

# Bridgman법에 의해 성장된 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 가전자 갈라짐에 대한 광전류 연구

백승남, 홍광준  
조선대학교

## Photocurrent Study on the Splitting of the Valence Band and Growth of CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> Single Crystal by Bridgman method

(Seungnam Baek and Kwangjoon Hong)  
Chosun Univ.

### Abstract

A p-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> single crystal has been grown by the Bridgman method without a seed crystal in a three-stage vertical electric furnace. From photocurrent measurements, it was found that three peaks, A, B, and C, corresponded to an intrinsic transition due to the band-to-band transition from the valence band states  $\Gamma_7(A)$ ,  $\Gamma_6(B)$ , and  $\Gamma_7(C)$  to the conduction band state  $\Gamma_6$ , respectively. Also, the valence band splitting of the CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> crystal has been confirmed by photocurrent spectroscopy. The crystal field splitting and the spin orbit splitting were obtained to be 0.2360 and 0.1119 eV, respectively. Also, the temperature dependence of the band gap energy of the CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> crystal has been driven as the following equation of  $E_g(T) = E_g(0) - (9.43 \times 10^{-3})T^2/(2676 + T)$ . In this equation, the  $E_g(0)$  was estimated to be 1.4750, 1.7110, and 1.8229 eV at the valence band state A, B, and C, respectively. The band gap energy of the p-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> at room temperature was determined to be 1.2023 eV.

### 1. 서론

CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>는 II-III<sub>2</sub>-VI<sub>4</sub>족 화합물 반도체로 상온에서 에너지 띠 간격이 1.2 eV[1-5]이고 space group I-2d에 속하는 tetragonal구조의 반도체이다.[6-11]. Eshraghi등[2,12]은 이원 화합물의 혼합에 의한 Bridgman방법으로 단결정을 성장시켜 schottky diode를 만들어 전기적 성질을 연구하였다. Lopez-Rivera등[1]도 chemical vapour transport (CVT)방법으로 단결정을 성장하여 결정 구조와 광학적 특성을 조사하였다. 그러나 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 온도에 의존하는 photocurrent spectra로부터 가전자대의 갈라짐에 대한 연구는 되지 않았다. 본 연구에서는 Bridgman 방법으로 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정을 성장하여 결정구조를 연구하였으며 Laue 배면 반사법을 이용하여 시료 단결정의 결정

면을 확인하였다. CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 c 축에 수직인 면의 광흡수 spectra로부터 온도에 의존하는 band gap  $E_g(T)$ 를 연구하고자한다. 또한 이시료의 photocurrent spectra와 Hamilton matrix를 이용하여 crystal field splitting  $\Delta_{cr}$ 과 spin-orbit splitting  $\Delta_{so}$ 값을 찾고 광전류 spectra에서 광전류 봉우리의 exciton 양자수 n 값이 얼마인가를 확인하고자 하였다.

### 2. 실험 및 측정

#### 2.1 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정 합성

성분 원소인 Cd(Aldrich, 6N), In(Aldrich, 6N), Te(Aldrich, 6N)를 몰비로 칭량하여 세척된 석영관(외경 16 mm, 내경 10 mm)에 넣어  $3 \times 10^{-6}$  torr의 진공에서 봉입하여 ampoule을 만들었다. 그림

1의 수평 전기로의 중앙에 넣고 1 rpm으로 노심관이 회전하도록 하면서 전기로의 온도를 상승시켰다. 온도 상승으로 인한 성분 원소의 증기압 증가로 ampoule이 파괴되는 것을 방지하기 위해서 시간당 20°C로 올리면서 중심의 온도가 500°C에 도달하면 그 상태에서 24시간 유지시킨다. 그리고 ampoule을 좌우로 회전하면서 단위 시간당 10°C로 온도를 올리기 시작하여 1050°C에 이르면 48시간 유지시킨 뒤 저속 DC 회전 모터와 전원을 끄고, 24시간 동안 자연 냉각시킨 후 합성된 다결정을 꺼내어 단결정 성장용 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 덩어리(ingot)를 제조하였다.

