

N형 SiC 반도체의 열전 물성에 미치는 적층 결함의 영향

배철훈
인천대학교 생명공학부

The Effect of Stacking Fault on Thermoelectric Property for n-type SiC Semiconductor

Chul-Hoon Pai
Division of Bio-Engineering, Incheon National University

요약 n형 SiC 반도체에서 적층 결함이 열전 물성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. β -SiC 분말 성형체를 질소 분위기에서 1600~2100 °C, 20~120분간 열처리해서 30~42 %의 기공률을 갖는 다공질 SiC 반도체를 제작하였다. X선 회절 분석으로 적층 결함량, 격자 스트레인 및 격자 상수를 산출하였고, 미세 구조 분석을 위해서 기공률 및 비표면적 측정과 함께, 주사 전자현미경 (SEM), 투과 전자현미경 (TEM) 및 고분해능 전자현미경 (HREM) 등을 관찰하였다. Ar 분위기 550~900 °C에서 도전율과 Seebeck 계수를 측정 및 산출하였다. 열처리 온도가 높을수록, 처리 시간이 길어질수록 캐리어 농도 증가 및 입자와 입자간의 연결성 향상에 의해 도전율이 향상되었다. 도너로 작용하는 질소의 고용으로 Seebeck 계수는 음(-)의 값을 나타내었고, 도전율과 마찬가지로 열처리 온도 및 시간이 상승함에 따라 Seebeck 계수의 절대 값이 증가하였다. 이는 적층 결함의 감소, 즉 입자 및 결정 성장과 함께 적층 결함 밀도의 감소에 의해 포논의 평균 자유 행정이 증가해서 결과적으로 포논-드랙 효과에 의한 Seebeck 계수의 향상으로 나타난 것으로 판단된다.

Abstract This study examined the effects of stacking faults on the thermoelectric properties for n-type SiC semiconductors. Porous SiC semiconductors with 30~42 % porosity were fabricated by the heat treatment of pressed β -SiC powder compacts at 1600~2100 °C for 20~120 min in an N₂ atmosphere. XRD was performed to examine the stacking faults, lattice strain, and precise lattice parameters of the specimens. The porosity and surface area were analyzed, and SEM, TEM, and HRTEM were carried out to examine the microstructure. The electrical conductivity and the Seebeck coefficient were measured at 550~900 °C in an Ar atmosphere. The electrical conductivity increased with increasing heat treatment temperature and time, which might be due to an increase in carrier concentration and improvement in grain-to-grain connectivity. The Seebeck coefficients were negative due to nitrogen behaving as a donor, and their absolute values also increased with increasing heat treatment temperature and time. This might be due to a decrease in stacking fault density, i.e., a decrease in stacking fault density accompanied by grain growth and crystallite growth must have increased the phonon mean free path, enhancing the phonon-drag effect, leading to a larger Seebeck coefficient.

Keywords : β -SiC, Electrical conductivity, Grain growth, N-incorporation, Seebeck coefficient, Stacking fault

본 논문은 인천대학교 2018년 교내학술연구지원사업에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Chul-Hoon Pai(Incheon National Univ.)

email: paichlab@inu.ac.kr

Received December 7, 2020

Revised January 7, 2021

Accepted March 5, 2021

Published March 31, 2021

1. 서론

열전발전이란 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 열전반도체를 응용한 것으로 고속증식로, 우주항공, 해저 탐사 등 각종 분야에 사용되어지고 있다. 또 열전발전은 에너지 변환효율 및 출력밀도가 다소 낮지만, 열(폐) 에너지를 이용하여 전기를 얻을 수 있는 유일한 방법으로 이용 열원이 다양하고, 무소음이면서 소형화가 가능하고, 출력을 용이하게 조절할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

