

## Characteristics of Raman scattering spectroscopy for $ZnS_{1-x}Te_x$ alloy semiconductor

Yong Dae Choi<sup>†</sup>

Department of Optical and Electronic Physics, Mokwon University, Taejeon 302-729, Korea

(Received June 21, 2002)

(Accepted August 12, 2002)

**Abstract** We have studied the characteristics of Raman scattering spectroscopy from  $ZnS_{1-x}Te_x$  alloys in the whole range of Te composition  $x$ . The Raman spectra showed two-mode behaviors for those alloys. The Raman line shape showed the changes of an asymmetry and broadening of that with Te composition  $x$ . The asymmetric broadening of the line shape could be explained with a spatial correlation model.

**Key words** Raman scattering,  $ZnS_{1-x}Te_x$  alloy, Spatial correlation model

## $ZnS_{1-x}Te_x$ 삼원 화합물 반도체의 라만 산란 특성

최용대<sup>†</sup>

목원대학교 광전자물리학과, 대전, 302-729

(2002년 6월 21일 접수)

(2002년 8월 12일 심사완료)

**요약**  $ZnS_{1-x}Te_x$  삼원 화합물의 전 영역에서 상온 라만 스펙트럼을 연구하였다. 격자진동 모드가 두 방식의 거동을 보이고, Te 조성비  $x$ 에 따라 라만 선 모양의 비대칭성과 넓어짐이 변하였다. 선 모양의 비대칭성 넓어짐은 공간적인 상호관계(spatial correlation) 모형을 이용하여 설명하였다.

### 1. 서론

넓은 에너지 띠 간격을 갖는 이원, 삼원 II-VI 반도체는 자외선-가시광선 영역의 광전소자로의 응용성과 무질서계에서의 기본적인 특성들 때문에 광범위하게 연구되어 왔다[1-4]. 특히 ZnSSe[5], ZnCdS[6], 그리고 ZnMnTe[7] 등의 치환형 반도체 합금계의 격자 동역학에 대하여 많은 연구가 되어 왔다. 라만 분광학은 이러한 합금계에서 격자 진동 연구에 적합한 방법으로 나노미터 크기 정도의 극미소결정 효과를 조사하는데 효과적이다. 이는 격자상수 몇 배 정도 크기의 정보를 얻는데 쉽지 않은 X-선 회절과 비교된다. 완벽한 결정의 라만 과정에서 (100)면의 후방산란에 대한 라만 선택률은 세로 광학 포논(longitudinal optical phonon, LO)에만 허락된다. 그러나 삼원 화합물에서 라만 신호는 합금의 무질서에 의하여 가로 광학 포논(transverse optical phonon, TO)과 LO

포논 둘 다 관측되고, 조성비에 따라 선 모양, 즉 반치폭과 비대칭성에 변화가 나타난다.  $ZnS_{1-x}Te_x$  합금은 가시광에서 적외선(2.0~3.7 eV) 영역까지 넓은 에너지 띠 간격을 갖는 물질이지만 많은 연구가 되지는 않았고, 격자 진동에 대한 연구도 거의 되지 않았다. Jin 등은 분자선 에피택시(Molecular Beam Epitaxy, MBE)로 성장한  $ZnS_{1-x}Te_x$  합금에 대한 라만 연구에서 격자진동 방식이 두 방식 행동을 보인다고 보고하였다[8].

이 논문에서는 라만 산란특성을 통하여  $ZnS_{1-x}Te_x$  합금의 격자 진동의 특성을 알아본다. Te 조성비에 따른 영역 중앙에서의 라만 진동수의 변화가 포논계의 두 방식 거동으로 나타남을 알아본다. 또한 라만 스펙트럼의 선 모양에서 비대칭성과 넓어짐이 관측되었고, LO 포논 선 모양의 조성비에 따른 변화를 공간적인 상호관계(spatial-correlation, SC) 모형을 이용하여 조사하였다[9].

