Journal of the Korean Association of Crystal Growth
Vol. 10, No. 4 (2000) 286-291

A study of faraday rotation for $Cd_{1-x}Mn_xTe$ single crystals

Hyo-Yeol Park
Department of Semiconductor Applications, Ulsan 680-749, Korea
(Received May 2, 2000)

Abstract $Cd_{1-x}Mn_xTe$ singe crystals were grown by the vertical Bridgman method and the Faraday rotations were measured as a function of wavelength and magnetic field. The Verdet constants were evaluated using the result of Faraday rotation. The Verdet constants were maximum at nearly absorption edge and increased for $0 \le x \le 0.38$ but decreased for $x > 0.40$. We found that large Faraday rotation occur in $Cd_{0.62}Mn_{0.38}Te$ at nearly absorption edge wavelength was more useful for a magnetic field sensor than any other crystals, and $Cd_{0.60}Mn_{0.40}Te$ crystal was useful in this application when wavelength is He-Ne laser wavelength.

$Cd_{1-x}Mn_xTe$단결정의 Faraday 회전에 관한 연구

박효열
울산과학대학 반도체 응용과, 울산 680-749
(2000년 5월 2일 접수)

요 약 수직 Bridgman 법으로 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정을 성장시켜 자기장과 파장을 변화시키면서 Faraday 회전을 측정하였다. Verdet 상수값은 포톤의 에너지가 높은 쪽으로 이동함에 따라 흡수단 근처에서 최대였고, 조성비 x에 따라 증가하다가 $x = 0.40$ 이상에서 감소하였다. $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정을 Faraday 소자로 이용할 경우, 흡수단 근처에서 Faraday 회전이 가장 크게 일어나는 $Cd_{0.62}Mn_{0.38}Te$ 단결정이 적합하고, 광원으로 He-Ne 레이저를 사용할 경우에는 $Cd_{0.60}Mn_{0.40}Te$ 단결정이 유용함을 알 수 있었다.

1. 서 론

II-VI 족 화합물 반도체에서 II족 원소 일부를 Mn, Fe, Co, Ni, Cr 등과 같은 자성원소로 대체하는 화합물 반도체를 DMS(Diluted Magnetic Semiconductors)라 한다[1]. DMS 물질은 운반자의 spin과 자성 이온간의 강한 교환 상호작용으로 인하여 밴드상태의 큰 Zeeman 분리, 큰 Faraday 회전, 그리고 자기 폴라론(magnetic polaron)과 같은 특이한 성질을 가진다[2, 3, 4].

광학적으로 등방성인 물질에 편광된 광을 통과시키고, 그 진행 방향과 평행하게 자기장을 인가하면 광의 편광면이 회전하는 현상을 Faraday 회전이라 한다[5]. Faraday 회전이 크고 광흡수가 적은 물질은 자기장 센서, 광전류 센서, 광 isolator 등 자기광학 장치에 이용되고 있다[6, 7]. 이러한 자기 광학재료는 자성이온을 반도체물질과 alloy하여 성장시키거나, 자기재료를 직접 사용하여 Faraday 회전을 증가시킬 수 있다. 또한 DMS 화합물의 Faraday 회전은 매우 크고, 비자성(nonmagnetic) II-VI 화합물 반도체와는 반대로 회전하며 큰 Faraday 회전은 Mn^{2+} 이온의 d 전자의 스핀과 밴드 전자사이의 교환 상호작용뿐만 아니라 자화(magnetization)에도 의존한다[8]. Faraday 소자에 이용되고 있는 물질은 반자성체 재료인 As_2S_2 글래스, ZnSe, $Bi_{12}SiO_{20}$(BSO), $Bi_{12}GeO_{20}$(BGO)가 있고, 상자성체 재료로는 FR-5 글래스, 강자성체 재료로서는 $Y_3Fe_5O_{12}$(Yttrium Iron Garnet : YIG), $((YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$ 등이 있다[9]. 이들 재료 중에서 실용적인 것은 특히 온도 특성이 우수한 BGO, BSO, ZnSe 단결정 등의 반자성 재료 등이 있다. 강자성체 재료 중에서는 내부자화가 매우 큰 YIG 결정은 1.3 μm 파장에서 Faraday 회전각이 0.38(deg/G·cm)로서 실용화되고 있지만, 1 μm 파장 이하에서 감쇠상수가 급격히 증가하기 때문에 가시광선 영역에서는 Faraday 소자로서 적당하지 못하다고 알려져 있다[10]. 가시광선 영역에서 효율이 좋은 반도체 재료중에는 ZnSe, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 등이 있다[11]. 이들 중에서 $Cd_{1-x}Mn_xTe$는 ZnSe 보다 큰 Faraday

