

수직 Bridgman법에 의한 CdTe 단결정의 성장과 특성

정용길, 신호덕, 엄영호, 박호열*, 진광수*

울산대학교 물리학과, 울산, 680-749

*부산대학교 물리학과, 부산, 609-735

Growth and characterization of CdTe single crystals by vertical Bridgman method

Yong-Keel Chung, Ho-Dug Shin, Young-Ho Um, Hyo-Yeol Park* and Gwang-Soo Jeon*

Department of Physics, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

**Department of Physics, Pusan University, Pusan 609-735, Korea*

요 약 두 개의 siliconit 발열체를 써서 이단 전기로를 제작하여 수직 Bridgman법으로 CdTe 단결정을 성장시켰다. 상단전기로의 최고온부를 1150°C로 고정시키고 하단전기로를 800°C로 하였을 때, 22.5°C/cm의 온도 기울기를 얻었다. 성장된 시료의 X-선 회절 실험으로부터 얻은 격자상수 a_0 는 6.482 Å 이었고, 실온에서 광흡수 측정으로부터 얻은 밴드갭 에너지는 1.478 eV이었다. 광발광(PL) 실험으로부터, 구속된 엑시톤 방출 피크가 각각 (A^0, X) (1.5902, 1.5887 eV), (h, D^0) (1.5918 eV) 그리고 (D^0, X) (1.5928, 1.5932 eV)의 방출 피크로 분리되는 것을 확인할 수 있었으며, 중성주개와 중성받개의 결합에너지와 이온화에너지를 계산하였다.

Abstract CdTe single crystals were grown by vertical Bridgman method using double furnace with two siliconit heating elements. When the peak temperature of the upper furnace was fixed at 1150°C and that of the lower furnace was 800°C, the temperature gradient was about 22.5°C/cm. The lattice constant a_0 was 6.482 Å from the X-ray diffraction and the band gap energy obtained from the optical absorption experiment at room temperature was 1.478 eV. PL spectrum showed that the bound exciton emission peak was resolved into (A^0, X) (1.5902, 1.5887 eV), (h, D^0) (1.5918 eV) and (D^0, X) (1.5928, 1.5932 eV), and we have also calculated binding energy and ionization energy of the neutral donor and acceptor.

1. 서 론

CdTe는 II-VI족 화합물 반도체중 p형 및 n형이 가능한 물질로 γ -선 검출기 및 X-선 검출기, 태양전지 그리고 적외선 검출기로 쓰이는 HgCdTe(CMT)의 박막성장용 기관으로 응용되고 있다[1-3]. 그런데 CdTe가 MCT의 성장용 기관으로 사용되기 위해서는 EPD(Etch Pit Density)가 10^5cm^{-2} 보다 작고 Te 석출물이 거의 없어야 하며, 60% 이상의 높은 적외선 투과도를 갖는 특성이 요구된다. 특히 반도체 소자로 쓰일 때 Te의 석출물이 결정성을 나쁘게 하는 문제점이 있다. 이러한 소자를 제작하기 위해서는 결정의 전기적, 광학적 특성을 조사하는 것이 대단히 중요하다[4].

CdTe 단결정은 Frerichs[5]가 처음으로 기상성장시켜 성장조건 및 결정구조를 주로 연구하였다. 그 후 많은 연구자들이 Bridgman법과 Traveling Heater Method(THM)를 시도하였으나 THM으로는 큰 단결정을 얻기가 어렵고 편석이 심한 것으로 알려져 있다. 그리고, 수직 Bridgman법으로 CdTe 단결정을 성장시킬 때, 가끔 2차 핵 형성(secondary nucleation)은 냉각접촉면과 석영으로 된 성장용 앰플(ampoule)이 접하고 있는 시료의 표면에 생겨 안쪽으로 성장함으로써 쌍정이 만들어지는 경우도 있다[6]. 그러나, 이 방법은 성장 접촉면 근처에서 낮은 온도 기울기로 결정성장을 시킬 수 있으며, 전위밀도를 줄이는 중요한 열쇠가 되기 때문에 양질의 큰 CdTe 단결정을 성장시키는데 적당한 방법이라고 생각된다.

