

## 전자선 증착기술에 의해 성장된 다결정 CdSe 박막의 광학적 특성

김 화 민

대구효성가톨릭대학교 물리학과  
(1999년 10월 26일)

### Optical properties of the polycrystalline CdSe thin films grown by the electron-beam evaporation technique

Hwa-Min Kim

Dept. of Physics Catholic University of Taegu-Hyosung  
(Received October 26, 1999)

**요 약** - 전자선 증착 기술에 의하여 유리기판 위에 성장된 다결정 CdSe 박막의 광학적 띠틈격, 굴절률, 그리고 흡광계수와 같은 광학 상수들이 400~2,500 nm의 파장 영역에서 결정되었다. CdSe 박막들의 두께와 기판온도 변화에 따른 광학상수들의 변화를 설명하기 위하여 성장조건이 다른 CdSe 박막들에 대한 AFM상으로부터 표면 미세구조 매개변수들을 관측하였으며, 그 결과 광학상수들의 변화는 CdSe 박막의 표면 morphology 변화와 밀접한 관계가 있음을 보여준다. 박막 두께에 따른 광학적 띠틈격의 감소는 결정립의 증가에 따른 양자 크기 효과와 관계가 있으며, CdSe 박막의 굴절률은 결정립이 증가함에 따라 감소한다. 그리고 CdSe 박막의 굴절률의 분산경향은 Sellmeier의 분산식에 의한 단순 진동자 모델을 따른다.

**Abstract** - The optical constants ( $E_g^d$ ,  $n$ ,  $K$ ) of the polycrystalline CdSe thin films deposited on the glass substrate by the electron-beam evaporation technique are determined over 400~2,500 nm photon wavelengths. In order to explain the variation of the optical constants with film thickness and substrate temperatures, the surface microstructural parameter are investigated by AFM(atomic forced microscope) images for the films deposited by different growth conditions. It is shown that the variations of optical constants are close related to changes of the surface morphology of the CdSe thin films. The decrease in the band gap with film thickness is connected with quantum size effects due to increase of the grain size. The refractive index of CdSe films decrease with increasing the grain size of the films, and the dispersion of the refractive index followed a single oscillator model according to the Sellmeier formulation.

### 1. 서 론

II-VI족 화합물 반도체는 photoresistor, 이중접합소자, 광전소자 그리고 SAW(surface acoustic wave)소자 등의 응용에 있어서 여러해 동안 많은 관심이 되어왔다 [1, 2]. 특히 CdSe 박막은 CdS 박막과 더불어 CuInSe<sub>2</sub> 대양전지의 window 물질로서 많이 이용되고 있다 [3]. CdSe가 이와 같이 많은 소자 응용에 대한 잠재력을 갖고 있는 것은 소자제작에 사용하기 적당한 1.7 eV의 띠틈격을 갖고 있고, 또한 다양한 방법으로 박막제작이 가능하기 때문이다

지금까지 CdSe 박막에 대하여 알려져 있는 구조적

특징은 NaCl과 운모, BaF<sub>2</sub>, silica, 그리고 유리 기판 위에 성장된 CdSe 박막들은 wurtzite(hexagonal) 구조를 갖는 반면 [4-6], 다결정 CdSe 기판 위에 성장된 경우에는 sphalerite(cubic) 구조를 갖는다 [7]. Ludeke와 Paul은 각각의 구조를 갖는 CdSe 박막에 대하여 자외선 영역에서의 광투과도를 측정하여  $\Lambda_3$ - $\Lambda_1$  천이의 스핀-궤도 분리를 cubic(0.26 eV)구조와 hexagonal (0.29 eV)구조에 대하여 계산하였다. 또한 이들은 wurtzite CdSe 박막에 대한 광투과도 측정을 기초로하여 이 물질에 대한 띠틈구조와 광구조를 제시하였다 [6]. CdSe 박막의 광학적 특성으로는 Thutupalli와 Tomlin [8] 그리고 El-Shazly [9]가 진공증착법에 의하여 유리

와 석영기판 위에 성장된 CdSe 박막들에 대한 광투과도 측정으로부터 광학상수들( $n, K$ )의 평균 값을 보고한 반면, Shalhan과 Muller는 광투과도와 반사도를 동시에 측정하여 다결정 CdSe 박막의 두께에 따른 광학상수들의 변화를 관측하였다 [10]. 이들은 매우 얇은 CdSe 박막들(16~166 nm)에 대해서만 두께에 따른 광학상수들의 변화를 관측하였으며, 이 변화에 대한 적절한 설명은 하지 못했다. 최근, El-Shazly 등은 유리기판 위에 진공 증착된 CdTe 박막의 굴절률이 박막의 두께에 따라 변하지만, 32 nm 이상의 두께에서는 굴절률의 두께 의존성이 없다는 유사한 결과를 보고하였다 [11].

이와 같이 II-VI족 화합물 반도체 박막의 두께에 대한 광학상수들의 변화에 대한 연구는 많은 논란이 되어 오고 있으며, 이에 대한 명확한 설명이 이루어지지 않고 있다. 본 실험에서는 유리기판 위에 전자선 증착법으로 성장된 CdSe 박막들의 두께와 기판온도에 따른 광학상수들의 변화를 광투과도 측정으로부터 조사하고, 그 결과를 AFM 상과 비교하여 광학상수들의 변화가 박막 성장시 표면의 미세구조와 결정립의 크기와 밀접한 관계가 있음을 설명하고, 또한 간단한 진동자 모델을 사용하여 CdSe 박막의 굴절률 분산을 설명한다.