열전발전은 p형과 n형 반도체를 직렬로 접속시켜서, 한쪽을 가열 또 다른 쪽을 냉각시키면 양자의 열기전력이 가산되어 나타나서, 부하에 연결함으로써 전류를 얻을 수 있다. 이를테면 열전지가 형성되는 것이다. 이와 같이 p-n-p-n...의 직렬회로를 다수 조합하여서 대전력을 얻는 것을 특히 열전발전이라고 한다. 열전발전소자의 최대 출력과 최대변환효율을 평가하는 지표로 성능지수(Z)가 사용되며, Z가 클수록 열전발전소자의 성능이 우수함을 나타낸다[1]. $Z = \sigma \alpha^2 / \kappa$ 이며, 여기서 σ 는 도전율, α 는 Seebeck 계수, κ 는 열전도도를 나타낸다. σ , α 및 κ 는 열전발전소자가 T_{c_j} (저온접합부 온도)~ T_{h_j} (고온접합부 온도) 영역에서 동작하고 있을 때의 평균값이므로, Z도 이 온도영역에서의 평균값이다. 따라서 열기관에서 공통적으로 발견되는 현상으로 열전발전소자의 최대변환효율을 크게 하기 위해서는 접합부의 온도차를 크게 하여야 한다.

일반적으로 열전변환재료들은 성능지수의 최대값이 지지하는 온도에 따라, 저온용(실온~100 ℃), 중온용(200~600 ℃), 고온용(700 ℃ 이상) 등의 3가지로 분류할 수 있다[2,3]. Bi_2Te_3 , PbTe 등과 이들의 고용체 화합물 반도체들이 열전냉각재료 및 발전재료로 상업적으로 적용되고 있으나 위 재료들은 1000 ℃ 이상의 고온에서 쉽게 산화되고 분해되며 또는 용해되는 등 고온에서 적용이 부적합한 단점이 있다. 이에 반해 본 연구에서의 출발원료인 SiC 세라믹 반도체는 높은 내열성 및 내부식성을 갖고 있기 때문에 고온용 열전에너지 변환재료로 효과적으로 이용가능하다. β -SiC 분말로부터 제조된 다공질 n형 SiC의 경우 발표된 도전율 값이 단결정 SiC와 비교해서 유사하거나 오히려 높은 값을 나타내었으며, 치밀한 SiC 세라믹보다 열전도율이 1/10에서 1/30정도로 낮은 값을 나타내었다[4,5].

SiC에는 200종 이상의 다형이 존재하는 것으로 알려져 있으며, 그중 입방정계인 Zinc blend형 구조를 갖는 3C-SiC가 β -SiC이다. β -SiC는 SiC_4 사면체가

ABCABC... 순서로 <111>방향으로 적층되어 있는 구조이다. 그 밖의 다형은 각각 다른 순서로 적층되어 육방정계 또는 능면체구조를 나타내며, 이러한 다형을 총칭해서 α -SiC라고 한다. 이러한 적층순서의 주기성에서 이탈한 것을 적층결함(stacking fault)이라 하며, 본 연구에서 고분해능 전자현미경으로 관찰한 β -SiC에서의 적층결함 일례를 Fig. 1에 나타내었다.

따라서 본 연구에서는 적층결함이 n형 SiC 반도체의 열전물성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

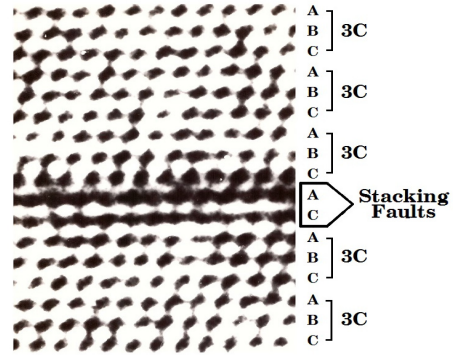


Fig. 1. HREM structural image of the typical stacking faults in β -SiC ceramics.