반도체의 특성을 평가하는 기술에는 PL 분광(Photoluminescence Spectroscopy), Raman 분광(Raman Spectroscopy), TEM(Transmission Electron Microscopy) 그리고 XRD

(X-Ray Diffraction) 등의 여러 가지가 있다. 특히 PL 분광법은 반도체 물질내의 빈자리(vacancy), 빈틈(interstitial), 불순물 등과 같은 부분적인 결함에 대한 연구에 있어서 민감하고, 비접촉적이며, 비파괴적으로 광학적 특성을 측정할 수 있는 방법이다. 그 측정 결과로부터 Cd-빈자리와 전기적으로 활성인 불순물들의 존재를 알아낼 수 있고, 또한 엑시톤 방출선의 반폭치(FWHM)는 CdTe와 다른 반도체의 결정성을 평가하는 수단으로 이용된다[7].

본 실험에서는 양질의 단결정을 성장시키기 위하여 Bridgman법에 의한 이단 전기로를 제작하여 CdTe 단결정을 성장시켰다. 성장된 결정의 격자상수를 구하기 위하여 X-선 회절 실험을 행하였고, 밴드갭 에너지를 결정하기 위하여 광흡수 실험을 행하였다. 또한 PL 스펙트럼의 방출 피크로부터 결정성과 결정내 결함을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. CdTe 단결정 성장

본 실험에서는 수직 Bridgman법에 의한 이단 전기로를 제작하여 CdTe 단결정을 육성하였으며, 단결정 육성장치는 Fig. 1에서와 같이 이단 전기로, 성장용 알루미늄 튜브, 전력 조절장치, 온도 조절장치, 인하장치, 교류 전원 공급장치로 구성되어 있다. 여기서 상·하단 전기로의 발열체는 동일한 siliconit를 사용하였고 두 발열체 사이는 운모판을 이용하여 절연시켰다. 전기로의 온도조절은 백금 열전대를 사용하여 마이크로 컴퓨터 온도조절기(PC-600, Shinko, Japan)로 온도를 제어하였다. 그리고, 인하장치의 모터

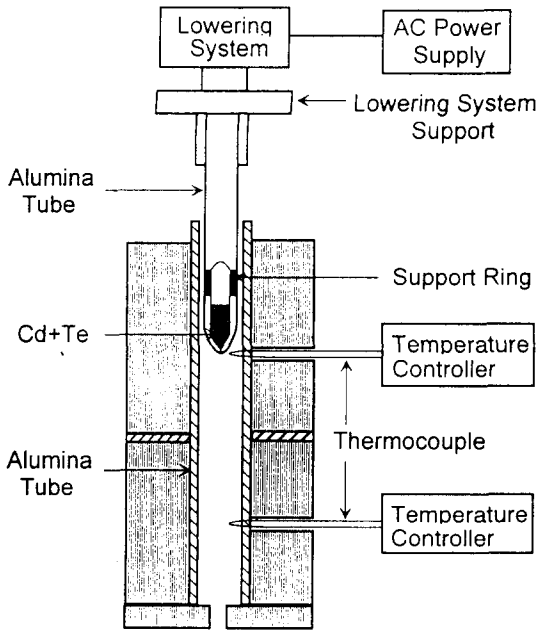


Fig. 1. Schematic diagram of the Bridgman furnace.

(M8GA36M, Panasonic, Japan)는 속도 조절장치(DV0P002, Panasonic, Japan)를 부착하여 모터가 저속으로 회전하는 경우에도 안정된 회전을 하도록 하였고, 이때 인하속도는 1.43 mm/hr로 하였다. 상·하단전기로의 최고온부 온도를 각각 1150°C, 800°C로 하였을 때 온도 기울기는 22.5°C/cm이었다.