회전을 갖고, 0~25 GHz의 주파수 영역에서 동작이 가능하며[12] 전기 절연성, 전자 잡음성과 25T(Tesla) 이상에서도 선형성과 온도특성이 우수하다[13].

본 실험에서는 수직 Bridgman법으로 성장시킨 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정으로 조성비 x에 따라 파장과 자기장을 변화시키면서 Faraday 회전을 측정하였다.

2. 실 험

본 실험에서는 수직 Bridgman법으로 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정을 성장하였으며 그 방법은 다음과 같다. 전기로의 최고 온도 1150°C가 전기로의 정중앙이 되게 하였고 온도기울기는 28.3°C/cm이었다. 산소-프로판 불꽃으로 내경 9 mm 두께 1 mm 길이 15 cm인 석영관의 끝을 seed가 생길 수 있도록 원추형으로 가공한 다음 아세톤을 부어 여러 차례 세척한 후 다시 산소-프로판 불꽃으로 가열하여 석영관이 완전히 불투명하게끔 탄소코팅 하였다. Mn과 Te는 공기중에서 쉽게 산화하므로 5 % HNO_3와 5 % HCl로 산화피막을 제거한 후 이 속에 Cd(5N)와 Te(5N) 그리고 Mn(5N)를 조성비로 섞은 시료를 넣고 10^{-5} Torr 진공 봉입하였다. 진공 봉입한 석영관을 알루미나 튜브에 넣어 인하장치에 고정시키고 수동으로 내려 전기로 중앙에 설치한 후 결정성장 장치를 가동시켰다. 그리고 결정성장은 시료의 온도를 실온에서부터 1°C/min의 율로 600°C까지 상승시킨 후 4시간 동안 유지시켰다. 이렇게한 이유는 Cd의 융점이 320.9°C, 비등점은 766±2°C이고, Te의 융점은 449.8°C, 비등점은 989°C 이므로 비등점 이상에서는 Cd의 증기압에 의해 석영관이 파괴될 위험이 있으나 600°C에서 유지시키면 Cd와 Te가 모두 액상으로 결합할 것으로 기대하였기 때문이다. 그 후 0.5°C/min의 비율로 800°C까지 상승시킨 후 Cd와 Te가 완전히 결합되도록 4시간 동안 유지시킨 후 Mn이 결합된 CdTe에 충분히 용해 되도록 30시간 유지하였다. 다시 0.5°C/min로 각 조성비 융점의 온도보다 50°C를 높여 CdMnTe가 충분히 섞이도록 20시간 유지한 후 1.5 mm/hr로 결정성장을 시작하였다. 결정성장속도가 빠르거나 부위에 따라 다른 결정성장 속도를 가지게되면 radial heat flow에 의한 strain을 유발하여 많은 전위결함을 유발시킨다. 또 반응용기와 접촉면에서 새로운 핵이 생겨 다결정 혹은 (111)면으로 twining을 유발시키는 원인이 된다. 그러므로 본 실험과 같이 1.5 mm/hr의 최적 성장조건을 유지하여야 한다. 또한 고온상태의 CdTe 단결정을 급격히 냉각하게 되면 열응력에 의한 전위결함을 유발시키므로 결정성장이 완전히 끝난 후 상온까지 30°C/hr 율로 서서히 냉각하였다.

