

Cavity-structured seed holders for enhanced crystalline quality of SiC

Ye Jin Choi, Min-Kyu Kang, Gi-Uk Lee, Gyeong-Jun Song, Na-Kyeong Kim, Mi-Seon Park, Gwang-Hee Jung, Jung-Gon Kim[†] and Won-Jae Lee[†]

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

(Received February 25, 2026)

(Revised March 4, 2026)

(Accepted March 6, 2026)

Abstract In the growth of silicon carbide (SiC) single crystals using the induction-heated physical vapor transport (PVT) method, designing an innovative hot-zone structure is essential to mitigate internal thermal stress. Key design parameters, such as the top insulation characteristics and graphite seed holder geometry, play a critical role in shaping the thermal distribution. This study focuses on modifying the thickness and cavity area of the seed holder platform to achieve an optimal axial temperature gradient and uniform radial thermal distribution. Three cavity-structured designs were evaluated based on the cavity surface area relative to the platform: Design A (0 %, baseline), Design B (50 %), and Design C (80 %). Numerical simulations and experimental growth were conducted under identical growth conditions. The results revealed that the radial temperature gradient (shape of the crystal) from the center to the periphery decreased as the cavity area increased, yielding gradients of 2.6°C (concave) for Design A, 1.5°C (flat) for Design B, and 1.8°C (flat) for Design C. Comprehensive characterization via XRD 2 θ - ω scans, Raman mapping for FWHM of the FTA phonon, and defect (etch pit) density analysis through surface etching confirmed that Design B exhibited the highest quality crystals. Specifically, Design B exhibited the lowest internal stress of -0.0033 GPa, superior crystalline uniformity with an average FWHM of 44.1 arcsec, and significantly reduced defect density. These findings demonstrate that precise cavity engineering of the seed holder platform is a straightforward yet highly effective strategy for achieving high-quality SiC crystals.

Key words SiC, Physical vapor transport, Seed holder, Platform, Cavity, XRD, Raman, Crystal quality

SiC 결정 성장 최적화를 위한 내부 캐비티 기반 시드 홀더 연구

최예진, 강민규, 이기욱, 송경준, 김나경, 박미선, 정광희, 김정곤[†], 이원재[†]

동의대학교 신소재공학과, 부산, 47340

(2026년 2월 25일 접수)

(2026년 3월 4일 심사완료)

(2026년 3월 6일 게재확정)

요약 유도가열 방식 기반의 PVT(Physical Vapor Transport)법에 의한 SiC 단결정 성장 시 결정 내부에 발생하는 열응력을 해소하기 위해서는 새로운 구조의 핫존 설계가 필수적이다. 도가니 상부측의 단열재 유/무, 단열재 밀도, 단열재 구조 등이 고려대상이 될 수 있다. 특히, 종자정이 부착되는 흑연 시드홀더의 플랫폼(후면부) 두께 변경이나 캐비티 공간의 적용은 도가니 축방향(Axial direction) 온도 구배달성은 물론 결정 반경방향(Radial direction)의 균일한 열장제어를 가능하게 한다. 본 연구에서는 도가니 상부측에 위치하는 흑연 시드홀더 플랫폼의 캐비티 두께를 조정해 도가니 반경방향의 온도구배를 최소화하여 결정 내부응력을 해소하고자 하였다. 기존 시드홀더 구조(Design A) 후면의 플랫폼(단면적 0%)을 기준으로 Design B와 Design C의 단면적을 각각 50%와 80%로 설정하여 동일한 성장조건으로 시뮬레이션과 결정성장을 진행하였다. 결정 성장결과, 캐비티의 면적 증가에 따라 도가니 중심(0 mm)으로부터 반경방향 온도구배(잉곳형상)의 경우 Design A: 2.6°C(오목), Design B: 1.5°C(편평), Design C: 1.8°C(편평)로 얻어졌다. XRD 2 θ - ω 스캔, 라만 스펙트럼 FTA 매핑 및 표면 에칭을 통한 결함밀도 분석 결과, Design B를 적용한 결정이 -0.0033 GPa의 가장 낮은 응력값을 가지며, 높은 결정성 균일성(평균값: 44.1 arcsec)과 낮은 결함밀도를 보였다. 이러한 연구 결과는 시드 홀더 플랫폼의 정밀한 캐비티 설계가 고품질 SiC 단결정을 확보하기 위한 단순하면서도 매우 효과적인 전략임을 보여준다.

[†]Corresponding author

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

1. 서 론

전력반도체는 전력의 변환, 제어 및 분배 등 전기적인 에너지의 흐름을 직접적으로 다루는 역할을 한다. 전력 변환 관점에서 전력반도체는 교류/직류변환, 전압 및 주파수 변환을 제어하는 등의 스위칭 기능이 주역할이라고 할 수 있다. 전력반도체는 전류제어를 위한 GTO(gate turn-off) thyristor나 Power transistor, 전압제어를 위한 power MOSFET(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)과 IGBT(insulated-gate bipolar transistor)가 있다. 기존의 전력반도체 소재로는 현재까지 절반이상의 시장 점유율을 가진 Si 기판이 사용되고 있으나, 높은 전력변환 효율성과 성능을 비롯해 소형화가 가능한 차세대 기판소재로써 SiC(Silicon Carbide), GaN(Gallium Nitride) 및 Ga₂O₃(Gallium Oxide)로 대표되는 와이드 밴드갭(wide bandgap) 반도체 기판소재가 상용화되고 있다. 특히, SiC의 경우 Si에 대비 3배 이상의 밴드갭, 열전도도, 절연 파괴전압을 가지므로 소형의 고온-고전압 성능이 필요한 극한 환경에서 안정적인 동작이 가능하다.

