

## HWE 방법에 의한 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs 단결정 박막 성장과 광학적 특성

### Growth and optic characteristics of AgGaS<sub>2</sub>/GaAs single crystal thin film by hot wall epitaxy

이상열\*, 홍광준\*, 정준우\*

(S. Y. Lee\*, K. J. Hong\*, J. W. Jeong)

#### Abstract

The stoichiometric composition of AgGaS<sub>2</sub> polycrystal source materials for the AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer was prepared from horizontal furnace. From the extrapolation method of X-ray diffraction patterns it was found that the polycrystal AgGaS<sub>2</sub> has tetragonal structure of which lattice constant  $a_0$  and  $c_0$  were 5.756 Å and 10.305 Å, respectively. AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer was deposited on throughly etched GaAs(100) substrate from mixed crystal AgGaS<sub>2</sub> by the Hot Wall Epitaxy (HWE) system. The source and substrate temperature were 590°C and 440°C respectively. The crystallinity of the grown AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer was investigated by the DCRC (double crystal X-ray diffraction rocking curve). The optical energy gaps were found to be 2.61 eV for AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer at room temperature. The temperature dependence of the photocurrent peak energy is well explained by the Varshni equation, then the constants in the Varshni equation are given by  $\alpha = 8.695 \times 10^{-4}$  eV/K, and  $\beta = 332$  K. From the photocurrent spectra by illumination of polarized light of the AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer, we have found that crystal field splitting  $\Delta Cr$  was 0.28 eV at 20 K. From the PL spectra at 20 K, the peaks corresponding to free and bound excitons and a broad emission band due to D-A pairs are identified. The binding energy of the free excitons are determined to be 0.2676 eV and 0.2430 eV and the dissociation energy of the bound excitons to be 0.4695 eV.

**Key word** : Hot Wall Epitaxy, single crystal thin film, Hall effect, photocurrent, photoluminescence

#### 1. 서론<sup>1)</sup>

AgGaS<sub>2</sub>는 I-III-VI<sub>2</sub>족 화합물 반도체로서 상온에서 에너지 띠틈격이 2.61 eV인 직접 천이형 반도체이어서 적외선검출기[1], 발광 다이오드[2-3], 비선형 광학 소자 및 태양 전지[4-5]등에 응용성이 기대되고 있어 주목되고 있는 물질이다. 특히

AgGaS<sub>2</sub>는 0.5  $\mu$ m부터 12  $\mu$ m까지 투명하고 큰 복굴절을 가지고 있어 laser system에서 진동수의 증폭, 변조 전환(conversion)장치에 이용되는 비선형 광학소자를 개발할수 있어 양질의 결정 성장과 물성 연구가 활발히 연구되고 있다[6-9].

AgGaS<sub>2</sub>의 성장 방법은 Bridgman-Stockbarger technique[10-11], zone levelling[12], iodine vapour transport[13-14], liquid encapsulated czochralski(LEC)법[15], 진공 증착법[16], e-beam 증착법[17], Hot Wall Epitaxy(HWE)[18]등이 있다. 이 방법 가운데 HWE 방법은 증발원의 물질을 직접 가열하여 기체상태로 기판에 도달해 응집되어 막이 성장되도록 하는 방법인데 열평형 상태에

\*: 조선대학교 물리학과  
(Fax:062-234-4326  
E-mail: syblee@mail.chosun.ac.kr)

가까운 조건하에서 결정을 성장시키므로 양질의 박막을 만들 수 있고 시료의 손실을 줄일 수 있으므로 대량으로 생산할 수 있다는 장점이 있다 [19-20]. 본 연구에서는  $\text{AgGaS}_2$  다결정을 본 실험실에서 제작한 수평 전기로를 이용하여 용융 성장법으로 합성하여, 합성된  $\text{AgGaS}_2$  다결정을 X-ray diffraction (XRD)을 측정하여 결정구조 및 격자상수를 구하였다. 합성된  $\text{AgGaS}_2$  다결정을 HWE 방법을 이용하여 GaAs(100)기판 위에  $\text{AgGaS}_2/\text{GaAs}$  epilayer를 성장시켜 결정성을 이중결정 X선 요동곡선(double crystal X-ray rocking curve, DCRC)의 반폭치(Full Width at Half Maximum, FWHM)로 부터 조사하였다. 또한 EDS(Energy dispersive X-ray spectrometer)를 이용하여  $\text{AgGaS}_2/\text{GaAs}$  epilayer의 조성비를 확인하였다. 광흡수 특성을 측정하여 광학적 에너지 띠틈격을 알아 보았다. 온도의존성에 의한 광전류(photocurrent)와 광발광(photoluminescence)을 측정하여 에너지 띠틈격의 온도 의존성과 에너지 띠틈격 내에 형성된 결합의 에너지 준위에 대한 분석을 하였다.

