

Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺(0.5mol%) 단결정에서 열역학적 함수의 온도의존성

論 文

52P-2-4

Temperature dependence of thermodynamic function in Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺(0.5mol%) single crystals

金南伍* · 金亨坤** · 金德泰*** · 宋好準[§]

(Nam-Oh Kim · Hyung-Gon Kim · Duck-Tea Kim · Heo-Jun Sung)

Abstract - Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺ single crystals were grown by the chemical transport reaction(CTR) method. They were crystallized in the monoclinic structure. These temperature dependence of the optical energy gap were closely investigated over the temperature range 10[K]~300[K]. The direct energy gaps of Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺ single crystals were given by 2.146[eV] and 2.042[eV] at 300[K]. The temperature dependence of the optical energy gap is well presented by the Varshni equation.

Key Words : Chemical transport reaction method, Zn₄SnSe₆, Zn₄SnSe₆:Co²⁺, Optical absorption, Varshni equation, Optoelectronic device.

1. 서 론

II₄-IV-VI₆(II=Zn, Cd, Hg, IV=Si, Ge, Sn, VI=S, Se, Te) 형의 삼원 화합물 반도체는 근적외광에서 고휘도의 형광을 발하기 때문에 Kitsche[1]에 의해 처음으로 단결정 성장과 결정구조해석에 관한 연구가 수행되었다.

이후 Cd₄SnSe₆[2], Cd₄GeSe₆[3], Cd₄GeSe₆[4, 5] 그리고 Zn₄GeSe₆[6]등의 반도체들의 성장, 광흡수, 광전도도, 광 발광특성 및 전기적 메카니즘에 관한 연구들이 보고되어진 바 있다. 최근에 이러한 II₄-IV-VI₆ 반도체에 불순물 Co²⁺를 첨가한 단결정에서 코발트(cobalt) 이온에 의한 불순물 광흡수 특성이 연구 보고되어지고 있다. 또한, 이러한 삼원화합물 반도체는 띠 간격이 광범위한 파장 영역에 분포하기 때문에 광전자 소자(optoelectronic device)를 제작하는 경우에 용도에 따라 선택적으로 사용할 수 있어 다방면에서 유망한 전자 재료로 기대되는 광전물질로 알려져 있다. 그러나 균일한 조성을 갖는 양질의 단결정 성장이 어렵기 때문에 많은 연구가 이루어지지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 Zn₄SnSe₆ 단결정 및 코발트를 첨가한 Zn₄SnSe₆:Co²⁺(0.5mole%) 단결정의 광학적 특성 규명을 위한 기초 연구의 하나로 에너지 띠의 온도의존성을 규명하기 위해서 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺(0.5mole%) 단결정을 화학수송법(CTR)으로 성장시켜, X-선 회절분석으로부터 결정구조를 밝혀내고, 광 흡수 특성과 광학적 에너지 띠 간격 및 이형적 온도의존성을 규명하였으며 이로부터 기초적 열역학함수를 추정하였다.

2. 실험

Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정을 성장시키기 위해서 투명 석영관을 HF에 24시간 동안 유지시킨 후, 증류수로 깨끗이 세척된 두께 2mm×직경 10mm×길이 400mm의 석영관 한쪽 끝을 봉입 하였다. 봉입된 석영관 내부의 잔류 불순물을 제거하기 위하여 석영관 내부를 2×10⁻⁶ torr의 진공으로 배기 시키면서 석영관 외벽에 약 1000℃ 정도의 열을 가하여 내부의 유기물질을 제거하였다. 깨끗하게 세척된 성장용 투명석영관내에 고순도(99.9999%)의 Zn, Sn, Se를 화학당량비에 맞추어 칭량하여 준비된 석영관 안에 넣고, 수송물질로 사용된 요오드(iodine(99.99%))과 함께 석영관 내부의 진공을 5×10⁻⁶ torr의 진공으로 봉입하여 길이가 150mm 정도의 단결정 성장용 앰플을 만들었다.