### 2. 실험 방법

$ZnS_{1-x}Te_x$  박막은 열벽적층성장(Hot Wall Epitaxy, HWE)

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-42-829-7552

Fax: +82-42-823-0639

E-mail: ydchoi@mokwon.ac.kr

범으로 반절연 GaAs(100) 기판 위에 성장하였다. 사용된 시료는 ZnS(5 N)와 ZnTe(5 N) 다결정 분말이고, HWE 장치 내에서 각각 독립적으로 온도 조절을 함으로서 ZnS와 ZnTe 분자전속을 조절하여 여러 성분비의  $ZnS_{1-x}Te_x$  단결정 박막을 성장하였다. GaAs 기판은 트리클로로에틸렌, 아세톤, 그리고 알코올로 세척하였고 초순수로 헹구었다. 이들은  $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O(50\sim60^\circ C) = 3 : 1 : 1$  용액에서 1분간 화학 에칭하고 초순수로 헹구었다. 기판 온도는  $280^\circ C$ 이고 성장률은  $\approx 2 \text{ \AA}/\text{sec}$ 로 유지하였다. 성장된 박막의 두께는  $0.6\sim 1.4 \mu\text{m}$ 이었다. Te 원자의 조성비는 러더퍼드 후방산란(Rutherford Backscattering Spectroscopy, RBS) 측정을 통하여 결정하였다. X선 회절 측정으로  $ZnS_{1-x}Te_x$  박막이 전 영역에 걸쳐 (100) 방향의 십아연광 구조를 갖는 단결정임을 확인하였다.

라만 산란 측정은 아르곤 이온 레이저( $514.5 \text{ nm}$ )를 이용하여 상온에서 측정하였다. 측정은 거의 후방산란 기하학적 구조에서 라만 스펙트럼을 얻었다. 산란 신호는 노치 필터( $514.536 \text{ nm}$ )를 투과시켜, 초점거리가  $0.85 \text{ m}$ 인 단색광 장치(Spex사)를 이용하여 분광하고 Si CCD (charge coupled device) 검출기를 사용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 논의

Fig. 1은 여러 조성비에 따른  $ZnS_{1-x}Te_x$  합금의 라만 스펙트럼을 나타낸다. 라만 스펙트럼에서  $LO_1$ 과  $LO_2$ 로 명명된 피크는 영역 중앙 LO 포논을 나타낸다.  $LO_1$ 은 유사-ZnS 포논 피크를 나타내고,  $LO_2$ 는 유사-ZnTe 포논 피크를 나타낸다. Te 조성비가 큰 영역에서는 유사-ZnTe 포논 피크가 지배적이고, 조성비가 작을 경우는 유사-ZnS 포논 피크가 지배적이다. 몇몇 시료에서 보이는 약한  $TO_1$ 과  $TO_2$ 로 표시된 피크는 영역 중앙 TO 포논으로 각각 유사-ZnS 포논과 유사-ZnTe 포논 피크를 나타낸다. TO 포논의 관측은 합금계에서 피할 수 없는 무질서도와 잘못된 방향의 빛 때문에 라만 산란 과정에서 운동량 보존법칙이 이완되기 때문이다[10]. 몇몇 시료에서 보이는 유사-ZnS TO 포논은 GaAs TO 포논과 비슷한 위치에서 나타나고, 이 피크는 Jin 등[8]과 Liu 등[11]에 의하여 보고되지 않았고, Shon 등[12]은 스트레인을 받는 ZnTe/ZnS 초격자에서 ZnS TO 포논을 보고한 바 있다.  $TO_1$ 를 유사-ZnS TO 포논으로 보는 이유는 순수한 ZnS 박막에서는 TO 포논이 관측되지 않고 ZnSTe 박막에서만 관측되며, 조성비가 증가함에 따라 약간의 청색이동(blue shift)을 하기 때문이다. Fig. 1에서 별표(\*)로 표시된  $180 \text{ cm}^{-1}$  근처의 피크의 근원은 명확하지 않다. 이 피크는 Te 원자의 양이 적은 영역에서만 나타나고, 순수한 ZnS 박막에서는 관측되지 않는다.

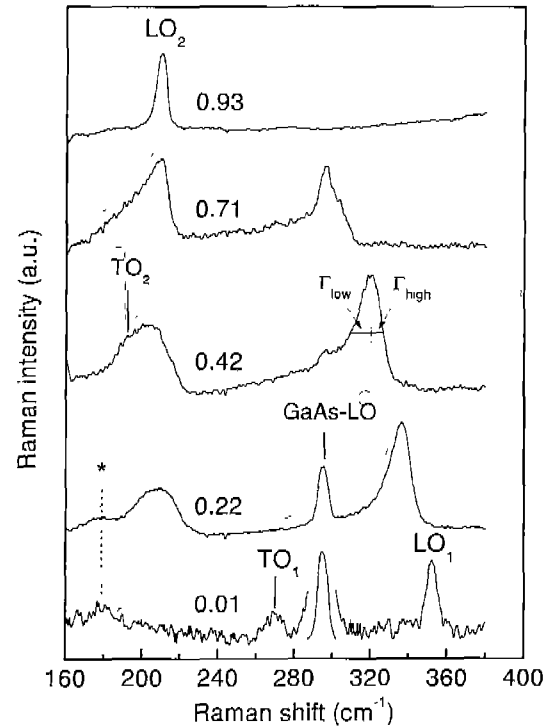


Fig. 1. Raman spectra from  $ZnS_{1-x}Te_x/GaAs(100)$  at room temperature for  $x = 0.01, 0.22, 0.42, 0.71,$  and  $0.93$ . The  $LO_1$  and  $TO_1$  peaks correspond to ZnS-like vibrations and the  $LO_2$  and  $TO_2$  peaks to the ZnTe-like one.

