

90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 밴드갭 에너지와 열전특성

하헌필 · 현도빈 · 황중승 · 오태성*

한국과학기술연구원 금속공정연구센터

*홍익대학교 금속·재료공학과

Band-Gap Energy and Thermoelectric Properties of 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ Single Crystals

Heon-Phil Ha, Dow-Bin Hyun, Jong-Seung Hwang, and Tae-Sung Oh*

Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650

*Dept. of Metallurgy and Materials Science, Hongik University, Seoul 121-791

(1998년 11월 9일 받음, 1999년 1월 22일 최종수정본 받음)

초 록 Dopant를 첨가하지 않은 시료와 donor dopant로 CdI₂를 첨가한 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정을 Bridgman법으로 성장시키고 Hall 계수, 전하이동도, 전기비저항, Seebeck 계수, 열전도도 및 성능지수를 77~600K의 온도범위에서 측정하였다. Dopant를 첨가하지 않은 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서 포화정공농도는 $5.85 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이고 degenerate 온도는 127K 이었으며, 전하 이동에 대한 산란인자는 -0.23 이고 전자이동도와 정공이동도의 비 (μ_e/μ_h)는 1.45 이었다. 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 0K에서의 밴드갭 에너지는 0.200 eV로서 Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 단결정에서는 Bi₂Se₃의 농도가 증가할수록 밴드갭 에너지가 증가하였다. Donor dopant로 CdI₂를 첨가한 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 조성의 n형 단결정에서 성능지수의 최대값은 CdI₂를 0.05 wt% 첨가한 경우에 약 230K에서 $3.2 \times 10^{-3}/\text{K}$ 를 나타내었다.

Abstract The temperature dependences of the Hall coefficient, carrier mobility, electrical resistivity, Seebeck coefficient, thermal conductivity, and figure-of-merit of the undoped and CdI₂-doped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystals, grown by the Bridgman method, have been characterized at temperatures ranging from 77K to 600K. The saturated carrier concentration and degenerate temperature of the undoped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal are $5.85 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and 127K, respectively. The scattering parameter of the 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal is determined to be -0.23, and the electron mobility to hole mobility ratio (μ_e/μ_h) is 1.45. The bandgap energy at 0K of the 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal is 0.200 eV. Adding CdI₂ as a donor dopant, a maximum figure-of-merit of $3.2 \times 10^{-3}/\text{K}$ at 230K was obtained for 0.05 wt% CdI₂-doped specimen.

1. 서 론

최근 전자부품의 소형화, 고전력화, 고밀도실장화 추세에 부응하여 적외선 센서, laser diode 및 CCD 소자의 냉각등 각종 전자기기나 IC의 국부냉각에 Peltier 효과를 이용하는 전자냉각방식이 적용되고 있으며, 과학계측장비, 의료용 장비뿐만 아니라 가전산업분야에도 점차 응용범위가 확대되고 있다.¹⁾ 전자냉각을 위한 Peltier 모듈은 상온 부근에서 성능지수가 가장 우수한 p형 Bi₂Te₃-Sb₂Te₃계와 n형 Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 열전반도체로 구성되어 있다. 이 중에서 Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 단결정은 Bi₂Te₃의 농도가 높은 영역에서 p형 전도기구를 가지므로^{2~6)} 이에 donor dopant를 첨가하여 n형 열전반도체로 제조하는 것이 일반적이다. 한편 열전반도체의 냉각성능을 결정짓는 성능지수 ($Z = \alpha \cdot \sigma / \kappa$)는 Seebeck 계수 (α), 전기전도도 (σ)와 열전도도 (κ)에 의존하며, 이들 물성은 전기적특성과 연관되어 있으므로 열전특성을 향상시키기 위해서는 dopant 첨가에 따른 전기적특성과 열전특성의 변화에 대한 분석이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 조

성의 단결정에 대해서 Hall 효과를 측정하여 전하농도, 전하이동도 등의 전기적특성을 측정하였으며, donor dopant로 CdI₂를 첨가한 단결정에 대해서 Seebeck 계수와 열전도도, 성능지수 등의 열전특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

순도 99.999% 이상인 shot 또는 granule 형태의 고순도 Bi, Te, Se를 묽은 질산, 아세트, 증류수 순으로 세척한 후에 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 조성에 맞추어 칭량하고 donor dopant로서 CdI₂를 0.20 wt% 범위 내에서 첨가하여, 내부가 탄소로 도포된 석영관에 장입한 후 10^{-5} torr의 진공도에서 진공봉입하였다. 800°C로 유지되고 있는 교반로에서 봉입된 석영관을 10시간 동안 교반시켜 균질용해시킨 뒤 상온으로 냉각하였다. 이와 같이 제조한 ingot을 Bridgman로를 이용하여 900°C에서 1.2 mm/hour의 성장속도, 고액계면의 온도기울기 25°C/cm의 조건으로 단결정으로 성장시켰다.