## 2. 실험 및 측정

### 2.1 $\text{AgGaS}_2$ 다결정 합성

성분 원소인 Ag(Aldrich, 6N), Ga(Aldrich, 6N), S(Aldrich, 6N)를 mole비로 칭량하여 깨끗이 세척된 석영관(외경 16 mm, 내경 10 mm)에 넣어  $3 \times 10^{-6}$  torr의 진공에서 봉입하여 ampoule을 만들어 Fig. 1과 같은 수평 전기로의 노심관 중앙에 넣고 DC 회전모터를 이용하여 노심관을 1 rpm으로 회전하도록 하면서 전기로의 온도를 상승시켰다. 온도 상승으로 인한 성분원소의 증기압 증가로 ampoule이 파괴되는 것을 방지하기 위해서 시간당  $20^\circ\text{C}$ 로 올리면서 노심관의 온도가  $500^\circ\text{C}$ 에 도달하면 그 상태에서 24시간 유지시킨다음 시간당  $10^\circ\text{C}$ 로 온도를 올리기 시작하여  $1030^\circ\text{C}$ 에 이르면 48시간 유지시킨 뒤 저속 DC 회전모터와 전원을 끄고, 상온까지 자연 냉각시켜  $\text{AgGaS}_2$  다결정을 합성하였다.

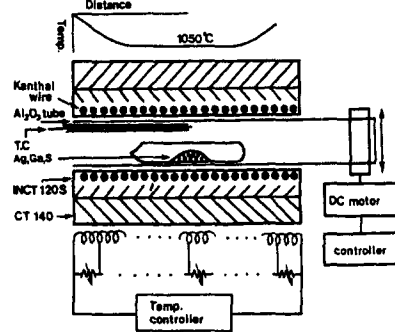


그림 1. Horizontal furnace for synthesizing of  $\text{AgGaS}_2$  polycrystal

### 2.2 HWE에 의한 $\text{AgGaS}_2/\text{GaAs}$ epilayer 성장

$\text{AgGaS}_2/\text{GaAs}$  epilayer는 Fig. 2와 같은 진공 조속의 hot wall 전기로와 기판으로 구성된 HWE 방법을 사용하였다. 전기로는 직경 0.5 mm 칸탈선을 직경 35 mm 석영관에 감아 만들었으며, 전기로 둘레의 열차폐 원통은 열효율을 높이기 위해 석영관에 금을 증착하여 사용하였다. 증발원은 합성된  $\text{AgGaS}_2$  다결정의 분말을 사용하였고 GaAs(100)를 기판으로 사용하였다.  $\text{AgGaS}_2/\text{GaAs}$  epilayer는  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ 를 5 : 1 : 1로 chemical etching한 GaAs(100) 기판과 증발원을 HWE 장치 속에 넣고 내부의 진공도를  $10^{-6}$  torr로 배기시킨 후  $\text{AgGaS}_2$  증발원의 온도를  $590^\circ\text{C}$ , 기판의 온도를  $440^\circ\text{C}$ 로 하여  $0.5 \mu\text{m/hr}$  성장속도로 성장하였다

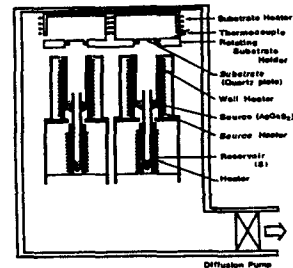


그림 2. Block diagram of the hot wall epitaxy system.