이 피크는 ZnS의 영역경계에서 세로 음향 포논(longitudinal acoustical phonon, LA)( $193 \text{ cm}^{-1}$ )[13]과 ZnTe의 영역경계 LA 포논( $126 \text{ cm}^{-1}$ )[14] 사이에서 나타난다. 따라서 이 피크를 ZnS의 무질서로 활성화된 세로음향(disorder activated longitudinal acoustical, DALA) 포논으로 생각한다. ZnSTe의 격자진동 모드는 전 영역에 걸쳐 유사-ZnTe와 유사-ZnS 피크로 따로따로 분리되어 나타나는 두 방식 거동을 보인다. ZnSTe에 대한 두 방식 거동은 Chang과 Mitra에 의하여 제안된 수정된 임의의 구성요소 등치환(modified random element isodisplacement, MREI) 모형[15]으로부터 예측되고 Jin 등[8]에 의하여 보고되었다.

Fig. 2는 라만 피크들의 조성비에 따른 변화를 나타낸다.  $ZnS_{1-x}Te_x$  박막의 포논 에너지는 이미 보고된 Jin 등[8]의 결과와 일치한다. 유사-ZnS LO 포논은 변화가 급격하지만 유사-ZnTe 포논의 피크는 변화가 완만하다. Fig. 2의 실선은 각각의 모드에 대하여 조성비에 따른 변화가 선형특성을 갖는 것으로부터 근사적으로 선형 피팅한 결과이다. 즉  $\omega(\text{유사-ZnTe, LO}) = 203.7 + 6.5x \text{ cm}^{-1}$ ,  $\omega(\text{유사-ZnTe, TO}) = 203.7 - 19.2x \text{ cm}^{-1}$ ,  $\omega(\text{유사-ZnS, LO}) = 353.8 - 79.6x \text{ cm}^{-1}$ , 그리고  $\omega(\text{유사-ZnS, TO}) = 271.3 + 2x \text{ cm}^{-1}$ 이다. 선형 피팅 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치한다. 이러한 관계를 이용하면 합금에서 조성

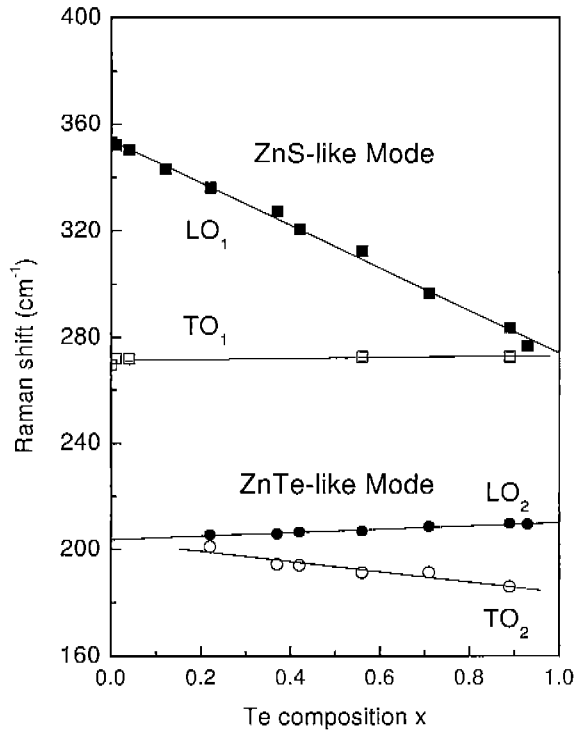


Fig. 2. The frequencies of long-wavelength optical phonons for  $\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$  epilayers as a function of  $x$ . The solid lines are linear fitting.

비를 결정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. ZnS에서 Te 원자의 국소 방식 주파수(local mode frequency)는 ZnS의 포논 주파수 보다 낮고, ZnTe에서 S 원자의 국소 방식 주파수는 ZnTe의 포논 주파수 보다 높게 나타난다. 이것은 ZnS(21.51)의 유효질량이 Te(127.63)의 질량보다 가볍고, ZnTe(43.23)의 유효질량이 S(32.06)의 질량보다 무겁기 때문이다.