2. 실험

2.1 적층결함 및 격자 스트레인 분석

출발원료로 13 %의 적층결함을 내포하는 β -SiC (Central Glass Co., Ltd., 순도 99.2 %, 평균입径 ~0.4 μ m)를 사용해서 정수압 가압 성형후 고주파 유도 가열로를 이용해서 질소 분위기 1600~2100 ℃에서 20~120 분간 열처리해서 각종 시편을 제작하였고, 시편들의 분말 X선 회절분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. X선 회절 프로파일로부터 상대적으로 적층결함이 많을 것으로 예측되는 β -SiC 분말 및 저온에서 열처리한 시편의 경우, 회절각 41.4°에서의 회절선이 고온에서 열처리한 시편의 회절선보다 완만하고 상대강도가 낮은 반면에 33.6° 회절선의 상대강도가 높은 것을 확인할 수 있으며, 2100 ℃에서 열처리한 시편 S9에서는 β -SiC에서 α -SiC로의 상전이가 일부 발생한 것을 알 수 있다. 따라서 X선 회절 분석 결과에서 상전이가 발생하지 않은 2000 ℃ 이하에서 열처리한 시편에 대해서 33.6° 회절선과 41.4° 회절선을 기준으로, 본 연구진이 기준에 제안했던 $Y [\%] =$

$x/(ax+b) + cx^3$ 식을 이용해서[6], 적층결함관련 X선 프로파일 분석을 행하였다. 여기서 Y는 적층결함 밀도, x는 33.6° 회절선과 41.4° 회절선의 상대강도비, a는 6.82×10^{-2} , b는 2.27×10^{-2} , c는 1.7 이다. 또한 X선 회절선의 폭은 일반적으로 적층결함 밀도, 결정립 크기 및 격자 스트레인 등의 구조적 인자에 영향 받으므로, 본 연구에서는 X선 회절선 $K\alpha_1$ 과 $K\alpha_2$ 의 분리도를 A/B 및 C/D로 해서 (Fig. 3), 격자 스트레인을 평가하였다.

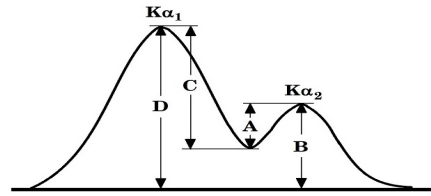


Fig. 3. X-ray diffraction profile in which the values for defining the separability are shown.

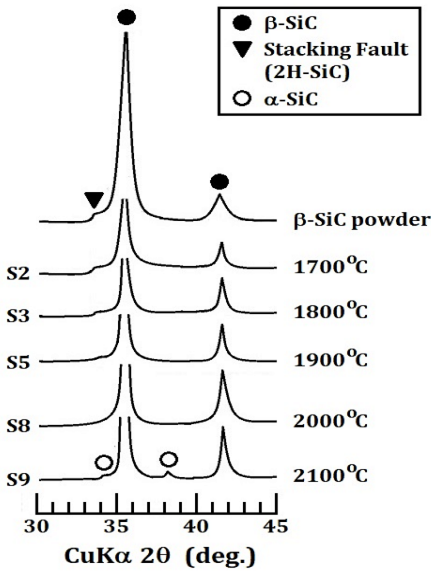


Fig. 2. Powder X-ray diffraction patterns of the starting β -SiC powder and the specimens heat treated for 20 min in N_2 atmosphere at various temperatures.

Table 1에 열처리한 시편에 대한 X선 회절분석 결과로부터 산출한 격자상수, 적층결함 및 격자 스트레인 등을 나타내었다.