SiC는 Si와 C 원자가 1:1로 강한 공유결합을 이루며 공유결합성(88%)과 이온결합성(22%)을 동시에 가지는 화합물 반도체이다. SiC 단결정 성장법으로 현재 산업적으로 안정화된 기술로는 물리적 기상 수송법(Physical Vapor Transport, PVT)으로 용액기반의 타 성장법에 대비 상대적으로 저렴한 장비 운용 및 유지 비용은 물론 비교적 높은 성장속도 달성과 직경 대구경화의 이점을 가진다. PVT 성장법은 기본적으로 성장로 내부의 핫존소재를 흑연소재로 구성하며, 이 흑연 피검체 가열을 위해 유도 가열 방식이 사용되고 있다. PVT법을 이용한 SiC 단결정 성장은 도가니 내부의 하부 원료층보다 상대적으로 낮은 온도영역에 있는 상부 시드층으로 SiC 화학종들이 이동하여 표면에 재결정화되는 과정이 수반된다. 유도 가열 방식을 통한 SiC 단결정의 대구경화에 있어 핫존 내부의 도가니 반경방향(Radial direction)과 도가니 축방향(Axial direction)을 따르는 큰 열구배(Thermal distribution) 차이로 발생하는 불균일한 성장환경 조성으로 인해 성장 과정 및 냉각과정에서 결정 내부에 열응력이 발생되고 이는 결정 내부의 격자 소성변형과 다양한 내부 결함을 유발시킨다. 최근, PVT 기반의 성장법에서 대형 구조의 히터를 갖춘 double-flap 핫존 설계를 이용한 저항가열 방식으로의 전환이 시작되고 있다[1-3]. 저항가열 방식을 통해 도가니 반경방향의 열구배를 균일화함과 동시에 double-flap 핫존 설계를 추가함으로써 도가니 상/하부 축방향의 온도구배 제어가 용이해지게 되므로 높은 성장률을 가지 는 고품질 단결정 성장이 가능해지게 된다.

기존의 PVT법을 통한 SiC 단결정 성장에서 단결정 내부에 발생하는 열응력을 해소하기 위해 도가니 상부층

의 흑연 시드홀더 디자인에 대한 선행 연구들이 보고되었다. Fadeev 등은 시드홀더 두께가 두꺼울수록 결정 내부에 발생하는 응력이 증가하는 것을 성장실험을 통해 확인하였고[4], Steiner 등은 사용 부재의 서로 다른 열팽창계수 차이에 의해 유도된 결정 반경방향으로의 열적/기계적 응력에 의해 시드홀더의 두께가 두꺼울수록 높은 응력을 유발하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다[5].

본 연구에서는 기존 PVT법에서 사용하는 시드홀더 디자인에 대한 검토를 시작으로 성장된 단결정 내부 응력을 해소시키기 위한 적절한 시드홀더 두께, 시드홀더 뒷면(플랫폼)의 빈공간(캐비티) 적용에 의한 도가니 반경 방향의 열구배의 검토가 필요하다고 판단하였다.

2. 실험 방법

Figure 1에 단결정 성장에 이용한 도가니 핫존 구조(Fig. 1(a)), 시드홀더 상세 구조(Fig. 1(b))와 도가니 상부 시드홀더 디자인(Fig. 1(c)~(e))을 나타내었다. Figure 1(a)에 나타낸 것 처럼 흑연 도가니 내부에 99.99% 순도의 SiC 원료분말을 채운 후, 상부층에 100 mm 직경의 4° off 4H-SiC 종자정(seed)을 부착한 흑연 시드홀더를 위치 시켜 도가니 외부로 흑연 단열부재로 단열하는 구조를 구성하였다[6]. 시드홀더 상세 구조를 Fig. 1(b)에 나타내었으며, 흑연 시드홀더의 플랫폼에 빈공간(캐비티)을 적용한 3가지 디자인을 Fig. 1(c)~(e)에 나타내었다. Figure 1(c)는 상/하부 플랫폼에 빈공간이 없는 기존 시드홀더 디자인(Design A)이며, Fig. 1(d)는 하부 플랫폼에만 빈공간을 적용한 디자인(Design B)이며, Fig. 1(e)는 상부와 하부 모두에 빈공간을 적용한 디자인(Design C)이다. 캐비티가 없는 Design A의 단면적을 기준으로 Design B와 C의 단면적은 각각 50%와 80%이다.