### 2.3 결정구조

합성된  $\text{AgGaS}_2$ 를 분말법으로 결정구조, 격자상수를 측정하였으며 HWE 방법으로 성장된

AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 결정성은 이중결정 X-선 회절(double crystal X-ray diffraction, DCXD) 장치로 측정하였다. 이때 X-선은 Cu-K $\alpha$ 인 파장 1.542 Å를 사용하였다.

#### 2.4 광전류(Photo-current) 측정

AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer 표면에 단색광을 쬐어 흐르는 광전류와 단색광의 관계를 광전류 스펙트럼이라 한다. 광전류 측정셀을 cryostat (AP, DE-2025)의 cold finger에 고정하고 단색광을 셀에 조사하면서 나오는 광전류를 lock-in-amplifier(Ithaco, 391 A)로 증폭하고 X-Y recorder(MFE, 815 M)로 기록하였다. 이때 사용한 회절격자(Jarrel Ash, 82 - 00, f:0.5 m series용)는 1180 grooves/nm ( $\lambda$  : 190 nm ~910 nm)를 사용하였다.

#### 2.5 광발광(Photoluminescence) 측정

AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer를 cryostat 내부에 있는 cold finger에 고정, 진공으로 배기하고 He-Cd Laser (Nippon, 325 nm, 10 mW)를 셀에 조사하였다. 발광된 빛을 렌즈로 집속하여 chopping하고 monochromator로 분광하였고 분광된 빛을 PM tube(RCA, C3 - 1034)로 받아 lock-in-amplifier로 증폭하여 X-Y recorder로 기록하였다. 이때 cryogenic helium refrigerator(AP, CSA-202B)로 cryostat의 온도를 상온에서 저온으로 내리면서 측정하였다.

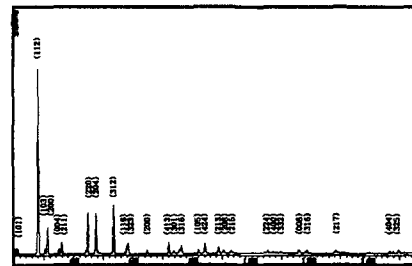
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 AgGaS<sub>2</sub>의 결정구조

본 실험에서 합성한 AgGaS<sub>2</sub> 다결정 덩어리를 분말로 만들어 측정한 X-ray 회절무늬 측정결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 회절무늬로부터 (hkl)을 면간격에 의한  $\theta$  값이 JCPDS(Joint Committee on Power Diffraction Standards)와 일치하는 값들이어서 tetragonal로 성장되었음을 알 수 있었고, 외삽법[21]으로 구한 격자상수  $a_0$  와  $c_0$  값은 각각 5.756 Å과 10.305 Å이었다.

HWE에 의한 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 성장은 우선적으로 GaAs 기판의 불순물을 제거하기 위하여 chemical etching 한 후 기판의 온도를 600~650°C로 변화시켜 예비 가열하였다. 이러한 조건에서 AgGaS<sub>2</sub> epilayer를 성장시켜 이중결정 X-선 요동 곡선(DCRC)을 측정한 결과 반폭치

(FWHM)는 거의 변화하지 않았다. 또한 불순물이 제거된 GaAs 기판위에 성장된 박막의 결정성은 성장하는 동안 증발원 및 기판온도와 같은 성장조건에 관계되므로 최적 증발원의 온도를 590°C로 고정하고 기판의 온도를 변화시켜 성장하였다. 성장된 박막들의 이중결정 X-선 요동곡선(DCRC)의 반폭치(FWHM)를 측정한 결과 가장 좋은 성장 조건은 기판의 온도가 440°C일 때 Fig. 4와 같이 반폭치(FWHM)가 124 arcsec 였다.



들의 면적 비에 따른 조성비 값을 Table 1에 보였다. 다결정의 starting element의 조성비와 성장된 결정의 조성비들이  $\pm 2\%$  오차 범위에서 일치되고 있어 화학양론적 조성비가 잘 이루어졌음을 알 수 있었다.

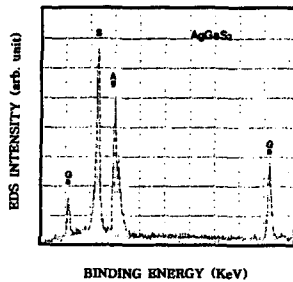


그림 5. EDS of AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer.