수직 Bridgman법으로 성장된 지름 9 mm인 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정을 두께 1 mm로 절단하고 양면을 광학 연마하여 Faraday 회전을 측정하였다. 그리고 X-선 회절실험으로부터 Furdyna[14] 등이 구한 식을 이용하여 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정의 조성비 x를 결정하였으며, 광흡수 스펙트럼은 UV-visible spectrometer(Cary 5. Varian Co. U.S.A.)로 200~1200 nm 영역에서 측정하였다. 그리고 흡수계수는 $\alpha = 2.303 \times O.D/d$로 주어지고, 식 $I = I_0 \exp(-d)$의 양변에 log를 취하면 $\log(I_o/I)$가 optical density(O.D)로 정의되며, 여기서 d는 시료의 두께이다. 이 식에 시료의 두께 d값과 O.D를 포톤 에너지 별로 대입하여 흡수계수 α를 구한 후, $[\alpha(h\nu)]^2$과 $(h\nu)$의 관계를 이용하여 각 조성비에 따른 밴드 갭 에너지를 구하였다. 또한 Faraday 회전 측정에 대한 실험장치는 Tungsten lamp, 단색화 장치, 편광자, 전자석, 해석기, 볼록렌즈, 그리고 검출기로 구성되어 있으며, 일정한 외부 자기장을 시료에 인가하고 파장을 변화시키면서 Faraday 회전각을 측정하였다.

3. 결과 및 논의

조성비 x에 따른 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정의 흡수 스펙트럼을 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에서 조성비가 증가할 수록 흡수단은 높은 에너지 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정은 직접 천이형 이므로, 흡수계수 α와 입사광의 포톤에너지 $h\nu$, 밴드갭 에너지 E_g 사이에는 $[\alpha(h\nu)] \sim (h\nu - E_g)^{1/2}$인 관계가 있고 이 식을 이용하여 흡수 스펙트럼으로부터 구한 조성비 x에 대한 밴드 갭 에너지를 Table 1에 나타내었다. 이 표에서 보는 바와 같이 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정의 밴드갭 에너지는 조성비 x에 따라 증가

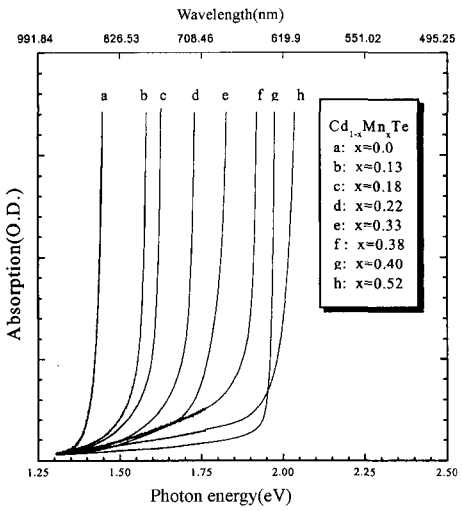

Fig. 1. Absorption spectra of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ single crystals.

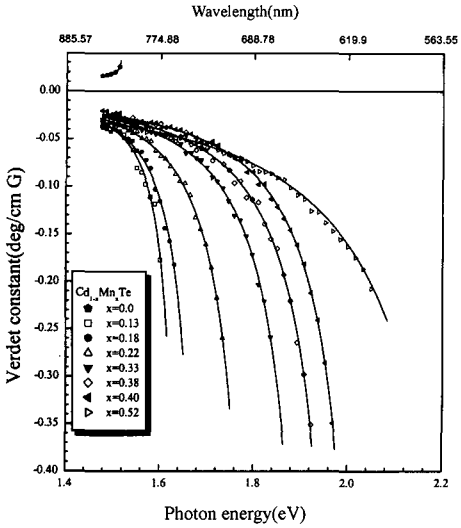

Fig. 2. Verdet constant as a function of photon energy.