단결정 성장에 앞서, 도가니 상부의 시드홀더 구조변경에 따른 도가니 반경방향의 온도 분포를 확인하기 위해 VR(Virtual Reactor) 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 진행하였다[7]. 단결정 성장은 PVT 성장로를 사용하여 성장온도 2,300~2,400°C, 성장압력 5 Torr, 50시간 동안 Ar 분위기에서 성장을 진행하였다. 성장된 SiC 잉곳은 육안 검사와 UVF(Ultra-Violet Fluorescence)를 통해 결정외형(크랙 유무, 두께 및 직경)과 결정다형을 분석하였다. 결정품질분석을 위해 얻어진 SiC 잉곳은 외경 연삭공정을 거친 후, multi wire saw를 이용하여 웨이퍼 형태로 절단하였고 기계적 표면 연삭을 통해 표면 단차를 제거하였다. 표면은 다이아몬드 슬러리(1 μm, 1/10 μm)를 이용한 MP(Mechanical Polishing) 공정을 통해 경면가공 하였다. UVF 분석에 이어 각 결정다형 영역을 라만 산란법(RamMics M532, Enspectr, Inc.)을 통해 결정다

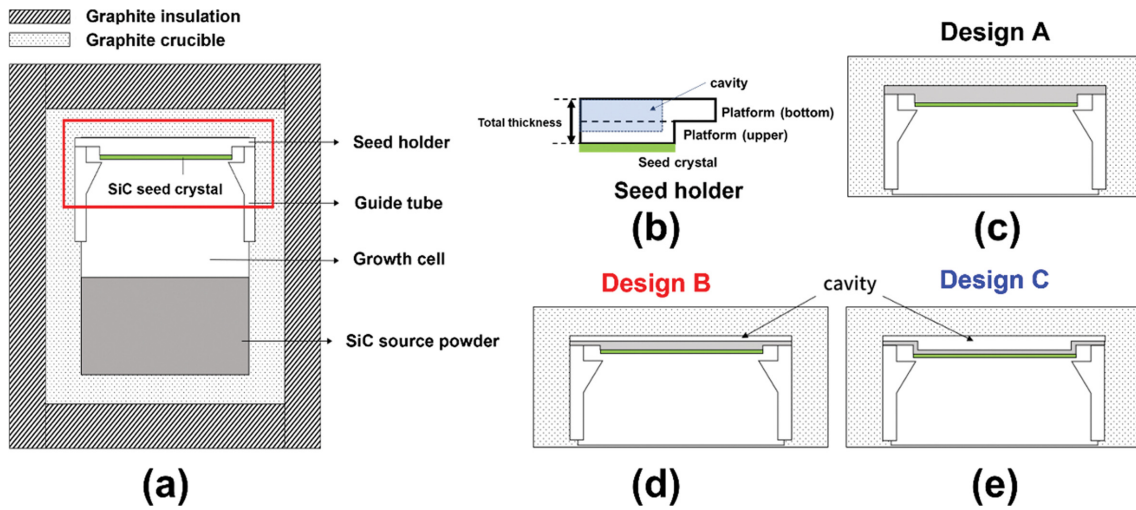


Fig. 1. Schematic of the SiC single crystal growth assembly: (a) Hot-zone configuration within the crucible system, (b) detailed structure of the seed holder, and (c)-(d) various designs of the upper seed holder.

형 판별에 가장 적합한 저파수 대역의 종방향 진동 음향 포논모드(Folded Transverse Acoustic: FTA, $\sim 200 \text{ cm}^{-1}$)의 매핑분석(측정 interval: 0.5 mm/point , 측정영역(가로 \times 세로): $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$)을 통해 타 결정다형 대비 4H-SiC 영역의 면적비를 구하였다. 웨이퍼 표면에 532 nm 레이저를 $\times 50$ 배율의 N.A.(Numerical Aperture)가 0.75 인 대물렌즈를 통해 입사시켜 산란 후 되돌아 나오는 후방산란 배치로 산란광을 수집하여 측정하였다. 계산된 파수 분해능은 0.5 cm^{-1} 이다. XRD(X'Pert PRO MRD, Panalytical)의 2θ - ω 분석을 통해 결정의 결정 평면내 응력을 구하였다. 웨이퍼 직경 내부에 내접하는 정사각형 영역을 대상으로 rocking curve의 반치폭(Full width at half maximum, FWHM) 매핑을 실시하여 결정성에 대한 균일성을 확인하였다. KOH와 Na_2O_2 를 50:3의 무게 비로 칭량하여 각 디자인을 적용하여 성장된 웨이퍼 표면을 550°C 에서 10분간 습식 에칭 후 결함밀도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 1에서 도시한 시드홀더 플랫폼에 캐비티 구조를 적용한 Design A, B, C를 이용하여 성장을 실시한 시뮬레이션 결과와 이를 토대로 추출한 시드 반경방향의 온도구배를 Fig. 2에 나타내었다. Figure 2(a)-(c)에 각 시드홀더 Design A, B, C를 적용한 도가니 내부 온도 분포를 나타내었다. 캐비티의 면적이 증가할수록 상부 시드층의 온도분포선(등온선)이 완만해지는 경향을 보이며, 시드 중심부가 상대적으로 높은 온도를 형성하는 것을 알 수 있다. 이는 시드홀더 상부에 생성된 캐비티 내 (Ar 가스)의 낮은 열전도율($\sim 0.018 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)로 인한 상부층의 단열효과로 이해할 수 있다. 한편, Fig. 2(d)에서 보듯 캐비티의 면적에 증가에 따라 도가니 중심(0 mm)으로부터 반경방향의 온도구배(Design A: 2.6°C , Design B: 1.5°C , Design C: 1.8°C)가 현저하게 감소하므로 결정 내부의 열충격 완화를 기대할 수 있다.