### 2.2 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정 성장

그림 2와 같은 Bridgman 삼단 수직 전기로에 합성된 다결정 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 시료를 ampoule 끝이 뾰족하게 세공된 부분에 넣고 2×10<sup>-6</sup> torr로 진공 봉입하여 하단으로 향하게 하였다. 고온부의 시작점에 ampoule을 고정하고 수직로의 온도는 상,중,하 각각 700°C, 900°C, 350°C가 되도록 온도를 서서히 올린 후 48시간동안 시료를 용융시켜 용액이 균질하게 반응하도록 하였다. 이 ampoule을 0.75 mm/hr로 하강시켰으며 이 때 성장된 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정은 그림 3과 같이 높이 28 mm, 직경 10 mm인 원추형으로 성장되었다.



그림 3. Photograph of CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> single crystal.

### 2.3 광전류(Photocurrent) 측정

CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 c축에 수직하게 성장된 면에 단색광을 쬐어 흐르는 광전류를 측정하기 위해 광전류 측정 셀을 cryostat의 cold finger에 고정하고 DC 전원을 연결하여 단색광을 셀에 조사하면서 나오는 광전류를 lock-in-amplifier(Ithaco, 391A)로 증폭하고 X-Y recoder로 기록하였다. 이 때 사용한 회절격자(Jarrell Ash, 82-000, f:0.5m series용)는 600 grooves/nm (λ:700 nm~2000 m)를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>의 결정구조

합성된 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 다결정을 분말로 만들어 측정된 X-ray 회절 무늬를 그림 3에 보였다. 그림 4의 회절무늬로부터 (hkl)은 면간격에 의한 θ 값이 JCPDS (joint committee on powder diffraction standards)와 일치하는 값들이어서 tetragonal로 성장되었음을 알 수 있었다. 격자상수는 Nelson Reley 보정식에 의하여 값을 계산한 후 외삽법<sup>11)</sup>으로 구한 결과를 각각 그림 5와 6에 보였다. 그림 5와 6에서 보는바와 같이 다결정의 격자상수는 a<sub>0</sub>=6.219 Å 과 c<sub>0</sub>=12.396 Å 이었다. 이 값들은 Hahn<sup>12)</sup>등이 보고한 격자상수 a<sub>0</sub>=6.205 Å 과 c<sub>0</sub>=12.405 Å 과 일치함을 알 수 있었다.

성장된 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 c축에 수직하게 성장된 면을 Laue 배면 반사법으로 촬영하여 그림 8과 같은 Laue 사진을 얻었다. 이사진의 회절점에 대응하는 각 좌표 γ와 δ를 Greninger[15] 도표를 이용하여 읽고 Wulff망을 이용하여 필름위의 회절점들을 투영하였다. 이 투영된 점들이 만드는 여러 쌍곡선에 대응하는 점을 연결하여 대원을 그려 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정에 대한 입체 투영을 그려 해석한 결과 그림 8은 (001)면의 Laue의 사진임을 알 수 있었다. Tetragonal 구조는 II-VI족의 ZnS와 비교하면 ZnS 입방정의 c축의 2배 가운데 1배는 양이온 sublattice가 Cd이고 c축의 2배일때는 양이온의 sublattice가 In에 의해 채워져 입방정계가 아닌 정방정계 구조를 형성한다. 따라서 unit cell은 c축 방향으로 2배 한것과 같으며 primitive unit cell 당 8개의 원자를 포함한다. ZnSe 입방정의 c축에 1배한 원자 배위와 2배한 원자 배위는 대칭이 아니다.

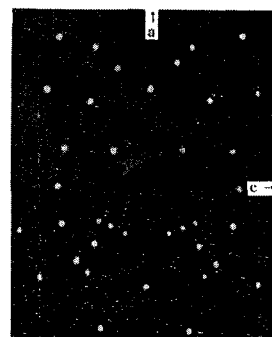


그림 8. Back-reflection Laue Patterns to (001)planes(C<sub>1</sub>)

CdS[16,17]가 c축에 따라서 anisotropy가 생기고 이 anisotropy 때문에 crystal field splitting  $\Delta_{cr}$ 가 생긴다고 하듯이 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>에서도  $\Delta_{cr}$ 이 생긴다고 고찰된다.

