

## Exploration of SiC single crystal growth by a resistive-heating-based PVT method

Gyeong-Jun Song, Ha-Jun Kim, Na-Kyeong Kim, Chan-Ho Park, Mi-Seon Park, Gwang-Hee Jung, Jung-Gon Kim<sup>†</sup> and Won-Jae Lee<sup>†</sup>

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

(Received February 25, 2026)

(Revised March 11, 2026)

(Accepted March 16, 2026)

**Abstract** Currently, the only established method for stable SiC single-crystal growth is the physical vapor transport (PVT) technique. However, conventional PVT systems often require optimizing the hot-zone and insulation layouts to compensate for thermal non-uniformities inherent in large-diameter crystal growth. To address these limitations, a resistive-heating-based PVT approach has been proposed, enabling more precise and uniform thermal-field control through flexible internal heater design. In this study, a resistive-heating-type PVT furnace was newly constructed, and 4-inch SiC single crystals were grown by optimizing the hot-zone and insulation configurations. The grown crystals exhibited a slightly convex shape and achieved an average growth rate of 116  $\mu\text{m/hr}$ . Ultraviolet fluorescence (UVF) imaging revealed that 4H-SiC crystals containing locally distributed 6H-SiC polytype regions were obtained. High-resolution X-ray diffraction (HR-XRD) measurements showed full width at half maximum (FWHM) values ranging from 71.1 arcsec to 115.9 arcsec. Raman spectroscopy confirmed consistent crystal quality, with the FTO (2/4) phonon mode exhibiting a FWHM of 5.5  $\text{cm}^{-1}$  to 5.9  $\text{cm}^{-1}$ . Except for areas with 6H-SiC polytypes, the dominant 4H-SiC regions exhibited nearly stress-free characteristics with the FTO (2/4) peak close to 776  $\text{cm}^{-1}$  of typical of free-standing 4H-SiC. These results demonstrate that resistive-heating-based PVT method can yield high-crystallinity, low-stress SiC single crystals, provided that polytype stability is maintained during growth.

**Key words** SiC, Resistive heating, Polytype, UVF, X-ray diffraction, Raman scattering

## 저항가열 방식 기반 PVT법을 이용한 SiC 단결정 성장모색

송경준, 김하준, 김나경, 박찬호, 박미선, 정광희, 김정곤<sup>†</sup>, 이원재<sup>†</sup>

동의대학교 신소재공학과, 부산, 47340

(2026년 2월 25일 접수)

(2026년 3월 11일 심사완료)

(2026년 3월 16일 게재확정)

**요약** 현재 SiC 단결정 성장 방법 중 산업적으로 가장 안정적인 방법은 물리적 기상 수송(Physical Vapor Transport, PVT)법이다. 그러나 기존의 유도가열 방식 기반 PVT법의 경우, 단결정 직경이 대규격화됨에 따라 열장(thermal field)의 비균일성 개선을 위해 핫존(hot zone)과 단열재 구조를 변경하는 등의 외부적 제어에 의존하는 경우가 많았다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 저항가열 방식이 제안되고 있다. 저항가열 방식 기반의 PVT법은 내부 흑연 히터 구조를 다양하게 설계함으로써 열장을 보다 정밀하고 균일하게 제어할 수 있다는 강점을 가지고 있다. 본 연구에서는 저항가열 방식 기반 PVT 장비를 도입하여 핫존과 단열재를 구성하고 4인치 SiC 단결정을 성장을 시도하였다. 성장된 SiC 결정은 약간 볼록한 형상을 나타내었으며, 평균 116  $\mu\text{m/hr}$ 의 성장률을 보였다. UVF 이미지 분석을 통해 6H-SiC 다형이 국부적으로 존재하는 4H-SiC 결정이 얻어졌으며, 고분해능 XRD 분석에서는 71.1~115.9 arcsec의 반치폭을 확인하였다. 라만 분광법을 통해 결정 면내 진동 모드인 FTO(2/4) 밴드의 반치폭이 5.5~5.9  $\text{cm}^{-1}$  수준으로 XRD 분석과 일관된 결정성을 보였으며, 6H-SiC 다결정이 혼재한 영역 외에는 Free-standing 4H-SiC의 FTO(2/4)(776  $\text{cm}^{-1}$ )에 가까운 stress-free 결정이 얻어졌음을 확인하였다. 본 연구에서 도입한 저항가열 방식 기반 PVT 성장로를 이용한 SiC 단결정 성장결과, 다형 발생 영역을 적절히 제어한다면 높은 결정성과 응력이 해소된 고품질의 SiC 단결정 육성이 가능할 것으로 판단된다.