ZnSTe의 격자진동 방식이 두 방식임을 나타내는 또 다른 증거는 유사-ZnTe와 유사-ZnS 피크의 상대적인 세기를 알아보는 것이다. Fig. 3은 실험적으로 얻어진 라만 세기의 상대적인  $\text{LO}_2/\text{LO}_1$  비를 조성비에 따라 나타낸 것이다. Barker와 Sievers[16]의 혼합 선형 사슬 계산에 따르면 방식 세기는 각각의 농도에 비례한다. 따라서 격자진동이 두 방식인 경우 라만 세기의 비는 다음과 같이 나타낸다[17].

$$R = k \frac{x}{1-x} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 피팅 매개변수로 조성비에 대한 의존도가 적을 것으로 기대된다. Fig. 3에서 실선은 (1) 식을 이용하여 얻은 피팅 결과로 실험 값과 매우 잘 일치하고, 이때 얻은 피팅 매개변수  $k=0.6$ 으로 이미 기대한 바와 같이 작은 값을 나타낸다.

$\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$  합금에 대한 라만 스펙트럼의 선 모양은 조

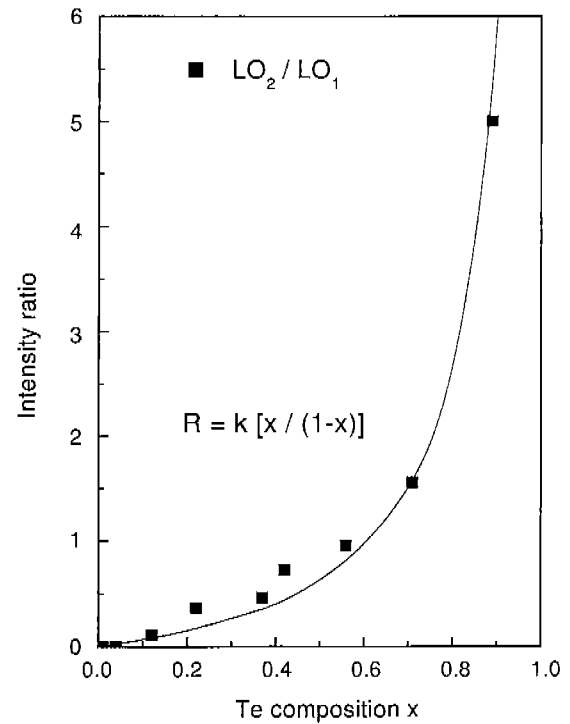


Fig. 3. Ratio of Raman intensities of ZnTe- and ZnS-like modes. The points are the observed values, and the solid line corresponds to Eq. (1) with  $k=0.6$ .

성비에 따른 넓어짐과 비대칭성이 나타난다. 이것의 근원을 알아보기 위하여 LO 포논 피크들의 반치폭을 피크

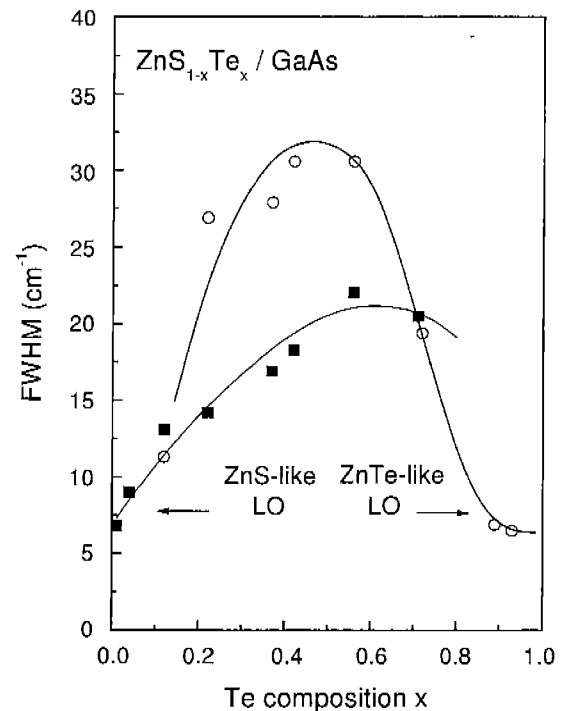


Fig. 4. Composition dependence of the FWHMs of the ZnTe- and ZnS-like LO phonons. The solid lines are guide ones for the eye.