이때 수송물질로 사용되는 iodine의 양은 성장된 단결정의 질과 단결정 성장속도에 크게 영향을 미치므로 이에 적당량 6mg/cm³의 요오드를 사용하였다. 진공 봉입된 앰플을 성장용 2-영역(two-zone) 수평진기로의 중앙부분에 넣고, 100℃/h의 속도로 600℃까지 승온시켜 24시간동안 유지하였다. 이때 셀렌(selenium) 증기압의 급격한 증가와 금속과 셀렌의 합성시 나타나는 발열반응으로 인한 앰플 파괴를 방지하였다. 다시 100℃/h의 속도로 1000℃까지 승온시킨 후 48시간 동안 합성한 후, 온도 반전법[7]으로 단결정 성장부를 깨끗이 처리하기 위하여 시료 증발부의 온도를 600℃, 결정 성장부의 온도를 800℃로 하여 다시 24시간동안 유지하였다. 결정 성장부의 잔류불순물을 깨끗이 제거한 후, 단결정을 성장시키기 위하여 시료 증발부의 온도는 780℃, 성장부의 온도는 680℃로 하여 7일간 성장시켰다. 성장된 단결정에서 요오드를 제거하기 위하여 시료 증발부의 전원을 차단하고 단결정 성장부의 온도를 250℃에서 10시간동안 유지하여 전원을 끊고 실온까지 서냉하였다. 이때 성장된 단

* 正 會 員 : 朝鮮理工大學 電氣科 助教授

** 正 會 員 : 朝鮮理工大學 電氣科 教授

*** 正 會 員 : 東亞人才大學 放送科 助教授

§ 非 會 員 : 全南大學校 齒科大學 專任講師

接受日字 : 2003年 1月 3日

最終完了 : 2003年 4月 10日

결정의 크기는 2mm×1.5mm×1.5mm 정도이었다.

성장된 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정의 조성분석을 EDAX (Energy-Dispersive X-ray Microanalyzer)로 확인하였으며, 화학양론(stoichiometry)을 만족하는 시료만 특성 측정에 이용하였다. 결정구조는 성장된 단결정을 분말로 하여 X-선 회절기(XRD, Rigaku, DMAX 2000, Japan)를 사용하여 X선 회절선을 측정하여 구하였다. 사용된 X선은 파장 1.5405 Å 인 Cu-K_α 선이었다. 측정으로부터 얻은 X선 회절 무늬를 JCPDS카드에서 주어진 결정면의 간격과 피크 세기와 비교하여 측정된 회절무늬의 결정면들을 조사하고, Nelson-Rilley의 관계식[8]을 이용하여 격자상수 값을 구하였다. 광흡수 특성 측정용 시편은 성장된 단결정 자연면의 배면을 광학전 위에서 Al₂O₃ 분말(0.2 μm)을 이용하여 두께 250~500 μm 까지 연마하여 광투과 창이 있는 원형 구리판에 부착하여 제작하였다.

에너지 띠 간격의 온도 의존성을 구하기 위하여 기초 흡수단 부근에서의 광흡수 스펙트럼을 저온장치(Air Products, SH-4)를 장치한 UV-VIS-NIR(Hitachi, U-3501)를 사용하여 기초흡수단 부근인 450 ~ 650 nm 의 파장 영역에서 측정하였다. 이때 측정 온도는 10K~300K까지 변화시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 성장된 단결정의 결정구조와 에너지 띠 간격의 온도 의존성

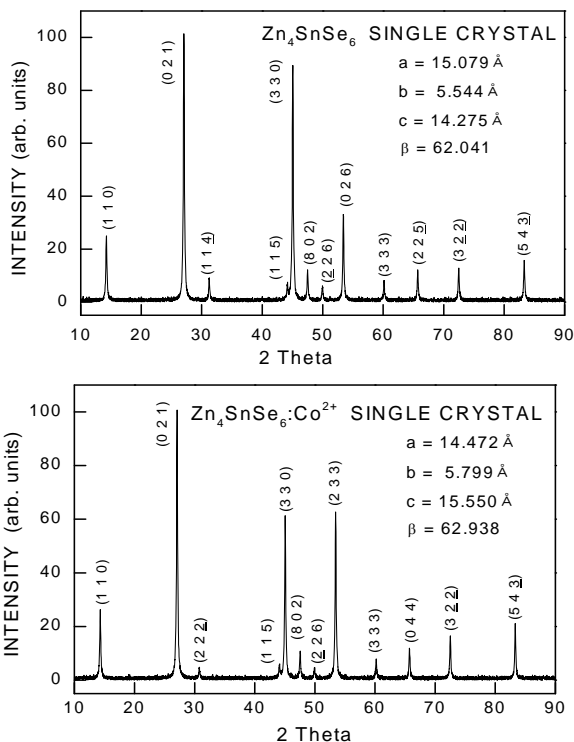


그림 1 Zn₄SnSe₆과 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정 분말의 X-선 회절 무늬

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺ crystal powders.