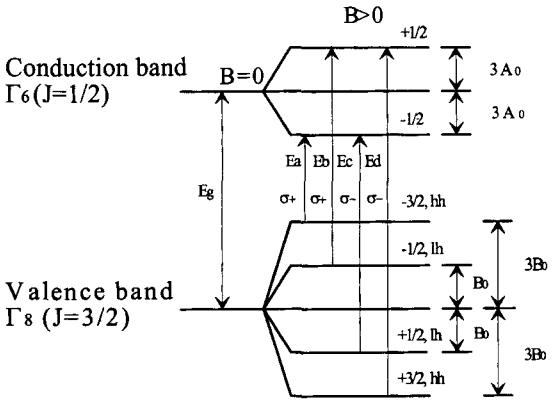

Fig. 3. Band splitting due to an applied magnetic field.

함을 알 수 있다.

Faraday 회전에서 자기장을 만드는 코일에 흐르는 전류와 같은 방향으로 평광면이 회전할 때는 Verdet 상수를 양의 값으로 정의하고 반자성체에서는 Verdet 상수값이 양으로 나타나고 상자성체에서는 음의 값으로 나타나는 것으로 알려져 있다[5].

Faraday 회전에 대한 실험식은

$$\Theta_F = VBl \tag{1}$$

로 주어지고 여기서 Θ_F는 Faraday 회전각, V는 Verdet 상수, B는 자기장의 세기, l은 시료의 두께를 나타낸다. 자기장이 2 kG일 때 식(1)을 이용하여 구한 Verdet 상수값을 파장에 따라 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 조성비 x = 0에서 Verdet 상수 값이 양인 반면 x > 0에서는 음의 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 비자성 반도체(nonmagnetic semiconductor)인 CdTe에 Mn을 첨가함으로서 상자성체가 되기 때문이다. 또한 포톤 에너지가 증가함에 따라 Verdet 상수값이 증가하여 흡수단 근처에서 최대값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 Mn^{2+} 이온의 d전자의 스핀과 전도대나 가전자대의 운반자의 스핀이 강한 스핀교환 상호작용을 하기 때문이다.

한편 밴드갭 에너지 E_0의 단진자(single oscillator)모델에서 Faraday 회전각은

$$\Theta_F = \left[\frac{\sqrt{F_0}l}{2\hbar c}\Delta E_0\right]\frac{1}{E_0}\frac{y^2}{(1-y^2)^{3/2}} \tag{2}$$