Seebeck 계수, 전기비저항 및 열전도도의 측정을 위해서 결정성장방향으로 $5 \times 5 \times 10$ (mm³) 크기의 시편을 채취하

였으며, Hall 계수의 측정을 위해 $5 \times 5 \times 0.3$ (mm³)의 시편을 채취하였다. Seebeck 계수는 heat-pulse법⁷⁾으로 측정하였으며, 열전도도는 Harman법⁸⁾으로 구하였다. 전기전도도, 전하이동도, 전하농도는 Van der Pauw법으로 측정한 Hall 계수로부터 구하였으며, 이때 DC 전류는 100 mA, 자기장의 세기는 3000 gauss로서 결정의 c축에 평행하게 가해주었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 밴드갭 에너지

Dopant를 첨가하지 않은 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서 온도에 따른 Seebeck 계수의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 상온 부근에서는 Seebeck 계수가 양수로서 p형 전도기구를 나타내며, 온도 증가에 따라 Seebeck 계수가 증가하다가 최대값에 이른 후 감소하여 약 470K에서 n형으로 천이하였다. 이와 같이 저온영역에서 Seebeck 계수가 온도에 따라 증가하는 것은 전하포화영역에서 온도의 증가에 따라 정공의 이동도가 감소하기 때문이며, 고온영역에서 Seebeck 계수가 최대값을 보인 후에 감소하는 것은 혼합전도에 의한 것이다.⁹⁾ 즉, 고온영역에서는 가전자대에서 전도대로 직접 여기하기에 충분한 에너지를 갖는 전자의 수가 급격히 증가하며, 이에 따라서 전기전도는 전도대의 전자와 가전자대의 정공에 의한 혼합전도에 의해 일어나게 되는데 이때의 Seebeck 계수는 식 (1)과 같이 표시된다.¹⁰⁾

$$\alpha = \frac{\sigma_h \cdot \alpha_h - \sigma_e \cdot \alpha_e}{\sigma_e + \sigma_h} \quad (1)$$

식 (1)에서 α_h 는 정공에 의한 Seebeck 계수, α_e 는 전자에 의한 Seebeck 계수, σ_h 는 정공에 의한 전기전도도이며 σ_e 는 전자에 의한 전기전도도이다. 따라서 p형 열전반도체

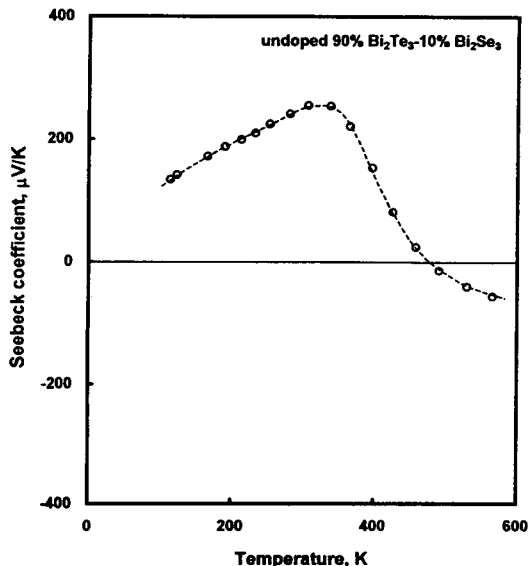


Fig. 1. Seebeck coefficient of the undoped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal as a function of temperature.

의 경우 혼합전도영역에서 전자에 의한 Seebeck 계수 또는 전기전도도의 기여가 커지면 Seebeck 계수가 감소하며, 또한 intrinsic 영역에서 전자의 이동도가 정공의 이동도보다 큰 경우에는 p형에서 n형으로 전도기구가 천이하게 되는데 Fig. 1의 결과는 이와 같은 해석과 잘 일치한다.