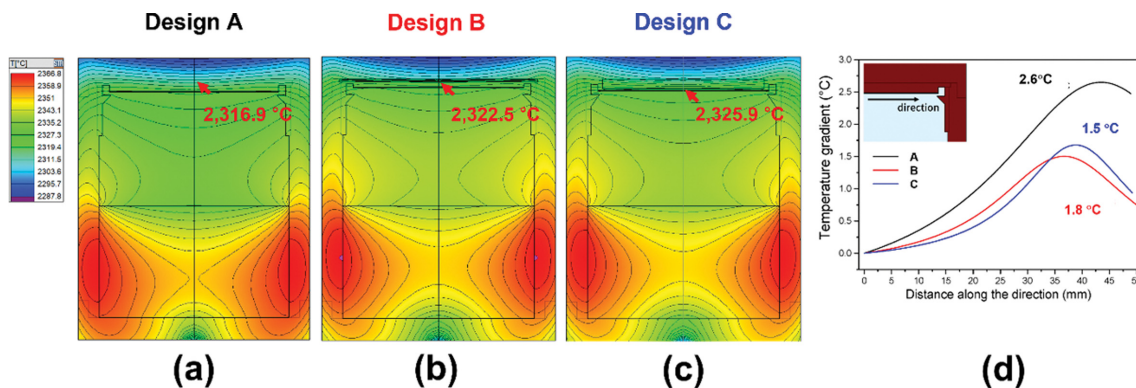


Fig. 2. Numerical simulation results of SiC growth with various cavity-structured designs and corresponding radial temperature gradients for different cavity-structured designs: (a-c) thermal field distributions for Designs A, B, and C, and (d) extracted radial temperature gradients for each seed holder design.

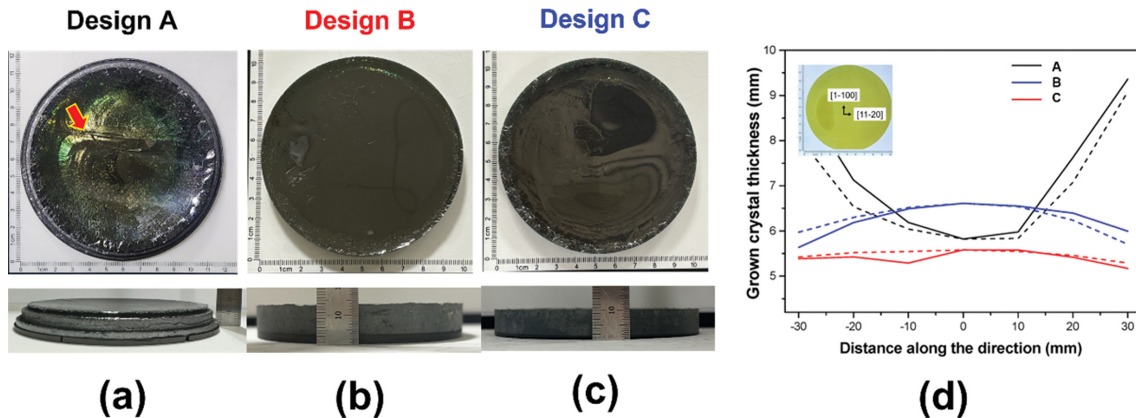


Fig. 3. Optical images and thickness profiles of SiC ingots grown with different seed holder designs: (Top) top-view and (Bottom) side-view photographs of the ingots for Designs A, B, and C; the corresponding plot shows the thickness distribution measured along the [11-20] radial direction.

Figure 3은 Design A, B, C를 적용해 실제 성장을 실시하여 얻은 SiC 잉곳의 평면(상)/측면(하) 이미지와 각 잉곳의 [11-20] 반경방향에 따른 두께값의 플롯이다. Figure 3(a)의 시드홀더 상/하부 플랫폼에 캐비티가 없는 Design A를 적용한 잉곳에서는 화살표에 표시한 것과 같이 잉곳을 가로지르는 크랙이 발생하였으며, 시드홀더 상/하부 플랫폼에 캐비티가 적용된 Design B(Fig. 3(b))와 Design C(Fig. 3(c))로 성장시킨 잉곳에는 크랙이 없는 매끈하고 균일한 표면을 보였다. 한편, Design B(Fig. 3(b)) 적용 잉곳이 Design C(Fig. 3(c)) 적용 잉곳에 비해 상대적으로 성장률이 높은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한