### 3.2 Hall 효과

CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 c축에 수직하게 성장된 면의 Hall 효과[14-16]는 van der Pauw 방법으로 293 K에서 측정한 carrier density, Hall mobility, conductivity 값은 각각  $8.61 \times 10^{17}$  holes/cm<sup>3</sup>, 242 cm<sup>2</sup>/V · sec,  $333.3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  이었다. 10K일 때는 이 값이 각각  $1.01 \times 10^{16}$  holes/cm<sup>3</sup>, 264 cm<sup>2</sup>/V · sec,  $104.4 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 이었고, 293K에서 10K까지 Hall coefficient가 양의 값이어서 P형 반도체임을 확인하였다. 293K일 때는 carrier density가  $\sim 10^{17}$  holes/cm<sup>3</sup>이고 10K일 때 carrier density가  $\sim 10^{16}$  holes/cm<sup>3</sup>이다. 따라서 293K일 때는  $\sim 10^{17}$ 개의 carrier density와 갈라진 가전자 준위  $\Gamma_{7A}$ 와  $\Gamma_{6B}$  그리고  $\Gamma_{7C}$ 에서 들뜬 exciton의 전자가 에너지 간격이 크면 클수록 주행거리도 멀어서 서로 scattering될 확률이 높다. 그러나 저온 10K에서는 carrier density들이 frozone state에 있고 carrier density는 적어서 scattering될 확률이 훨씬 적어 에너지가 큰 A-, B- 와 C-exiton peaks가 나타나고 상온에서는 장거리 여행으로 인한 상호 충돌효과로 산란되기 때문에 에너지가 적은 A-, B-exiton peaks만 나타난다고 고찰된다.

### 3.3 광흡수 스펙트럼과 광전류 스펙트럼

CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정 박막의 온도에 따르는 광흡수 스펙트럼을 293 K에서 10 K까지 측정하여 그림 9에 보였다. 광흡수 스펙트럼으로부터 조사광의 에너지 ( $h\nu$ )에 대응하는 광흡수 계수 ( $\alpha$ )를 구하고 ( $\alpha h\nu$ )  $\sim$  ( $h\nu - E_g$ )의 관계로부터 에너지 갭을 구하여 표 1에 모았다. 그림 10은 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 흡수 곡선에 의한 direct band gap의 온도 의존성을 나타내고 있다. Direct band gap의 온도 의존성은 varnish 공식 [18]

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad \dots (1)$$

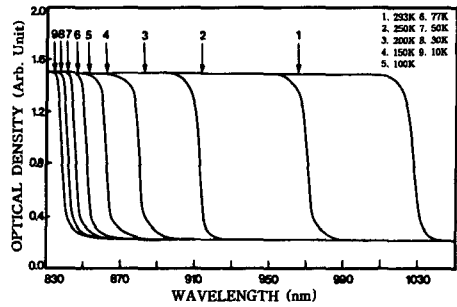


그림 9. Optical absorption spectra according to temperature variation of CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> single crystal.

을 잘 만족하고 있으며, (1)식에서  $E_g(0)$ 는 0K에서의 에너지 갭,  $\alpha$ 과  $\beta$ 는 상수이다. 여기서  $E_g(0) = 1.4750$  eV,  $\alpha = 7.69 \times 10^{-3}$  eV/K,  $\beta = 2147$  K으로 주어진다.

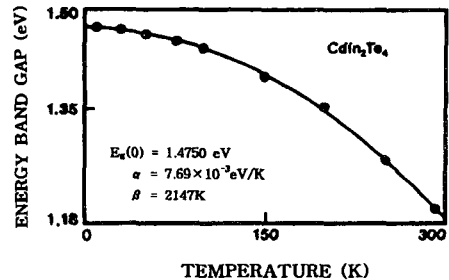


그림 10. The temperature dependence of the energy gap in CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> single crystal. The solid line represents the fit to the varshni equation.

CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 온도 변화에 의한 광전류 스펙트럼을 293 K에서 10 K까지 측정한 결과는 그림 11과 같고, 온도에 따른 광전류 봉우리 위치는 표 2에 정리하였다.

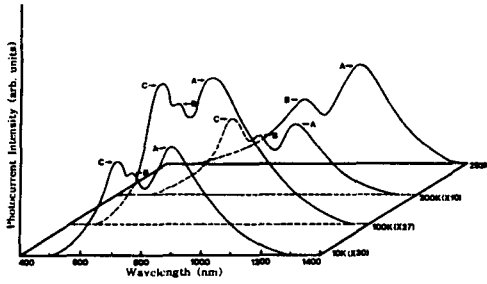


그림 11. Photocurrent spectra of CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> single crystal(C<sub>-</sub>)

표 2. Temperature dependence of PC peaks for CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> single crystal (C<sub>-</sub>)