Fig. 2는 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서 온도에 따른 Hall 계수 (R_H)의 변화를 온도의 역수에 대해서 도시한 것인데, 약 300K 이하의 온도영역에서는 R_H 가 일정하여 전하가 포화되어 있음을 알 수 있다. 300K 이상의 온도 범위에서는 온도 증가에 따라 R_H 가 급격히 감소하며 약 470K에서 R_H 의 부호가 바뀌어 Fig. 1의 Seebeck 계수와 마찬가지로 p형에서 n형으로 전도기구가 천이함을 볼 수 있는데, 이는 가전자대에서 전도대로 여기된 전자의 농도가 정공의 농도보다 많아지기 때문이다. 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정과 같이 전기적 이방성이 큰 재료의 경우 extrinsic 영역에서 R_H 와 전하농도 (n) 사이의 관계는 식 (2)와 같이 표시된다.

$$R_H = \frac{r_H \cdot B}{n \cdot e} \quad (2)$$

식 (2)에서 r_H 는 degeneracy correction factor이고, B 는 anisotropic factor인데 편의상 r_H 와 B 의 곱이 1이라고 가정하면 R_H 의 측정값으로부터 전하농도를 구할 수 있다.¹¹⁾ 식 (2)로부터 구한 전하농도를 Fig. 3에 도시하였는데, 전하포화영역에서의 포화정공농도 (P_s)는 5.85×10^{18} cm⁻³로서 85% Bi₂Te₃-15% Bi₂Se₃ 단결정의 포화정공농도¹²⁾인 3.8×10^{18} cm⁻³보다 큰 값을 나타내어 Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 단결정에서는 Bi₂Te₃의 농도가 증가할수록 포화정공농도가 높아짐을 알 수 있다. 한편 반도체에 있어서 degenerate 온도 (T_{deg})는 식 (3)으로 표시되는데,^{13,14)} 식 (3)으로부터 구한 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 T_{deg} 는 137K로서 순수한 Bi₂Te₃ 단결정의 T_{deg} 인 240K,¹⁴⁾ 85% Bi₂Te₃-15% Bi₂Se₃ 단결정의 T_{deg} 인 103K¹²⁾와 비교할 때 Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 단결정에서는 Bi₂Se₃의 농도가 증가할수록 degenerate 온도가 낮아짐을 알 수 있다.

$$T_{deg} = \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} \frac{h^2}{8k_B m} P_s^{2/3} \quad (3)$$

Fig. 4에 dopant를 첨가하지 않은 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서 온도에 따른 Hall 이동도 (μ_H)의 변화를 나타내었는데, degeneracy가 강한 저온영역에서 μ_H 는 식 (4)와 같이 $T^{-1.23}$ 에 비례하여 직선적으로 감소한다.

$$\log \mu_H = 1.23 \log (1000/T) + 1.715 \quad (4)$$

온도가 증가함에 따라서 μ_H 가 직선관계로부터 벗어나는 것은 혼합전도의 영향이며, 약 470K 이상의 온도에서 μ_H 가 증가하는 것은 전자가 주된 전하로 작용하는 intrinsic 영역에서 나타나는 일반적인 현상이다. 전하가 포화되어 있는 온도 범위에서 Hall 이동도는 전하이동도와 동일하게

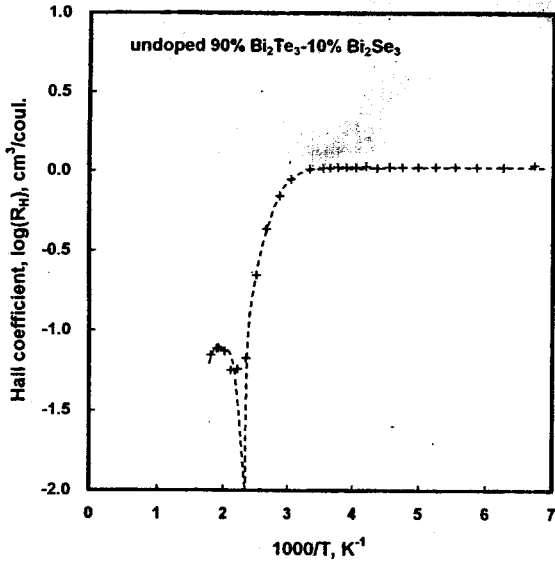


Fig. 2. Hall coefficient of the undoped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal as a function of the reciprocal temperature.

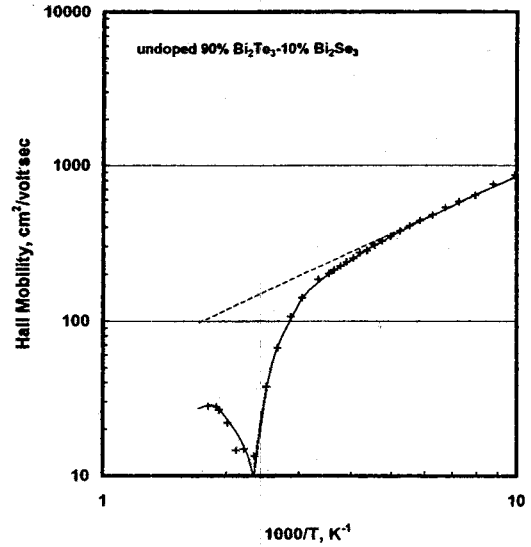


Fig. 4. Hall mobility of the undoped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal as a function of the reciprocal temperature.