시드홀더 상부측 캐비티 형성으로 인한 단열효과로 반경 방향의 온도구배는 현저하게 감소하는 대신 Si-C 화학종의 증기압이 상승하여 시드 표면측으로 과포화도 증가해 다결정 생성에 유리한 환경이 만들어지며 그 성장속도가 빠를 수 있음을 시사한다. Figure 3(d)에 각 Design A, B, C를 적용하여 성장시킨 잉곳의 직경방향(60 mm)의 두께를 플롯하여 나타내었다. 잉곳의 형상(직경 방향의 두께 분포)의 도가니 내부의 열분포에 의해 결정되며 반경방향의 온도구배가 성장계면의 형상을 결정한다. 관찰된 각 잉곳의 형상은 Fig. 2의 시뮬레이션으로 예측한 반경 방향 온도구배 순서(Design A: 2.6°C, Design B: 1.5°C,

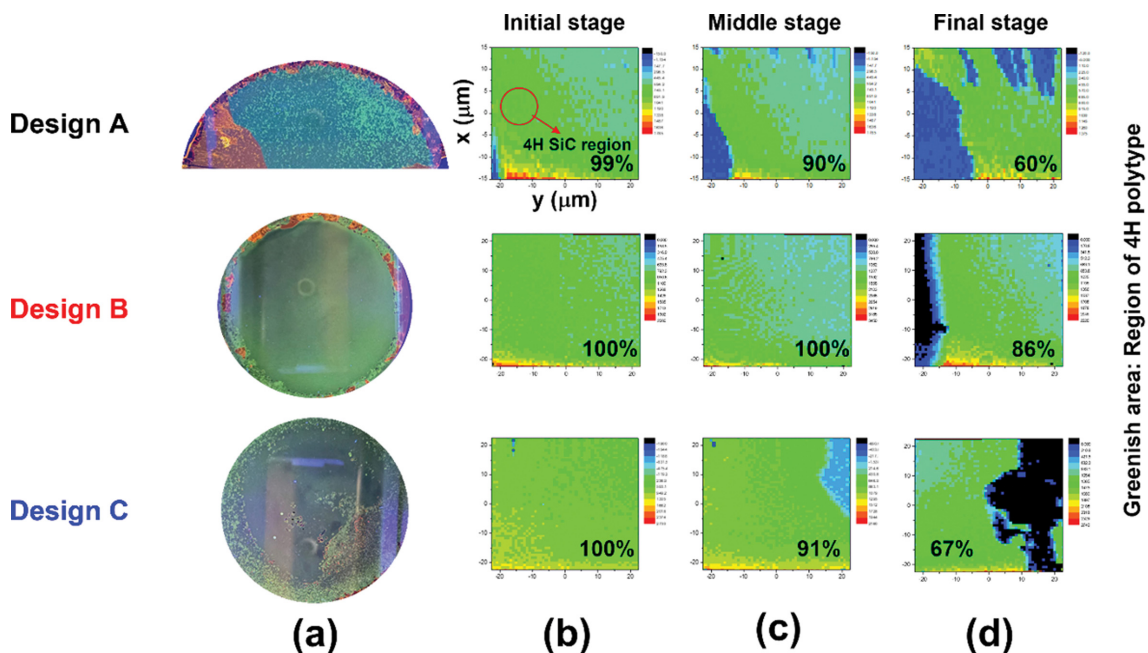


Fig. 4. Defect and polytype analysis of SiC wafer samples: (a) UVF (Ultraviolet Fluorescence) images of the wafers; (b-d) Raman mapping images of the FTA (Folded Transverse Acoustic) phonon mode corresponding to the (b) initial, (c) middle, and (d) final stages of the growth process.

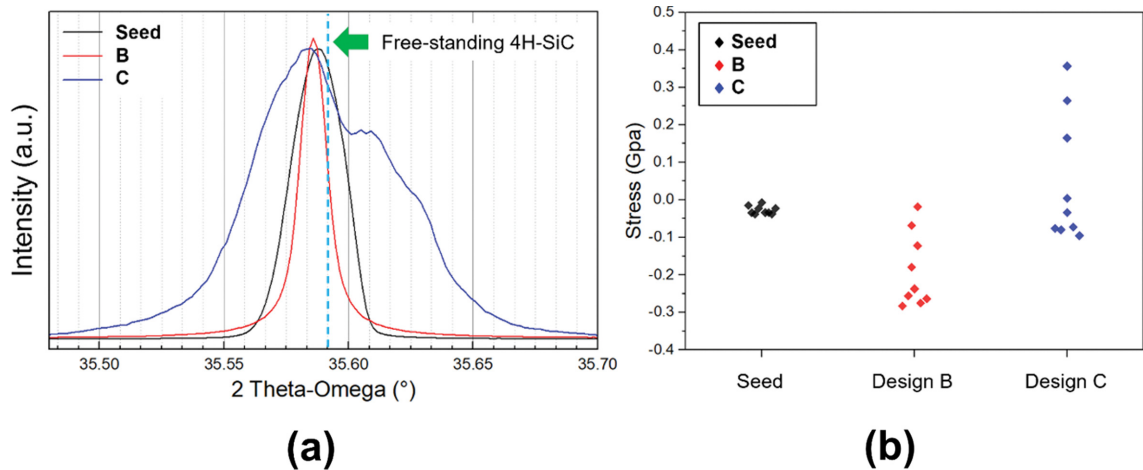


Fig. 5. Comparison of structural properties for the seed wafer and crystals grown using different seed holder designs: (a) 2θ - ω scan profiles and (b) calculated internal stress (GPa) for the seed wafer and wafers grown using Design B and Design C.