로 주어진다[15]. 여기서 F_0는 진동자의 세기, $y = (E/E_0)$, E는 입사 포톤 에너지 E_0는 자기장이 가해 졌을 때 밴드갭 에너지 그리고 ΔE_0는 Fig. 3에서와 같이 E_d와 E_a간의 전이 에너지 차이이다. Zinc blende 구조의 Brillone zone Γ점(즉 k = 0)에서 가장 높은 가전대는 2중 축퇴되어 있고, 가장 낮은 전도대는 단일 축퇴되어 있다. 가전자대는 가벼운 홀과 무거운 홀밴드로 구성되어 있고 이들 밴드들은 각각 up 스핀과 down 스핀으로 구성되어있다. 반면에 전도대는 up 스핀과 down 스핀 전자를 포함하는 단일 밴드(single band)로 구성되어 있다. 가벼운 홀 전자와 전도대 전자는 스핀 양자수 ±1/2 를 가지고 있고, 무거운 홀 전자는 스핀 양자수 ±3/2을 가진다. 우원편광($\widehat{\sigma^+}$)은 스핀 양자수가 증가하는 방향으로 전이가 일어나고, 좌원편광($\widehat{\sigma^-}$)에서는 스핀 양자수가 감소하는 방향으로 전이가 일어난다[16]. 선택률에 의하면 원편광($\widehat{\sigma^+}$, $\widehat{\sigma^-}$)에 대해서는 자기양자수의 변화가 $\Delta m_j = +1$ 또는 -1 일 때 전이가 일어난다[19]. 그러므로 우원편광에 대해서는 전도대와 가전자대 간의 전이는 스핀 양자수가 -2/3 → -1/2로 -1/2 → +1/2로 전이가 일어나고, 좌원편광에서는 스핀 양자수 +2/3 → +1/2로 +1/2 → -1/2로 일어난다. 자기장이 가해지지 않았을 때 스핀 up과 스핀 down의 전자는 같은 에너지를 가진다. 이러한 조건하에서는 좌우편광에 대해서 밴드갭 에너지와 유전함수는 같지만, 자기장이 가해지면 자기장에 따른 전자의 스핀 배열은 이 그림과 같이 분리가 일어난다. 여기에서 Γ_6 전도대의 최소점은 $E_g \pm 3A_0$에 의하여 주어진 두 개의 준위로 분리되고, Γ_8 가전대의 최대점은 $\pm B_0$와 $\pm 3B_0$로 주어진 4개의 준위로 분리된다. E_g는 자기장을 가하지 않을 때 k = 0에서 밴드갭 에너지 이고, A_0와 B_0는 인가한 자기장에 의한 전도대와 가전대의 에너지 변화를 나타내는 에너지이다. E_a와 E_b는 우원편광과 관련있는 에너지 갭이고, E_c와 E_d는 좌원편광과 관련있는 에너지 갭이다. E에 대한 값은 다음과

$$E_a = E_0 + 3B_0 - 3A_0, \tag{3a}$$

$$E_b = E_0 + B_0 + 3A_0 \quad (3b)$$

$$E_c = E_0 - B_0 - 3A_0, \quad (3c)$$

$$E_d = E_0 - 3B_0 + 3A_0 \quad (3d)$$

같이 결정된다[17].

여기서 $A_0 = (1/6)(\alpha M/g_{Mn}\mu_B)$, $B_0 = (1/6)(\beta M/g_{Mn}\mu_B)$ 이고, α와 β는 각각 전도대 전자와 가전자대 전자에 대한 교환 상수(exchange constant)이고, M은 단위 부피당 자화(magnetization), g_{Mn}은 Mn^{2+} 스핀의 Lande g factor, 그리고 μ_B는 Bohr 마그네톤이다. 원편광에서 관측되는 밴드 사이 전이의 에너지들은 이 모델에서 두 개의 성분 E_d와 E_a 사이의 차이다. 이러한 전이는 Faraday geometry에서 관측된 전이고, $Cd_{1-x}Mn_xTe$에 대한 교환 에너지(exchange energy) $N_0\alpha$와 $N_0\beta$에 대한 값은 각각 0.22 eV, -0.88 eV이다[1]. 여기서 N_0는 단위 부피당 Mn^{2+} 이온의 수이다. 식(3) 과 $N_0\alpha$, $N_0\beta$ 값에 의하면 a와 d의 전이가 b와 c의 전이 보다 3배 더 일어날 확률이 높다. 또한 $Cd_{1-x}Mn_xTe$에서 A_0, B_0의 크기와 부호에 따라 b와 c의 전이는 zero field에 가까워짐에 따라 일어나고, 반면 a와 d 전이는 E_0 위와 아래에서 일어난다. 따라서 Faraday 효과는 a와 d 전이가 더 중요하게 된다. 그러므로 식(3)에서 ΔE_0는

$$\Delta E_0 = E_a(\widehat{\sigma_+}) - E_d(\widehat{\sigma_-}) = \frac{\beta - \alpha}{g_{Mn}\mu_B}M \quad (4)$$

와 같다. 식(4)를 식(2)에 대입하고 Verdet 상수를 구하면

$$V(E) = \frac{D}{E_0}\frac{y^2}{(1 - y^2)^{3/2}} \quad (5)$$

로 주어진다. 여기서 변수 D는 $D = \left[\frac{\sqrt{F_0}l}{2\hbar c}\frac{\beta - \alpha}{g_{Mn}\mu_B}M\right]$ 이다. 이식에서 M은 $M = \chi\beta$로 나타나며 χ는 자기 감수율이고, B는 자기장의 세기이다.

