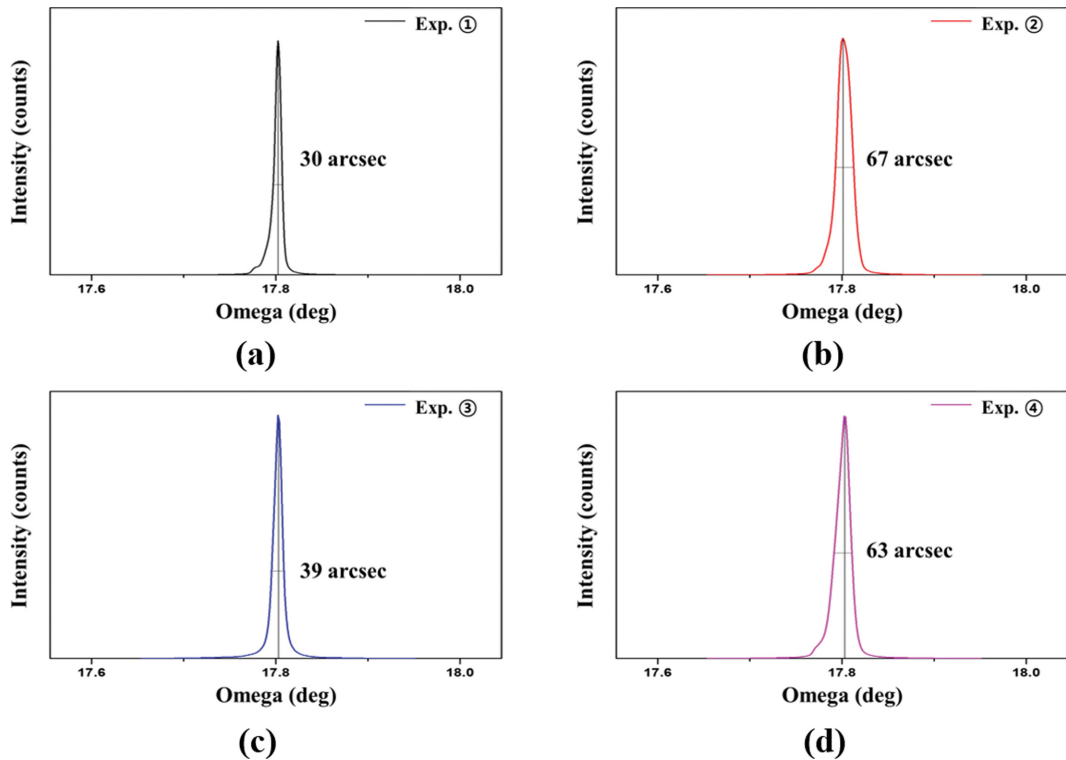


Fig. 4. Rocking curve of SiC wafers grown : (a) Experiment ①, (b) Experiment ②, (c) Experiment ③, (d) Experiment ④.

온도를 추측함으로써 진성 점결함의 농도 차이 여부를 추출하고자 하였다. Figure 5에 상분석 결과를 나타내었다. SiC는 적층 주기에 따라 주피크 사이의 보조피크의 개수가 달라지는데 4H-SiC의 경우 3개의 보조피크, 6H-SiC의 경우 5개의 보조피크, 15R-SiC의 경우 5개의 보조피크를 가진다[8]. 본 실험의 분석 결과, 실험 ③을 제외한 모든 분석 시료에서 6H-SiC가 나타난 것으로 보아 성장 온도는 2,300°C가 넘는 고온인 것으로 추측된다. 실험 ③의 경우 4H-SiC와 6H-SiC의 보조피크가 동시에

나타나 결정 다형 혼입이 나타났다. 그러므로 실험 ①과 실험 ③은 진성 점결함 농도차이가 발생되었을 것으로 추측된다.