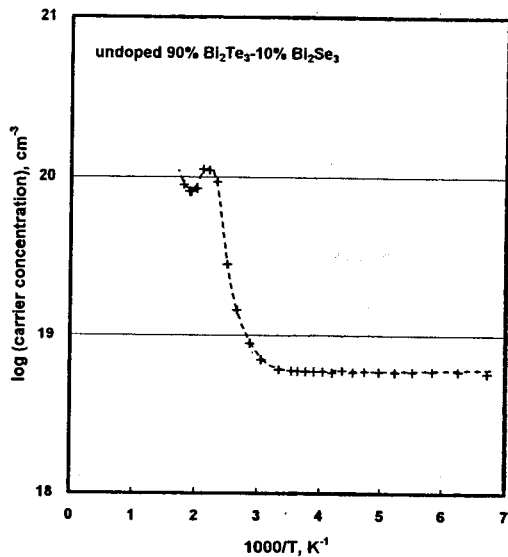


Fig. 3. Carrier concentration of 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal as a function of the reciprocal temperature.

취급할 수 있으며,¹⁴⁾ 전하이동도의 온도의존성은 $\mu \propto T^{(s-1)}$ 과 같이 산란인자(s)의 함수이다. 전하의 산란이 acoustic phonon 산란(s_{ac})인 경우에 $s = -1/2$, Debye 온도 이상에서 ionic lattice에 의한 optical phonon 산란(s_{op})인 경우에 $s = 1/2$, 불순물 원자에 의한 산란(s)이 주된 산란기구인 경우에 $s = 3/2$ 이다.¹⁵⁾ Bi₂Te₃계 열전 반도체와 같이 에너지띠 간격이 좁고 불순물의 농도가 매우 높은 반도체에서는 acoustic phonon 산란, optical phonon 산란, 불순물 산란 등의 여러 가지 산란기구가 가운데에서 2개 또는 그 보다 많은 산란기구가 동시에 작용하는데,¹⁶⁾ 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서의 산란인자는 식 (4)로부터 -0.23 이고, 85% Bi₂Te₃-15% Bi₂Se₃ 단결정에서는 산란인자가 0.1 이므로¹²⁾ Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 단결정에서는 Bi₂Se₃의 농도가 증가할수록 acoustic phonon에

의한 산란 이외에 optical phonon과 불순물에 의한 산란 등의 기여가 점차 증가하는 것으로 판단된다.

전하이동도와 정공이동도의 비를 $b(= \mu_e / \mu_h)$ 로 표시하면 p형 반도체에서 전자와 정공의 농도는 식 (5)와 같이 표시된다.¹³⁾

$$p = \frac{1}{(1+b)} \left[\frac{\sigma}{e \cdot \mu_h} + b \cdot p_s \right]$$

$$n = p - p_s \tag{5}$$

Fig. 5는 dopant를 첨가하지 않은 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서 온도에 따른 전기전도도의 변화를 도시한 것인데, extrinsic 영역에서는 주로 정공에 의해 전도가 일어나므로 Fig. 2에서 Hall 계수가 0으로 되는 온도인 470K까지 외삽한 전기전도도는 $\sigma_o = p_s \cdot e \cdot \mu_h$ 이며, 이때 실제 전기전도도는 $\sigma_o = (n \cdot e \cdot \mu_e + p \cdot e \cdot \mu_h)$ 이다. R_H 가 0으로 되는 470K에서 σ_o 와 σ 값이 각각 $0.277\text{m}\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ $0.086\text{m}\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 이므로 $\sigma_o / \sigma = b / (b-1)$ 의 관계식으로부터 전하이동도와 정공이동도의 비인 b 값을 구하면 1.45가 된다. 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서 정공이동도(μ_h)가 전 온도범위에서 식 (4)의 μ_h 와 같다고 가정하고 식 (5)로부터 계산한 전자와 정공의 농도를 Fig. 6에 나타내었다. 이때에 전자와 정공농도의 곱 ($n \cdot p$)과 밴드갭 에너지 (E_G)와의 관계는 식 (6)과 같다.