표 1. EDS data of AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer

Element	Starting element (%)	Growing element (%)
Ag	44.627	42.737
Ga	28.845	28.268
S	26.528	28.995

### 3.3 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 에너지 띠간격

AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 광흡수 spectrum 특성은 Fig. 6과 같다. AgGaS<sub>2</sub>는 direct gap semiconductor이기 때문에 입사광 energy( $h\nu$ ) 및 광흡수 계수( $\alpha$ )와 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 에너지 띠간격 ( $E_g$ ) 사이에는

$$(\alpha h\nu)^2 \sim (h\nu - E_g) \quad (1)$$

의 관계가 있다[22]. Fig. 7에서 직선어  $(\alpha h\nu)^2 = 0$  인 점과 만나는 점이 (1)식에 의해 에너지 띠간격에 해당된다. 기판의 온도가 440°C일 때 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 에너지 띠간격은 상온에서 2.61eV였다.

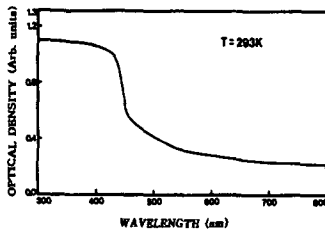


Fig. 6. Optical absorption spectra of AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer.

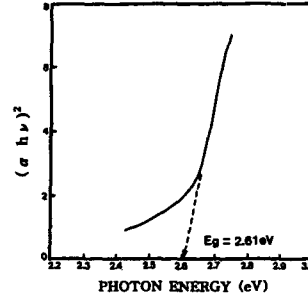


그림 7. Plots  $(\alpha h\nu)^2$  versus the incident photon energy  $h\nu$  for AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer.

### 3.4 광전류(Photocurrent)

Fig. 8은 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 온도에 따르는 광전류 스펙트럼을 상온에서 20 K까지 측정 한 결과 온도가 내려감에 따라 광전류 봉우리들이 단파장 영역으로 shift함을 알 수 있었고, 각 온도에 의존하는 광전류 봉우리의 위치는 Table 2에 모았다. 광전류 스펙트럼에 대하여 Gudden등 [23,24]은 광전도 재료를 물질자체의 고유한 성질에 직접 관계되는 idiochromatic 물질과 불순물 또는 vacancy defect와 같은 imperfection에 직접 관계하는 allochromatic 물질로 분류하였다. Idiochromatic 물질은 흡수단의 파장(에너지)에서 광전도도가 극대를 이루는 물질이며 allochromatic 물질은 imperfection에 기인하는 장파장대 근방에서 광전도도가 극대를 이루는 물질이다. Allochromatic 물질에서 imperfection이 하는 역할은 네가지로 나누어 살펴볼 수 있다[25]. 첫째는 주개와 받개에 의한 암전도도의 변화이다. n형의 경우 주개는 전도도 증가에 기여하는 반면, 받개는 감소에 기여한다. 둘째는 재결합중심에 의한 광전도도의 감소이다. 셋째는 trapping 중심으로 작용하였다. 감도를 증가시키는 imperfection은 응답속도를 감소시키고 감도를 감소시키는 imperfection은 응답속도를 증가시킨다. 넷째는 imperfection에 기인하는 광전도도의 주개는 장파장대로 변위된다. Table 2와 Fig. 7에서 보는 바와 같이 상온에서 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 광전류 봉우리는 에너지 띠간격에 기인하는 봉우리로 관측되었다. 따라서 Varshni 공식[26]에 의해 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 온도의존성에 의한 에너지 띠간격  $E_g(T)$ 는 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 band edge에

해당되는 광전도 peak energy의 온도의존성인 Fig. 9와 같다.

온도가 저온으로 내려감에 따라 광전도도의 peak의 energy는 선형적으로 증가하고 있으며 Varshni 관계식[26]

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

이다. 이때  $E_g(0)$ 는 0 K에서 에너지 띠틈,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 상수이며,  $E_g(0)$ 는 2.7284 eV,  $\alpha = 8.695 \times 10^{-4}$  eV/K,  $\beta = 332$  K였다.