Raman 분석을 통해 HPSI-SiC 분석 시료의 결정 다형과 자유 캐리어 농도 분석을 진행하였다. Figure 6은 SiC 분말 순도와 성장 후 냉각 속도를 다르게 하여 성장시킨 Raman 데이터이고 Table 3은 상용화 4H-SiC와 6H-SiC의 Raman 피크 별 비교표이다. 실험 ①, 실험 ②, 실험 ④의 경우 149 cm^{-1} (TA), 504 cm^{-1} (LA), 765

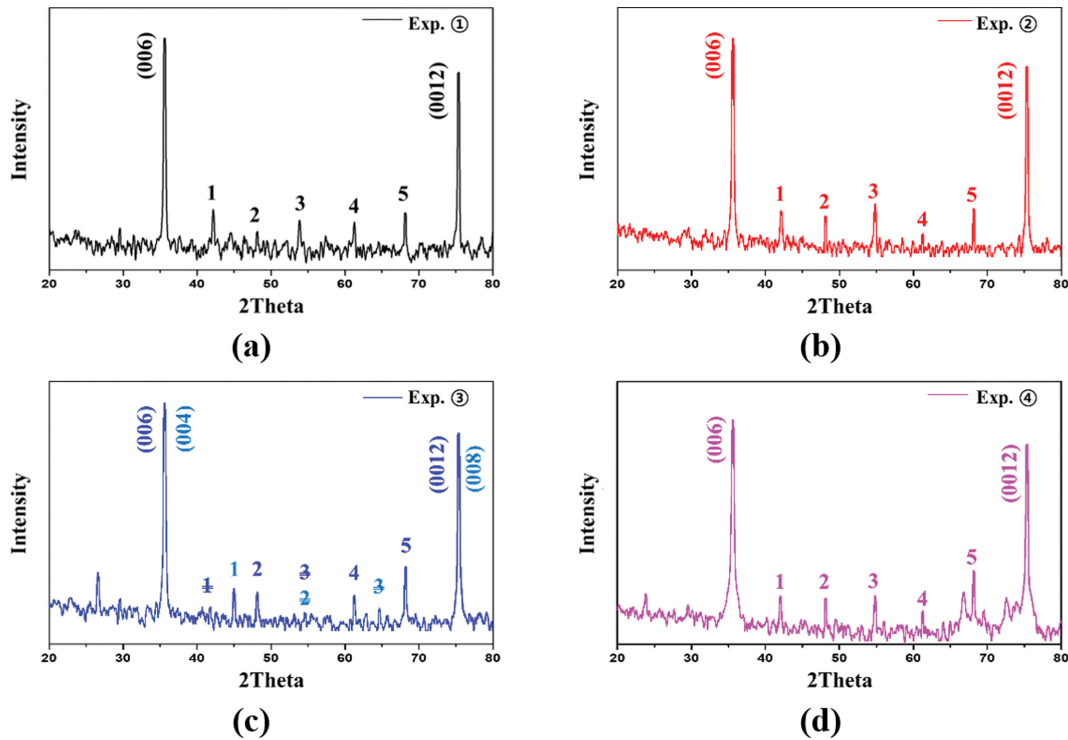


Fig. 5. XRD patterns of SiC wafers grown : (a) Experiment ①, (b) Experiment ②, (c) Experiment ③, (d) Experiment ④.

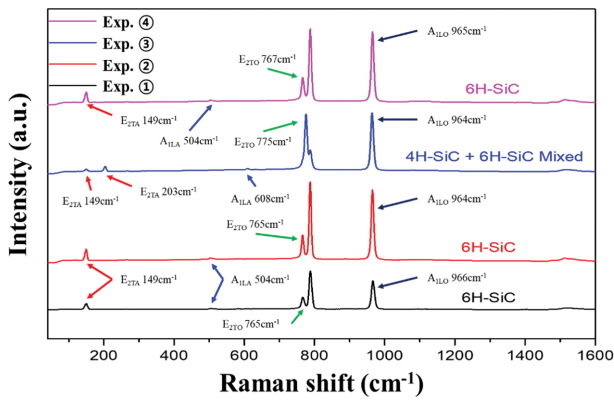


Fig. 6. Raman spectra of SiC wafers.