성장된 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺(0.5mole%) 단결정의 구조를 분말 형태시료를 XRD로 측정된 결과를 그림 1에 나타내고 있다. 단결정의 결정구조는 단사정계(monoclinic)구조이고, 격자상수는 순수한 결정인 Zn₄SnSe₆ 단결정에서는 a = 15.079Å, b = 5.544Å, c = 14.275Å 이고 β = 62.041° 이었고, 불순물로 코발트를 첨가한 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정인 경우 격자상수는 a = 14.472Å, b = 5.799Å, c = 15.550Å 이고 β = 62.938°로 약간씩 변화되었다.

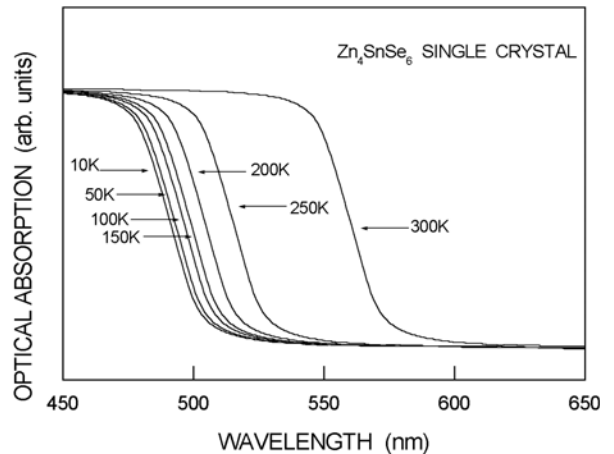


그림 2 기초흡수단 영역에서 Zn₄SnSe₆ 단결정의 광흡수 (10K~300K)

Fig. 2 Optical absorption spectra of Zn₄SnSe₆ single crystal near of the fundamental absorption edge at 10K to 300K.

Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정의 에너지 띠 간격을 구하기 위하여 이들 단결정의 자연면에 평행하게 연마하여 만든 시료에서 측정된 광흡수 특성은 450~650nm 파장영역과 10K에서 300K까지의 온도범위에서 측정하였다. 그림 2와 그림 3에서 보여준 것 같이 기초흡수단 영역에서 광흡수가 급격히 증가하고, 시료의 온도가 낮아질 때 파장영역으로 기초흡수단이 이동되었다. 불순물 코발트를 첨가한 경우 순수한 경우 보다 장파장측으로 이동되었다.

이들 광흡수 스펙트럼으로부터 구한 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정에서 기초흡수단은 직접허용천이로 주어진다. 직접허용천이에서는 광흡수계수 α와 광학적 에너지 띠 간격(optical energy band gap) E_g의 띠 구조가 직접전이형이므로, 직접전이형 반도체에서 성립하는 에너지 띠 간격 관계식[9]은

$$(\alpha h\nu)^2 \sim (h\nu - E_g) \tag{1}$$

형태로 쓸 수 있다. 여기서 α는 광흡수 계수이고, hν는 입사된 광전자이다. (1) 식에서 (αhν)² = 0인 점으로 외삽하면, 그림 4 및 그림 5와 같이 에너지 띠 간격이 주어지며, 이러한 외삽법으로 구한 에너지 띠 간격은 순수한 단결정의 경우는 300K에서는 2.146eV이며, 10K에서 2.438eV로 증가된다. 코발트를 첨가한 단결정의 경우는 300K에서는 2.067eV이며, 10K에서 2.240eV이었다. 이는 W. T. Kim[2]등

에 의해서 발표한 Cd_4SnSe_6 및 $Cd_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정과 비교해보면 Zn_4SnSe_6 및 $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정 에너지 띵 간격이 커짐을 알 수 있다. 또한, 불순물 코발트를 첨가한 경우 에너지 띵 간격이 감소를 보여주고 있다.