정점을 중심으로 하여 높은 에너지쪽의 반치폭( $\Gamma_{\text{high}}$ )과 낮은 에너지의 반치폭( $\Gamma_{\text{low}}$ )으로 구분하여 알아본다. Fig. 4는 Te 조성비에 따른 LO 피크들의 반치폭을 나타낸다. 유사-ZnS LO 포논의 반치폭 변화는 조성비가 증가함에 따라 증가하여  $x \sim 0.6$ 에서  $22 \text{ cm}^{-1}$ 의 최대 값을 나타낸다.  $x = 0$ 에서 순수한 ZnS LO 포논의 선 모양은 반치폭이 약  $6.8 \text{ cm}^{-1}$ 인 로렌츠형이다. 반치폭의 조성비에 따른 유사한 결과가 유사-ZnTe 방식에서도 보인다. 조성비  $x$ 가 0이나 1인 극한에서 ZnS와 ZnTe에서 라만 선 모양은 LO 포논에 대하여 로렌츠형 윤곽( $\Gamma_{\text{low}} = \Gamma_{\text{high}}$ )을 나타내며, 그 외의 조성비에서는 라만 선 모양이 비대칭성 윤곽( $\Gamma_{\text{low}} > \Gamma_{\text{high}}$ )을 보인다. 이러한 합금계에서 비대칭성과 넓어짐은  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  등의 III-V족 삼원 합금계에서 폭넓게 연구되어왔다[9, 18].

Fig. 5는 조성비  $x$ 에 따른 유사-ZnS와 유사-ZnTe LO 포논에 대한  $\Gamma_{\text{low}}/\Gamma_{\text{high}}$  비를 나타낸다. ZnS에 대한 비는  $x=0$ 에서 1로 라만 선 모양이 대칭임을 보인다. 조성비가 증가함에 따라 증가하여  $x \sim 0.6$ 에서 최대 값을 나타내고 그 이상의 조성비에서는 감소하는 경향을 나타낸다. 비율의 증가는 조성비 증가에 따라  $\Gamma_{\text{high}}$  보다  $\Gamma_{\text{low}}$  증가가 더 크다는 것을 나타내며, 비대칭성이 점점 더 심해지는 것을 나타낸다. 유사-ZnTe 방식에 대한 비율은  $x = 1$ 에서 1로 대칭임을 나타내고 조성비 증가에 따라 급격히 증가하여  $x \sim 0.7$ 에서 최대 값을 나타낸 후 완만하게 감

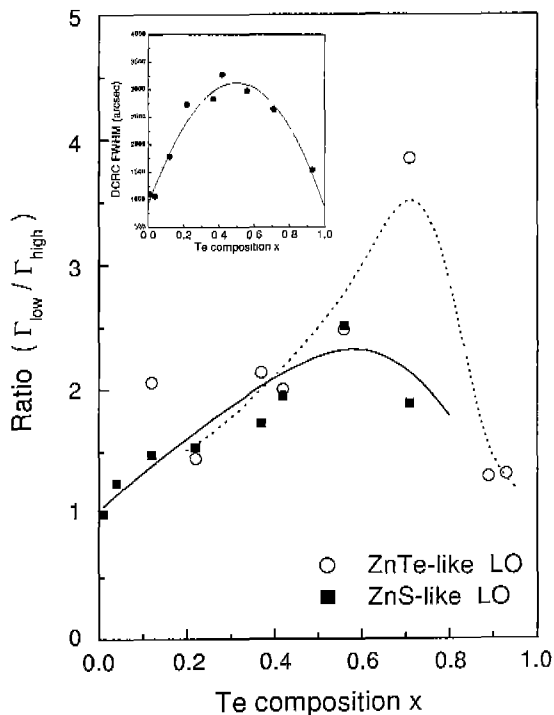


Fig. 5. Composition dependence of the ratio ( $\Gamma_{\text{low}}/\Gamma_{\text{high}}$ ) for the ZnTe- and ZnS-like LO phonons. The solid lines are guide ones for the eye. The inset shows the FWHM of the DCRC as a function of  $x$ .

소한다.

ZnSTe 합금은 두께가  $\sim 1 \mu\text{m}$ 로 격자 부정합에 의한 스트레인이 거의 이완된 것으로 본다. 따라서 스트레인이 이완되면서 생성되는 전위결함이 단결정 박막 내에 존재하고 박막의 결정성에 영향을 준다. 박막의 결정성은 이중 결정 요동 곡선(double crystal rocking curve, DCRC)의 반치폭 값을 통하여 알 수 있다. Fig. 5의 삽화는 DCRC 반치폭의 조성비에 따른 변화를 나타낸다. 조성비에 따른 DCRC 반치폭의 변화는  $x \sim 0.5$ 에서 최대 값을 나타낸다. 라만 분광학도 박막의 결정성을 확인하는 좋은 측정법으로 선 모양과 반치폭이 결정성을 나타내는 척도이다. 조성비의  $0.1 \leq x \leq 0.9$  영역에서 유사-ZnS와 유사-ZnTe LO 포논의 변화는 반치폭 및 비율에 있어서 서로 일치하지 않고, DCRC 반치폭의 변화와도 일치하지 않는다. 따라서 라만 선 모양의 비대칭성과 넓어짐을 박막 내에 존재하는 결함만으로는 설명되지 않는다.