$$\frac{n \cdot p}{T^3} = 4 \left(\frac{2\pi m k_B T}{h^2} \right)^3 \left(\frac{m_e m_h}{m^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G(T)}{k_B T}\right) \tag{6}$$

식 (6)에서 m_e 와 m_h 는 각기 전자와 정공의 유효질량이다. Fig. 7은 Fig. 6의 결과로부터 계산한 $\ln(n \cdot p/T^3)$ 를 $1/T$ 에 대해 도시한 것인데 intrinsic 영역에서의 측정치가

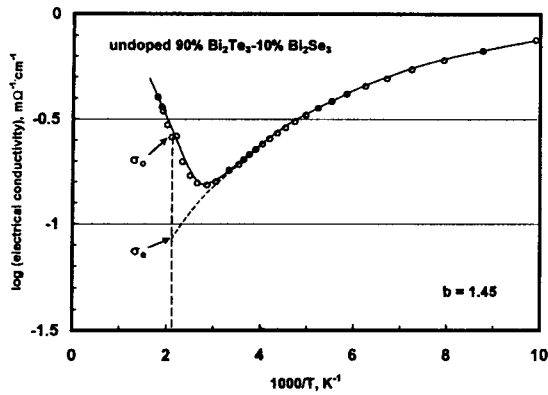


Fig. 5. Electrical conductivity of the undoped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal as a function of the reciprocal temperature.

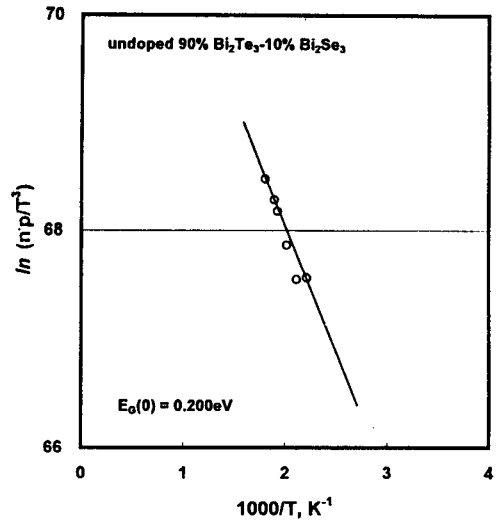


Fig. 7. $\ln (n \cdot p)/T^3$ of the undoped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal as a function of the reciprocal temperature.

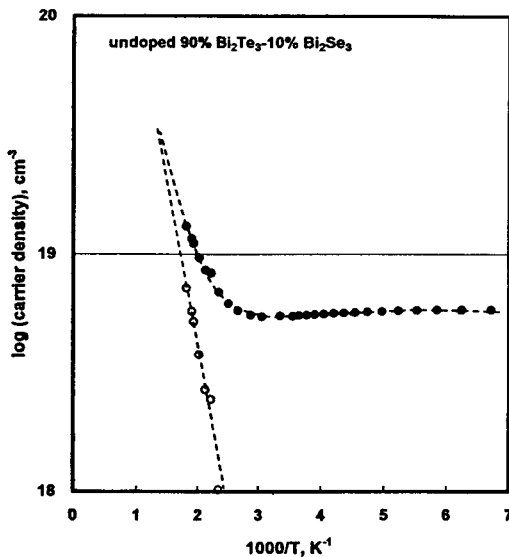


Fig. 6. Electron and hole concentrations of the undoped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ single crystal.

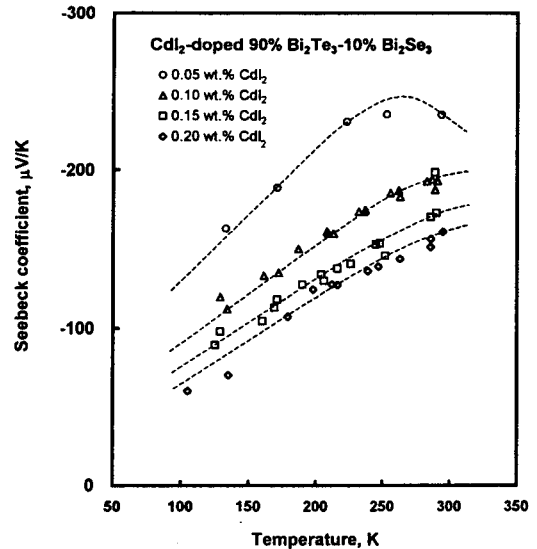


Fig. 8. Variation of the Seebeck coefficient with temperature for the CdI₂-doped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ alloys.