2.2 미세구조 분석 및 열전물성 측정

열전물성 평가는 Ar 분위기 550~900 $^\circ C$ 에서 Fig. 4에 나타난 바와 같이 시편의 양끝에 흡을 내어 Pt-Pt•13%Rh 열전대의 접합부를 고정시키고 Pt선을 전극 처리한 부분 끝의 흡에 고정하여 직류 4단자법으로 도전율을 측정하고, 동일 시편에 대해 한쪽에 냉각공기를 흘려 주어 고온부와 2~8 K의 온도차를 발생시켜 이에 발생된 전위차의 기울기로부터 Seebeck 계수를 산출해서 열전물성에 미치는 적층결함의 영향에 대해 고찰하였고, 미세구조의 영향을 고찰하기 위해 열처리한 시편들에 대해 기공률 및 비표면적을 측정하였고, TEM (Transmission electron microscope), HREM (High-resolution transmission electron microscope) 및 SEM (Scanning electron microscope) 등을 이용해서 미세구조 변화를 관찰하였다.

Table 1. Characteristics for the specimens obtained under the various heat treatment conditions.

Sample name	Heat treatment condition (in N_2 atmosphere)		Porosity (%)	Lattice parameter (Å)	Stacking fault (%)	Lattice strain (10^{-4})	Surface area (m^2/g)
	Temp. ($^\circ C$)	Time (min)					
S1	1600	20	41.92	4.3590	12.43	5.37	11.15
S2	1700	20	39.09	4.3592	11.67	5.19	8.23
S3	1800	20	36.67	4.3588	9.21	4.54	5.07
S4		120	34.51	4.3582	7.95	4.43	4.15
S5	1900	20	33.43	4.3579	5.61	3.27	2.12
S6		60	32.08	4.3574	4.18	2.92	2.08
S7		120	30.95	4.3575	1.69	1.28	1.34
S8	2000	20	31.17	4.3571	1.73	0.56	1.28
S9	2100	20	32.87	-	-	-	-

3. 결과 및 고찰

3.1 적층결함

β -SiC 분말 성형체를 질소 분위기 1600~2000 °C에서 20분간 열처리한 시편의 적층 결함량 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 열처리 온도의 상승에 따라 적층결함이 감소하며, 특히 1800°C 이상에서 급속히 감소하는 것을 알 수 있다. 대표적인 공유결합성 물질인 SiC의 경우 일반적으로 초기 소결과정에서 표면확산에 의해 입자가 성장하는데[7,8], 열처리 온도가 상승함에 따라 보다 활발한 표면확산에 의해 입자가 성장하면서 내부에 잔존하는 적층결함을 감소시킨 것으로 판단할 수 있다. 앞서의 Table 1으로부터도 열처리 온도 1800 °C 이상에서 입자 성장에 의해 기공률과 비표면적이 큰 폭으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 열처리 온도를 1800 °C로 고정시키고 열처리 시간에 따른 적층 결함량 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 열처리 시간 증가에 따라 적층결함이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 80분 이상부터는 감소율이 둔화되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 열처리 초기에 입자 성장이 활발히 일어나고 시간이 경과함에 따라 입자 성장이 둔화됨에 기인하는 것으로 판단되며, Table 1에서 열처리 온도 1800 °C인 시편 S3과 S4, 1900 °C인 시편 S5~S7의 기공률 및 비표면적 변화로부터 확인할 수 있다. 또한 입자 성장의 영향과 더불어 질소의 고용량 변화에 따른 격자 스트레인 변화의 영향도 기인하는 것으로 사료된다. Table 1의 열처리 시편들의 격자상수 측정값을 살펴보면 SiC의 격자상수 표준값[9] 4.3596 Å과 비교시 전반적으로 열처리 온도가 상승함에 따라, 또 열처리 시간이 증가함에 따라 격자상수가 감소하는 경향을 볼 수 있다.