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: kimjg@deu.ac.kr and leewj@deu.ac.kr

## 1. 서 론

실리콘 카바이드(SiC)는 기존 실리콘(Si) 반도체 대비 약 3배에 달하는 넓은 밴드갭(wide-bandgap)과 높은 열전도도 및 높은 항복 전계 강도 등 우수한 물성을 가지고 있다[1]. 이러한 물성을 바탕으로 SiC는 고온 및 고전압과 같은 극한 조건에서 동작하는 전력 소자의 핵심 기판 소재로 주목받고 있다. 최근 전기차 산업의 급성장, 신재생에너지 시스템의 확산, 데이터 센터 고효율 전원 공급장치에 활용될 차세대 전력 반도체에 대한 수요가 급격히 증가하고 있어, 대구경 고품질 SiC 단결정 기판의 생산 수율 향상을 위한 기술 개발이 산업계의 핵심 과제로 대두되고 있다.

현재 산업적으로 가장 널리 사용되는 SiC 단결정 성장 기술은 승화법으로도 불리는 물리적 기상 수송(Physical Vapor Transport, PVT) 방식이다. 이 유도가열 방식 기반 PVT법은 비교적 간단한 공정과 낮은 성장 비용이라는 장점을 가지며, 현재 8인치급 대구경 웨이퍼가 상용화 단계에 도달하였고 12인치 데모급 웨이퍼도 소개되고 있는 상황이다. PVT법을 이용한 대구경 SiC 단결정 성장에 있어 가장 중요하게 고려되어야 할 기술로는 핫존 내 열장(thermal field)을 정밀하게 제어하는 것이라 할 수 있다. 특히, 결정의 대구경화에 따른 도가니 반경 방향(radial direction)과 축방향(axial direction)의 열장을 정밀하게 관리할 수 있는 기술이 요구된다. 도가니 반경 방향의 열장 불균일성은 결정 내부에 과도한 잔류 응력을 유발하여, 크랙 발생, 결정 결함 밀도 증가, 타 결정 다형(polytype)의 혼입을 발생시킬 수 있으므로 최종 결정 품질을 저하시키는 주된 원인이 된다[2,3].

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 본 연구에서는 보다 정밀한 열장 제어가 가능한 저항가열(resistive heating) 방식 기반 PVT법에 주목하였다. 저항가열 방식은 흑연 히터의 형상 및 구조를 변경함으로써 핫존 내부의 균일한 열장을 구현할 수 있어 대구경 SiC 단결정 성장 시 도가니 반경방향 및 축방향의 온도 구배를 제어하는 데 효과적이다[4]. 나아가, 다수의 히터(Multi-zone heater)를 도입함으로써 각 영역별 온도를 독립적으로 제어하여 도가니 직경 방향 및 축방향의 정밀한 열장 제어가 가능하다[2,5]. 국내에서도 저항가열 방식 기반 PVT법을 이용한 SiC 결정 성장의 선행 연구도 보고된 바 있다. 강승민은 격벽을 이용하여 상부와 하부의 흑연 히터를 독립적으로 배치(two-zone) 및 제어함으로써 저항가열 방식이 SiC 단결정 제조 공정의 효율적인 대안이 될 수 있음을 국내 최초로 제시하였다[6,7]. 본 연구에서 활용한 저항가열 방식 기반 PVT 성장로는 단일 흑연 히터를 가지므로 구조적 단순성과 조작 용이성이 구현 가능한 반면, 독립적인 도가니 축방향 온도구배 제어 역량