## 2. 실험

그림 1은 본실험에서 사용한 전자선 증착 장치를 나타낸 것이다. 증착용 타겟트는 CdSe 분말(Aldrich Chem. Co. 99.999%)을 500 kg/m<sup>2</sup>로 압축하여 만든 실린더 모양의 pellet을 카본 보트에 넣고 10<sup>-5</sup> Torr의 진공과 400°C의 온도에서 30분 동안 고형화 시켰다. 기판은 Corning 7059 유리를 증류수, 아세톤 순으로 초음파 세척한 후, 끓는 알코올로 세척한 후, 질소 개스로 잔류 불순물을 제거하였다. 증착할 때 진공장치 내부의 진공도는 확산펌프에 연결된 냉각트랩에 액체질

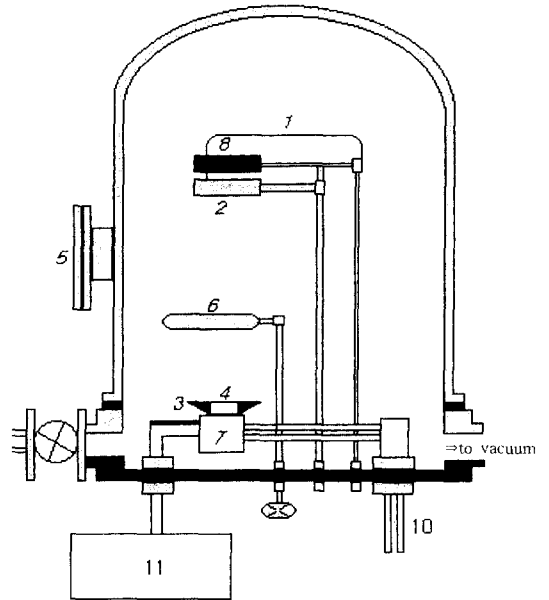


그림 1. Schematic diagram for electron-beam evaporation system. 1. thermocouple, 2. substrate, 3. carbon basket, 4. pellet, 5. window, 6. shutter, 7. electron gun, 8. heater, 9. gas-inlet valve, 10. cooling system, 11. power supply.

소를 사용하여  $1 \times 10^{-6}$  Torr를 유지하였다. 증착하는 동안 타겟트와 기판 사이는 28 cm를 유지하였다.

CdSe 박막들의 두께에 변화를 주기 위해서는 전자총의 방출 전류와 증착 시간을 조절하였으며, 표 1과 2에 시료의 증착 조건을 각각 나타내었다.

여기서  $V_{power}$ ,  $I_{target}$  그리고  $T_{sub}$ 는 각각 가속전압, 전자총과 타겟트사이의 전류 그리고 기판온도를 나타낸 것이다. 증착시 기판의 온도조절에는 할로겐-텅스텐 램프(300W×3)와 copper-constantan 열전대를 PID 온도 조절 장치에 연결하여 사용하였다.

위에서 제작된 CdSe 박막들의 표면 미세구조 매개변수들은 AFM(DI, MN-SPM Nanoscope)상으로부터 관측하였으며, 광학상수들을 계산하기 위한 광투과도 측정

표 1. Evaporation conditions for the CdSe thin films with different thickness

sample number	thickness (nm)	emission current (A)	deposition time (min.)	$V_{power}$ (KV)	$I_{target}$ (mA)	$T_{sub}$ (K)
a	340	8	10	4	9.8	300
b	450	8	15	4	9.8	300
c	650	9	15	4	13.0	300
d	800	8	30	4	9.8	300

표 2. Evaporation conditions for the CdSe thin films with different substrate temperatures

sample number	thickness (nm)	emission current (A)	deposition time (min.)	V <sub>power</sub> (KV)	I <sub>target</sub> (mA)	T <sub>sub.</sub> (K)
a	340	8	10	4	9.8	300
b	320	8	10	4	9.8	400
c	360	8	11	4	9.8	500
d	350	8	12	4	9.8	630

은 UV-Vis-Nir spectrophotometer(Cary-5G, Varian)를 사용하여 400 nm에서 2,800 nm까지의 파장 영역에서 이루어 졌으며, 광투과도 측정시 입사광은 박막에 수직으로 통과시켰다. 그리고 측정된 광투과도로부터 변형포락선법(Modified envelope method)을 사용하여 굴절률과 두께를 각각 계산하였다.

### 3. 결과 및 논의

그림 2는 상온에서 증착된 두께가 다른 4개의 CdSe 박막들의 AFM 상을 나타낸 것이다. 각 시료에 대한 미세구조 매개변수들은 표 3에 나타내었다. 시료 (a), (b) 그리고 (d)의 경우, 결정립의 크기가 거의 비슷한 반면, 시료 (c)는 시료 (d)보다 얇음에도 불구하고, 결정립의 크기가 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 이는 표 1에서 보는 바와 같이 박막 성장시 전자총(electron gun)의 방출 전류, 증착률, 그리고 타겟 제작시 소결 온도와 같은 성장조건에 차이에 의한 것으로 생각된다. 박막 시료의 표면 거칠기(rms roughness) 또한 결정립의 크기 변화와 거의 비슷한 양상을 보여준다.