Tem p. (K)	Wavelength (nm)	Ener gy (eV)	$\Delta$ so or $\Delta$ cr	Fine structure
293	1029.4	1.2044	0.2361 $\Delta$ cr	$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>∞</sub> exciton)
	860.7	1.4405		$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>∞</sub> exciton)
250	975.5	1.2704	0.2381 $\Delta$ cr	$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>5</sub> exciton)
	821.9	1.5085	0.1141 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>5</sub> exciton)
	764.1	1.6226		$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>5</sub> exciton)
	918.8	1.3494		$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>3</sub> exciton)
200	781.5	1.5865	0.2371 $\Delta$ cr	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>3</sub> exciton)
	729.5	1.6995	0.1130 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>3</sub> exciton)
	888.8	1.3950		$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>4</sub> exciton)
	760.6	1.6301	0.2351 $\Delta$ cr	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>4</sub> exciton)
150	710.1	1.7460	0.1159 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>4</sub> exciton)
	861.3	1.4395		$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>5</sub> exciton)
	740.4	1.6745	0.2350 $\Delta$ cr	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>5</sub> exciton)
	694.4	1.7855	0.1110 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>5</sub> exciton)
100	854.2	1.4514		$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>5</sub> exciton)
	735.2	1.6864	0.2350 $\Delta$ cr	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>5</sub> exciton)
	689.4	1.7984	0.1120 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>5</sub> exciton)
	849.5	1.4595		$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>2</sub> exciton)
50	731.7	1.6944	0.2349 $\Delta$ cr	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>2</sub> exciton)
	686.7	1.8055	0.1110 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>2</sub> exciton)
	844.7	1.4678		$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>1</sub> exciton)
	728.1	1.7028	0.2350 $\Delta$ cr	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>1</sub> exciton)
30	683.5	1.8139	0.1111 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>1</sub> exciton)
	842.8	1.4711		$\Gamma_{7C} \rightarrow \Gamma_1$ (or A <sub>1</sub> exciton)
	726.3	1.7070	0.2359 $\Delta$ cr	$\Gamma_{6B} \rightarrow \Gamma_1$ (or B <sub>1</sub> exciton)
	681.6	1.8190	0.1120 $\Delta$ s.c	$\Gamma_{7A} \rightarrow \Gamma_1$ (or C <sub>1</sub> exciton)

정방정계의 가전자대는 spin-orbit splitting과 non cubic crystalline filed의 동시효과에 의하여 그림 12와 같이 분리되며, 그림 12에서  $\Gamma_{7A}$ 와  $\Gamma_{6B}$  사이의 에너지 간격이  $\Delta$ cr이고  $\Gamma_{6B}$ 와  $\Gamma_{7C}$ 사이의 에너지 간격이  $\Delta$ so라 하였다[19].

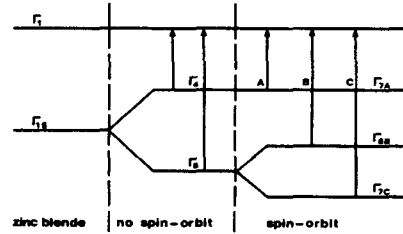


그림 12. Fine structure for energy level of CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>

Band theory에 의하면 반도체의 전도대를 S-like, 가전자대를 P-like로 보았으며, P-like계도는 P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>z</sub>와 같이 세 개의 준위로 나누어 질 수 있다고 보았다[20,21,22].

Hopfield는 spin-orbit splitting과 non-cubic crystalline filed의 동시효과에 의해 가전자대가 갈라지는 모델을, Hamilton matrix ;

$$E_{1(2)} = \frac{1}{2} (\Delta_{so} + \Delta_{cr}) - (+) \left[ \frac{1}{4} (\Delta_{so} + \Delta_{cr})^2 - \frac{2}{3} \Delta_{so} \cdot \Delta_{cr} \right]^{\frac{1}{2}} \dots (2)$$

로 표현하였다. 단 여기서 E<sub>1</sub>과 E<sub>(2)</sub>는 다음과 같다. 실험에 의해 찾은 A-, B-그리고 C-exciton의 에너지를 E<sub>FX</sub>(A), E<sub>FX</sub>(B)그리고 E<sub>FX</sub>(C)라 표기하면 E<sub>1</sub> = E<sub>FX</sub>(B)-E<sub>FX</sub>(A)이고 E<sub>2</sub> = E<sub>FX</sub>(B)-E<sub>FX</sub>(C)이다. E<sub>1</sub>과 E<sub>2</sub>는 각각  $\Delta$ cr과  $\Delta$ so값을 찾는 산과 역이 된다.