면에서는 부족함을 보인다고 할 수 있다. 본 연구에서는 단일 흑연 히터를 가지는 저항가열 방식 기반의 PVT법을 이용하여 4인치 SiC 단결정 성장을 시도하였으며, 성장된 결정의 다형 및 결정학적 특성을 체계적으로 분석함으로써 대구경 SiC 단결정 성장에 있어 저항가열 방식 기반의 PVT법 적용 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 단일 흑연 히터를 가지는 저항가열 방식 PVT 장비를 이용하여 SiC 단결정을 성장시켰다. 저항가열 방식은 흑연 히터에 전압을 인가할 때 히터 자체의 전기적 저항에 의해 발생하는 줄 열(Joule heat)을 열원으로 사용한다[8,9]. 성장에 사용된 흑연 히터 및 도가니의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Figure 1(a)는 성장로 내부 핫존의 반단면도이며, Fig. 1(b)는 핫존 내 흑연 히터, 도가니, 원료분말, 종자정의 구성과 위치를 나타내었다. 결정 성장에 사용된 종자정은 [110] 방향으로 4° off-axis된 4인치 n-type 4H-SiC (000) 기판을 사용하였다. SiC 원료 분말은 GTech社(국내)의 순도 5N의 SiC 분말(granule-type powder, 입도 분포(D50): ~2 mm)을 사용하였으며, 도가니 내의 원료 분말과 종자정 사이의 거리는 26.4 mm로 설정하였다. 결정 성장은 도가니 상부 기준 2,100°C의 온도를 설정하여 5 kPa의 아르곤 분위기에서 30시간 진행하였다. 성장된 SiC 잉곳의 결정 다형 분포는 육안 관찰 및 자외선 형광(Ultra-Violet Fluorescence, UVF,  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ) 분석을 통해 평가하였으며, 결정성과 내부 응력 평가는 웨이퍼 중심부와 가장자리의 5개 지점(point #1~#5, Fig. 2(b))을 선정하여 고분해능 X선 회절(High-Resolution X-ray Diffraction, X'Pert PRO

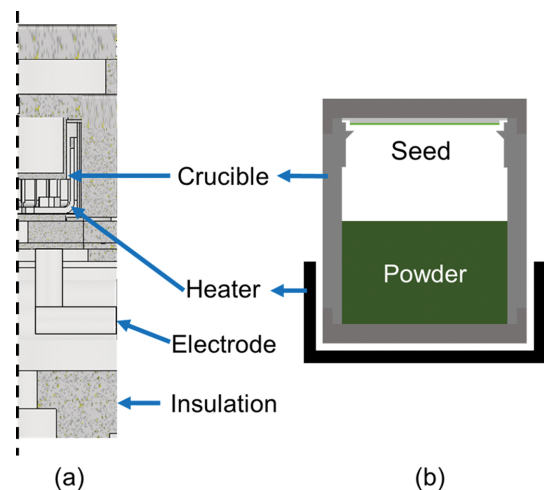


Fig. 1. Schematic diagram of the hot-zone for the resistive heating-based PVT method.