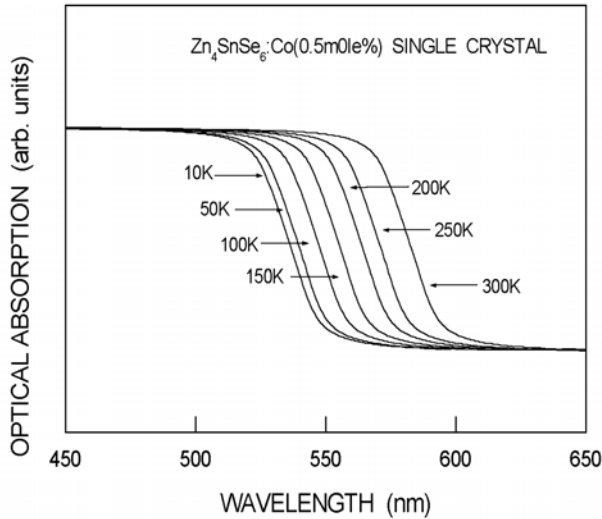


그림 3 기초흡수단 영역에서 $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정의 광흡수(10K-300K)

Fig. 3 Optical absorption spectrum of $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ single crystal near the fundamental absorption edge at 10K to 300K.

이처럼 코발트를 불순물로 첨가할 때 광학적 에너지 띵 간격이 감소하는 현상에 대하여 Sato 등[10]은 $CuAlSe_2$, $CuGaSe_2$ 에서 코발트 불순물 첨가에 의한 에너지 띵 간격을 주개 이온화 문턱(donor-ionization threshold)에 기인한 것으로 보고하고 있고, 또한, W. T. Kim등은 불순물로 첨가된 코발트가 층만대 위에 받개준위(acceptor level)를 만들고, 이 받개준위와 층만대 사이의 간격이 좁아짐으로써, 광조사시 이 받개준위로 부터 전자가 여기되기 때문에 나타나는 에너지 띵 감소현상으로 설명할 수 있기 때문에, 아직 명확하게 이론적으로 규명하지 못한 상태로 남아있다.

10K에서 300K의 온도범위에서 Zn_4SnSe_6 및 $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정의 에너지 띵 갭을 측정하면 시편의 온도가 증가할 때 에너지 띵 간격은 감소하게 된다. 이 때 에너지 띵 간격의 온도의존성은 아래의 Varshni 방정식[11]

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2)$$

으로 잘 만족하고 있다. 이 때 $E_g(0)$ 는 0K에서 에너지 띵 간격이며, T는 절대온도, α 와 β 는 상수이다. Zn_4SnSe_6 및 $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정에서 광학적 에너지 띵 간격의 온도의존성은 그림 6과 같다. 순수한 Zn_4SnSe_6 단결정의 경우에서 보여준 것 같이 100K 보다 낮은 저온영역에서는 온도상승에 따른 에너지 띵 간격은 서서히 감소되고 있으나, 100K보다 높은 온도영역에서는 급격히 감소되고 있다. 코발트 불순물을 첨가한 $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정의 경우에서도 순수한

Zn_4SnSe_6 단결정과 유사하게 감소되고 있다.

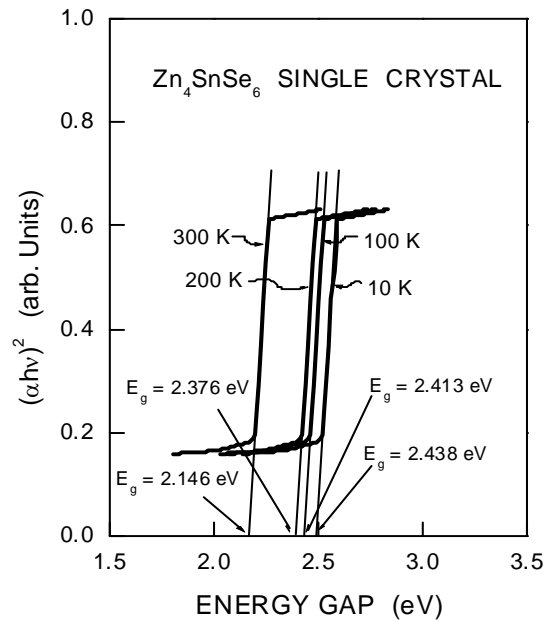


그림 4 10K-300K에서 Zn_4SnSe_6 단결정의 광학적 에너지 띵 간격

Fig. 4 Optical energy band gap of Zn_4SnSe_6 single crystal at 10K to 300K.