본 연구에서는 광전류 스펙트럼으로부터 E<sub>1</sub>과 E<sub>2</sub>값을 찾아 Hamilton matrix에 의해 crystal field splitting  $\Delta$ cr과 spin-orbit splitting  $\Delta$ so값을 찾고자 한다. 또 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 반도체의 광흡수곡선으로부터 구한 에너지 띠허격 E<sub>g</sub>(T)의 varshni관계식으로부터 10K때의 E<sub>g</sub>(10)값과, photocurrent peak로부터 구한 에너지 E<sub>pp</sub>(T)의 10K때의 E<sub>pp</sub>(10)값과의 차이로부터 free exciton binding energy, E<sub>FX</sub>를 찾고자 한다. 이어서 293K에서 10K까지 사이의 광전류 봉우리(PP)에는 장파장대(L), 중간파장대(M)와 단파장대(S)들의 에너지를 각각 E<sub>PP</sub>(L), E<sub>PP</sub>(M) 그리고 E<sub>PP</sub>(S)로 표기해 exciton 양자수 n 값을 확인

하고자 한다.

CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 10K 때 광전류 스펙트럼에는 광전류 봉우리 3개가 있다. 이들 에너지로부터 구한 E<sub>1</sub>과 E<sub>2</sub>는 각각 다음과 같다.

$$E_1 = E_{PP}(10,M) - E_{PP}(10,L) = 1.7070 - 1.4711 = 0.2359\text{eV}$$

$$E_2 = E_{PP}(10,M) - E_{PP}(10,S) = 1.7070 - 1.8190 = -0.1120\text{eV}$$

E<sub>1</sub>과 E<sub>2</sub>값을 Hamilton matrix에 대입해 연립 방정식을 풀면

$$\Delta_{cr} = 0.2704\text{eV}, \Delta_{so} = 0.1465\text{eV} \quad \dots (3)$$

이다. 이 값들은 Shay<sup>[18]</sup>등이 electro-reflectance 측정하여 구한 crystal field splitting  $\Delta_{cr}$  0.267 eV, spin-orbit splitting  $\Delta_{so}$  0.151 eV값과 일치함을 알 수 있었다.

광흡수 곡선으로부터 Varshni의 E<sub>g</sub>(T) 공식 (1)로부터 10 K일때의 E<sub>g</sub>(10)값은 1.4746 eV 이고, 표 2에서 10 K일때 E<sub>PP</sub>(10,L) = 1.4711 eV이므로 E<sub>g</sub>(10) = E<sub>FX</sub> + E<sub>PP</sub>(10,L) = E<sub>FX</sub> + 1.4711 eV에서 E<sub>FX</sub> = 1.4746 - 1.4711 = 0.

0035 eV이다. 그러므로 free excitation binding energy E<sub>FX</sub> = 0.0035 eV이다.

표 1에서, 10K일 때, E<sub>g</sub>(10) = 1.4746 eV이고 표 2에서 10K일 때 E<sub>PP</sub>(10,L) = 1.4711 eV 이다. E<sub>g</sub>(10) = E<sub>FX</sub>(10) + E<sub>PP</sub>(10,L)이므로 E<sub>FX</sub>(10) =

$$E_g(10) - E_{PP}(10,L) = 1.4746 - 1.4711 = 0.0035 \text{ eV} = E_{FX} / 1^2 = 0.0035 \text{ eV} \text{ 이다.}$$

E<sub>FX</sub>(10)는 E<sub>FX</sub> / 1<sup>2</sup>와 일치한다. 따라서 10K 일 때 광전류 봉우리 장파장대의 에너지 E<sub>PP</sub>(10,L)은 n = 1일 때 가전자대  $\Gamma_{7c}$ 에서 전도대  $\Gamma_1$ 으로 뜰 때 생긴 A<sub>1</sub>-exciton 봉우리이다. 마찬가지로 (3)식의  $\Delta_{cr}$  0.2704 eV를 갖고 10K의 중간파장대 광전류 봉우리의 에너지 E<sub>PP</sub>(10,M)은 n = 1일 때  $\Gamma_{7B}$ 에서 전도대  $\Gamma_1$ 으로 뜰 때 생긴 B<sub>1</sub>-exciton 봉우리이다. 마찬가지로 (3)식의  $\Delta_{cr}$ 와  $\Delta_{so}$ 와의 합계 0.4169 eV를 갖고 E<sub>PP</sub>(10,S)도 n = 1일 때  $\Gamma_{7c}$ 에서 전도대  $\Gamma_1$ 으로 뜰 때 생긴 C<sub>1</sub>-exciton봉우리이다. 이런 방법으로 실행하여 Tabel 2의 Fine structure에 표시하였다.