그림 3은 각각 비슷한 두께를 가지는 반면, 기판온도를 달리하여 성장된 CdSe 박막들의 AFM상을 나타낸 것이다. 상온(300 K)에서 성장된 CdSe 박막의 결정성은 기판에 수직 {002} 방향으로 성장된 다결정인 반면, 기판온도가 증가함에 따라 결정성은 기판과 평행 {112} 한 방향의 hexagonal 형으로 증가함과 동시에 처음의 {002} 방향도 함께 증가한다. 다만 630 K의 경우는 500 K에서 성장된 박막에 비하여 {002} 방향은 오히려 감소하였으며, {112} 방향은 훨씬 증가한 것을 볼 수 있다. 이 결과는 XRD 측정으로부터도 확인되었다. 기판온도에 따른 결정립 크기와 표면 거칠기는 표 4에 나타내었으며, 두께 의존도되는 달리 기판온도가 증가함에 따라 현저하게 증가한 것을 알 수 있다.

그림 4는 두께가 다른 4개의 CdSe 박막들의 투과

스펙트럼을 나타낸 것이다. 700 nm 근처에서 입사광을 흡수하기 시작하면서 투과율이 지속적으로 감소한다. 흡수강 적은 파장 영역에서 나타나는 투과율 곡선의 진동은 박막을 투과하는 빛의 간섭효과 때문에 나타나는 것이다. 이 때의 투과율 T는 파장에 따라 다음 식으로 나타낼 수 있다 [13-15].

$$T = \frac{16n_a n_g n^2 X}{R_1^2 + R_2^2 X^2 + 2R_1 R_2 X \cos(4\pi nt/\lambda)} \quad (1)$$

$$X = \exp(-4\pi Kt/\lambda) = \exp(-\alpha t) \quad (2)$$

여기서

$$R_1 = (n + n_a)(n_g + n)$$

$$R_2 = (n - n_a)(n_g - n)$$

이고,  $\alpha$ 는 흡수계수, K는 흡광계수(extinction coefficient), t는 박막의 두께,  $\lambda$ 는 입사광의 파장을 각각 나타내며, n,  $n_g$ ,  $n_a$ 는 각각 박막, 공기 그리고 기판의 굴절률이다. 본 실험의 경우 공기와 유리의 굴절률은 각각 1과 1.52를 대입하였다. 투과율 곡선의 극대치와 극소치는 다음의 간섭 조건이 만족될 때 나타난다.

$$4\pi nt = m\pi \quad (3)$$

여기서 m은 두 극대치 사이의 진동수이다. 이 식을 이용하면, 각 파장에 대한 굴절률은 다음 식으로부터 구할 수 있다 [13-16].

$$n = [N + (N^2 - n_a^2 n_g^2)]^{1/2} \quad (4)$$

여기서

$$N = \frac{n_a^2 + n_g^2}{2} + 2n_a n_g \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} T_{\min}} \text{ 이고,}$$

각각의 파장에 대응하는  $T_{\max}$ 와  $T_{\min}$ 은 그림 4의 투과율 곡선의 극대치 또는 극소치 끼리 연결한 포

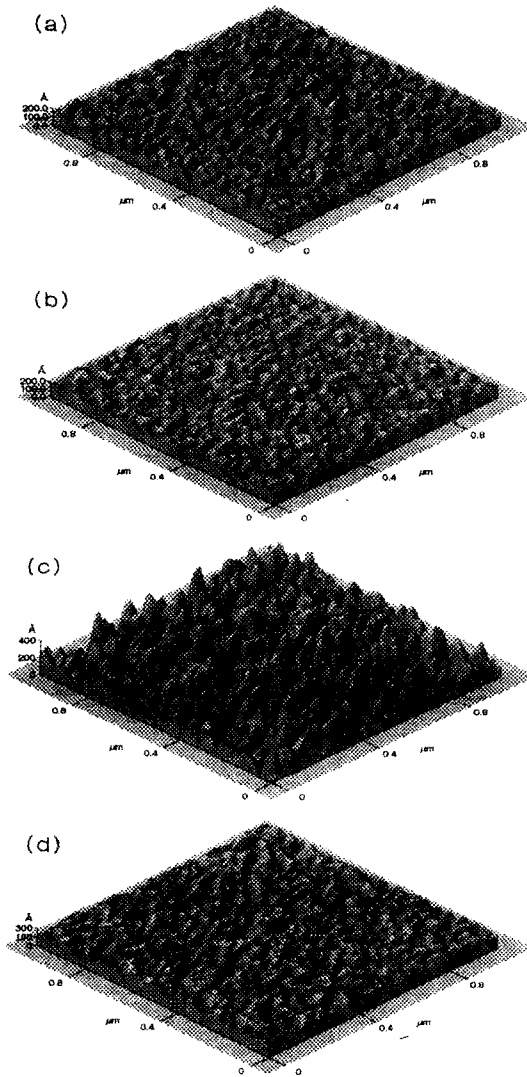


그림 2. AFM images of (a) 340 nm (b) 450 nm (c) 650 nm (d) 800 nm CdSe thin films deposited at 300 K.