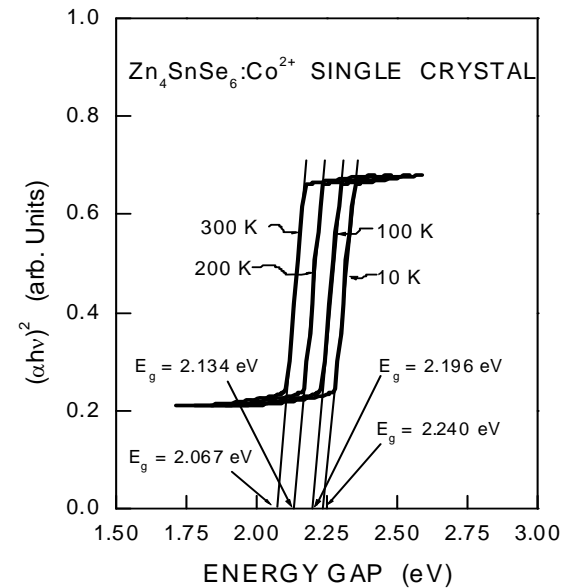


그림 5 10K-300K에서 $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정의 광학적 에너지 띵 간격

Fig. 5 Optical energy band gap of $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ single crystals at 10K to 300K.

그림 6의 Zn_4SnSe_6 단결정의 경우 Varshni 방정식의 상수는 $E_g(0) = 2.439\text{eV}$, $\alpha = 4.079 \times 10^{-4}\text{eV/K}$, $\beta = 63\text{K}$ 로 되고, 코발트를 첨가한 $Zn_4SnSe_6:Co^{2+}$ 단결정의 경우 Varshni 방정식의 상수는 $E_g(0) = 2.439\text{eV}$, $\alpha = 4.079 \times 10^{-4}\text{eV/K}$, $\beta = 63\text{K}$ 로 된다. 이 들 값은 Cd_4GeS_6 화합물반도체에서 $\alpha \sim \times 10^{-4}\text{eV/K}$ 인 값[3]과 비교해 보면 유사한 값이다.

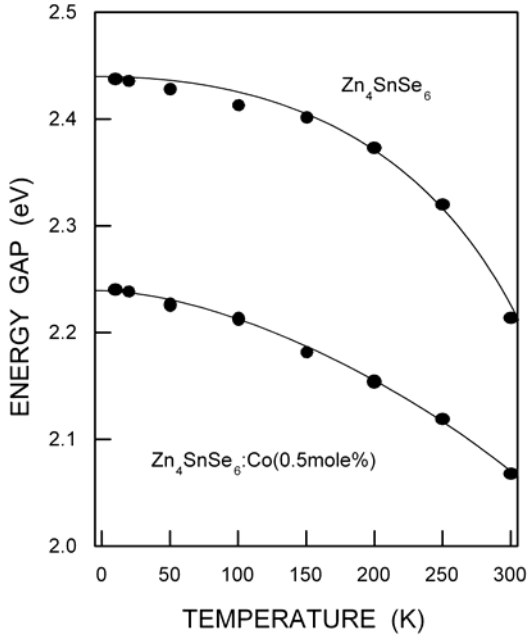


그림 6 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정의 광학적 에너지 띠 간격의 온도의존성

Fig. 6 Temperature dependence of the optical energy band gap for Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺ single crystal.