많지 않아서 어느 정도 오차는 있으나 직선의 기울기와 $E_G(T) = E_G(0) - \beta T$ 의 관계식으로부터 0K에서의 밴드갭 에너지를 구하면 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서의 $E_G(0) = 0.200$ eV 이다. 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 밴드갭 에너지에 대해서 Austin과 Sheard¹⁷⁾은 광학적 방법인 흡수 스펙트럼을 측정하여 0.200 eV임을 보고 하였으며, Greenaway와 Harbeke¹⁸⁾는 반사율을 측정하여 0.203 eV로 보고하고 있어 본 연구의 결과와 잘 일치하고 있다. 한편 본 실험의 결과를 85% Bi₂Te₃-15% Bi₂Se₃ 단결정의 $E_G(0) = 0.245$ eV¹²⁾와 비교하면 p형의 Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 단결정에서는 Bi₂Se₃의 농도가 증가할수록 밴드갭 에너지가 증가함을 알 수 있다.

3-2. CdI₂를 doping한 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 열전특성

90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 조성에 donor dopant로 CdI₂를 첨가한 단결정에서 온도에 따른 Seebeck 계수, 전기비저항, 열전도도 및 성능지수의 변화를 Fig. 8~Fig. 12에 나타내었다. CdI₂를 첨가하지 않은 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂

Se₃ 단결정은 Fig. 1과 같이 상온부근에서 p형의 전도기구를 나타내며 약 470K 이상의 온도에서 n형으로 전도기구가 천이하였으나, donor dopant인 CdI₂를 첨가함에 따라 전 온도영역에서 n형의 전도기구를 나타내었다. Seebeck 계수는 온도가 증가함에 따라 증가하였으며 CdI₂의 첨가량이 증가할수록 Seebeck 계수가 저하하였는데 이는 CdI₂의 첨가량이 증가할수록 전자농도가 증가하기 때문이다. Fig. 9는 온도에 따른 전기비저항의 변화를 나타낸 것인데 Seebeck 계수의 변화 거동과 마찬가지로 온도가 증가함에 따라 전기비저항이 증가하였으며 CdI₂의 첨가량이 증가할수록 전기비저항이 감소하였다. Fig. 8과 Fig. 9에서 온도가 증가함에 따라 Seebeck 계수와 전기비저항이 증가하는 것은 reduced Fermi 에너지가 감소하고, 또한 격자진동에 의한 산란단면적이 증가하여 Fig. 4와 같이 전하이동도가 감소하는데 기인한다.

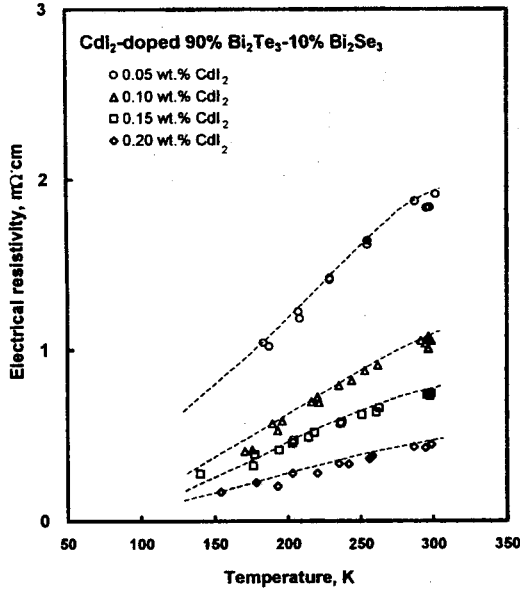


Fig. 9. Variation of the electrical resistivity with temperature for the CdI₂-doped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ alloys.

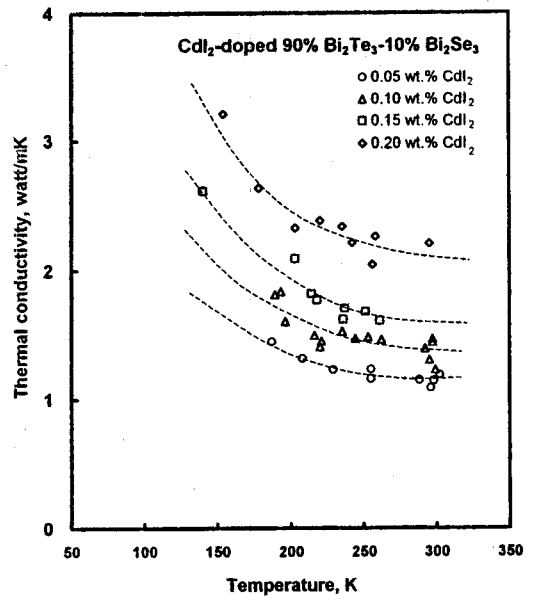


Fig. 11. Variation of the thermal conductivity with temperature for the CdI₂-doped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ alloys.