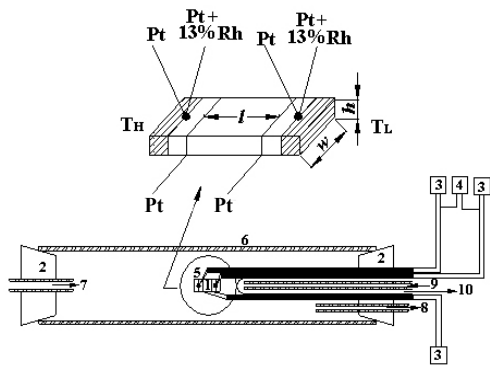


Fig. 4. Schematic diagram of the apparatus for electrical conductivity and Seebeck coefficient measurement; 1. Specimen, 2. Silicon rubber, 3. Voltmeter, 4. DC current source, 5. Thermocouple, 6. Alumina tube, 7. Gas inlet, 8. Gas outlet, 9. Air inlet, and 10. Air outlet.

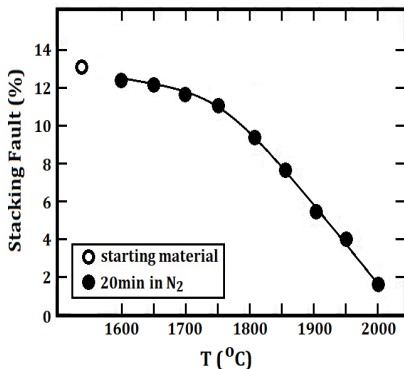


Fig. 5. Change in stacking fault for SiC heat treated for 20 min in N_2 atmosphere at the various temperatures.

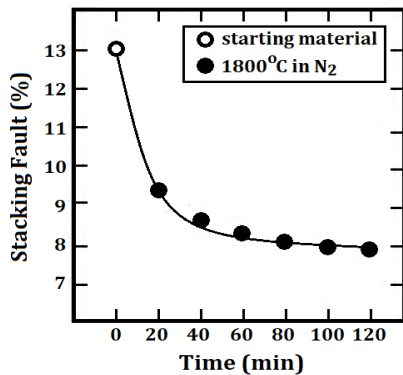


Fig. 6. Change in stacking fault for SiC heat treated at 1800 °C in N_2 atmosphere for the various times.

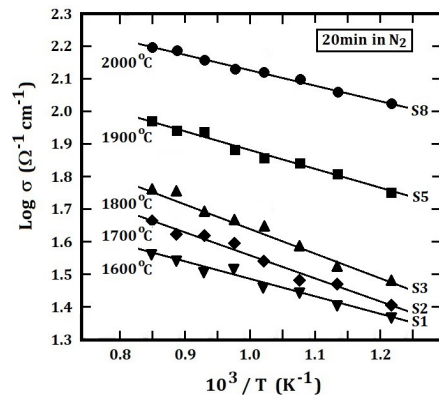


Fig. 7. Temperature dependences of electrical conductivity for SiC heat treated for 20 min in N_2 atmosphere at the various temperatures.

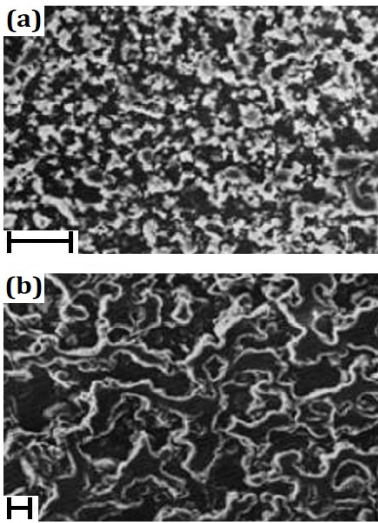


Fig. 8. Scanning electron micrographs of the specimens heat treated at (a) 1800 °C (b) 2000 °C for 20 min in N₂ atmosphere ; bar = 10 μm