3. 2 광학적 에너지 띠의 온도의존성으로부터 열역학적 함수

반도체에서 에너지 띠 간격이 온도의 변화에 의존되는 원인으로서는 격자의 열팽창으로 인해 에너지 띠 간격이 변하는 체적효과(volume effect)와 전자-포논(electron-phonon)의 상호작용에 기인될 때 온도계수 10⁻⁴~10⁻⁵eV/K 정도의 차원을 갖는다고 알려져 있다[11]. 반도체내의 전자-포논 쌍의 화학퍼텐셜(chemical potential(μ_p+μ_n))에 의한 열역학적 에너지 띠 간격과 광학적 에너지 띠 간격의 엔트로피(entropy) S는 동등성을 가지며 다음과 같이 (3) 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \mu_n + \mu_p &= E_C - E_V \\ &= \Delta E_{CV}(\text{Thermal}) \\ &= \left(-\frac{\partial \Delta G^0}{\partial N} \right)_{P,T} = \left(-\frac{\partial U^0}{\partial N} \right)_{V,S} \quad (3) \\ &= \Delta E_g(\text{Optical}) \end{aligned}$$

온도 함수로서 전자-포논 쌍의 형성에 의한 에너지 띠 간격(E_C - E_V = E_g)은 반도체의 녹는점 이하에서 정상상태의 기준 깁스(gibbs) 에너지(ΔG⁰)로 표현할 수 있음을 볼 수 있다. 그러므로 측정온도 변화에 따라 광학적으로 측정된 에너지 띠 간격(E_g)으로부터 열역학적 함수의 물리량을 추정할 수 있다. 특히 광학적으로 구한 이들 열역학적 함수들은 상온 이하에서 잘 적용됨이 알려져 있다. 에너지 띠 간격의 온도 의존성인 Varshni 방정식 (2)으로부터 엔트로피(S_{CV}), 열용량(heat capacity(C_{CV})), 엔탈피(enthalpy(H_{CV}))

값을 구하면 다음과 같다[13].

$$\begin{aligned} E_g &= H_{CV} - TS_{CV} \\ S_{CV} &= -\frac{d}{dT}(E_g) \\ H_{CV} &= E_g - T\frac{d}{dT}(E_g) \\ C_{CV} &= T\frac{d^2}{dT^2}(E_g) \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 식으로부터 Varshni 방정식의 광학적 에너지 띠 간격의 온도의존성으로부터 계산된 엔트로피의 온도의존성을 그림 7에 보여주고 있다. 상온으로 갈수록 증가율이 일반적인 반도체 경우와 같이 증가하고 있으며, 순수한 Zn₄SnSe₆ 단결정과 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정 모두 상온이하에서 엔트로피 값은 10⁻⁴eV/K 이내에 존재하였다.

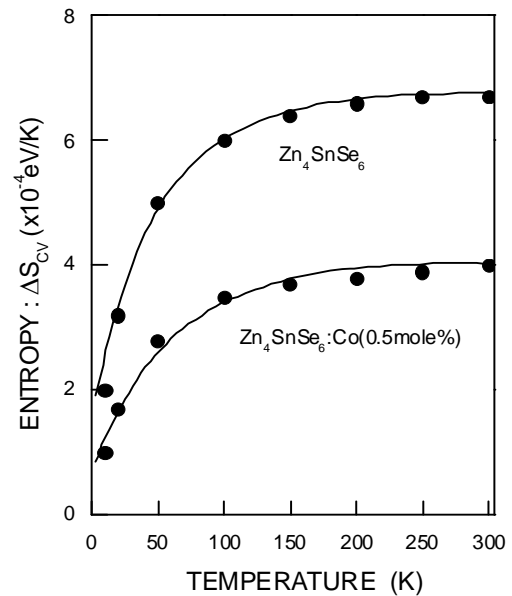


그림 7 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정에서 엔트로피의 온도의존성

Fig. 7 Temperature dependence of the entropy in Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺ single crystals.

Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정에서 Varshni 방정식 (2) 식으로부터 광학적 에너지 띠 간격의 온도의존성으로부터 구하여 (4)식에 대입하여 계산된 엔탈피의 온도의존성을 결과를 그림 8에 보여주고 있다. 코발트를 첨가한 경우 순수한 경우보다 엔탈피 값은 작은 값을 갖고 엔탈피는 증가하였다. 이와 같이 엔탈피가 증가하는 이유는 순수한 Zn₄SnSe₆ 단결정의 가전자대에 Co²⁺ 이온이 받게준위로 용융(merging)된 형태로 존재하기 때문에 순수한 단결정에서 보다 코발트를 첨가한 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정의 경우 에너지 띠 간격이 줄어드는 현상 때문이다.

