


# 전자기 유도가열식 단결정 성장로의 온도 구배제어에 있어 복사열 전달의 효과

박태용<sup>1,2</sup>, 신윤지<sup>1</sup>, 하민탄<sup>1</sup>, 배시영<sup>1</sup>, 임영수<sup>2</sup>, 정성민<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> 한국세라믹기술원 에너지환경본부 에너지효율소재센터

<sup>2</sup> 부경대학교 신소재시스템공학과

## Effect of Radiation Heat Transfer on the Control of Temperature Gradient in the Induction Heating Furnace for Growing Single Crystals

Tae-Yong Park<sup>1,2</sup>, Yun-Ji Shin<sup>1</sup>, Minh-Tan Ha<sup>1</sup>, Si-Young Bae<sup>1</sup>, Young-Soo Lim<sup>2</sup>, and Seong-Min Jeong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Energy Efficient Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

<sup>2</sup> Department of Materials System Engineering, Pukyong National University, Busan, 48547, Korea

(Received September 24, 2019; Revised October 1, 2019; Accepted October 5, 2019)

**Abstract:** In order to fabricate high-quality SiC substrates for power electronic devices, various single crystal growing methods were prepared. These include the physical vapor transport (PVT) and top seeded solution growth (TSSG) methods. All the suggested SiC growth methods generally use induction-heating furnaces. The temperature distribution in this system can be easily adjusted by changing the hot-zone design. Moreover, precise temperature control in the induction-heating furnace is favorably required to grow a high-quality crystal. Therefore, in this study, we analyzed the heat transfer in these furnaces to grow SiC crystals. As the growth temperature of SiC crystals is very high, we evaluated the effect of radiation heat transfer on the temperature distribution in induction-heating furnaces. Based on our simulation results, a heat transfer strategy that controls the radiation heat transfer was suggested to obtain the optimal temperature distribution in the PVT and TSSG methods.

**Keywords:** SiC, Single crystal growth, Induction heating furnace, Radiation heat transfer, Simulation

### 1. 서론

탄화규소(SiC)는 실리콘(Si)과 탄소(C) 원자의 화합물로 88%의 공유 결합과 12% 이온 결합을 하는 물질로서 우수한 기계적 특성, 내열성능 및 전기적 특성을 가지므로 연마재, 고경도 코팅소재, 고성능 세라믹 브레이크 및 다양한 고온고전압이 요구되는 전자적인 응

용에 활용되고 있다 [1]. 최근에는 SiC가 갖는 N 타입 및 P 타입의 도핑 가능성, 높은 열전도율, 높은 용융점, 넓은 밴드갭 등의 우수한 특징으로 인해 Si 을 대체하여 고전압, 고주파, 전기자동차 등에 적용되는 전력 반도체용 기판소재로 각광받고 있다 [2,3]. 가장 일반적인 기존의 전력반도체용 기판소재인 Si 단결정 기판이 용융법의 일종인 쇼크랄스키법에 의한 단결정 성장으로 얻어지는 데 반하여, SiC 기판은 승화법, 용액법, 기상법 등의 방법으로 단결정 성장시킨 잉곳(ingot)에서부터 웨이퍼링하여 얻어진다. 현재 상용화된 SiC 기판은 통상 승화법으로 얻어지나 최근 용액법이나 기상법 등을 이용한 고품질 기판이 활발하게 연구 개발되고 있다.

✉ Seong-Min Jeong; [smjeong@kicet.re.kr](mailto:smjeong@kicet.re.kr)