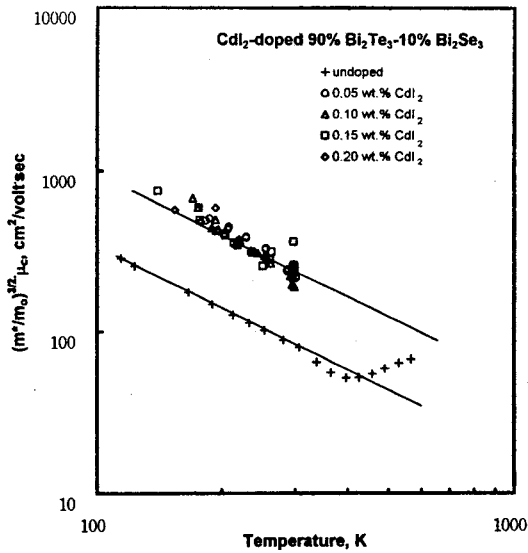


Fig. 10. $\log (m^*/m_0)^{3/2} \cdot \mu_c$ for the CdI₂-doped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ alloys as a function of $\log T$.

Fermi-Dirac 통계에 의하면 전하이동도와 전기전도도의 관계는 식 (7)로 표시되고, Seebeck 계수는 식 (8)과 같다.¹⁰⁾

$$\left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{3/2} \cdot \mu_c = \frac{1292 (s+1/2)! \sigma}{T^{3/2} F_{(s+1/2)}(\xi)} \quad (7)$$

$$\alpha = \pm \left(\frac{k_B}{e}\right) \left(\frac{(s+5/2) F_{(s+3/2)}(\xi)}{(s+5/2) F_{(s+1/2)}(\xi)} - \xi\right) \quad (8)$$

식 (4)와 같이 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 조성에서 산란 인자는 -0.23이므로 CdI₂를 첨가하지 않은 시편과 첨가한 시편에서 각 온도에 해당하는 reduced Fermi energy (ξ) 값을 Fig. 8의 Seebeck 계수와 식 (8)로부터 구하고, Fig. 9로부터 전기전도도를 산출하여 식 (7)에 의해 $(m^*/m_0)^{3/2}$

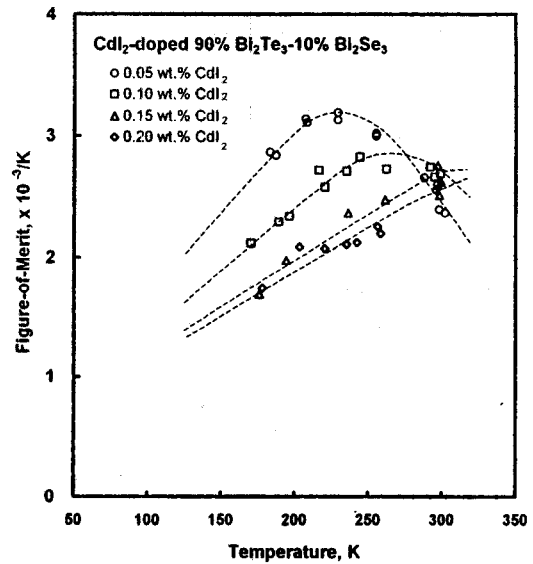


Fig. 12. Variation of the Figure-of-Merit with temperature for the CdI₂-doped 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ alloys.

$\cdot \mu_c$ 값을 계산하였다. Fig. 10은 $\log (m^*/m_0)^{3/2} \cdot \mu_c$ 값을 $\log T$ 에 대해 도시한 것인데 저온영역에서는 $(m^*/m_0)^{3/2} \cdot \mu_c \propto T^{-1.30}$ 의 직선관계를 나타내며, CdI₂를 첨가함으로써 $(m^*/m_0)^{3/2} \cdot \mu_c$ 값이 증가하였다. 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정에서의 Hall 이동도는 식 (4)와 같이 $T^{-1.23}$ 에 비례하므로 이로부터 유효질량의 온도의존성을 구하면 $(m^*/m_0)^{3/2} \propto T^{-0.07}$ 로서 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 경우에 유효질량은 거의 온도에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 10의 고온영역에서 $\log T$ 와 $\log (m^*/m_0)^{3/2} \cdot \mu_c$ 가 직선 관계로부터 벗어나는 것은 혼합전도의 영향이며, 이 영역에서는 에너지 띠 구조를 single-band로 해석하는 것이 적합하지 않음을 의미한다.