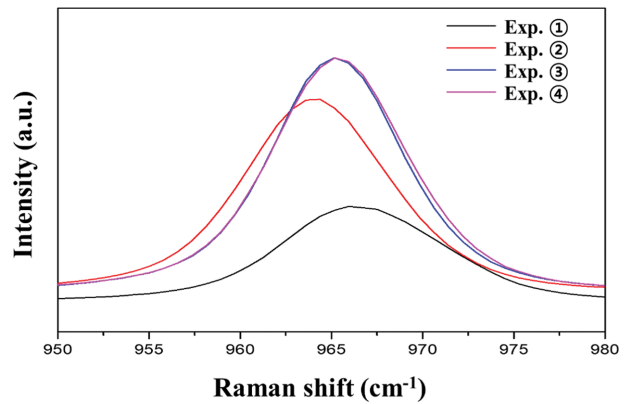


Fig. 7. LOPC peak of grown SiC wafers.

$\text{cm}^{-1}(\text{TO})$ 의 파수 피크가 관찰되어 6H-SiC를 확인하였고 실험 ③의 경우 $149 \text{ cm}^{-1}(\text{TA})$, $203 \text{ cm}^{-1}(\text{TA})$, $608 \text{ cm}^{-1}(\text{LA})$, $775 \text{ cm}^{-1}(\text{TO})$ 의 파수 피크가 관찰되며 TA 피크를 통해 4H-SiC와 6H-SiC가 혼합되어 있는 것을 확인하였다.

SiC 결정 C축에 평행하게 진동을 하는 LO(Longitudinal Optical)는 진동하기 전 중성상태에서 진동이 발생하면 전하들이 움직여 전기장이 생성이 되며 동시에 도핑된 결정의 플라즈몬이 만드는 전기장과 결합하여 공명이 이뤄진다. 이를 통해 이동도와 도핑농도를 간접적으로 알아 낼 수 있다. SiC의 도핑농도는 LOPC(LO-Phonon Plasmon Couple) 모드에서 피크폭이 넓어지고, 피크 위치의 이동

이 발생됨에 따라 도핑농도가 증가한다는 것을 나타낸다 [9]. Figure 7은 Raman 분석 결과 중 LOPC 모드 피크를 나타내었다. 네 가지 분석 시료에서 LOPC 모드의 피크 위치 이동은 크게 이뤄지지 않아 피크폭의 넓어짐으로 도핑농도를 추측하였다. 네 가지의 분석 시료 중 피크폭이 넓은 순서는 실험 ① > 실험 ② > 실험 ③ > 실험 ④ 순이며 이는 SiC 분말 순도의 영향이 성장 후 진성 점결함 농도 영향 보다 불순물 의존도가 우세하다는 의미이다. 성장 후 냉각속도를 조절하여 형성된 진성 점결함의 농도가 중순도 분말의 불순물 농도보다 낮아 LOPC 모드에서 고순도 분말을 적용한 결과보다 피크폭이 넓게 나타난 것으로 보여진다.

Table 3
Raman measurement wavenumber for each wafer

	FTA	FLA	FTO		LOPC
4H-SiC Ref.	204 cm⁻¹	610 cm⁻¹	776 cm⁻¹	796 cm⁻¹	964 cm⁻¹
Experiment ③	203 cm ⁻¹	608 cm ⁻¹	775 cm ⁻¹	-	964 cm ⁻¹
6H-SiC Ref.	150 cm⁻¹	504 cm⁻¹	767 cm⁻¹		965 cm⁻¹
Experiment ①	149 cm ⁻¹	504 cm ⁻¹	765 cm ⁻¹		966 cm ⁻¹
Experiment ②	149 cm ⁻¹	504 cm ⁻¹	765 cm ⁻¹		964 cm ⁻¹
Experiment ③	149 cm ⁻¹	-	-		964 cm ⁻¹
Experiment ④	149 cm ⁻¹	504 cm ⁻¹	767 cm ⁻¹		965 cm ⁻¹