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

단결정 성장은 유도가열 또는 저항가열 방식의 전기로를 이용하여 원료의 상변화 물질이 종자결정으로 이동하고 이때 종자결정 부근에서의 원료의 상변화 물질이 과포화되고 종자결정상에 단결정으로 응축하는 과정을 통하여 진행된다. SiC 단결정 성장에 있어 상술한 세 가지 SiC 단결정 성장방식은 공통적으로 전자기유도에 의해 단결정을 성장시키는 흑연도가니를 직접 가열시키는 방식의 성장로를 사용한다. 이때 결정 성장 속도는 온도 분포에 의존하는 원료 상변화 물질의 과포화도에 의해 결정된다. 온도 구배가 크다면 결정 성장 속도는 빨라질 수 있지만 다결정이 형성될 확률이 증가하며 결정 내 응력 구배에 의한 결정 품질 저하의 부작용이 발생할 가능성이 커진다. 이러한 이유로 고품질의 단결정을 얻기 위해서는 온도 구배가 적은 환경에서 결정 성장하는 것이 나은 것으로 알려져 있다 [4].

본 연구에서는 최근 고품질의 SiC 단결정 성장법으로 각광받고 있는 상부종자용액성장법(top seeded solution growth, TSSG)과 [5-8] 상용화된 SiC 결정 성장법인 물리적 기상증착법(physical vapor transport, PVT) [9,10]을 기준으로, 전자기유도가열방식의 단결정 성장로에 있어서 온도 분포의 정밀한 제어를 위한 열전달기구를 고찰하였다. SiC의 경우 2,000°C 이상의 고온에서 공정이 진행되므로 복사열전달이 특히 중요하다. 이에 따라 본 연구에서는 전자기 유도가열로에 있어 복사열전달의 효과를 유한요소법에 기반한 다중물리시뮬레이션을 통하여 분석하고 이를 실험적인 방법으로 확인하는 일련의 연구를 진행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 모델링

그림 1에 본 연구에 사용된 이중 도가니 방식 (double crucible method)의 SiC 단결정 성장용 승화법 및 용융법 성장로의 모식도를 나타내었다. 이중 도가니 구조의 핫존에서는 단일도가니 구조 대비 도가니 직경을 자유롭게 적용할 수 있어 핫존의 온도 분포 제어가 용이하며 도가니의 열화된 부분만 교체할 수 있어 비용 절감이 가능한 장점이 있다 [11]. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 승화법과 용액법의 성장로는 구조적으로 유사하지만 용액법의 경우에는 용융액과 성장결정이 열린계에서 접촉하는 반면 승화법의 성장로에서는 닫힌계에서 종자결정상에 단결정이 성장하는 구조라는 차

이가 있다.

본 연구에서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 사용하여 유도 가열에 의한 이중 도가니의 온도 분포를 해석하였다. 그림 2에 본 연구에 적용한 유도가열로에 대한 유한요소모델을 나타내었다. 해석에 사용한 물질들의 물성은 표 1에 나타내었다. 효율적인 계산을 위하여 2차원 축대칭 정상 상태하에

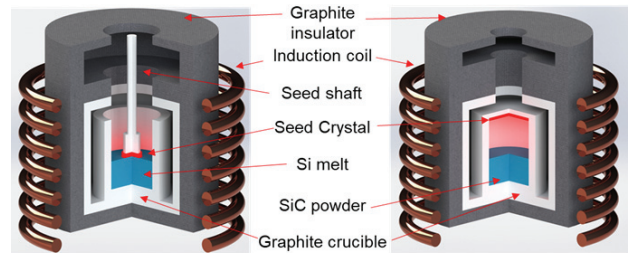


Fig. 1. Schematic of rf heating furnace for growing SiC crystals: hotzone configurations for (a) solution growth method and (b) sublimation method.

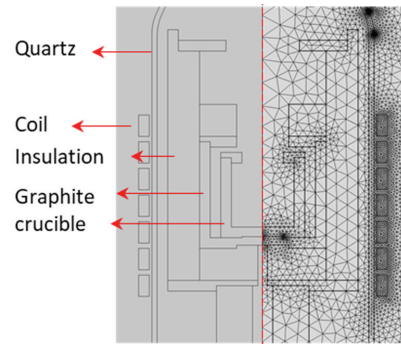


Fig. 2. Simulated model and its meshed model of rf heating furnace for growing SiC crystals via solution growth method.

Table 1. Materials properties used in the simulations.