CdI₂의 첨가량을 변화시켰을 때 온도에 따른 열전도도의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 저온영역에서는 온도의 증가에 따라 열전도도가 빠르게 감소하며 CdI₂의 첨가량이 증가할수록 전하에 의한 열전도도(κ_e)의 증가로 열전도도가 증가하였다. Seebeck 계수, 전기비저항 및 열전도도의 측정 결과로부터 성능지수($Z = \alpha^2/p \cdot \kappa$)를 계산하여 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 전반적으로 CdI₂를 첨가한 시편의 성능지수는 온도에 따라 증가하다가 최대값을 나타낸 후 감소하였으며, CdI₂의 첨가량이 증가할수록 성능지수의 최대값은 감소하고 성능지수가 최대로 되는 온도가 점차 고온으로 이동하였다. 이에 따라 donor dopant로 CdI₂를 첨가한 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 조성의 n형 단결정에서 성능지수의 최대값은 CdI₂를 0.05 wt% 첨가한 경우에 약 230K에서 $3.2 \times 10^{-3}/K$ 를 나타내었다.

4. 결 론

1) Dopant를 첨가하지 않은 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정은 상온 부근에서 p형 전도기구를 나타내며, 약 470K에서 n형으로 전도기구가 천이하였다.

2) 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 포화정공농도는 $5.85 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이고, degenerate 온도는 127K 이다. Dopant를 첨가하지 않은 p형 Bi₂Te₃-Bi₂Se₃계 단결정에서는 Bi₂Se₃ 농도가 증가할수록 포화정공농도와 degenerate 온도가 감소한다.

3) Dopant를 첨가하지 않은 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 단결정의 산란인자는 -0.23이며, 전하이동도와 정공이동도의 비(μ_e/μ_h)는 1.45이고, 0K에서의 밴드갭 에너지는 0.200 eV이다.

4) Donor dopant로 CdI₂를 첨가한 90% Bi₂Te₃-10% Bi₂Se₃ 조성의 n형 단결정에서 성능지수의 최대값은 CdI₂를 0.05 wt% 첨가한 경우에 약 230K에서 $3.2 \times 10^{-3}/K$ 를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. D. M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, Inc., Boca Raton (1995).
2. R. G. Cope and A. W. Penn, *J. Mat. Sci.*, **3**, 103 (1968).
3. D. L. Greenaway and G. Harbeke, *J. Phys. Chem. Solids*, **26**, 1585 (1965).
4. D. B. Hyun, H. P. Ha, and J. D. Shim, *Proc. XI International Conf. Thermoelectrics*, Arlington, Texas, 266 (1992).
5. J. Black, E. M. Conwell, L. Seigel, and C. W. Spencer, *J. Phys. Chem. Solids*, **2**, 240 (1957).
6. H. Kaibe, M. Sakata, Y. Isoda, and I. Nishida, *J. Jpn. Inst. Metals*, **53**, 958 (1989).
7. P. C. Eklund and A. K. Mabatah, *Rev. Sci. Instrum.*, **48**, 775 (1977).
8. T. C. Harman, J. H. Cahn, and M. J. Logan, *J. Appl. Phys.*, **30**, 1351 (1959).
9. H. J. Goldsmid, *Proc. Phys. Soc.*, **71**, 633 (1958).
10. H. J. Goldsmid, *Thermoelectric Refrigeration*, Plenum Press, New York, (1964).
11. K. Seeger, *Semiconductor Physics*, Springer-Verlag, New York, 61 (1982).
12. D.-B. Hyun, J.-S. Hwang, T.-S. Oh, J.-D. Shim and N. V. Kolomoets, *J. Phys. Chem. Solids*, **59**, 1039 (1998).
13. W. Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductor*, Van Nostrand Co., (1950).
14. S. Shigetomi and S. Mori, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **11**, 915 (1956).
15. A. F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling*, Infosearch, London (1957).
16. D. M. Rowe and C. M. Bhandari, *Modern Thermoelectrics*, Holt, Rinehart and Winston, London, 22 (1983).
17. L. G. Austin and A. Sheard, *J. electron. Contr.*, **3**, 236 (1957).
18. D. L. Greenaway and G. Harbake, *J. Phys. Chem. Solids*, **26**, 1585 (1965).