내경이 9 mm인 석영관의 끝을 원추형의 seed로 만들어 세척액(H₂O+K₂Cr₂O₇+H₂SO₄) 속에 24시간 담근 후 증류수, 아세톤, 메탄올, 증류수 순서로 여러번 세척하여 건조시켜서 사용하였다. 이 석영관은 CdTe 단결정을 성장시킬 때 증기압이 높은 Cd과 석영관의 반응 문제 때문에 성장온도 보다높은 1200°C 부근에서 성장관 내부를 완전히 불투명하게 탄소코팅하여 고순도의 Cd과 Te을 1:1 mole 비로 혼합한 시료를 석영관에 넣어서 4×10⁻⁶ Torr로 진공배기하여 봉입하였

다. 전기로 내부의 열대류 현상에 의한 온도 변화를 줄이기 위하여 진공으로 봉한 석영관을 알루미늄튜브에 넣었고, 앰플이 기울어지는 것을 방지하기 위하여 알루미늄 튜브와 앰플 사이에 석영링을 넣어 고정후 수동으로 내려 전기로 중앙에 위치시켜 결정성장장치를 가동하였다.

Fig. 2의 a), b)는 상·하단전기로의 온도 조절 프로그램을 나타내고 있다. 여기에서 상단전기로의 경우 실온에서부터 1°C/min의 율로 600°C까지 상승시킨 후 5시간 동안 유지시켰고, 하단전기로는 0.7°C/min의 율로 250°C까지 상승시켜 상단전기रो와 같은 시간동안 유지시켰다. 이것은 상단전기로의 경우 Cd의 용점이 320.9°C, 비등점은 766±2°C이고, Te의 용점은 449.8°C, 비등점은 989°C이므로 비등점 이상에서는 Cd의 증기압에 의해 석영관이 파괴될 위험이 있으나 600°C에서 유지시키면 Cd과 Te이 모두 액상으로 결합할 것으로 기대하였기 때문이고, 하단전기로의 중심부 온도 250°C는 앰플의 seed가 위치하는 상단전기로의 중심부의 온도인 600°C에 영향을 주지않도록 전구간에서 측정된 온도분포 측정치를 바탕으로 Gauss Fit

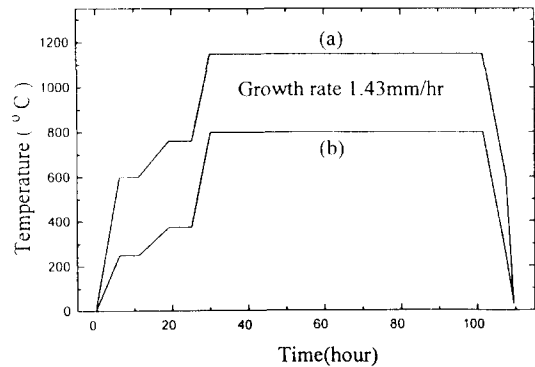


Fig. 2. Temperature control program for synthesis of CdTe. (a) Upper furnace and (b) Lower furnace.

하여 결정하였다. 그리고나서 상단로는 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 비율로 760°C 까지, 하단로는 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 비율로 374°C 까지 상승시켜서 6시간 동안 유지시켰다가 다시 상단로는 CdTe의 용점(1092°C)보다 58°C 높은 1150°C ($1^{\circ}\text{C}/\text{min}$)로, 하단로는 800°C ($1.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$)로 온도를 올려서 CdTe가 완전히 섞이도록 1-2시간 유지시킨 후 인하장치를 가동시켜 결정성장을 시작하였다. 이때, 결정성장 속도가 빠르거나 부위에 따라 다른 결정성장 속도를 가지게 되면 동경방향으로 열흐름에 의한 strain이 생겨 많은 전위결함을 유발시키게 되며, 또 반응 용기와 접촉면에서 새로운 핵이 생겨 다결정 혹은 (111)면으로 twinning을 유발시키는 원인이 된다[8]. 그래서 본 실험에서는 1.43 mm/hr 의 속도로 앰플의 상단 끝부분이 고온에 위치하는 지점까지 천천히 인하하였고, 또한 고온 상태의 CdTe 단결정이 급격히 냉각하게 되면 열응력에 의한 전위결함이 생겨나므로 결정성장이 완전히 끝난 후에도 초기에는 $33^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 율로 일정 온도까지 서서히 냉각시킨 후 자연냉각시켰다.