MRD, PANalytical) 및 라만 분광법(Raman spectroscopy, RamMics M532, Enspectr, Inc)을 이용하였다. 라만 분광 분석의 경우, 파장 532 nm의 여기광을 SiC 잉곳 표면으로 입사시켜 x50 배율의 N.A.(Numerical Aperture)가 0.75인 대물렌즈를 사용하였으며, 결정의 c축으로 산란되어 나오는 산란광을 취득하는 (000)면 후방 산란 배치로 스펙트럼을 얻었다. 계산된 스펙트럼의 파수 분해능은  $0.5 \text{ cm}^{-1}$ 이다. 라만 스펙트럼의 FTO(2/4) 모드와 XRD  $\omega$ -2 $\theta$  스캔의 Rocking curve의 FWHM(Full width at half maximum)을 분석하여 결정성과 응력 상태를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Figure 2에 성장된 잉곳(a), 외경연삭 후 잉곳(b)의 광학 이미지와 UVF 이미지(c)를 각각 나타내었다. Figure 2(a)에서 보듯 성장된 잉곳은 약간 불룩한 형상으로 직경 4 inch, 두께  $\sim 3.5 \text{ mm}$ 의 평균  $116 \mu\text{m/h}$ 의 성장률을 보였다. 이는 유도가열 방식 기반의 PVT법을 이용한 4인치 SiC 결정 성장률( $\sim 200 \mu\text{m/hr}$ )에 버금가는 성장률이 얻어졌음을 보여준다. Figure 2(b)는 Fig. 2(a)의 잉곳을 외경 연삭 후 펍(puck) 형태로 가공한 이미지이다. 이 펍 형태의 잉곳에 대해 UVF 형광 분석을 실시하였

다. Figure 2(c)의 UVF 이미지에서 보듯 잉곳의 대부분은 어두운 연두색을 보이는 4H-SiC였으며, 일부 밝은 갈색을 띠는 6H-SiC가 혼재된 것을 알 수 있다. 잉곳 표면의 파란색은 여기광에 의한 반사광과 간섭에 의한 illusion으로 해석할 수 있다. 일반적으로 질소와 붕소 등 불순물 도핑 농도가 낮은 4H-SiC 결정의 경우 UV광 조사 시 donor와 acceptor 재결합에 의한 가시광 발광이 미약하여 연한 초록색을 보이는 반면, 6H-SiC의 경우 연한 갈색 계열의 발광을 하게 된다. SiC 단결정 성장에서 결정 다형 안정성은 핫존 내 온도 변화와 기체 종들의 과포화도에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. UVF 이미지에서 나타난 일부 영역의 6H-SiC 결정 다형의 발생은 성장 초기 종자점 주변의 국부적인 온도 불균일성에 의해 과포화도가 변화하고, 그 결과 6H-SiC가 형성되기 쉬운 성장 조건으로 전환되면서 발생한 것으로 판단된다[10].

Figure 2(b)에 #1~#5로 표시한 지점에 대해 HR-XRD의  $\omega$ -2 $\theta$  scan을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Figure 3(a)는 측정 지점 #1에서의 2 $\theta$  scan 결과로 주 회절 피크(main peak, (0006), (00012)) 사이에 5개의 보조 피크(sub-peak)가 관찰되는 전형적인 6H-SiC 결정의 회절 패턴에 관찰되는 반면, Fig. 3(b)에서 보듯 측정지점 #2부터 #5의 경우, 주 회절 피크(main peak, (0004), (0008)) 사이에 3개의 보조 피크가 관찰되는 4H-SiC 결정임을 확인하였다[10]. 각 지점의 결정성을 평가하기 위해 Rocking

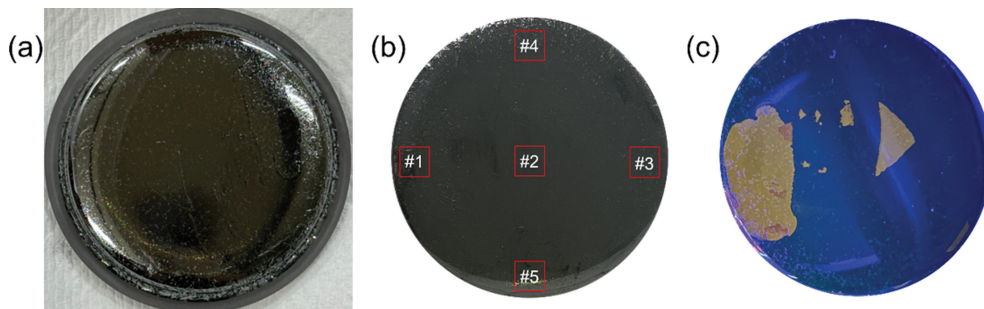


Fig. 2. Optical (a, b) and UVF (c) images of the grown SiC crystal.