Design C: 1.8°C)에 따라 온도구배가 가장 컸던 Design A구조를 적용한 결과 오목한 형상의 잉곳이 얻어졌으며 상대적으로 온도구배가 작았던 Design B와 C에서 편평한 잉곳이 얻어졌음을 알 수 있다. 즉, 시드홀더 플랫폼에 캐비티 면적이 증가할수록 반경방향 온도구배가 감소하여 편평한 잉곳이 성장될 수 있음을 시사한다.

각 시드홀더 디자인을 적용하여 성장시킨 SiC 잉곳은 웨이퍼링 공정을 통하여 경면을 가지는 웨이퍼 형태로 준비하였다. Figure 4(a)에 각 SiC 웨이퍼 시편의 UVF 이미지와 성장단계(초기: Fig. 4(b), 중기: Fig. 4(c), 후기: Fig. 4(d)) 별 라만스펙트럼의 FTA 포논 모드의 영역별 매핑이미지를 나타내었다. Design A를 적용한 웨이퍼의 경우, 잉곳 크랙 발생으로 인해 잉곳의 1/2 영역만이 웨이퍼로 추출 가능하였다. 각 디자인을 적용하여 얻은 성장단계별 FTA 포논모드 매핑이미지(웨이퍼내부 중앙영역)의 연두색영역이 4H-SiC 영역이 되며 그 비율(%)을 이미지 하단에 표시하였다. 각 디자인별 4H-SiC 영역의 비율은 성장이 진행됨에 따라 다결정 유입으로 인해 그 영역이 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다. 상대적으로 Design B를 적용한 결정이 성장 후기에어도 어느 정도의 4H-SiC 단결정영역을 유지하는 것을 알 수 있다. 시드홀더의 플랫폼에 캐비티가 형성된 Design B와 Design C를 비교했을 때 캐비티 영역이 더 큰 Design C에서 다결정영역이 더욱 증가하는 것을 알 수 있는데, 결정이 상대적으로 더 평탄한 형상을 갖는 경우 온도구배와 유속 불균형을 형성하고 성장영역에서 화학종의 흐름을 방해하여 다결정 형성을 촉진하게 된다[8].

Figure 5(a)와 Fig. 5(b)에 종자정(seed) 및 시드홀더 Design B와 C를 적용하여 얻은 웨이퍼의 2θ - ω 스캔결과와 내부응력(GPa)을 플롯한 그래프를 각각 나타내었다. Figure 5(a)의 2θ - ω 에서 점선은 Free-standing 4H-SiC의 회절각도(35.59°)를 나타낸다. 각 샘플이 가진 반치폭은

Table 1

Results of 2θ - ω scan analysis and the corresponding calculated internal plane stress values for the center regions of crystals grown using a seed crystal, Designs B and C. Negative values denote tensile stress

	2θ - ω	Plane stress (GPa)
Seed	35.5891	-0.0006
Design B	35.5884	-0.0033
Design C	35.5811	-0.3141

로 볼 때 Design C를 적용해 얻은 웨이퍼의 면간거리의 불균일이 가장 높은 것을 알 수 있다. 또한, 회절각의 위치를 기준으로 종자정 및 Design B와 C를 적용한 웨이퍼의 회절각도가 저각으로 시프트한 것을 알 수 있는데, 이는 상대적으로 격자가 인장응력을 받고 있음을 보여준다. 이 정보를 토대로 브래그 법칙을 통해 격자상수 d 를 얻은 후, 각 샘플의 평면내 격자변형률(ϵ_x)을 얻었다. 4H-SiC의 푸아송 비(ν)는 0.157이며, 탄성계수(E)는 444 GPa이다. 여기서, 샘플 내 잔류응력은 성장방향(z 축)에 수직으로 작용하는 평면응력(Plane Stress, σ_p)을 구하였다. 수직변형률 $\epsilon_z = -2\nu\epsilon_p = -2\nu/E\sigma_p$ (ϵ_p : 평면방향 변형률)을 통해 평면응력(GPa)을 도출하였다[9]. 각 샘플 중심을 기준(0 mm)으로 좌우 10 mm 간격으로 4포인트에서의 평면응력을 Fig. 5(b)에 플롯하였으며, Table 1에 대표값을 나타내었다.

Figure 6에 각 시드홀더 디자인을 적용하여 준비한 SiC 웨이퍼 시편의 편광이미지(상)와 웨이퍼에 내접하는 사각형 영역(하)의 Rocking curve 매핑이미지를 나타낸다. XRD Rocking curve 매핑에 적용한 웨이퍼 내부 영역은 각각 $30\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ (Design A), $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ (Design B), $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ (Design C)였으며 매핑 interval은 5 mm/point였다.