Table 1
Single-oscillator model parameters for $Cd_{1-x}Mn_xTe$ at room temperature

Composition x	Absorption edge (E_g) (eV)	Fitting parameter	
		E_o (eV)	$D(\times 10^{-3}$ deg · eV/cm)
0.00	1.416	1.504	0.04
0.13	1.566	1.693	-10.45
0.18	1.604	1.748	-19.01
0.22	1.725	1.846	-22.72
0.33	1.804	1.972	-28.93
0.38	1.894	2.046	-33.44
0.40	1.955	2.092	-35.94
0.52	2.004	2.353	-76.53

Fig. 2에서 실선은 식(5)를 이용하여 짜맞춤한 것을 나타내고, 여기서 구한 상수값을 Table 1에 나타내었다. 이 표에서 조성비 x가 증가함에 따라 자기장을 가했을 때의 상수값 E_0과 D 값이 증가함을 알 수 있다. 조성비 x가 증가함에 따른 E_0의 증가는 흡수단이 단파장쪽으로 이동함과 관련 있고, 같은 조성비에서 E_g와 E_0 차이가 나는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 반도체에 자기장이 가해졌을 때와 가해지지 않았을 때 밴드갭 에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$E_o(B, T) = E_g(B = 0) + \Delta E_g \quad (6)$$

여기서 $\Delta E_g = (1/2)x(\alpha - \beta)\ N_0 <S_z>$, x는 Mn의 조성비, $<S_z>$는 자기장이 가해진 방향에 따라 자성 이온의 스핀 정렬을 나타낸다. 또한 $Cd_{1-x}Mn_xTe$에서 $\alpha > 0$, $\beta < 0$ 이므로 ΔE_g는 양의 값이므로 식(6)에서 E_o는 E_g 보다 크게 나타난다. 또한 D 값의 증가는 자기 감수율에 관련된 양으로서 조성비 x에 의존하고, 이 값은 Mn의 조성비가 증가함에 따라 결정의 자기 감수율이 커지기 때문이다[15]. Fig. 4는 각 조성비에 해당하는 파장을 흡수단 근처에 고정시키고, 자기장의 세기에 따른 결정의 단위 두께당 Faraday 회전을 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 자기장의 세기가 증가함에 따라 Faraday 회전각이 선형적으로 변함을 알 수 있다. 또한 CdTe의 회전각은 자화 전류의 방향과 같은 방향인 양이였고, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정은 음으로 나타났으며, Mn의 조성비가 증가함에 따라 Faraday 회전은 x = 0.38까지 증가하다가 다시 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 실선은 식(1)을 이용하여 짜맞춤한 것으로서 기울기는 각 결정의 Verdet 상수를 나타낸다. Mn의 조성비가 0.38과 0.40인 경우에 그래프의

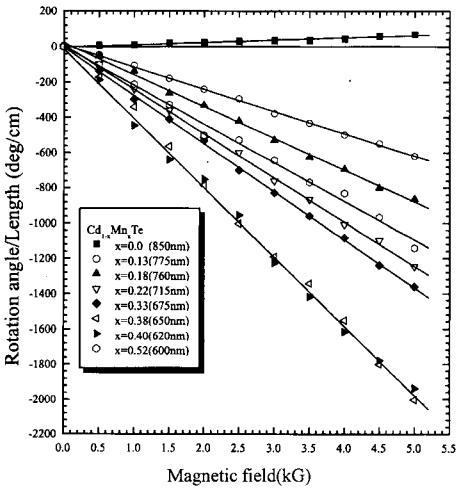

Fig. 4. Faraday rotation as a function of magnetic field at near absorption edge.