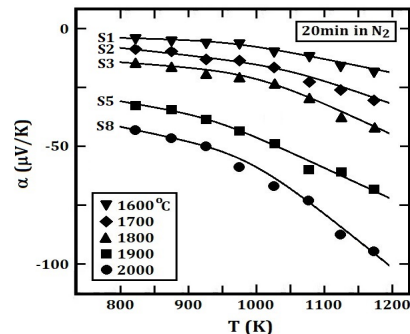
Si, C 및 N의 공유반경이 각각 0.111, 0.077, 0.075 nm인 것을 감안하면, 질소 분위기에서의 열처리 과정에서 질소가 규소 및 탄소와 치환 고용함으로써 격자상수가 감소한 것으로 판단할 수 있으며, 공유반경이 다른 질소의 치환 고용에 의해서 격자 스트레인이 발생함으로 질소 고용량 또한 적층결함에 영향을 미칠 것으로 사료된다[6]. 따라서 Fig. 6에서 열처리 시간 80분 이상에서 적층결함 감소율이 둔화된 경향은 질소 고용량 증가에 의한 영향도 기여한 것으로 판단된다. 적층결함과 마찬가지로 열처리 온도 상승 및 시간 증가에 따라 격자 스트레인이 감소하였다 (Table 1).

3.2 열전변환 물성

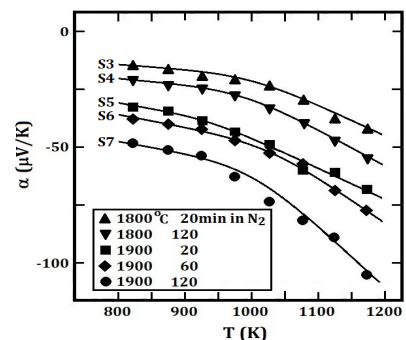
Fig. 7에 도전율의 온도의존성을 나타내었다. 모든 시편에서 온도 상승과 함께 도전율이 증가하는 전형적인 반도체적 특성을 나타내었고, 열처리 온도가 높을수록 도전율이 상승하였으며 2000 °C에서 열처리한 시편(S5)의 도전율이 가장 높았다. 이는 열처리 과정에서 도입된 질소의 고용량과 미세구조의 영향으로 판단된다. Table 1에서 시편 S1, S2, S3, S5, S8의 격자상수 변화로부터 열처리 온도가 상승함에 따라 질소 고용량 증가에 의해 격자상수가 감소하였고, 결과적으로 캐리어 농도 증가에 의해 도전율이 상승한 것으로 사료된다. 또한 열처리 온도가 상승함에 따라 기공률이 감소하였고, SEM 관찰결과

(Fig. 8) 1800 °C보다 2000 °C에서 열처리한 시편의 경우에 뚜렷한 입자 성장과 함께 입자와 입자간의 연결성이 비교적 양호했던 미세구조적 영향도 도전율 상승에 기여한 것으로 판단된다.

다결정 반도체의 전기전도기구는 입계에 전하가 축적되기 때문에 입계 양측에 공간전하층이 형성되고, 그 공간전하층에 의해 Schottky 장벽이 형성된다는 모델로 검토되고 있다[10,11]. 본 연구에서의 SiC 반도체의 경우, 열처리 과정에서 분위기 기체인 질소가 입내로 확산 고용되고 출발원료(순도 99.2 %)에 내재했던 불순물들의 일부는 입계에 잔존할 것으로 예상되므로, 입내에는 적층결함 및 고농도의 질소 고용물이 존재하게 되어 밴드갭내에 고농도의 국재준위가 존재하고, 입계에는 불순물에 의한 국재준위가 존재하여 입계층에는 정(+)의 전하가 축적되고, 입계층의 양측은 공간전하층이 형성되어 도전율이 저하되는 것으로 사료된다. 따라서 도전율 향상을 위해서는 입자간의 연결성과 함께 입계층의 제어도 중요한 인자로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 9. Temperature dependences of the Seebeck coefficient for SiC heat treated in N₂ atmosphere.