Table 1에 종자정, Design B와 C를 적용하여 성장시

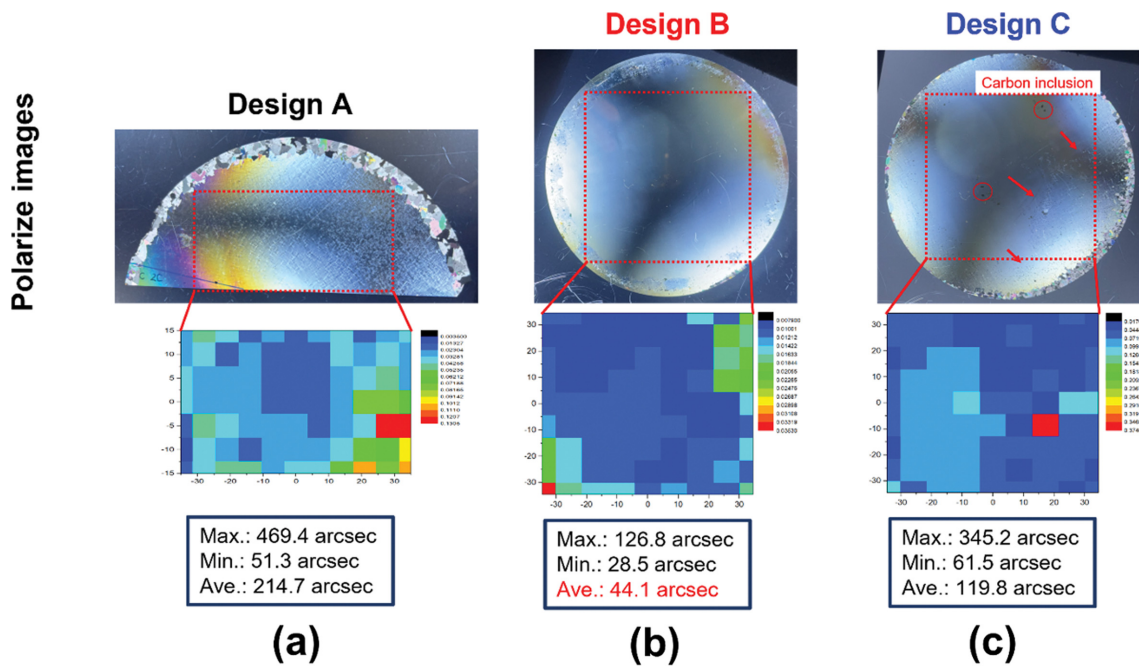


Fig. 6. Visualization of crystalline uniformity for SiC crystals grown using different seed holder designs: (Upper) Cross-polarized images and (Lower) high-resolution XRD rocking curve maps of the square-inscribed areas, illustrating the effect of seed holder geometry on defect distribution.

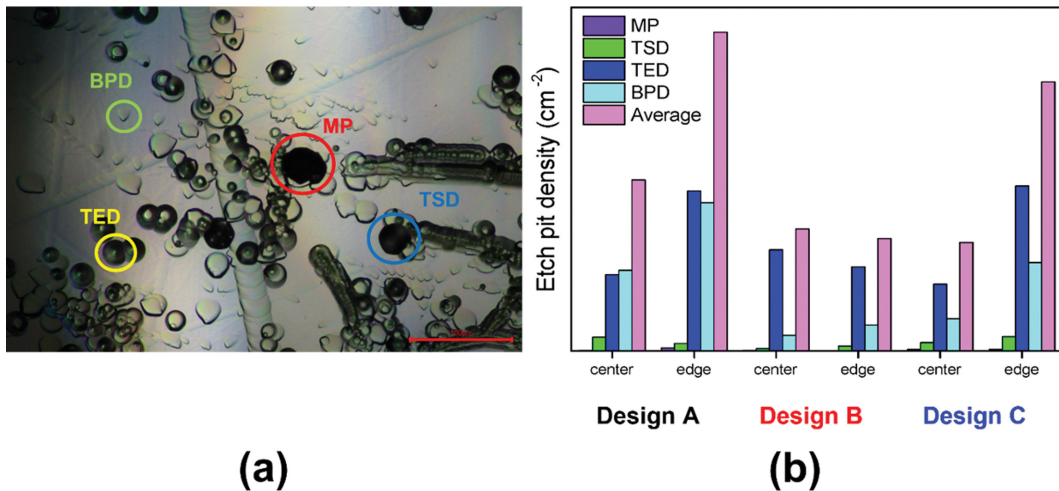


Fig. 7. Characterization of crystalline defects via chemical etching: (a) Etch pit morphologies on the SiC surfaces and (b) quantitative distribution of different dislocation types (EPD) according to the seed holder design.

킨 결정 중심부의 $2\theta-\omega$ 스캔결과와 이 값으로 통해 얻어진 내부 평면응력 변환값을 나타내었다(여기서 - 기호는 인장응력을 나타냄).