2.2. X-선 회절 실험

성장된 CdTe 단결정의 seed 부분과 중간부분을 잘라서 약 $0.1\ \mu\text{m}$ 정도의 미소분말로 만든 후, X-선 회절장치(Rigaku, GDX-1193A, Japan)를 이용하여 회절 피크를 조사하였다. 이때 사용한 X-선 관은 Cu-target($1.5406\ \text{\AA}$)을 사용하였고, $2\theta = 20^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 범위에서 $1.2^{\circ}/\text{min}$ 로 scanning하여 격자상수 값 a_0 를 구하였다.

2.3. 광흡수 측정

실온에서 CdTe 단결정의 광흡수를 UV-Visible spectrometer(Cary 5, Varian U.S.A.)로 $200 \sim 2000\ \text{nm}$ 영역에서 측정하였다. 흡수계수 $\alpha = 2.303 \frac{\text{O.D.}}{d}$ 로 주어지고, 여기에서 optical density(O.D.)는 $I = I_0 \exp(\alpha d)$ 에서 상대적인 세기의 자연대수값인 $\log(I/I_0)$ 로 정의되며, 위 흡수계 수식에 두께 d 값과 O.D.를 광자 에너지별로 대입하여 α 를 구한 후 $(\alpha h\nu)^2$ 과 $h\nu$ 의 관계를 이용하여 밴드갭 에너지를 구하였다.

2.4. 광발광 측정

Fig. 3은 광학적 성질을 측정하기 위한 광발광 측정장치의 개략도이다. 시료의 온도를 낮추기 위하여 저온장치(Janis, C210-4, U.S.A.)를 사용하였으며, 발광 스펙트럼의 여기광원으로서는 출력이 $5\ \text{mW}$ 이고 출력모드가 TEM₀₀로 편광되어 있는 He-Ne 레이저(Spectra Physics, 120S, U.S.A.)를 사용하였다. 시료로부터 방출된 luminescence는 촛점거리 $10\ \text{cm}$, $20\ \text{cm}$ 인 볼록렌즈로 집속되어 분광기(SPEX 1702, $f = 3/4\ \text{m}$, U.S.A.)에 입사된 후, 광증배관(HAMAMATSU, R928)에서 전기적 신호로 전환, 증폭되어 Datascan(SPEX, NJ 08820)에 입력되고 입력된 신호는 RS-232C port를 통하여 PC에

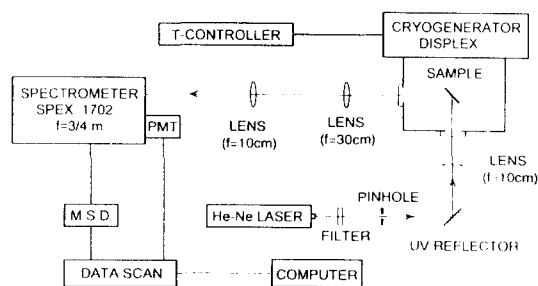


Fig. 3. Schematic diagram of photoluminescence apparatus.

전송되어 AUTOSCAN 프로그램으로 분석, 저장되도록 구성되어 있다.