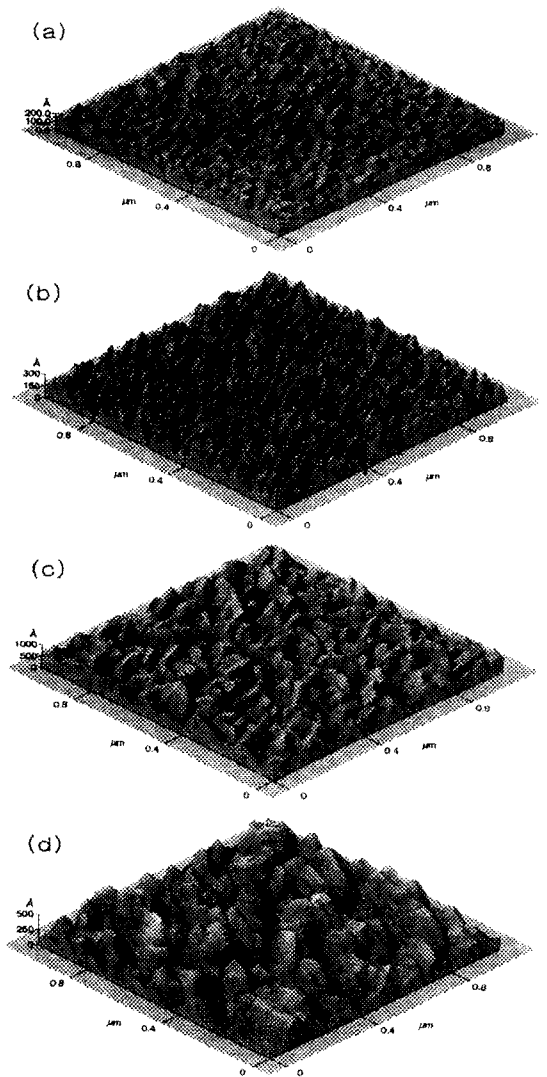


그림 3. AFM images of CdSe thin films deposited at (a) 300 K (340 nm) (b) 400 K (320 nm) (c) 500 K (360 nm) (d) 630 K (350 nm).

락선(envelope)으로 부터 구할 수 있다. 한편, 박막의 두께는 파장에 관계없이 일정한 값을 가지기 때문에 투과율의 극대치와 극대치(또는 극소치와 극소치)의 관계식 (3)을 이용하면, 박막의 두께는 다음식으로부터 구할 수 있다.

$$t = \frac{m\lambda_1\lambda_2}{2[n(\lambda_1)\lambda_2 - n(\lambda_2)\lambda_1]} \quad (5)$$

여기서  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 극대치가 나타나는 파장이며,  $n(\lambda_1),$

$n(\lambda_2)$ 는 각각 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에서의 굴절률을 나타낸다. (5)식으로부터 계산된 CdSe 박막들의 두께를 Table 1에 나타내었으며 이 값들은 간섭 현미경으로 부터 직접 측정된 값들과 거의 일치함을 확인하였다.

투과 스펙트럼의 흡수단 영역에서는 투과율이 거의 지수적으로 변하므로 흡수계수  $\alpha$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$T = A \exp(-\alpha t) \quad (6)$$

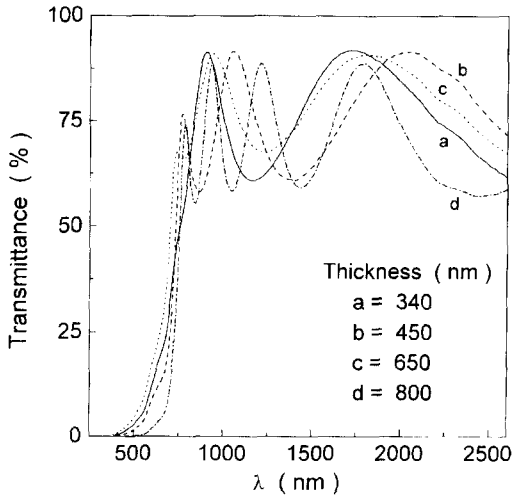


그림 4. Transmittance spectra for (a) 340 nm (b) 450 nm (c) 650 nm (d) 800 nm CdSe thin films deposited at 300 K.

여기서

$$A = \frac{16n_a n_g (n^2 + K^2)}{[(n_a + n)^2 + K^2][(n_g + n)^2 + K^2]}$$

이다. 흡수단 근방에서 A는 거의 1이기 때문에 박막의 두께를 알면 (6)식으로부터  $\alpha$  값을 계산할 수 있다. 한편  $\alpha$ 와 입사광의 에너지  $h\nu$  사이의 관계식은 직접천이와 간접천이에 대하여 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다 [12-16].

$$\alpha h\nu = C_1 (h\nu - E_g^d)^{1/2} \tag{7}$$

$$\alpha h\nu = C_2 (h\nu - E_g^i)^2 \tag{8}$$

여기서  $C_1, C_2$ 는 상수들이고,  $\alpha = 4\pi K/\lambda$ 는 흡수계수, 그리고  $E_g^d, E_g^i$ 는 각각 직접천이 띠간격과 간접천이 띠간격을 나타낸다.