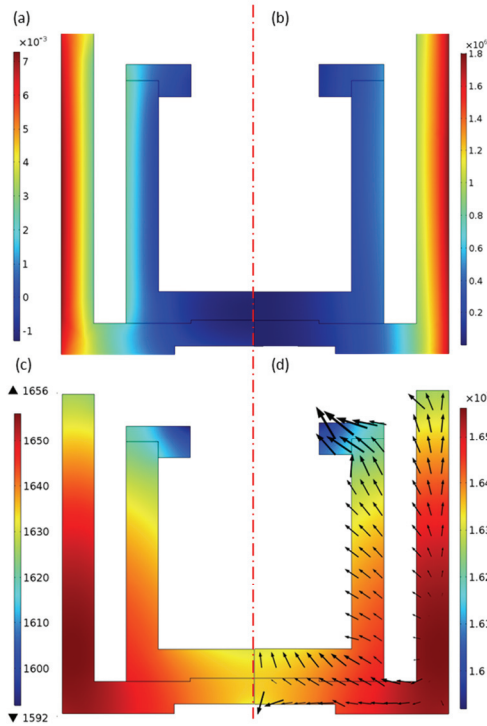
Parameter	Graphite	Graphite insulation	Copper	Quartz
Heat capacity [J/(kg*k)]	710	200	385	730
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1,950	120	8,700	2,210
Thermal conductivity [W/(m*K)]	150 * (300[K]/T)	0.336	400	1.4
Electric conductivity [S/m]	75.4e+3	430	5.998e+7	1e-14
Relative permeability	1	1	1	1
Emissivity	0.8	0.8	0.5	0.7

서 다중물리해석으로 전자기장 해석과 열전달 해석을 수행하였다. 본 연구그룹의 선행연구에 따른 rf 코일의 주파수는 11.4 kHz, 내부도가니 외경은 80 mm, 외부도가니 외경은 120 mm였으며 도가니의 두께는 모든 부분에서 10 mm였다. 기본적인 흑연도가니의 발열 및 온도분포 현상 분석을 위하여 원료를 배제하고 흑연도가니 및 단열재만을 고려한 다중물리해석을 수행하였다(세부 해석조건은 참고문헌 [12] 참조). 복사열전달의 효과를 분석하기 위하여 흑연 도가니의 방사율 수치를 0.1, 0.5, 1.0 순으로 변경해 가며 온도 분포를 해석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 흑연도가니 성능 평가

그림 3에 다중물리 해석에 따른 다양한 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 그림 3(a)는 자속밀도, 그림 3(b)는 유도전류에 의해 가열되는 영역과 그림 3(c)는 이중 도



**Fig. 3.** Simulation results showing electromagnetic heating distribution with empty double crucible configuration (a) magnetic flux density [T], (b) electromagnetic heating [W/m<sup>3</sup>], (c) normal temperature distribution [degC], and (d) conductive heat flux [W/m<sup>2</sup>].

가니의 온도분포, 그림 3(d)는 전도에 의한 heat flux를 나타내고 있다. 그림 3(b)를 통하여 rf 유도전류에 의해 직접적으로 발열되는 부분은 코일과 근접한 외부도가니 외벽인 것을 알 수 있다. 이는 전기시스템에 있어 표피효과(skin effect) 및 근접효과(proximity effect)에 의한 결과이다 [13]. 표피효과는 AC 전류가 흐를 때 전류가 표면에 집중되고 내부로 들어갈수록 전류밀도가 감소하는 현상을 말하며, 표피에서 내부로 들어갈수록 전류밀도는 아래의 관계식에 따라 감소한다.

$$I = I_0 e^{-y/\delta} \quad (1)$$

$I_0$ 는 표피전류를 말한다.  $y$ 는 표면에서 중심으로의 거리  $\delta$ 는 침투 깊이이다. 침투 깊이는 전력밀도가 표피전류에 비해 0.37배 약해지는 부분, 86% 파워가 집중되는 깊이로 정의된다 [13]. 침투 깊이는 아래의 식을 따른다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\pi u_r f}} \quad (2)$$