3. 결과 및 논의

3.1. CdTe 단결정 성장

성장용 석영앰플의 길이를 상대적으로 길게 하였을 때는 앰플의 seed와 상단부 사이의 온도차에 의하여 앰플의 상단부에 증기상태에서 냉각된 비결정질인 Cd 또는 Te이 많이 달라 붙어 있었기 때문에 길이를 적절히 줄여서 상단부에 Cd 또는 Te이 남아 있지 않도록 하였다. 그리고, 상단전기로의 최고온부의 온도를 1150°C에 고정하고 하단로의 온도를 700~1150°C로 변화시키면서 상·하단전기로 내부의 온도분포를 조절한 결과 하단전기로의 온도가 800°C일 때 22.5°C/cm의 온도기울기를 얻었다. 그 이상의 온도에서는 상단로와 하단로의 중심사이의 거리 때문에 중심부에서 온도가 감소하였으며, 앰플의 하강속도를 2 mm/hr로 하였을 경우 성장결정 표면의 굴곡이 심하였고 벽개면의 형성이 여러방향으로 나타났으며, 하강속도를 상대적으로 늦은 1.43 mm/hr로 하였을 때는 커다란 벽개면을 얻을 수 있었으며, 축에 수직인 방향으로 형성되었다.

3.2. X-선 회절 실험

성장된 CdTe 단결정의 격자상수 a_0 를 구하기 위하여 결정을 분말로 만들어 X-선 회절 실험을 행한 결과로부터 Miller 지수(hkl)와 격자면간의 간격 d 를 구하여 Fig. 4에 나타내었다. 각 회절 피크는 그림에서와 같이 우선 결정면 (111), (220), (311), (400),

(331), (422), (511) 및 (333)면과 (440)면에 대한 피크가 나타나 결정구조는 Zinc blende 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 피크로부터 구한 격자상수값 a_0 를 Fig. 5와 같이 Nelson의 보정식

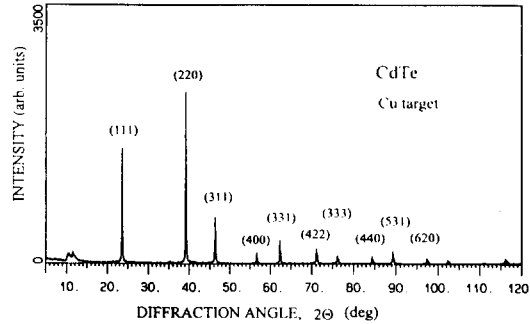


Fig. 4. X-ray diffraction peaks of the CdTe single crystal.

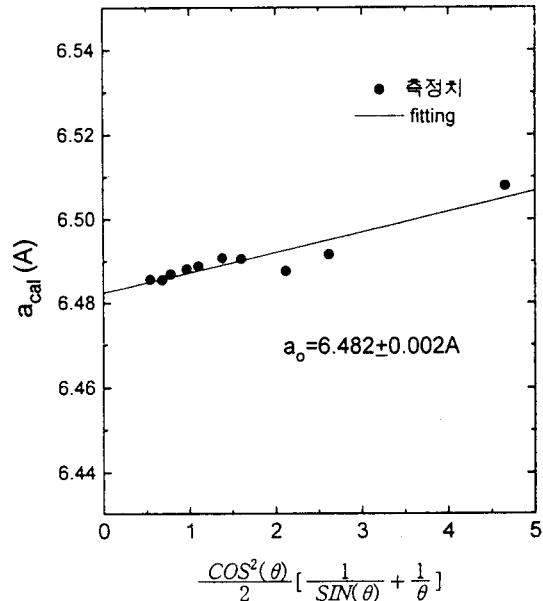


Fig. 5. Precision lattice constant determination for CdTe single crystal.

$$t(\theta) = \frac{\cos^2 \theta}{2} \left(\frac{1}{\sin \theta} + \frac{1}{\theta} \right)$$

에 따라서 plot한 후 $\theta=90^\circ$ (즉, $t(90^\circ)=0$) 에 외삽시켜 얻은 격자상수값 a_0 는 6.482 Å 이었다. 이 값은 이미 알려진 격자상수 6.48 Å 과 잘 일치하고 있다[9].