그림 5는 (7)식을 이용하여 CdSe 박막들의 두께변화에 따른  $(\alpha h\nu)^2$  대  $h\nu$ 의 관계를 나타낸 것이다. 한편, (8)식에 의한  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  대  $h\nu$ 의 그래프는 광 흡수 스펙트럼의 어느 부분에서도 직선을 나타내지 않는 것이 확인되었기 때문에 대부분의 진공증착된 CdSe 박막은 간접천이 보다는 직접천이 띠간격을 나타내며, 이는 Kobayashi [20] 등에 의하여 의하여 제안된 CdSe의 에너지-밴드 모델과도 일치한다. 그림 5에서 직선 부분을

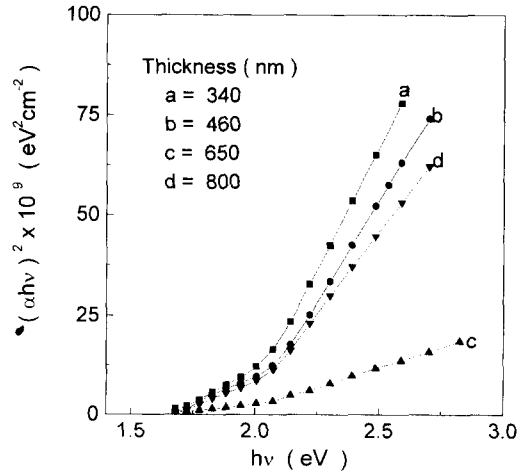


그림 5.  $(\alpha h\nu)^2$  vs  $h\nu$  plots for CdSe thin films with various thickness.

의사하여  $h\nu$ 축과 교차하는 값으로부터 각 박막들의 광학적 띠간격을 구할 수 있다. 그런데 여기서 주목할 사실은 직접천이에 의한 광학적 띠간격을 나타내는 직선 부분이 두 개 나타나는 것을 볼 수 있다. 그래프의 아래 영역에 나타나는 직선부분에 의한 직접천이 띠간격  $E_g^d$ 의 평균값은 1.65 eV인 반면, 그래프 윗 영역의 직선부분이 나타내는 띠간격  $E_g^i$ 의 평균값은 1.95 eV로서 두 값은 약 0.3 eV의 차이를 보여준다. 이 결과는 Ludeke와 Paul이 지적했듯이 CdSe 박막의 가전자 띠에 대한  $\Lambda_3-\Lambda_1$  천이의 스핀-궤도 분리에 의한 것으로 설명할 수 있다 [8].

박막의 두께변화에 따른 광학적 띠간격의 값들을 표 3에 나타내었다. CdSe 박막의 밴드갭은 결정립의 크기가 비슷한 (a), (b), (d) 시료의 경우, 박막의 두께가 증가함에 따라 약간 감소하는 반면, 시료 (c)의 경우는 박막의 두께가 시료 (d)보다 얇음에도 불구하고 밴드갭이 훨씬 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 시료 (d)의 결정립의 크기가 다른 시료에 비교하여 훨씬 크기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 CdSe 박막의 밴드갭의 변화는 박막의 두께 보다는 결정립의 크기에 의하여 많은 영향을 받게됨을 알 수 있다. 이 결과는 U. Pal [12]과 Shaalan [10] 등의 실험과도 일치함을 보여주며, 이들에 의하면 두께 증가는 결정립 크기의 증가를 수반하게 되고, 이는 결국 rms strain의 감소를 초래하기 때문에 띠간격은 벌크 값(1.70 eV)에 가까워지는 것으로

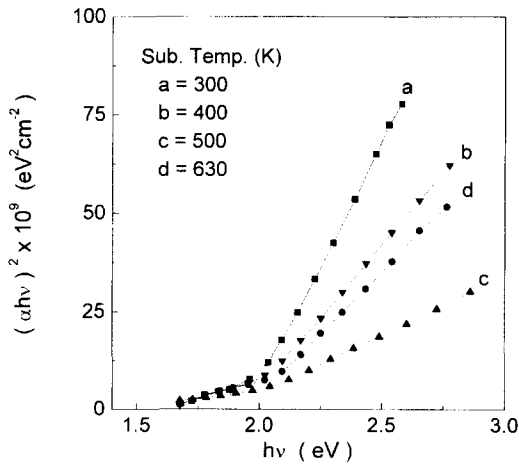


그림 6.  $(\alpha hv)^2$  vs  $hv$  plots for CdSe thin films deposited at various substrate temperatures.

설명하고 있다. 그러나 일반적으로 진공증착된 CdSe 박막은 두께가 증가함에 따라 Cd 성분이 더 많이 초과되는 것으로 알려져 있다 [12]. 따라서 CdSe 박막의 띠간격의 변화에 대한 또 다른 요인으로서 박막에 포함된 Cd와 Se의 성분비가 다른 것도 원인이 될 수 있지만, 상온에서 증착된 CdSe 박막의 경우, 초과된 양은 띠간격의 변화를 가져오기에는 아주 적은 양으로 알려져 있다.