(a) for 20 min at the various temperatures
(b) at 1800 °C and 1900 °C for the various times

Fig. 9의 Seebeck 계수의 온도의존성으로부터 열처리된 모든 시편에서 n형 반도체의 특성인 음(-)의 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 분위기 기체인 질소의 고용에 의한 것으로 판단할 수 있다. 또 열처리 온도가 상승함에 따라 Seebeck 계수의 절대값이 증가하였는데, 이는 온도구배에서 전자확산에 의해 기전력이 발생한다는 반도체 이론만으로는 설명할 수가 없고, 입계, 적층결합면, 전위 등의 경계에서 산란되는 포논에 의한 캐리어의 드랙현상 즉 포논드랙 효과로 해석할 수 있다[12]. 즉 열처리 온도의 상승에 따라 입자 성장과 함께 적층결합이 감소하여, 결과적으로 포논의 평균 자유행정이 향상되어 Eq. (1)에 의거 Seebeck 계수가 상승한 것으로 판단된다.

$$|\alpha| = |\alpha_0| + (\tau_p/\tau_{ep})(m^*s^2/eT) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $1/\tau_p = 1/\tau_{pp} + 1/\tau_{pb} + 1/\tau_{pe} + \dots$, α 는 포논드랙 Seebeck 계수, α_0 는 포논드랙 효과가 나타나지 않았을 때의 Seebeck 계수, τ_p 는 포논의 완화시간, τ_{ep} 는 포논에 의해 산란된 전자의 완화시간 (첨자 e는 전자, p는 포논, b는 입계), m^* 는 하전 캐리어의 유효질량, s 는 포논의 평균속도를 나타낸다. Table 1의 적층결합 변화와 Fig. 10에 나타난 TEM 관찰결과로부터 열처리 온도 상승에 의해 적층결합이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)에서 1900 °C에서 열처리한 시편 S5~S7의 Seebeck 계수 절대값을 비교해 보면 열처리 시간에 따라 확연하게 증가하는 것을 알 수 있고, 특히 120분간 열처리한 시편 S7의 경우 2000 °C에서 20분간 열처리한 시편 S8과 비교시 고온에서 약간 큰 값을 나타내었다. Table 1에서의 시편 S7과 S8의 격자상수와 적층결합을 비교해 보면, 격자상수는 시편 S7이 적층결합은 시편 S8이 큰 값을 갖는 것으로부터 질소의 치환 고용량이 적은 시편 S7이 고용이 격자스트레인에 미치는 영향이 상대적으로 작은 결과 및 기공률 차이에 의해 적층결합량이 감소한 것이 Seebeck 계수에 영향을 미친 것으로 사료된다.

결과를 종합적으로 분석해 보면, 도전을 향상을 위해서는 질소 고용량을 증가시키면서 입자와 입자의 연결성이 우수한 미세구조가 바람직하지만, 역으로 질소 고용은 적층결합을 증가시켜 Seebeck 계수를 감소시키기 때문에, 열처리 조건의 정밀한 제어를 통해서 최적의 열전변환능 (power factor, $\sigma\alpha^2$) 조건을 확립함으로써 SiC의 열전변환 물성의 보다 큰 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

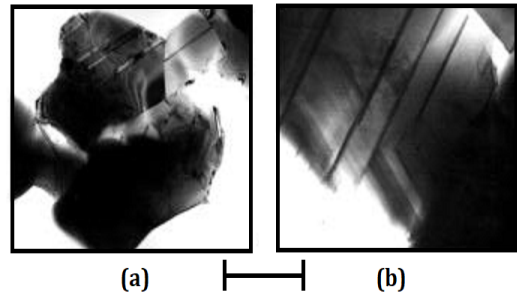


Fig. 10. Low-magnification transmission electron micrographs of the specimens heat treated at (a) 1800 °C (b) 2000 °C for 20 min in N₂ atmosphere ; bar = 2 μm.