3.3. 광흡수

CdTe 단결정의 밴드갭 에너지를 결정하기 위하여 흡수 스펙트럼을 측정하였다. 여기서 흡수단 E_x 는 Brillouin zone의 Γ 점($\vec{k}=0$)에서의 가전자대의 꼭지점과 전도대의 최하점 사이에서 일어나는 최소 에너지갭이다. CdTe 단결정은 직접 천이형이므로 흡수계수 α 와 입사광의 광자에너지 $h\nu$, 밴드갭 에너지 E_g 사이에는

$$[\alpha h\nu] \approx (h\nu - E_g)^{1/2}$$

인 관계가 있다[10]. 이 관계를 이용하여 흡수 스펙트럼에서 구한 밴드갭 에너지를 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과로부터 상온에서의 밴드갭 에너지는 $E_g=1.478$ eV로 주어졌다 [11].

3.4. 광발광

Fig. 7은 CdTe 단결정의 결정성을 평가하기 위하여 12 K에서의 PL 스펙트럼을 나타낸 것으로, 주어진 CdTe에 있어서 다양한 주개나 받개에 구속된 엑시톤의 방출 피크를 Table 1과 같이 확인하였다.

양질의 CdTe 단결정에서만 볼 수 있는 자유 엑시톤($X_{n=1}$)의 발광이 밴드갭 에너지 (1.607 eV)보다 약 10 meV[12] 낮은 1.5969

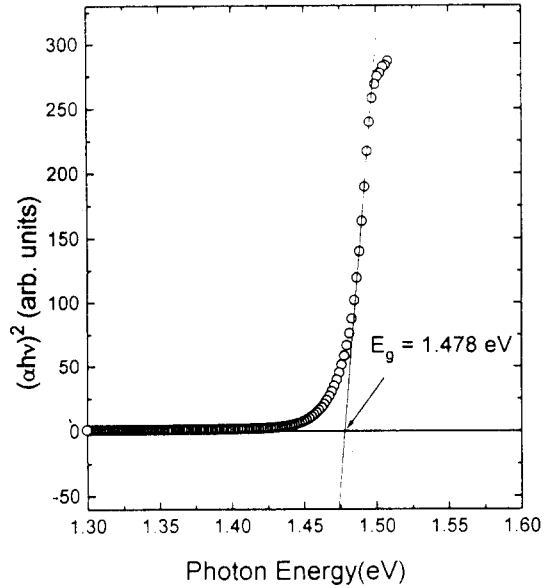


Fig. 6. Determination of energy gap which obtained from the absorption spectra of CdTe.

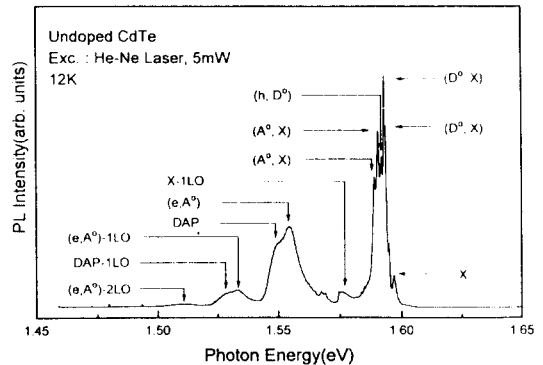


Fig. 7. Photoluminescence spectra of CdTe at 12 K over the energy range of 1.45 ~ 1.65 eV.

eV에서 보이는데, 이 방출 피크의 FWHM은 0.71 meV로 아주 날카롭게 분리되어 나타났으며, CdTe에서의 LO-포논 에너지는 약 21.3 meV[13]로 1.5756 eV에서 X-1LO 포논 복