특히 293K 일때 표1의 E<sub>g</sub>(293)은 표 2의 E<sub>PP</sub>(293,L)과 같고, 1.2044 eV이어서 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>는 I-III<sub>2</sub>-VI<sub>4</sub>족 화합물 반도체로서 상온에서 띠 간격이 1.2 eV인 직접 천이형 반도체임을 확인하였다. E<sub>g</sub>(293)과 E<sub>PP</sub>(293,L)은 E<sub>FX</sub> (293) = E<sub>g</sub> (293) - E<sub>PP</sub> (293,L) = 0 = E<sub>FX</sub> / n<sup>2</sup>이어서, E<sub>g</sub>(293)과 E<sub>PP</sub>(293,L)은 n = ∞인 A<sub>∞</sub>-exciton 봉우리이며

Varshni의 E<sub>g</sub>(T)인 공식 (1)은 온도변화에 대응하여 가전자대  $\Gamma_1(Z)$ 에서 전도대  $\Gamma_1(S)$ 로 뜰 때 생긴 A<sub>∞</sub>-exciton봉우리들이 확인되었다.

#### 4. 결 론

수평 전기로를 제작하여 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정을 합성하여 결정구조는 정방정계(tetragonal)이며 격자상수 a<sub>0</sub> = 6.219 Å, c<sub>0</sub> = 12.396 Å임을 알았다. 또한 Bridgman 방법으로 CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정을 성장시켜 c 축에 수직한 시료를 만들어, 광전류 스펙트럼과 광흡수 스펙트럼을 분석하였다. CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 단결정의 c 축에 수직한 시료의 Hall 효과를 van der Pauw 방법으로 측정할 결과 상온에서 운반자 농도는 8.61 × 10<sup>17</sup> electrons/cm<sup>3</sup>, 이동도는 242 cm<sup>2</sup>/V · sec였다. 또한 Hall 계수가 양의 값이어서 성장된 단결정 박막은 P형 반도체임을 알 수 있었다. 광흡수 spectra에 의해 에너지 띠 갭 E<sub>g</sub>(T)는 varshni type 의 E<sub>g</sub>(T) = E<sub>g</sub>(0) -  $\frac{\alpha T^2}{T + \beta}$  에서 E<sub>g</sub>(0) = 1.4750eV,  $\alpha = 7.69 \times 10^{-3} \text{eV/K}$ 이고  $\beta = 2147 \text{K}$ 임을 확인하였다. E<sub>g</sub>(T)는 가전자대 갈라짐에 의한 가전자대의  $\Gamma_{7c}$ 준위와 전도대  $\Gamma_1$ 사이의 에너지 간격임을 알았다.

10K의 광전류 spectra값을 Hamilton matrix에 대입하여 연립 방정식으로 구한 crystal field splitting  $\Delta_{cr}$ 값은 0.2704 eV이며 가전자대 갈라짐에 의한 가전자대  $\Gamma_5(X)$ 와  $\Gamma_4(Z)$ 사이의 에너지 간격임을 알았다. Spin-orbit splitting  $\Delta_{so}$  값은 0.1465 eV이며 가전자대 갈라짐에 의한 가전자대  $\Gamma_5(Y)$ 와  $\Gamma_5(X)$ 사이의 에너지 간격임을 알았다. 10K일 때 광전류 봉우리 3개는 n = 1 일때의 A<sub>1</sub>-, B<sub>1</sub>-와 C<sub>1</sub>-exciton 봉우리임을 알았다.

#### 참고 문헌

- [1] S. A. Lopez-Rivera, L. Martinez, J. M. Briceno-Valero, R. Echeverria and G. Gonzalez de Armengol. Prog. Cryst. Growth Charact. 10, 297 (1985)
- [2] S. S. Ou, S. A. Eshraghi, O. M. Stafsudd and A. L. Gentile, J. Appl. Phys. 57, 2