$\rho$ 는 전기저항  $u_r$ 은 상대 투자율  $f$ 는 AC 전류 주파수이다. 침투 깊이는 저항이 낮을수록 주파수가 높을수록 투자율이 높을수록 얇아진다. 일반적인 금속의 경우 가열되는 동안 포논 산란에 의해서 저항이 높아져 침투 깊이가 깊어진다. 반면에 층상구조를 갖는 흑연은 구조적·전기적으로 이방성을 가지며, 이에 따라 온도가 높아지면 층상구조의 면방향 저항은 증가하지만 층간방향은 저항이 감소하므로 전체적으로는 온도가 올라감에 따라 저항이 감소하다 다시 상승하는 경향이 있다 [14].

근접효과는 전류가 흐르고 있는 도체가 서로 가까운 곳에 있을 때 나타나는 상호작용을 말한다. 서로 다른 두 도체에 반대 방향의 전류가 흐르고 있는 경우 서로 마주 보는 영역에 전류가 집중된다. 유도가열 방식은 코일에 흐르는 전류와 발열체에 흐르는 유도전류의 방향이 반대이기 때문에 코일과 발열체가 서로 마주 보는 서로 근접한 영역에 전류가 집중되기 때문에 그림 3(b)과 같은 결과가 나타난다. 그림 3(d)에서 외부도가니의 전도에 의해 내부도가니로 열이 이동하는 것을 확인할 수 있다. 내부도가니 바닥은 전도와 복사의 영향을 받기 때문에 온도가 높고 내부도가니 상부 벽면의 경우 상대적으로 약한 전도, 복사에 의해서 발열이 되기 때문에 상대적으로 온도가 낮은 온도 분포를 나타내고 있다.

### 3.2 방사율에 의한 영향

그림 4는 흑연 도가니의 표면 방사율 설정값을 0.1, 0.5, 1.0으로 변경해가며 시뮬레이션을 한 결과이다. 방사율이 높을수록 발열된 부분의 열 손실량이 많아져 도가니 자체의 온도는 감소하지만 최외각 벽면에서의 복사열 이동 비율이 높아져 도가니 전체의 온도 분포는 균일해지는 것을 확인할 수 있다. 그림 5에 방사율이 증가할수록 내부도가니의 내벽(path C)에서 위치에 따른 온도 구배가 확연히 줄어들고 있음을 알 수 있다. Coil center 위치에서 방사율별  $\Delta T$ 는  $\Delta T_{0.1} = 48^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{0.5} = 22^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{1.0} = 12^\circ\text{C}$ 이다. 실제로 source와 맞닿는 내부도가니의 내벽(path C)에서의 최고온도와 최저온도 간의 온도차( $T_{\max} - T_{\min}$ )는 방사율이 0.1, 0.5, 1.0이었을 때 각각  $35^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $23^\circ\text{C}$ 으로 방사율이 증가함에 따라 온도 구배가 줄었다. PVT 경우에는 상부, 하부의 온도 차이가 일정수준 존재해야 하기 때문에 위 결과를 토대로 보면 방사율이 낮은 도가니가 유리할 수 있다 [15].

흑연 도가니의 실제 방사율은 표면상태에 따라 매끈한 경우 0.4 표면이 거칠거나 산화된 경우 약 0.9까지의 범위를 가지는 것으로 알려져 있다 [15-17]. PVT의 경우 표면이 매끄러운 도가니를 씌으로써 그림 6과 같이 동일구조에서 온도 구배를 더 높여주는 효과를 얻을 수 있다. 반면에 TSSG의 경우에는 용액의 온도 구배는 0에 가깝고 시드가 붙어 있는 흑연 샤프트의 냉각 효과에 의해서 온도 구배가 형성되는 조건이 이상적인데 이를 위해서는 용액의 온도가 매우 균등해야 한다 [18]. 이 경우 PVT의 경우와는 달리 흑연의 방사율이 높은 도가니를 사용하는 것이 유리하므로 흑연 도가니 표면을 거칠게 처리하여 방사율을 증가시킴으

로써 그림 6처럼 도가니 온도 구배를 줄이는 것이 적합할 것이다.