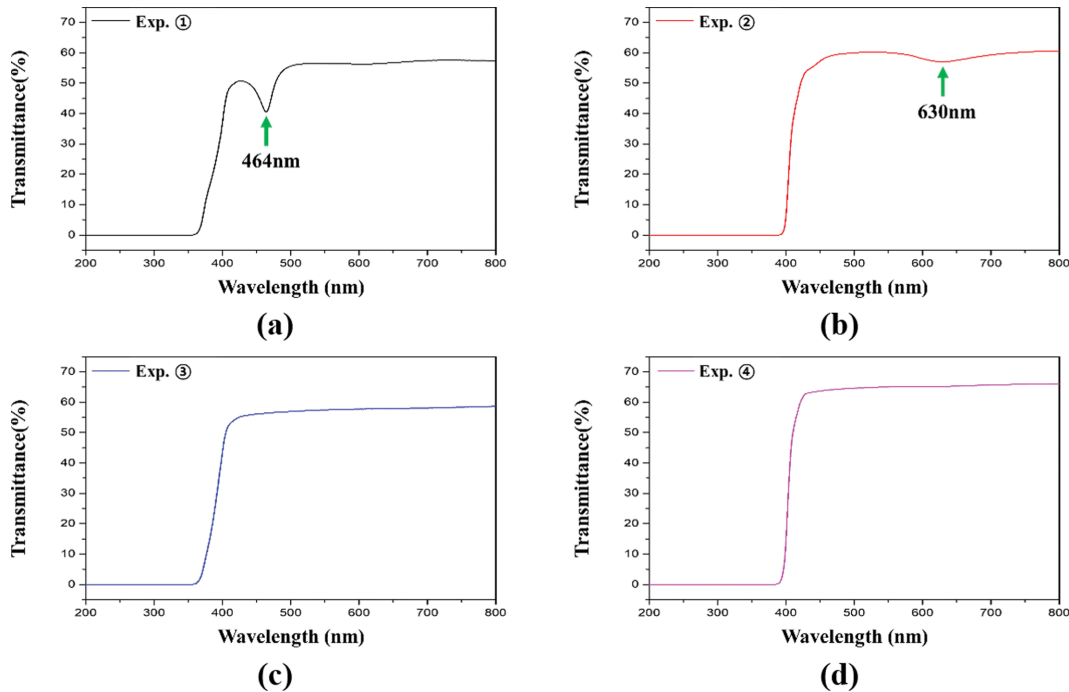


Fig. 8. Transmittance of SiC wafers grown : (a) Experiment ①, (b) Experiment ②, (c) Experiment ③, (d) Experiment ④.

Table 4
Resistivity for each wafer

Sample	Experiment ①	Experiment ②	Experiment ③	Experiment ④
Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	2.06E+03	2.82E+03	2.29E+05	3.47E+05

UV/Vis/NIR 분석(Agilent technologies사의 Cary 5)을 통해 SiC 시료의 결정 다형 및 불순물 농도를 분석하였다. 분석 결과는 Fig. 8에 나타났다. 실험 ①의 분석 시료의 경우 약 464 nm 부근에서 흡수피크가 나타나는데 이는 N 도펀트로 인해 발생하는 것을 의미한다[10,11]. 실험 ②의 분석 시료의 경우 약 630 nm 부근에서 흡수피크가 일어나며 이 역시 6H-SiC에서 나타나는 N 도펀트로 인해 발생하는 것을 의미한다[12]. 실험 ③와 실험 ④의 분석 시료의 경우 전도성 흡수피크가 나타나지 않고 반절연 SiC에서 나타나는 분석 결과를 나타내었다[12].

SiC 분말 순도와 성장 후 냉각 속도를 다르게 하여 성

장시킨 SiC 분석 시료의 비저항을 SEMILAB의 비접촉 고저항 측정장비를 이용하여 OCV(Open Circuit Voltage) 방식으로 측정한 결과를 Table 4에 나타내었다. 측정 결과 비저항이 높은 순서로는 실험 ④, 실험 ③, 실험 ②, 실험 ① 순으로 나타났다. 고순도 분말을 적용한 시료의 경우 약 $10^5 \Omega\cdot\text{cm}$ 의 값을 가졌고 중순도 분말을 적용한 시료의 경우 약 $10^3 \Omega\cdot\text{cm}$ 의 값이 나타났다. 흥미롭게도 성장 후 빠른 냉각 속도를 적용한 시료가 성장 후 느린 냉각 속도를 적용한 시료보다 비저항이 미량 높게 나타났다. 이는 빠른 냉각 속도로 인해 형성된 진성 점결함의 농도가 느린 냉각 속도로 형성된 진성 점결함 농도보