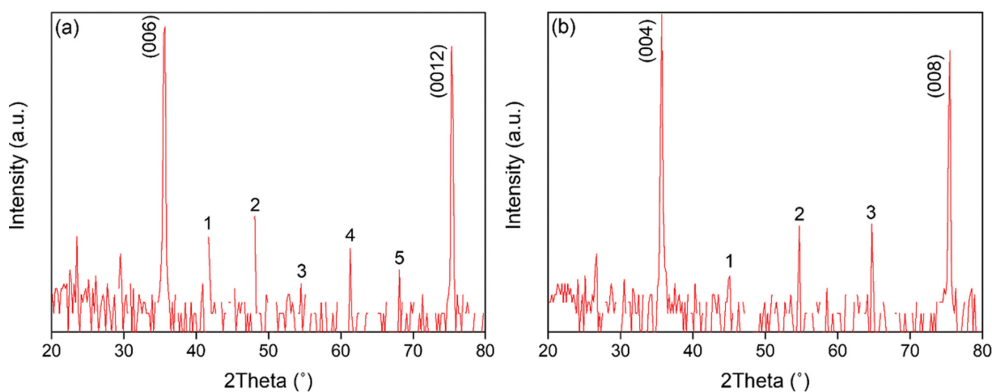


Fig. 3. XRD  $\omega$ -2 $\theta$  scan patterns for (a) point #1 and (b) points #2-#5 of the grown SiC crystal.

Table 1  
FWHM values of the X-ray rocking curves for five measurement points on the grown SiC crystal

Point	#1	#2	#3	#4	#5
FWHM (arcsec)	115.9	84.9	100.3	71.1	74.3

curve의 반치폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)을 측정하였으며 결과를 Table 1에 나타내었다. 각 지점에서 얻어진 FWHM 값은 71.1~115.9 arcsec 범위를 가지며, 6H-SiC 다형이 주영역인 지점 #1에서 FWHM이 115.9 arcsec로 결정성이 가장 낮은 것으로 확인된다. 이는 6H-SiC 다형혼입에 의한 격자 변형 및 전위 밀도의 국부적 증가를 반영한 결과이다. Figure 4(a)~(e)에 결정의 측정지점 #1~#5에서 획득한 라만 스펙트럼을 각각 나타내었다. FTO 포논(phonon) 모드의 경우, SiC 단위셀 내부(Si원자 2개, C원자 2개)의 상대적으로 가벼운 C원자가 외부전기장(레이저)의 전파방향에 대해 결정면 내에서 진동하는 모드로 결정 면 내(in-plane)의 결정성과 응력에 민감한 격자 진동 모드이다[11]. 측정지점 #1 (Fig. 4(a))에서는 787.8 cm<sup>-1</sup> 부근에서 강한 FTO(2/6) 피크와 776 cm<sup>-1</sup> 근처에서 약한 FTO(2/4) 피크가 관찰되어 6H-SiC와 4H-SiC 결정 다형이 혼재된 영역임을 재확인하였으며, 지점 #2~#5(Fig. 4(b)~(e))에서는 776 cm<sup>-1</sup>

Table 2  
FWHM values of the Raman FTO (2/4) bands at five measurement points on the grown SiC crystal

Point	#1	#2	#3	#4	#5
FWHM (cm <sup>-1</sup> )	5.9	5.6	5.7	5.7	5.5

부근에서 FTO(2/4) 피크가 관찰되어 4H-SiC 결정으로 확인되었다. 또한, 관찰된 FTO(2/4) 피크의 위치가 응력이 없는(free-standing) 4H-SiC의 파수인 776 cm<sup>-1</sup>와 거의 일치하므로 해당 영역에는 유의미한 수준의 열응력이나 격자변형이 존재하지 않는 것으로 판단된다. Table 2에 각 지점에서 관찰된 FTO(2/4) 모드의 반치폭 값을 나타내었다. 각 지점의 포논 FWHM 값은 5.5~5.9 cm<sup>-1</sup> 수준으로 측정되었으며, 이는 XRD 분석의 Rocking curve의 반치폭 값과 동일한 수준으로 각 지점의 결정성이 일관됨 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존 유도가열 방식 기반 PVT법의 한계로 지적되어 온 SiC 단결정 대구경화에 따른 열장 제어의 어려움을 인식하고, 단일 히터 구조를 갖는 저항가열