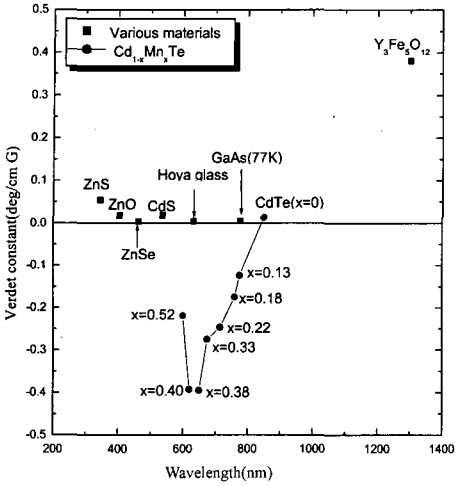

Fig. 5. Verdet constant of the $Cd_{1-x}Mn_xTe$ single crystals and the various materials.

기울기가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 측정한 Verdet 상수의 값들과 여러 가지 물질들의 Verdet 상수값을 Fig. 5에 나타내었다[12]. 이 그림에서 보는 바와 같이, 650 nm의 광원을 사용한 x = 0.38 결정의 Verdet 상수의 값이 -0.395 deg/cm · G로서 가장 크다는 것을 알 수 있으며, 620 nm의 광원을 사용한 0.40 결정의 경우에도 -0.393 deg/cm·G의 큰 값이 나타남을 알 수 있다. 이 그림에서 $Cd_{1-x}Mn_xTe$와 여러 가지 물질의 Verdet 상수값을 비교하여 보면 가시광선 영역에서는 $Cd_{1-x}Mn_xTe$의 값이 훨씬 큼을 알 수 있다. Fig. 6은 632.8 nm He-Ne 레이저 광원에 대한 x = 0.40, 0.52인 단결정의 Faraday 회전을 나타내고 있다. 두 단결정 $Cd_{0.60}Mn_{0.40}Te$와 $Cd_{0.48}Mn_{0.52}Te$

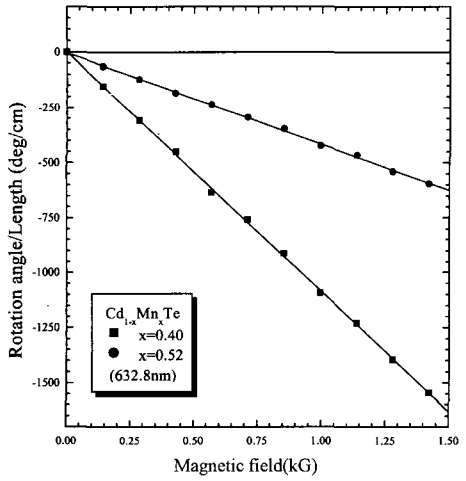

Fig. 6. Faraday rotation of the $Cd_{0.38}Mn_{0.52}Te$ and the $Cd_{0.60}Mn_{0.4}Te$ single crystals at He-Ne layser wavelength.