Table 1

Notation, position, and assignments for the emission lines in the PL spectra

Notation	Position		Assignment
	Energy (eV)	Wavelength (Å)	
X	1.5969	7764	Free exciton
(D ⁰ , X)	1.5932	7782	Bound exciton on neutral donor
(D ⁰ , X)	1.5928	7784	Bound exciton on neutral donor
(h, D ⁰)	1.5918	7789	Valence band hole and neutral donor
(A ⁰ , X) ₁	1.5902	7797	Bound exciton on neutral acceptor
(A ⁰ , X) ₂	1.5887	7804	Bound exciton on neutral acceptor
X-1LO	1.5756	7869	Phonon replica
(A ⁰ , X) ₁ -1LO	1.5690	7902	Phonon replica
(A ⁰ , X) ₂ -1LO	1.5674	7910	Phonon replica
(e, A ⁰)	1.5543	7977	Conduction band electron and neutral acceptor
DAP	1.5498	8000	Donor-acceptor pair band
(e, A ⁰)-1LO	1.5337	8084	Phonon replica
DAP-1LO	1.5287	8110	Phonon replica
(e, A ⁰)-2LO	1.5126	8197	Phonon replica

제에 의한 방출 피크가 나타나 있다.

CdTe에 있어서 주개나 받개에 구속된 엑시톤에 의한 여러 PL 방출 피크들은 자유 엑시톤 방출 피크 바로 아래쪽에 보이며, 1.5918 eV의 피크는 Cd-빈자리와 관계되는 잔류 주개 준위에 있는 전자와 가전자대의 정공과의 재결합 과정에서 나타나는 발광(*h*, *D*⁰)으로 해석된다[14]. 그리고(*D*⁰, *X*) 재결합 방출 피크들은 1.5928~1.5932 eV 영역에서 나타나고 있으며, 1.5890~1.5887 eV 영역에서 보이는 두 방출 피크는 중성 받개와 자유엑시톤의 재결합(*A*⁰, *X*)에 의한 luminescence이고, Copper[12], Seto[15] 등은 이 방출 피크들이 V_{Cd}^{2-} 또는 V_{Cd}^{2-} 과 이온화된 주개와의 복합체인($V_{Cd}^{2-} - D^+$)에 의

한 것이라고 하였으며, Molva[16], Francou[17] 등은 Cd-빈자리에 치환된 O, N, Li, Na, Sb, P, As, Ag, Cu 등이 중성 받개 역할을 하게 되어 나타나는 방출 피크들이라고 하는 서로 다른 견해를 보이고 있다. 그리고 1.5543 eV의 방출 피크는 전도대의 전자가 중성 받개로의 천이과정에서 나타나는 발광(*e*, *A*⁰)으로 보이며, 보다 낮은 1.5498 eV를 중심으로 한 방출 피크는 얇은 준위의 주개와 불순물 또는 Cd-빈자리와 같은 결정결함과 관계된 깊은 준위의 받개와의 재결합에 의한 DAP 발광으로 해석된다. 한편 저에너지 영역에서는 (*e*, *A*⁰)와 DAP 방출 피크의 제1, 제2 포논 복제 피크가 나타나고 있으며, 저온에서는 (*e*, *A*⁰)와 DAP 발광이 동시

Table 2

Measured parameters of the free and bound excitons in CdTe

Emission line	Energy(meV)	
	Binding energy	Ionization energy
Free exciton (X) [12]	10	
Bound exciton on neutral donor (D^0, X)	3.8	
	4.2	
Bound exciton on neutral acceptor (A^0, X)	6.8	
	8.3	
Valence band hole and neutral donor (h, D^0)		15.7
Conduction band electron and neutral acceptor (e, A^0)		53.2

에 관측되었고, (e, A^0) 발광이 더 지배적임을 알 수 있다. 이 발광에 대한 이온화에너지 (E_1)는 아래와 같이 주어진다.

$$h\nu(e, A^0) = E_g - E_1 + \frac{1}{2} kT$$

위 식를 이용하여 12 K에서 계산한 이온화에너지 E_1 는 53.2 meV로, 이 값은 Cd-빈자리에 치환된 O 혹은 N의 이온화에너지 정도의 값이다. Table 2는 Table 1의 값을 이용하여 구한 여러 가지 방출 피크의 결합에너지와 이온화에너지를 나타내고 있다.