각 매핑영역에서 얻어진 Rocking curve의 반치폭 값의 최대값, 최소값 및 평균값을 아래에 표시하였다. Rocking curve의 반치폭 값의 균일성(최소값 분포)과 평균값(44.1 arcsec)을 고려하였을 때 가장 결정성이 우수한 샘플은 Design B를 적용한 결정인 것을 확인할 수 있다. Design C를 적용한 샘플의 경우, 비교적 반치폭 값이 균일하나 중심부에 발생한 carbon inclusion 등에 의한 결정성 저하

가 나타난다. 이는 VR 시뮬레이션 결과로 얻어진 Design C에서 상대적으로 고온을 나타내는 결정성장부에서 종자정과 흑연 부재의 소모로 인한 과잉 탄소의 유입에 의한 결정질 저하로 판단된다. Figure 7에 각 시드홀더 디자인으로 적용하여 성장시킨 결정에 대해 화학적 에칭을 통해 얻은 결정표면 이미지(Fig. 7(a))와 다양한 전위 결함밀도를 도식화(Fig. 7(b))하여 나타내었다. 각 결정의 화학적 표면에칭은 KOH와 Na_2O_2 를 50:3의 무게비로 칭량하여 550°C 에서 10분간 진행하였다[10]. Figure 7(a)에 SiC 결정의 표면 습식에칭으로 관찰되는 다양한 전

위결함의 이미지를 대표적으로 나타내었으며, 각 전위결함의 종류와 위치를 표시하였다. Figure 7(b)에 습식에칭을 통해 얻은 광학이미지를 바탕으로 결정 중심과 외각 부에서 관찰된 각 전위 결함의 밀도(ea/cm^2)와 그 평균 값을 막대그래프로 나타내었다. Design B를 적용하여 성장시킨 결정의 전위결함밀도가 Design A와 Design C를 적용 결정의 결함밀도 대비 현저히 낮음을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 FTA 라만 스펙트럼의 매핑에서 확인한 결정다형 균일성, XRD 2θ - ω 스캔결과에서 확인한 낮은 내부결함 분포 및 XRD Rocking curve의 반치폭 값의 균일성과 높은 연관성을 보인다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 PVT법을 이용한 SiC 단결정 성장 과정에서 발생하는 열응력을 해소하기 위해 흑연 시드홀더 플랫폼에 캐비티 구조를 도입하고, 그 면적 변화가 결정성에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다. 열장 시뮬레이션 및 성장 실험 결과, 캐비티 면적을 50%로 설정한 Design B에서 반경 방향 온도구배가 기준(2.6°C) 대비 약 42% 감소한 1.5°C 로 최적화되어 가장 안정적인 편평한 성장 계면을 형성하였다. 이를 통해 결정 내 잔류 응력을 -0.0033 GPa 까지 대폭 낮추었을 뿐만 아니라, 44.1 arcsec 수준의 우수한 결정성 균일성과 낮은 결함 밀도를 확보함으로써 시드홀더의 구조적 미세 조정이 결정 품질 향상에 결정적인 역할을 하였다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 정밀 캐비티 설계는 복잡한 핫존의 전면 개편 없이도 효율적인 열장 제어와 고품질 SiC 단결정 양산을 가능하게 하는 실질적이고 핵심적인 공정 최적화 전략임을 입증한다.

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) and by the Korea Basic Science Institute (National Research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Education (Grant No. RS-2025-02317773).

References

- [1] 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.
- [2] 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. Sci.* 59 (2024) 8930.
- [3] D. Liu, S. Jiang, W. Li, S. Yang, X. Liu, J. 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.
- [4] A. Fadeev, A. Lebedev and Y. Tairov, ‘Stress in SiC single crystal caused by the difference of CTE of SiC seed and graphite holder and role of the elastic moduli’, *Mater. Sci. Forum.* 858 (2016) 93.
- [5] J. Steiner and P. J. Wellmann, ‘Impact of mechanical stress and nitrogen doping on the defect distribution in the initial stage of the 4H-SiC PVT growth process’, *Materials* 15 (2022) 1897.
- [6] J.W. Choi, J.G. Kim, B.K. Jang, S.K. Ko, M.O. Kyun, J.D. Seo, K.R. Ku, C.Y. Lee and W.J. Lee, ‘Polytype control by pretreatment of SiC source powder for 4H-SiC single crystal growth’, *Mater. Sci. Forum.* 963 (2019) 38.
- [7] J.K. Kim, K.R. Ku, D.J. Kim, S.P. Kim, W.J. Lee, B.C. Shin, G.H. Lee and I.S. Kim, ‘SiC crystal growth by sublimation method with modification of crucible and insulation felt design’, *Mater. Sci. Forum.* 47 (2005) 483.
- [8] S. Zhang, G. Fan, T. Li and L. Zhao, ‘Optimization of thermal field of 150 mm SiC crystal growth by PVT method’, *RSC Adv.* 12 (2022) 19936.
- [9] Y.B. Yang, J. Wang and Y.M. Wang, ‘Thermal stress simulation of optimized SiC single crystal growth crucible structure’, *J. Cryst. Growth* 504 (2018) 31.
- [10] Y. Yao, Y. Ishikawa, Y. Sugawara, K. Sato, K. Danno, H. Suzuki, T. Bessho, S. Yamaguchi and K. Nishikawa, ‘Correlation between etch pits formed by molten $\text{KOH}+\text{Na}_2\text{O}_2$ etching and dislocation types in heavily doped $n^+-4\text{H-SiC}$ studied by X-ray topography’, *J. Cryst. Growth* 364 (2013) 7.