의 Faraday 회전을 보면, 자기장의 변화에 대하여 좋은 선형성을 띠고 있으며, Mn의 조성비가 0.40인 결정이 훨씬 더 많이 회전하였음을 알 수 있다. x = 0.38 이하의 결정에 대해서는 흡수단이 레이저 파장의 632.8 nm에 미치지 못하므로 측정이 불가능했다. 이상의 결과들을 종합해 보면 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정은 자기장의 변화에 따라 큰 Faraday 회전이 생겼으며 선형성이 좋음을 알 수 있다. 그러므로 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정은 자기장을 측정하는 센서로 이용할 수 있는 유용한 물질이라 할 수 있다. 따라서 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정을 자기장 센서로 이용할 경우, 자기장의 변화에 대해 Faraday 회전각이 선형적일 뿐만 아니라, 자기장의 작은 변화에도 광의 회전이 많이 일어나는 $Cd_{0.62}Mn_{0.38}Te$ 단결정을 사용하는 것이 유용할 것으로 생각된다. 그렇지만, 상용으로 많이 이용되는 632.8 nm He-Ne 레이저의 광원을 사용할 경우에는 Faraday 회전이 크게 일어나는 $Cd_{0.60}Mn_{0.40}Te$ 단결정을 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

4. 결 론

$Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정의 Faraday 회전을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 밴드갭 에너지는 조성비 x가 증가함에 따라 증가하였고 Faraday 회전에서 CdTe 단결정의 Verdet 상수는 양의 값으로 측정되었고, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (x > 0)는 음의 값으로 나타났다. 그리고 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정의 Verdet 상수값은 포톤의 에너지가 높은 쪽으로 이동함에 따라 흡수단 근처에서 최대였고, 조성비 x에 따라 증가하다가 x = 0.40 이상에서 감소하였다. 또한, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 단결정을 자기장 센서로 이용할 경우 일반적으로 Faraday 회전이 가장 크게 일어나는 $Cd_{0.62}Mn_{0.38}Te$ 단결정을 사용하는 것이 유리하고 He-Ne 레이저 광원을 사용할 경우에는 $Cd_{0.60}Mn_{0.40}Te$ 단결정을 사용하는 것이 유용하다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 울산과학대학 산학협동 연구비에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

[1] J.K. Furdyna, J. Appl. Phys. 64 (1982) R29.
[2] B.B. Krichevtsov, R.V. Pisarev, A.A. Rzhevskil and V.N. Gridnev, JETP LETTERS 67 (1998) 602.
[3] L. Bryja, M. Ciorga, J. Misiewicz, A. Zaleski, P. Becla and W.C. Chou, J. Cryst. Growth 197 (1999) 694.

[4] W.E. Hagston, T. Stirner and J. Miao, J. Appl. Phys. 82 (1997) 5635.
[5] S. Nudelman and S.S. Mitra, Optical Properties of Solid (Plenum press, New York, 1998) p.85.
[6] E. Oh, A.K. Ramdas and J.K. Furdyna, J. Luminescence 52 (1992) 183.
[7] A.E. Turner, R.L. Gunshor and S. Datta, Applied Optics 22 (1983) 3152.
[8] S.V. Melnichuk, A.I. Savchuk and D.N. Trifonenko, Phys. Solid State 38 (1996) 731.
[9] J.K. Furdyna and J. Kossut, Semiconductors and Semimetals, Vol. 25 (Academic Press, New York, 1988).
[10] S.T. Krsch, W.A. Biolsi, S.L. Blank, R.J. Martin, P.M. Bridenbaugh and P. Grabbe, J. Appl. Phys. 52 (1981) 3190.
[11] A. Ebina, T. Koda and S. Shionoya, J. Phys. Chem. Sloids 26 (1965) 1497.
[12] J.J. Dubowski, K. Lebecki and M. Buchanan, IEEE Transaction on Instrument on Measurements 42 (1994) 332.
[13] E. Muller and W. Gebhardt, IEEE Transctions on Magnetics 29 (1993) 82.
[14] J.K. Furdyna, J. Appl. Phys. 53 (1982) 7637.
[15] D.U. Bartholomew, J.K. Furdyna and A.K. Ramdas, Phys. Rev. B34 (1986) 6943.
[16] J. Singh, Physics of Semiconductors and Their Hetrostructures (McGraw-Hill international edtions, 1996) p.145.
[17] A. Ginter and R. Galazka Phys. Status Solilide, B89 655 (1985).