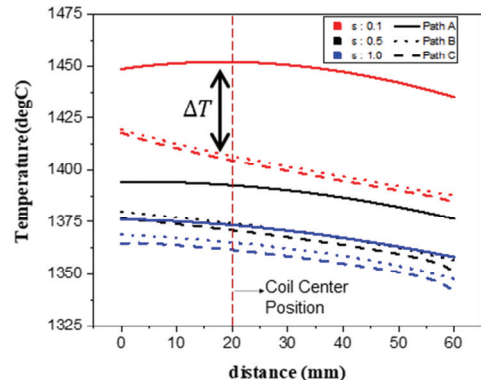


Fig. 5. Temperature distribution of path A, B, and C from multiphysics result (see path (a), (b) and (c) in Fig. 4).

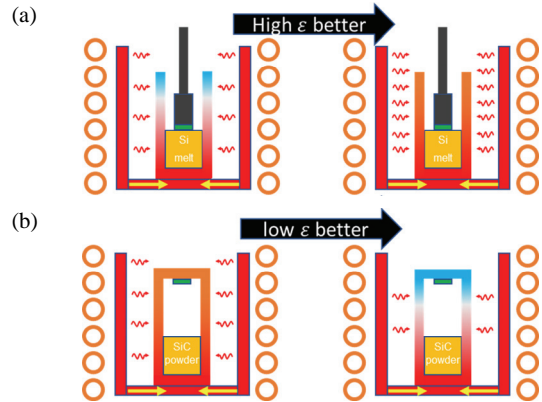


Fig. 6. Schematic diagram of temperature gradient control through emissivity control (a) TSSG case (b) PVT case.

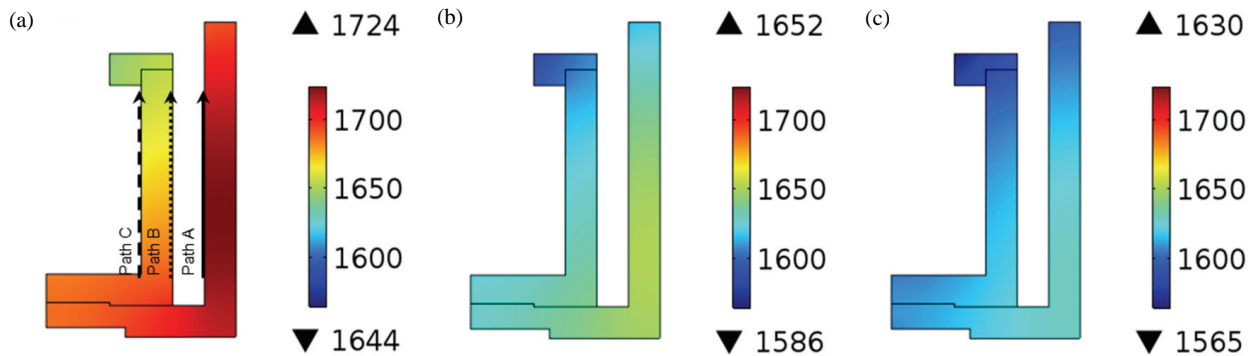


Fig. 4. Temperature distribution showing the effect of the emissivity (a)  $\epsilon$ : 0.1, (b)  $\epsilon$ : 0.5, and (c)  $\epsilon$ : 1.0.