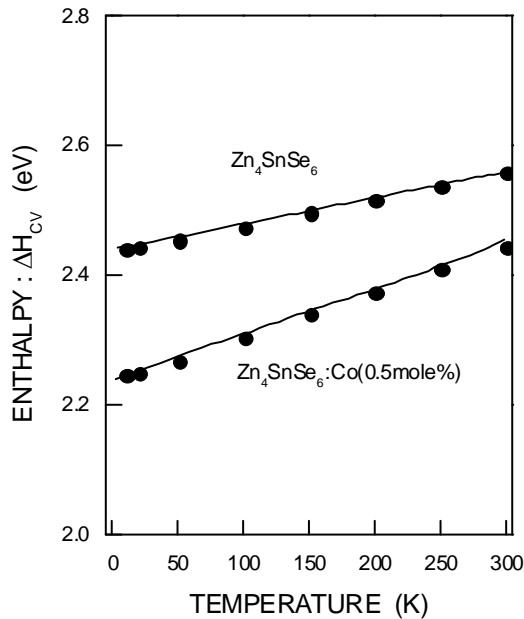


그림 8 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정에서 엔탈피의 온도의존성

Fig. 8 Temperature dependence of the enthalpy in Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺ single crystals.

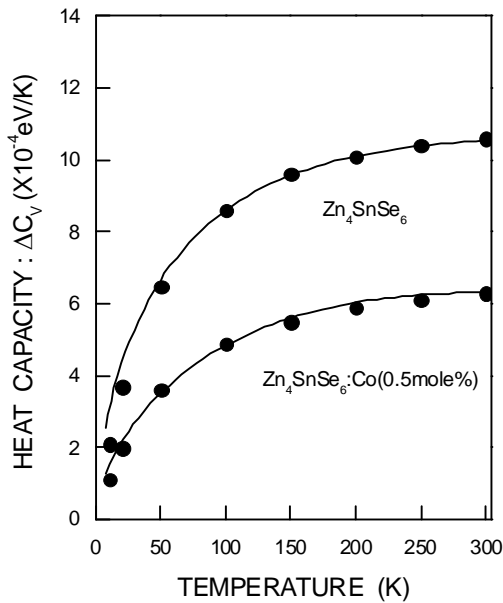


그림 9 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정에서 열용량의 온도의존성

Fig. 9 Temperature dependence of the heat capacity in Zn₄SnSe₆ and Zn₄SnSe₆:Co²⁺ single crystals.

그림 9는 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정에서 열용량 값의 온도의존성을 보여주고 있다. 열용량 값은 순수한 경우와 코발트를 첨가한 단결정의 경우 온도가 상승할 수 값이 커짐을 알 수 있었다. 이들 열역학적 함수들은 Cd₄GeSe₆[3] 단결정의 열역학적 함수들과 유사한 경향을 보여주고 있다.

4. 결론

화학수송법으로 Zn₄SnSe₆ 및 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정을 성장하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 성장된 단결정은 단사정계 구조이며, 격자상수는 순수한 결정인 Zn₄SnSe₆ 단결정에서는 a = 15.079 Å, b = 5.544 Å, c = 14.275 Å이고 β = 62.041° 이었고, 불순물로 코발트를 첨가한 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정인 경우 격자상수는 a = 14.472 Å, b = 5.799 Å, c = 15.550 Å이고 β = 62.938°으로 주어졌다.
- [2] 광흡수 스펙트럼으로부터 구한 에너지 띠 간격은 순수한 단결정의 경우는 300K에서는 2.146eV이며, 10K에서 2.438eV로 증가된다. 코발트를 첨가한 단결정의 경우는 300K에서는 2.067eV이며, 10K에서 2.240eV이었다.
- [3] 이들 에너지 띠 간격은 Varshni 방정식에 잘 적용되었으며 이 때 구한 상수값은 Zn₄SnSe₆ 단결정의 경우 E_g(0) = 2.439eV, α = 4.079×10⁻⁴eV/K, β = 63K로 되고, 코발트를 첨가한 Zn₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정의 경우 Varshni 방정식의 상수는 E_g(0) = 2.439eV, α = 4.079×10⁻⁴eV/K, β = 63K로 된다.
- [4] 광학적인 방법에 의한 에너지 띠 간격의 온도의존성으로부터 열역학적 함수인 엔트로피(Scv), 열용량(Hcv), 엔탈피(Ccv)값을 각각 추정하였다.