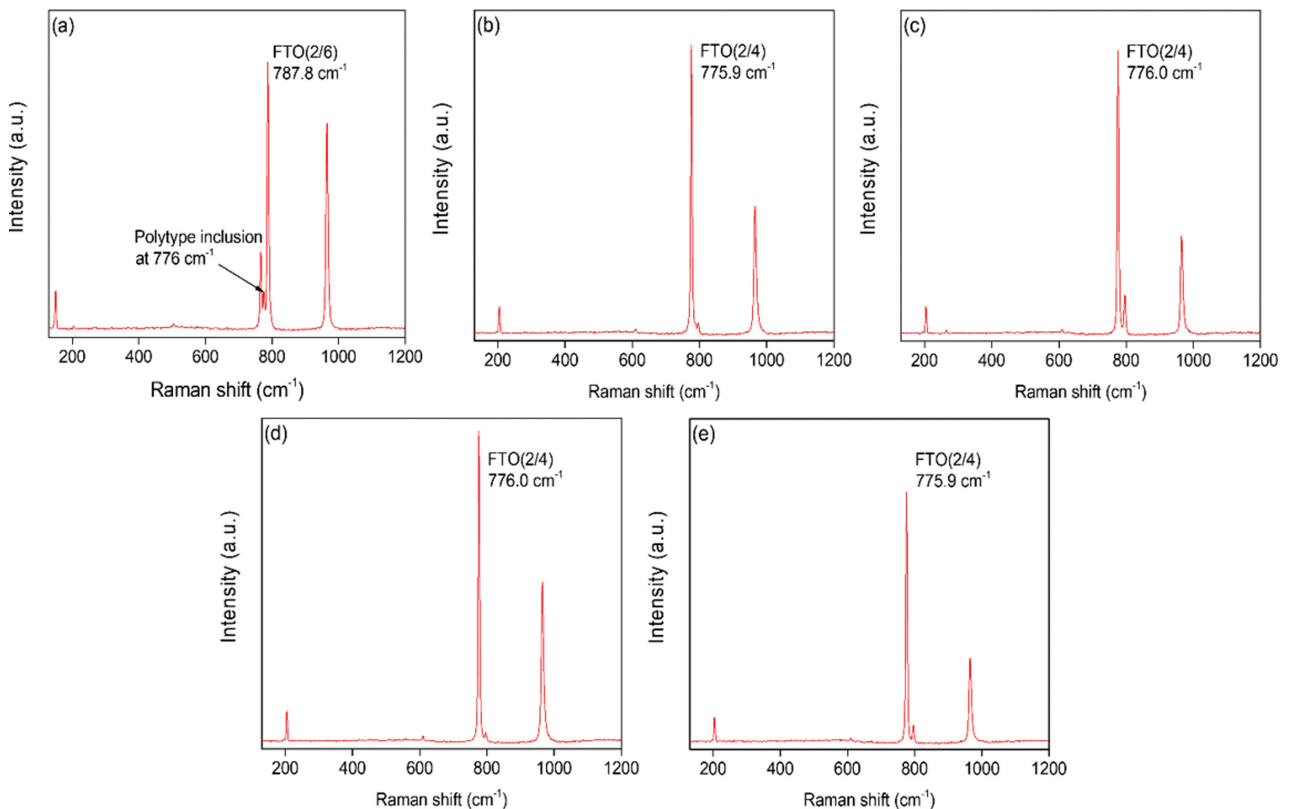


Fig. 4. Raman spectra of the as-grown SiC crystal at five measurement points: (a) point #1, (b) point #2, (c) point #3, (d) point #4, and (e) point #5.