한편, 결정립 크기에 따른 띠간격의 변화는 개개의 colloidal 입자들이 액정 또는 유리에서 분산되는 colloidal 반도체에서도 나타나며, 이는 3차원 양자크기 효과에 의하여 결정립의 크기가 감소함에 따라 띠간격이 증가하는 것으로 설명하고 있다 [17]. 현재, 많은 실험 결과에 의하면 CdSe 박막의 경우 띠간격은 양자크기 효과에 의하여 벌크의 띠간격보다 0.5 eV까지 증가할 수 있는 것으로 알려져 있다 [18-19].

그림 6은 기판온도를 달리하여 성장된 CdSe 박막에 대한  $(\alpha hv)^2$  대  $hv$ 의 그래프를 나타낸 것이다. 이들 곡선들의 모양은 실온에서 증착된 것과 매우 유사하지만, 그림 5에서와 같이 그래프 아래 영역의 직선부분들이 분명하게 관측되지 않는다. 각각의 기판온도에 대응하는 광학적 띠간격( $E_g^o$ )의 값들을 표 4에 나타내었다. 500 K 까지는 기판온도가 증가함에 따라 띠간격이 감소한다. 이는 앞에서 설명된 바와 같이 결정립의 크기 증가에 의한 rms strain의 감소로 설명될 수 있다. 한편, 기판온도가 630 K인 경우에는 결정립의 크기가 크

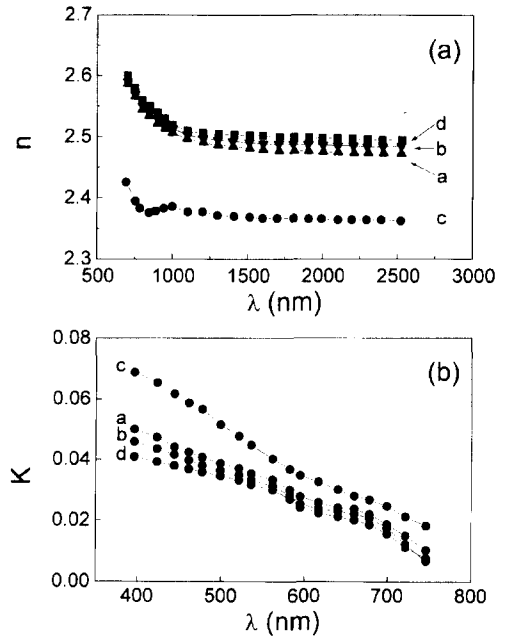


그림 7. Changes of (a) refractive index and (b) extinction coefficient for CdSe thin films with various thickness.

게 증가했음에도 불구하고 띠간격이 오히려 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 기판온도가 증가하면 CdSe 박막의 화학양론적 조성비가 좋아지는 반면, 기판온도가 630 K에서는 화학양론적인 조성비를 훨씬 벗어나기 때문인 것으로 추측된다. U. Pal 등에 의하면 본 실험과 비슷한 두께를 갖는 CdSe 박막이 623 K에서 성장될 경우, Cd와 Se의 성분비가 1.32:1로써 Cd 성분이 30 at % 이상 많이 포함될 수 있음을 보고한 바 있다 [12]. 따라서 이 정도의 성분 변화는 CdSe 박막의 띠간격에 충분한 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다. 이와 유사한 결과가 다른 실험에서도 보여지고 있다 [13]. 이상의 실험 결과로부터 CdSe 박막의 두께 증가 또는 성장시 기판온도 증가에 따른 띠간격의 감소는 성장된 CdSe 박막의 결정립 크기에 의존함을 알 수 있다.

그림 7(a)와 (b)는 실온에서 성장된 CdSe 박막의 두께 변화에 대한 굴절률과 흡광계수의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 굴절률과 흡광계수의 계산은 식 (4)와 (2)를 사용하였다. CdSe 박막의 굴절률 변화 역시 띠간격의 변화와 비슷한 양상을 보여준다. 결정립의 크기가 비슷한 시료들 (a), (b) 그리고 (d)의 경우, 굴절률

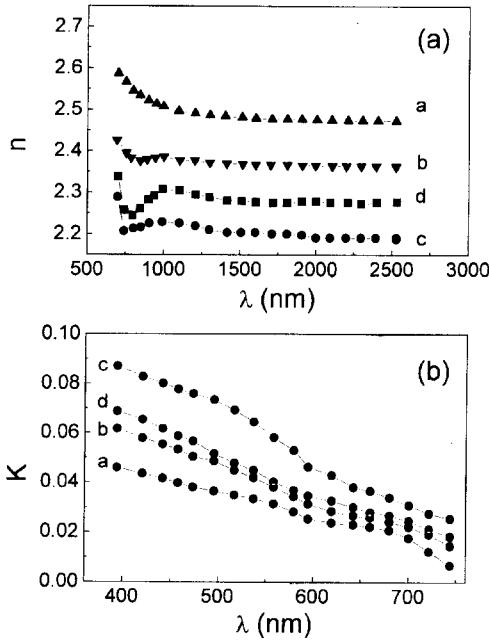


그림 8. Changes of (a) refractive index and (b) extinction coefficient for CdSe thin films deposited at various substrate temperatures.