참고 문헌

- [1]. R. Kitsche, "The growth of single crystals of binary and ternary chalcogenides by chemical transport reactions" J. Phys. Chem. Solids 17, pp163-165, 1960.
- [2]. 한석용, 김화택, "Cd₄SnSe₆ 및 Cd₄SnSe₆:Co²⁺ 단결정의 광학적 특성연구" 한국진공학회지, Vol 2. No. 4. pp.299~303, 1993.
- [3]. 김덕태, "코발트를 첨가한 Cd₄GeSe₆ 단결정에서 에너지 띠의 온도의존성 및 열역학적 함수 추정" 한국전기전자재료학회, Vol 11. No. 9. pp693~699, 1998.
- [4]. D. T. Kim, W. T. Kim, K. S. Yu, C. D. Kim, H. L. Park, "Optical Absorption Spectra of undoped and Co-doped Cd₄GeSe₆ Single Crystals" J. Mat. Sct .Lett 12, 1160, 1993.
- [5]. P. Quenez and P. Khodadad, "Etude du systeme GeSe₂-CdSe Identification du compose Cd₄GeSe₆" C. R. Acad. Sc. Paris. 268. pp. 2294, 1969.
- [6]. 김화택, "Zn₄GeSe₆ 및 Co²⁺를 첨가한 Zn₄GeSe₆:Co²⁺ 단결정의 광학적 특성" 한국전기전자 재료학회, Vol 10. No. 2. pp.105~112, 1997.
- [7]. C. Paorici, L. Zanotti and G. Zuccalli, "A temperature variation method for the growth of chalcopyrite crystals by iodine vapour transport" Journal of crystal growth 43, pp.705~710, 1978.
- [8]. J. B. Nelson and D. P. Riley, "An Experimental Investigation of Extrapolation Methods in The Derivation of Accurate unit-cell Dimensions of

- Crystals" *Proc. Phys. Soc. (London)* 57, p.160, 1945.
- [9]. J. J. Pankove, "Optical Processes in Semiconductors" (Dover Pub. Co. New York, 1971), pp.36~37
- [10]. K. Sato et al, Proc. of the 7th Int. Con. on Ternary and Multinary Compounds, Snowmass 1986 (MRS, Pittsburgh, 1987) pp.459
- [11]. Y. P. Varshni, "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors" *Physica* 34, p.149, 1967.
- [12]. P. W. Yu, W. J. Anderson, "Anomalous temperature dependence of the energy gap of AgGaS_2 " *Solid State Comm.* 13, pp.1883, 1973.
- [13]. C. D. Thurmond, J. Electro Chem. Soc., "The Standard Thermodynamic Functions for the formation of Electrons and holes in Ge, Si, GaAs and GaP" *J. Electrochem. Soc., Solid-State Science and Tec.* 122, p.1135, 1975.

저 자 소 개



김 남 오 (金南伍)

1967년 2월 9일생. 1994년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 조선대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 조선이공대학 전기과 조교수
Tel : (062) 230-8388

E-mail : nokim@mail.chosun-c.ac.kr



김 형 곤 (金亨坤)

1950년 2월 5일생. 1974년 조선대 물리학과 졸업. 1978년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1989년 전남대 대학원 물리학과 졸업(이학박). 현재 조선이공대학 전기과 교수

Tel : (062) 230-8383

E-mail : hgkim@mail.chosun-c.ac.kr



김 덕 태 (金德泰)

1953년 6월 5일생. 1976년 조선대학교 물리학과 졸업. 1982년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1993년 원광대학교 대학원 졸업(이학박사). 현재 동아인재대학 자동차환경레이저과 부교수, Tel : (061) 471-1751

E-mail : dtkim@mail.dongac.ac.kr



송 호 준 (玄承哲)

1966년 4월 1일생. 전남대학교 물리학과 졸업. 전남대학교 대학원 물리학과 졸업(석사). 동 대학원 물리학과 졸업(박사). 현재 전남대학교 치과대학 치과재료실 전임강사

Tel : (062) 530-4872

E-mail : schyun@netian.com