4. 결 론

수직 Bridgman법으로 이단 전기로에서 성장시킨 CdTe 단결정의 X-선 회절 실험과 흡수 및 PL을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상단전기로의 최고온부의 온도를 1150 °C에 고정하고 하단전기로의 온도를 800 °C

로 하였을 때, 온도 기울기는 22.5 °C/cm이었으며, 그 이상의 온도에서는 상단로와 하단로의 중심 거리 때문에 가운데 부분에서 온도가 감소하였다.

2) X-선 회절 실험으로부터 CdTe 단결정의 격자상수 값은 6.482 Å임을 알았고, 상온에서의 광흡수 측정 결과로부터 계산한 밴드갭 에너지는 1.478 eV이었다.

3) 12 K에서 측정된 CdTe 단결정의 PL 스펙트럼으로부터, 양질의 단결정에서 볼 수 있는 (A^0, X)(1.5902, 1.5887 eV), (h, D^0)(1.5918 eV) 그리고 (D^0, X)(1.5928, 1.5932 eV) 방출 피크 들이 분리되는 결과를 얻었고, 자유 엑시톤의 결합에너지가 10 meV일 때, 중성 발광에 의한 결합에너지는 6.8~8.3 meV 영역, 중성 주광에 구속된 결합에너지는 3.8~4.2 meV 영역에서, 중성 주광의 이온화에너지는 15.7 meV, 중성 발광의 이온화에너지는 53.2 meV임을 알았다.

참 고 문 헌

- [1] K. Zanio, Semiconductors and Semimetals, Willardson, Ed., Vol. 13 (Academic Press, New York, 1978) p. 164.
- [2] V.P. Singh, O.M. Erickson and J.H. Chao, J. Appl. Phys. 78 (1995) 4538.
- [3] M.C. Chen and M.J. Bevan, J. Appl. Phys. 78 (1995) 4787.
- [4] S. Seto, A. Tanaka and M. Kawashima, J. Appl. Phys. 64 (1899) 3658.
- [5] R. Frerichs, Phys. Rev. 72 (1947) 594.
- [6] R.O. Bell, N. Hemmet and H.B. Serrze, Nuclear Instrument and methods 117 (1974) 113.
- [7] Z.C. Feng, J. Appl. Phys. 64 (1988) 2595.
- [8] 박효열, 송승빈, 유병길, 진광수, 응용물리 15 (1992) 130.
- [9] S. Yoshimura, H. Nakata, T. Ohmaya, E. Otsuka, J. Li and S. Yuan, Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) 1459.
- [10] T. Koyangi and T. Matsubara, J. Appl. Phys. 61 (1987) 3020.
- [11] M. Jain, Diluted Magnetic Semiconductors, M. Kumar, Ed. (World Scientific, Singapore, 1991) p. 6.
- [12] D.E. Cooper, J. Bajaj and P.R. Newman, J. Crystal Growth 86 (1988) 544.
- [13] J. Lee and N.C. Giles, J. Appl. Phys. 78 (1995) 119.
- [14] E. Cohen and R.A. Street, Phys. Rev. 28 (1983) 7115.
- [15] S. Seto, A. Tanaka, Y. Masa, S. Dairaku and M. Kawashima, J. Appl. Phys. 53 (1988) 1524.
- [16] E. Molva, J.L. Pautrat, K. Saminadayar, G. Milchberg and N. Magnea, Phys. Rev. 30 (1984) 3344.
- [17] J.M. Francou, K. Saminadayer and J. L. Pautrat, Phys. Rev. 41 (1990) 12035.