은 두께가 증가함에 따라 약간씩 증가하지만, 시료 (c)의 굴절률은 크게 감소하였다. 두께증가에 따른 굴절률의 증가는 Shaalan과 Muller의 실험 결과 [11]와는 반대이지만 El Shazly와 El Shair [12]는 진공 증착된 CdTe 박막에 대하여 본 실험과 유사한 변화를 보고하였다. 한편, 굴절률이 크게 감소한 시료 (c)의 경우, 단파장 영역에서 굴절률이 비정상적으로 변하는(n의 감소) 양상을 보여준다. 이와 같은 굴절률의 비정상적 변화는 Manificier [15]와 Pal [12] 등에 의해서도 보고된 바 있으며, 본 실험의 경우, 표면이 불균일한 시료 즉, 표면거칠기가 큰 시료에서 많이 나타난다. 이와 같은 굴절률의 비정상적 변화는 투과도 측정시 박막 표면의 비균질성 때문에 일어나는 산란 효과에 의한 것으로 설명

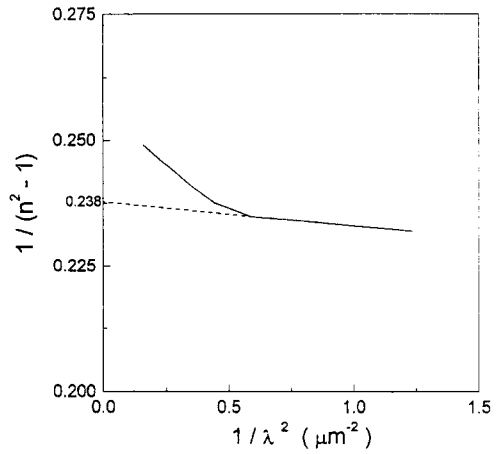


그림 9.  $1/(n^2-1)$  vs  $1/\lambda^2$  plot for a typical CdSe thin film (650 nm) on glass substrate.

될 수 있다. 즉 미시적 비균질 입자들에 의한 다중산란 효과는 반사에 대한 Kramer-Kroniger 해석에 심각한 오류를 줄 수 있기 때문에 결과적으로는 투과스펙트럼에 대한 해석에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다 [21-25].

그림 8(a)와 (b)는 기판온도를 달리하여 성장시킨 CdSe 박막들의 굴절률, n과 흡광계수 K의 변화를 각각 나타낸 것이다. 기판온도에 따른 굴절률의 변화는 실온에서 성장된 CdSe 박막의 두께증가에 의한 굴절률 변화보다 훨씬 현저한 변화를 보여준다. 기판온도가 증가함에 따라 굴절률은 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 기판온도가 증가함에 따라 결정립의 크기가 증가하면서 박막 표면의 rms rough 값이 크게 증가한 시료 (b), (c), (d)의 경우, 단파장 영역에서의 굴절률이 비정상적으로 변하는 것을 알 수 있다. 대부분의 CdSe 박막의 흡광계수, K값이 아주 작은 것을 알 수 있는데, 이 때문에 입사광이 시료를 여러번 통과하게 되고, 그 결과 투과곡선에 간섭무늬가 나타나게 되는 것이다. 이상의 실험 결과로부터 CdSe 박막의 광학 상수들의 변

표 3. Optical parameters and surface microstructural parameters for CdSe thin films with different thickness

thickness (nm)	peak height (nm)	rms roughness (nm)	n (2000 nm)	$E_g^d$ (eV)	$E_g^i$ (eV)	$S_0$ $10^{13} m^{-2}$
340	7.4	2.2	2.47	1.66	1.96	8.0
450	7.7	2.4	2.49	1.65	1.95	18
650	25.9	8.1	2.50	1.60	1.89	16.2
800	9.7	3.1	2.36	1.65	1.94	22.9

표 4. Optial parameters and surface microstructural parameters for CdSe thin films deposited at various substrate temperatures

T <sub>sub</sub> (K)	thickness (nm)	peak height (nm)	rms roughness (nm)	n (2000 nm)	E <sub>g</sub> <sup>d</sup> (eV)	S <sub>0</sub> 10 <sup>13</sup> m <sup>-2</sup>
300	340	7.4	2.2	2.47	1.96	8.0
400	320	29.0	6.8	2.38	1.93	9.2
500	360	64.7	16.9	2.20	1.85	9.5
630	350	42.1	12.4	2.31	1.92	10.9

화는 두께 변화보다는 결정립의 크기에 영향을 줄 수 있는 박막 성장조건에 의하여 더 많은 영향을 받게됨을 알 수 있다.