이상적인 결정에서는 원자들의 주기적인 배열이 무한하기 때문에 포논이 퍼져있는 영역이 무한하고, 라만 산란의  $q = 0$  운동량 선택률과 평면파 포논이 고유상태에 이르게 된다. 그러나 합금계에서는 완벽한 격자구조를 갖고 있을지라도 원자들이 어떤 주기적인 방법으로 격자를 점유할 수 없기 때문에 격자에 무질서하게 위치하므로 완벽한 단결정은 아니다[19]. 예를 들어 ZnS 포논의 자유 전파는 Te 원자의 존재로부터 손상을 입고, ZnS의 격자진동은 ZnS 영역에 제한된다. 이는 결정의 주기성이 유한하고 포논이 퍼져있는 영역 또한 유한하다는 것을 의미한다. 따라서 포논은 주기성이 존재하는 여러 작은 영역의 ZnS나 ZnTe에 제한된다. Te의 조성비가 증가함에 따라 합금 내의 무질서 효과가 증가하여 ZnS의 평균 영역은 감소하지만, ZnTe의 평균 영역은 증가한다. 이러한 합금에서 주기성의 유한함은 라만 산란의  $q=0$  선택률을 이완시키고 라만 스펙트럼의 폭과 모양으로 반영된다. Fig. 5에서 유사-ZnS와 유사-ZnTe 포논의 비가 최대 값을 나타내는 영역은  $x \sim 0.7$  근처이다. 이는  $\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$  합금에서 주기적인 퍼텐셜의 변화와 무질서 효과에 의한 비주기적인 퍼텐셜의 존재로부터 일어나는 휨 효과[20]에 의한 에너지 띠 간격이 최소가 되는 영역( $x \sim 0.7$ )[21]과 일치한다.

라만 산란 연구에서 미세결정의 크기효과와 스펙트럼의 선 모양 사이의 관계는 Richter 등[22]에 의하여 제안되었고, 무한 크기를 갖는 결정의 라만 세기  $I(\omega)$ 는 아래의 SC 모형[9, 23]으로 나타낸다.

$$I(\omega) \propto \int \exp\left(-\frac{q^2 L^2}{4}\right) \left\{ [\omega - \omega(q)]^2 + \left(\frac{\Gamma_0}{2}\right)^2 \right\} d^3 q \quad (2)$$

여기서  $L$ 은 합금에서 평균크기를 나타내는 상관 길이어

고,  $\Gamma_0$ 는 순수한 물질( $x=0$ ,  $x=1$ )에서 라만 스펙트럼의 반치폭(ZnS의 경우  $6.8 \text{ cm}^{-1}$ )을 나타낸다. 또한 선형사슬모형에 기초를 둔 LO 포논의 조성비  $x$ 에 따른 주파수 분산  $\omega(x, q)$ 는 다음과 같다.

$$\omega(x, q)^2 = A(x) + \sqrt{A^2(x) - B(x)[1 - \cos(\pi q)]} \quad (3)$$

여기서  $A(x)$ 와  $B(x)$ 는 ZnS<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub>계에서  $x$ 에 따라 변하고, ZnS[13]의 경우  $A(0) = 6.2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 과  $B(0) = 8.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-4}$ 이고 ZnTe[24]의 경우  $A(1) = 2.2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 과  $B(1) = 1.6 \times 10^8 \text{ cm}^{-4}$ 이다. 선 모양 피팅에서 영역 중앙의 포논 주파수는  $\omega(x, q=0) = \omega_0(x)$ 이고,  $A(x) = 1/2\omega_0^2(x)$ 으로 놓을 수 있다.  $\omega_0(x)$ 는 (2)식에 의한 선 모양 피팅에서 피크의 위치를 조절한다. 유사-ZnS LO 포논의 분산 곡선을 결정하는 매개변수  $B(x)$ 는 ZnS의 평균 영역의 변화에 대하여 분산의 변화를 무시하였다.