### 3.3 이중 도가니에서의 열 전달

그림 7은 시뮬레이션 결과를 토대로 나타낸 이중 도가니에서의 열전달 과정을 나타낸 모식도이다. 그림 7에 도시한 원료는 PVT의 경우 SiC 분말이며 TSSG의 경우 Si 용액이다. 먼저 외부도가니 벽면이 유도가열에 의해 가열되고 외부도가니의 열은 전도에 의하여 외부도가니 하부, 내부도가니 하부, 내부도가니 벽면, 원료순으로 전달되는 한편 외부도가니 벽 내벽과 내부도가니 외벽 간의 복사열전달에 의해 열전달이 일어난다. 이때 열전도 방정식은 아래의 식을 따른다.

$$Q = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

$Q$ 는 heat flux,  $k$ 는 열전도도를 나타낸다. 식 (3)에 의하면 전도에 의한 열 분포는 열원과 거리가 멀수록 열전도도 값의 기울기와 동일하게 온도가 감소한다. 따라서 내부도가니 바닥은 내부도가니 벽면보다 열원과 거리가 가깝기 때문에 전도에 의한 열을 많이 받는 영역이라고 할 수 있다. 반면에 복사에 의한 열전달은 상부와 하부가 큰 차이가 나지 않는다. 이로 인해 이중도가니 구조는 하부의 전도에 의한 열전달의 영향으로 하부가 뜨겁고 상부가 차가운 온도 분포를 가지기에 적합한 구조이다. 따라서 상대적으로 상하부 온도차가 결정 성장의 구동력으로 작용하는 PVT의 경우 이중도가니 구조가 공정조건을 잡는 데 유리한 구조임을 알 수 있다. 그러나 TSSG와 같이 용액 내의 온도 구배를 최소화해야 하는 경우에는 고온에서 중요한 열전달기구인 복사 열전달에 대한 고려와 상하부의 온도 구배를 최소화할 수 있는 핫존을 구성해야 하므로 오히려 하부의

전도에 의한 열전달을 최소화하고 상부의 열손실을 최소화하는 한편 복사에 의한 열전달을 잘 제어할 수 있는 핫존을 구성해야 할 것으로 생각된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 유도가열 시스템에 다중물리 유한요소모델을 이용하여 이중 도가니의 열 유동 프로세스에 대한 이해를 높이고자 하였다. 이중 도가니의 최외각 벽면이 유도가열에 의해 직접적으로 발열되고 전도, 복사에 의해 내부도가니, 원료물질에 열이 전달됨을 전자장 해석, 열전달 해석을 통하여 확인하였다. 또한 흑연 도가니의 방사율이 1.0일 때 내부도가니 벽면의 온도차가 35°C였으며 0.1일 때 23°C임을 통하여 방사율에 의한 온도 분포 제어 가능성을 확인하였다.

본 연구에서 얻은 이해를 활용하여 흑연 도가니의 방사율을 제어함으로써 유도가열 전기로 내의 발열체의 온도 및 온도 분포를 제어할 수 있음을 알게 되었다. 특히 SiC 단결정 PVT 성장의 경우 표면이 매끈한 도가니를 사용하는 것이 온도 구배를 증가시키는 데 유리하며, TSSG에서는 표면이 거친 도가니를 이용함으로써 온도 구배를 최소화하여 공정의 온도 분포를 정밀하게 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