흡수가 작은 영역에서의 굴절률의 분산 이론은 다음의 단순 진동자(single-oscillator) 모델로서 잘 알려져 있다 [26].

$$n^2 - 1 = \frac{S_0 \lambda_0}{1 - (\lambda_0/\lambda)} \quad (9)$$

여기서  $\lambda_0$ 는 진동자의 평균 위치이고,  $S_0$ 는 진동자의 평균 강도를 나타낸다.  $S_0$ 는  $1/(n^2 - 1)$  대  $1/\lambda^2$ 의 그래프에서 나타나는 직선의 기울기로부터 구할 수 있으며, 무한 파장에서의 절편은  $1/S_0 \lambda_0^2$  값을 나타낸다. 그림 9에 실온에서 증착된 두께 653 nm인 CdSe 박막에 대한  $1/(n^2 - 1)$  대  $1/\lambda^2$ 의 관계를 나타내었다. 진동자의 평균 강도  $S_0$ 와 굴절률 매개변수  $E_0/S_0$ 를 모든 CdSe 박막에 대하여 계산하여 표 3과 4에 각각 나타내었다. 여기서  $E_0$ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$E_0 = hc/e\lambda_0 \quad (10)$$

여기서  $h$ 는 플랑크 상수,  $c$ 는 빛의 속도, 그리고  $e$ 는 전자의 전하량이다. CdSe 박막에 대한 진동자의 평균 강도는 두께와 기판온도가 증가할수록 커진 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 실험은 전자선 증착법에 의하여 성장된 CdSe 박막의 두께와 기판온도의 변화에 따른 광학상수들의 변화와 미세구조 매개변수들의 변화를 조사한 것이다. CdSe(wurtzite) 박막은 직접천이에 의한 띠틈격을 나타내며, 유리 기판 위에 성장된 CdSe 박막의 직접천이 띠틈격과 굴절률은 박막의 두께와 기판온도에 의존한다. 특

히 성장 조건을 일정하게 할 경우 두께 증가에 따른 박막의 결정립의 크기는 큰 변화를 보여주지 않음에 따라 띠틈격과 굴절률 역시 미세한 변화를 나타내었다. 반면, CdSe 분말의 소결온도, 증착시 전자 방출 전류, 그리고 기판온도의 변화와 같은 박막의 성장조건에 민감한 변화를 나타냄으로써, 띠틈격과 굴절률의 변화는 형성된 CdSe 박막의 성분비, 결정립의 크기, 그리고 strain 정도에 따라 결정됨을 알 수 있다. 실온에서 성장된 hexagonal CdSe 박막은 직접천이에 의한 두 개의 띠틈격이 나타남으로써 0.3 eV의 가전자 띠의 스핀-궤도 분리가 관측되었다. 특히 흡수단 근방에서의 굴절률의 비정상적 변화는 표면이 불균일한 시료에서 잘 나타나며, 이는 다중산란 효과에 의하여 설명될 수 있다. 그리고 CdSe 박막에 대한 굴절률의 분산은 단순 진동자 모델을 따른다.

#### 참고문헌

- [1] M. Aven and D. M. Look, J. Appl. Phys. **32**, 99 (1961).
- [2] S. Matsumoto, Jpn. J. Appl. Phys. **11**, 2051 (1979).
- [3] L. W. Chow and H. L. Kwok, J. Appl. Phys. **14**, 643 (1981).
- [4] M. Nair, P. Nair, R. Zingaro, and E. Meyers, J. Appl. Phys. **74**, 1879 (1993).
- [5] A. Brunnschweiler, Nature **209**, 493 (1996).
- [6] R. Ludeke and W. Paul, Phys. Status Solidi. **23**, 413 (1967).
- [7] V. Sovolev, Sov. Phys. Opt. Spectrosc. **18**, 456 (1965).
- [8] G. K. Thutupalli and S. G. Tomlin, J. Phys. **D9**, 1639 (1976).
- [9] A. El-Shazly, Opt. Pura Appl. **19**, 23 (1986).
- [10] M. Shallan and R. Muller, Sol. Cells **28**, 185 (1990).
- [11] A. El-Shazly and H. El-Shair, Thin Solid Films **78**, 287 (1981).
- [12] U. Pal, D. Samanta, S. Ghorai, and A. Chaudhuri, J. Appl. Phys. **74**, 6368 (1993).
- [13] B. R. Rhee, K. B. Lee, D. G. Hwang, et al. 새 물리 **35**, 68 (1995).



- [14] T. S. Moss, *Optical Properties of Semiconductors* (Butterworth, London, 1961).
- [15] J. C. Manificier, J. Gasiot, and J. P. Fillard, *J. Phys.* **E9**, 1002 (1976).
- [16] E. Marquez, J. R-Malo, R. Villares, and R. J-Garay, *J. Phys.* **D25**, 535 (1992).
- [17] L. E. Brus, *J. Chem. Phys.* **79**, 5566 (1983).
- [18] G. Hodes, A. Yaron, F. Decker, and P. Motisuka, *Phys. Rev. B* **36**, 4215 (1987).
- [19] H. Weller, H. M. Schmidt, etc, *Chem. Phys. Lett.* **124**, 557 (1986).
- [20] U. Pal, S. Saha, A. K. Chaudhuri, V. V. Rao, and H. D. Banerjee, *J. Phys.* **D22**, 965 (1989).
- [21] F. Khayaja and S. G. Tomlin, *J. Phys.* **D8**, 581(1975).
- [22] J. M. Pawlikowskii, *Thin Solid Films* **127**, 39 (1985).
- [23] H. E. Bennett and J. M. Benett, *Thin Solid Films* **4**, 3 (1967).
- [24] P. Rouard and A. Messen, *Prog. Opt* **15**, 79 (1977).
- [25] D. Beaglehole and O. Hunderi, *Phys. Rev.* **B2**, 309 (1970).
- [26] M. Di Domenico and S. H. Wemple, *J. Appl. Phys.* **40**, 720 (1969).