Fig. 6은 상관길이  $L$ 에 따른 반치폭( $\Gamma = \Gamma_{\text{low}} + \Gamma_{\text{high}}$ )과 비( $\Gamma_{\text{low}}/\Gamma_{\text{high}}$ )를 나타낸다. 유사-ZnS LO 포논에 대한 이론적인 곡선과 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 6의 삽화는 조성비  $x=0.22$ 인 유사-ZnS 라만 선을 상관길이  $L=9 \text{ \AA}$ 과 식 (2)와 (3)식을 이용하여 피팅한 결과로 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과는 유사-ZnS 방식에 대한 상관길이( $L$ )가 Te 조성비가 증가함에 따라 감소함을 나타낸다. 이는 앞에서 상술한 조성비 증가에 따른 ZnS의 평균 영역의 감소와 부합되는 것으로 라만 선 모양의 비대칭성과 넓어짐이 합금 무질서

도에 의한 효과임을 의미한다. 유사-ZnTe 방식에 대한 연구는 LO와 TO 포논 피크가 매우 근접하여 라만 스펙트럼이 중첩되어 나타나기 때문에 SC 모형을 적용하기가 어려웠다. 또한 ZnS와 유사한 방식에서도 높은 조성비에서 TO 포논과 가까워짐에 따라 LO 포논 선 모양의 낮은 에너지쪽이 이론 결과와 실험 결과가 불일치하게 나타남을 볼 수 있다. 이에 대한 자세한 연구는 다음으로 남겨 놓고자 한다.

#### 4. 결 론

ZnS<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> 합금의 전 영역에서 상온 라만 스펙트럼을 연구하였다. 조성비에 따른 포논 주파수 의존성과 세기의 비로부터 격자진동 모드가 두개의 방식이 있음을 알 수 있었다. 또 조성비에 따른 포논 주파수의 선형적인 관계를 이용하여 합금의 조성비를 결정하는데 유용하게 활용될 수 있음을 알 수 있었다. 비대칭성이 최대인 영역과 무질서에 의한 휨 효과가 최대가 되는 영역이 일치하였다. SC 모형을 이용하여 조성비에 따른 라만 선 모양의 비대칭성과 넓어짐을 합금의 무질서도에 의한 효과로 잘 설명할 수 있었다.

#### 감사의 글

“이 논문은 2000년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-015-DP0158)”.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Mitsuhashi, I. Mitsuishi and H. Kukimoto, “MOCVD Growth ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> Epitaxial Layers Lattice-Matched to GaAs Using Alkyls of Zn, s and Se”, Jpn. J. Appl. Phys. 24 (1985) L864.
- [2] N. Matsumura, K. Ishkawa, J. Saraie and Y. Yodogawa, “Growth of ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> by MBE on (100) GaAs Substrates: Effect of Lattice-matching”, J. Crystal Growth 72 (1985) 41.
- [3] S. Fujita, S. Hayashi, M. Funato and S. Fujita, “Organometallic Vapor-phase Epitaxial Growth of Cubic ZnCdS Lattice-matched to GaAs Substrate”, J. Crystal Growth 99 (1990) 437.
- [4] I. K. Sou, K. S. Wong, Z. Yang, H. Wong and G. K. Wong, “Highly Efficient Light Emission from ZnS<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> Alloys”, Appl. Phys. Lett. 66 (1995) 1915.
- [5] O. Brafman, I. F. Chang, G. Lengyel, S. Mitra and E. Carnall, “Optical Phonons in ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> Mixed Crystals”, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1120.
- [6] M. Ichimura, A. Usami, T. Wada, M. Funato, K. Ichino,

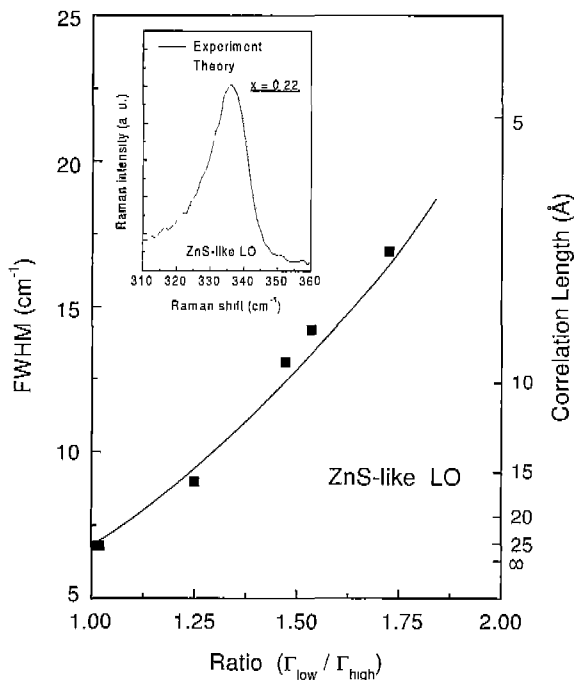


Fig. 6. The relationship between the FWHM and the ratio ( $\Gamma_{\text{low}}/\Gamma_{\text{high}}$ ) for ZnS-like LO phonons as a function of correlation length  $L$ .