4. 결론

N형 SiC 반도체의 열전물성에 미치는 적층결합의 영향에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열처리 온도 및 시간의 상승에 따라 입자 성장에 의해 적층결합이 감소하였으며, 특히 1800 °C 이상의 열처리 공정에 의해 급속하게 감소하였다.
- 2) 열처리 온도 및 시간의 상승에 따라 질소 고용량 증가에 따른 캐리어 농도 상승과 함께 기공률 감소 및 입자와 입자간의 연결성 향상 등의 미세구조 변화에 의해 도전율이 상승하였다.
- 3) 열처리 온도 및 시간의 상승에 따라 적층결합 감소에 의해 Seebeck 계수의 절대값이 증가하였고, 1900 °C에서 120분간 열처리한 시편에서 가장 큰 절대값을 나타내었다.
- 4) 과잉의 질소고용은 격자 스트레인 증가에 의한 적층결합량 상승의 원인이 되어 Seebeck 계수의 절대값을 감소시켰다.

References

- [1] K. Uemura and I. Nishida, Thermoelectric Semiconductors and Their Applications, Nikkankogyoshinbunsha, 1988, pp.33-37.
- [2] I. B. Cadoff and E. Miller, Thermoelectric Materials and Devices, Chapman and Hall Ltd., 1960, pp.178-183. DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.3057558>
- [3] K. Uemura and I. Nishida, Thermoelectric Semiconductors and Their Applications, Nikkankogyoshinbunsha, 1988, pp.1-7.

- [4] K. Koumoto, C. H. Pai, S. Takeda, and H. Yanagida, "Microstructure-controlled Porous SiC Ceramics for High-temperature Thermoelectric Energy Conversion", *Proc. of the 8th Inter. Conf. on Thermoelectric Energy Conversion*, ECT, Nancy, France, pp.107-112, 1989.
- [5] C. H. Pai, K. Koumoto, S. Takeda, and H. Yanagida, "Preparation of SiC Hollow Particles by Gas-Phase Reaction and Thermoelectric Properties of Sintered Bodies", *Solid State Ionics*, 32/33, pp.669-677, 1989.
- [6] W. S. SEO, C. H. Pai, K. Koumoto, and H. Yanagida, "Microstructure Development and Stacking Fault Annihilation in β -SiC Powder Compact", *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 99[6], pp.443-447, 1991.
DOI: <https://dx.doi.org/10.2109/jcersj.99.443>
- [7] W.S. Seo, C.H. Pai, K. Koumoto, and H. Yanagida, "Effects of Additives on the Stacking Fault Annihilation in β -SiC Powder Compacts," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 99[12] pp.1179-1184, 1991.
DOI: <https://doi.org/10.2109/jcersj.99.1179>
- [8] W.F. Knippenberg and G. Verspui, "The Influence of Impurities on the Growth of Silicon Carbide by Recrystallization," *Mater. Res. Bull.*, 4 45-56 (1969).
- [9] V. Munch, "Silicon Carbide," *Landolt-Bornstein*, 17 [a] 132-42 (1982).
- [10] J. Y. W. Seto, "The Electrical Properties of Polycrystalline Silicon Films", *J. Appl. Phys.*, 46[12], pp.5247-5254, 1975.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.321593>
- [11] J. Y. M. Lee and I. C. Cheng, "Electrical Properties of Lightly Doped Polycrystalline Silicon", *J. Appl. Phys.*, 53[1], pp.490-495, 1980.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.329952>
- [12] J. E. Parrott, "Some Contributions to the Theory of Electrical Conductivity, Thermal Conductivity, and Thermoelectric Power in Semiconductors", *Transport Phenomena in Semiconductors*, B70, pp.590-607, 1957.

배 철 훈(Chul-Hoon Pai)

[정회원]



- 1986년 2월 : 연세대학교대학원 세라믹공학과 (공학석사)
- 1990년 2월 : 동경대학교대학원 응용화학과 (공학박사)
- 1992년 3월 ~ 1994년 9월 : 생산 기술연구원 조교수
- 1994년 9월 ~ 현재 : 인천대학교 나노바이오공학과 교수

<관심분야>

전자세라믹재료, 에너지변환재료, 센서재료