방식 기반 PVT법을 이용하여 4인치 SiC 단결정 성장을 시도하였다. 2,100°C, 5 kPa의 아르곤 분위기에서 30시간 동안 성장한 결과, 약간 볼록한 계면을 가지며 평균 성장률 116  $\mu\text{m/hr}$ 의 SiC 잉곳을 얻었다. UVF, HR-XRD 및 라만 분석 결과, 성장된 잉곳은 4H-SiC를 기반으로 하여 일부 영역에서 6H-SiC 결정 다형이 혼재되어 있음을 확인하였다. 6H-SiC 결정 다형이 혼입된 영역을 제외한 대부분의 영역에서는 높은 결정성과 내부 응력이 크게 완화된 4H-SiC 단결정이 형성되었음을 확인하였다. 이러한 결과는 단일 히터를 사용하는 저항가열 방식 기반 PVT법을 통해서도 고품질 SiC 단결정 성장이 가능함을 시사한다. 향후에는 도가니 및 히터 구조의 최적 설계를 통해 고품질·고수율·대구경 SiC 단결정 육성을 위한 공정 최적화 연구를 진행할 예정이다.

## 감사의 글

This work was supported by the Technology Innovation Program (Project Number: 00402234, Project Name: Development of highly flat, highly clean large area polished SiC single crystal wafers by utilizing advanced process technology for power semiconductor application) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea).

## References

- [ 1 ] N.P. Maity, “4H-SiC semiconductor based metal oxide semiconductor devices”, IACSIT Press 13 (2011) 1.
- [ 2 ] B. Xu, X. Han, S. Xu, D. Yang and X. Pi, “Optimization of the thermal field of 8-inch SiC crystal growth by PVT method with “3 separation heater method””, *J. Cryst. Growth* 614 (2023) 127238.
- [ 3 ] T. Nakano, N. Shinagawa, M. Yabu and N. Ohtani, “Formation and multiplication of basal plane dislocations during physical vapor transport growth of 4H-SiC crystals”, *J. Cryst. Growth* 516 (2019) 51.
- [ 4 ] X. Wang, X. Xie, W. Yu, X. Yang, X. Chen, X. Li, L. Sun, Y. Peng, X. Hu and X. Xu, “Hot-zone design and optimization of resistive heater for SiC single crystal growth”, *J. Mater.* 59 (2024) 8930.
- [ 5 ] D. Liu, S.Y. Jiang, W.T. Li, S. Yang, X.C. Liu, J.X. Sun, M. Ding, Y. Xue, S. He, R. Li, Y. Wang and P. Gao, “Thermal field simulation and optimization for 8 in. SiC crystal growth via novel resistance furnace design”, *ACS Omega* 10 (2025) 40492.
- [ 6 ] S.M. Kang, “A study on SiC crystal growth by sublimation process using resistance heating method”, *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 25 (2015) 85.
- [ 7 ] S.M. Kang, “A study on the SiC single crystal growth conditions by the resistance heating method”, *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 26 (2016) 53.
- [ 8 ] S. Lupi, M. Forzan and A. Aliferov, “Induction and direct resistance heating, Theory and Numerical Modeling”, Springer International Publishing, Switzerland (2015) 2.
- [ 9 ] M. Shestopalov, V. Stara, M. Rejhon and J. Kunc, “Annealing, design and long-term operation of graphite crucibles for the growth of epitaxial graphene on SiC”, *J. Cryst. Growth* 651 (2025) 127988.
- [ 10 ] M. Kanaya, J. Takahashi, Y. Fujiwara and A. Moritani, “Controlled sublimation growth of single crystalline 4H-SiC and 6H-SiC and identification of polytypes by x-ray diffraction”, *Appl. Phys. Lett.* 58 (1991) 56.
- [ 11 ] S. Nakashima and H. Harima, “Raman investigation of SiC polytypes”, *Phys. Status Solidi A* 162 (1997) 39.