- Sz. Fujita and Sg. Fujita, "Raman Spectra of Cubic  $Zn_{1-x}Cd_xS$ ", *Phys. Rev. B* 46 (1992) 4273.
- [ 7 ] D.L. Peterson, A. Petrou, W. Giriat, A.K. Ramdas and S. Rodriguez, "Raman Scattering from the Vibrational Modes in  $Zn_{1-x}Mn_xTe$ ", *Phys. Rev. B* 33 (1986) 1160.
- [ 8 ] C.X. Jin, Z. Ling, D.H. Wangt, D.M. Huang, X.Y. Hou and X. Wang, "Phonon Modes of  $ZnS_{1-x}Te_x$  Alloys Epitaxially Grown on (100) GaAs Substrates", *J. Appl. Phys.* 81 (1997) 3465.
- [ 9 ] P. Parayanthal and F.H. Pollak, "Raman Scattering in Alloy Semiconductors: "Spatial Correlation" Model", *Phys. Rev. B* 52 (1984) 1822.
- [10] M. Cardona, "Light Scattering in Solid II", edited by M. Cardona, and G. Guntherodt, (Springer, Heidelberg, 1982).
- [11] N.Z. Liu, G.H. Li, H.X. Han, Z.P. Wang, W.K. Ge and I.K. Sou, "Raman Scattering and Photoluminescence of Mixed Crystals", *J. Phys.* 13 (1998) 4119.
- [12] L.H. Shon, K. Inoue and K. Murase, "Raman Probing of ZnTe-ZnS Strained-layer Superlattices", *Solid State Commun.* 62 (1987) 621.
- [13] C.A. Klein and R.N. Donadio, "Infrared-active Phonons in Cubic Zinc Sulfide", *J. Appl. Phys.* 51 (1980) 797.
- [14] S. Narita, H. Harada and K. Nagasaka, "Optical Properties of Zinc Telluride in the Infrared", *J. Phys. Soc. Japan* 22 (1967) 1176.
- [15] I.F. Chang and S.S. Mitra, "Application of a Modified Random-Element-Isodisplacement Model to Long-Wavelength Optic Phonons of Mixed Crystals", *Phys. Rev.* 172 (1968) 924.
- [16] A.S. Barker and A.J. Sievers, "Optical Studies of the Vibrational Properties of Disordered Solids", *Rev. Mod. Phys.* 47 (1975) S2.
- [17] S. Emura, T. Nakagawa and Shun-ichi Gonda, "Raman Spectra of  $Al_xIn_{1-x}As$  Grown by Molecular-beam Epitaxy", *J. Appl. Phys.* 62 (1987) 4632.
- [18] B. Jusserand and J. Sapriel, "Raman Investigation of Anharmonicity and Disorder-induced Effects in  $Ga_{1-x}Al_xAs$  Epitaxial Layers", *Phys. Rev. B* 24 (1981) 7194.
- [19] J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*, "Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology" (McGraw-Hill, New York, 1995).
- [20] J.A. Vechten and T.K. Bergstresser, "Electronic Structures of Semiconductor Alloys", *Phys. Rev. B* 1 (1970) 3351.
- [21] Y.-M. Yu, S. Nam, J.-K. Rhee, O. Byung-sung, K.-S. Lee and Y.D. Choi, "Characterization and Growth of ZnSTe Epilayers by Hot-wall Epitaxy", *J. Crystal Growth* 210 (2000) 521.
- [22] H. Richter, Z.P. Wang and L. Ley, "The One Phonon Raman Spectrum in Microcrystalline Silicon", *Solid State Commun.* 39 (1981) 625.
- [23] A. Fischer, L. Anthony and A.D. Compaan, "Raman Analysis of Short-range Clustering in Laser-deposited  $CdS_xTe_{1-x}$  Films", *Appl. Phys. Letters* 72 (1998) 2559.
- [24] D.J. Olego, P.M. Raccah and J.P. Faurie, "Compositional Dependence of the Raman Frequencies and Line Shapes of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  Determined with Films Grown by Molecular-beam Epitaxy", *Phys. Rev. B* 33 (1986) 3819.