## ORCID

Seong-Min Jeong

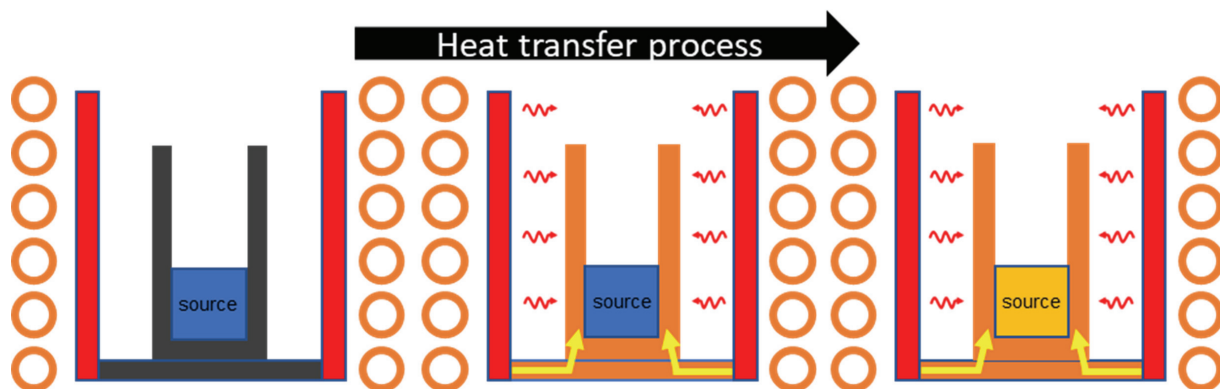
<https://orcid.org/0000-0002-1558-1456>

Fig. 7. Heat transfer process with the double crucible method in the induction heating furnace.

## REFERENCES

- [1] Grand View Research, *Silicon Carbide Market Size, Share & Trend Analysis Report*, www.grandviewresearch.com/industry-analysis/silicon-carbide-market (2019).
- [2] Y. M. Tairov and V. F. Tsvetkov, *J. Cryst. Growth*, **43**, 209 (1978). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(78\)90169-0](https://doi.org/10.1016/0022-0248(78)90169-0)]
- [3] A. A. Lebedev and V. E. Chelnokov, *Semiconductors*, **33**, 999 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1187823>]
- [4] C. B. Carter and M. G. Norton, *Ceramic Materials Science and Engineering* (Springer, New York, 2007) p. 508.
- [5] D. H. Hofmann and M. H. Müller, *Mater. Sci. Eng., B*, **61**, 29 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(98\)00440-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(98)00440-1)]
- [6] Y. Yamamoto, S. Harada, K. Seki, A. Horio, T. Mitsuhashi, and T. Ujihara, *Appl. Phys. Express*, **5**, 115501 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1143/APEX.5.115501>]
- [7] J. Y. Yoon, M. H. Lee, Y. Kim, W. S. Seo, Y. G. Shul, W. J. Lee, and S. M. Jeong *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 065501 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.065501>]
- [8] J. E. Lee, B. G. Kim, J. Y. Yoon, M. T. Ha, M. H. Lee, Y. Kim, W. S. Seo, H. J. Choi, W. J. Lee, and S. M. Jeong, *Ceram. Int.*, **42**, 11611 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.04.060>]
- [9] Z. C. Feng, *SiC Power Materials: Devices and Applications* (Springer, Heidelberg, 2004) p. 6.
- [10] S. A. Sakwe, M. Stockmeier, P. Hens, R. Müller, D. Queren, U. Kunecke, K. Konias, R. Hock, A. Magerl, M. Pons, A. Winnacker, and P. Wellmann, *Phys. Status Solidi B*, **245**, 1239 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.200743520>]
- [11] J. Y. Yoon, M. H. Lee, W. S. Seo, Y. G. Shul, and S. M. Jeong, *J. Kor. Cryst. Growth Cryst. Technol.*, **26**, 8 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2016.26.1.008>]
- [12] F. Mercier, J. M. Dedulle, D. Chaussende, and M. Pons, *J. Cryst. Growth*, **312**, 115 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.10.007>]
- [13] V. Rudnev, D. Loveless, and R. L. Cook, *Handbook of Induction Heating, Second Edition* (CRC press, 2017) p. 60.
- [14] H. O. Pierson, *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes* (William Andrew, 1993) p. 61.
- [15] L. Biasetto, M. Manzolaro, and A. Andrighetto, *Eur. Phys. J. A*, **38**, 167 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/i2008-10666-6>]
- [16] F. Wang, L. Cheng, H. Mei, Q. Zhang, and L. Zhang, *Int. J. Thermophys.*, **35**, 62 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1533-9>]
- [17] S. K. Seo, J. S. Roh, G. H. Kim, S. H. Chi, and E. S. Kim, *Korean J. Mater. Res.*, **18**, 645 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2008.18.12.645>]
- [18] K. Kusunoki, Y. Kishida, and K. Seki, *Mater. Sci. Forum*, **963**, 85 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.963.85>]