다 미량 많은 것으로 판단된다. 그러나, SiC 분말 순도를 다르게 적용하였을 때에 약 $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 정도의 비저항 차이가 나타나 Raman LOPC 모드의 결과와 동일하게 SiC의 반절연 특성은 SiC 분말 순도가 더 우수하다는 것을 증명하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고순도 반절연 SiC의 비저항 특성에 대한 변수를 체계적으로 조사하기 위해 SiC 분말 순도와 성장 후 냉각 속도를 다르게 하여 총 네 번의 SiC 단결정 성장실험을 진행하였다. 실험 ①과 실험 ②는 중순도 분말을 적용하여 많은 불순물 농도를 유도하고 냉각속도를 다르게 하여 점결함 농도를 달리하였고 실험 ③과 실험 ④는 고순도 분말을 적용하여 적은 불순물 농도를 유도하고 냉각속도를 다르게 하여 점결함 농도를 달리하였다. 분석 결과를 토대로 HPSI-SiC 비저항 특성의 SiC 분말 순도와 진성 점결함 농도의 상관관계를 조사한 결과 비저항을 결정짓는 우세한 요인은 SiC 분말 순도로 확인할 수 있었다. 그렇지만 진성 점결함 농도 또한 비저항 특성에 실질적인 요인으로 작용하는 것을 알 수 있었다. 추후 PVT법을 이용하여 성장한 HPSI-SiC 잉곳의 진성 점결함을 자세하게 분석하기 위해 DLTS 분석과 EPR 분석 등 다양한 전기적 특성 분석이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원(RS-2022-00154720)과 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(No. 2019R1A6C1010045), 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0012451, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행된 연구입니다.

References

- [1] <https://www.powerwaywafer.com/ko/gan-mosfet-structure.html>.
- [2] S. Wang, A. Powell, J. Redwing, E. Piner and A.W. Saxler, "Generation and properties of semi-insulating SiC substrates", Mater. Sci. Forum. 338 (2000), 17.
- [3] M. Bickermann, D. Hofmann, T.L. Straubinger, R. Weingärtner and A. Winnacker, "Preparation of semi-insulating silicon carbide by vanadium doping during PVT bulk crystal growth", Mater. Sci. Forum. 433 (2003) 51.
- [4] Y.M. Wang, X.R. Hou, W. Xu and M. Tian, "Effects of reaction temperature on the synthesis of high purity silicon carbide powder", Mater. Res. Innov. 19 (2015) S5 1338.
- [5] N.T. Son, P. Carlsson, A. Gallstrom, B. Magnusson and E. Janzn, "Prominent defects in semi-insulating SiC substrates", Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 202111.
- [6] J.J. Ronald, M.D. Philip, H.H. McDonald, M.S. Georg and U.S. Patent, WO/2004/001836, filed June 10, 2003, and issued March 16 (2011).
- [7] N.W. Jepps and T.F. Page, "Polytypic transformations in silicon carbide", Prog. Cryst. Growth. CH. 7 (1983) 259.
- [8] S. Nishino, Y. Kojima and J. Saraie, "Growth and morphology of 6H-SiC prepared by the sublimation method", Springer Proc. Phys. 56 (1992) 15.
- [9] H. Hiroshi, S.I. Nakashima and T. Uemura, "Raman scattering from anisotropic LO-phonon-plasmon-coupled mode in n-type 4H- and 6H-SiC", J. Appl. Phys. 78 (1995) 1996.
- [10] S. Zollner, J.G. Chen, E. Duda, t. Wetteroth, S.R. Wilson and J.N. Hilfiker, "Dielectric functions of bulk 4H and 6H SiC and spectroscopic ellipsometry studies of thin SiC films on Si", J Appl. Phys. 85 (1999) 8353.
- [11] P.J. Wellmann, R. Weingartner, "Determination of doping levels and their distribution in SiC by optical techniques", Mater. Sci. Eng. 102 (2003) 262.
- [12] G.L. DesAutels, C. Brewer, M. Walker, S. Juhl, M. Finet, S. Ristich, M. Whitaker and P. Powers, "Femtosecond laser damage threshold and nonlinear characterization in bulk transparent SiC materials", J. Opt. Soc. Am. B. 25 (2008) 60.