Fig. 8에서 20 K일 때 412.5 nm(3.0056 eV) 근처에서 약한 광전류 봉우리를 관측할 수 있는데 412.5 nm(3.0056 eV)의 광전류 봉우리는 가전자대의 crystal-field splitting에 의한  $\Delta Cr$ 의 0.28 eV로

고찰되었다.  $\Delta Cr = \frac{3}{2} b (2 - \frac{c}{a})$  에서 b

는 deformation potential인데 I-III-VI<sub>2</sub>족은 약 1로 fitting되었고 이때  $\Delta Cr = 0.315$  eV이므로 0.035 eV 오차값으로 412.5 nm(3.0056 eV)는 가전자대의 crystal-field splitting에 의한 가전자대  $\Gamma_{15}$ 에서 전도대  $\Gamma_1$ 으로 여기되어서 생긴 봉우리로 생각되어진다.

표 2. Temperature dependence of PC eaks for AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer

Temperature (K)	Wavelength (nm)	Energy (eV)	Energy difference	$\Delta Cr$
293	474.9	2.6106		
270	473.3	2.6195		
250	471.1	2.6318		
200	466.2	2.6594		
150	461.8	2.6848		
100	458.3	2.7053		
77	457.1	2.7124		
50	455.9	2.7195		
20	454.9	2.7255	0.2801	$\Delta Cr$
	412.5	3.0056		

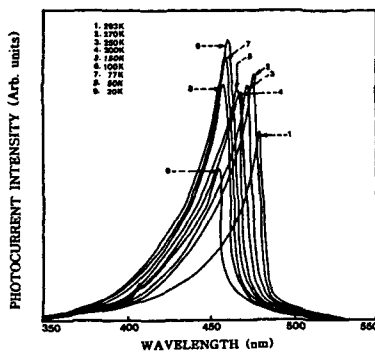


그림 8. Photocurrent spectra of epilayer

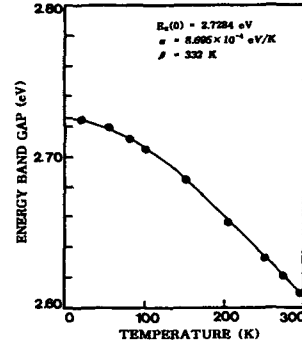


그림 9. Temperature dependence of the energy gap in AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer (The solid line represents the fit to the Varshni equation).

### 3.5 광발광(Photoluminescence)

Fig. 10은 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 온도에 변화에 따른 PL 스펙트럼을 나타내고 있다. PL 스펙트럼은 sharp-line emission 영역과 broad-line emission 영역으로 구분할 수 있다[27]. Fig. 10에서 20 K일 때 414.3 nm(2.9926 eV)와 415.1 nm(2.9868 eV)의 peak는 free exciton emission spectrum으로 여겨진다. Free exciton은 순수한 결정과 저온에서만 관측되며 가전자대의 전자가 에너지 띠틈격 이상의 에너지를 갖는 광자로 여기되면 전도대로 여기되고 가전자대에는 양으로 대전된 정공(hole)이 남게 된다. 이때 정공의 영향으로부터 충분히 벗어나지 못하게 여기된 전자(electron)는 정공과 exciton을 형성하고 이들이 재결합할 때 spectrum의 빛을 방출한다. 이와 같이 자유전자와 자유정공의 쌍(pair)으로 구성된 exciton은 Coulomb 인력이 작용하게 되며 각각의 pair는 수소원자처럼 전자가 정공주위를 궤도운동하고 에너지상태는 양자화되어 있다. 이것을 free exciton이라한다.

Free exciton은 불안정하고 전자와 정공의 재결합에 의해서 소멸된다. 또한 exciton은 불순물이나 결함에 포획될때까지 격자사이를 자유롭게 운동하기 때문에 운동에너지와 결합에너지를 갖는다.

$$h\nu = E_g - E_{ex}^{Free} \quad \text{-----}(3)$$

식(3)으로 부터 20 K일 때,  $E_g$ 를 2.7249 eV로 하여 구한 binding energy는 각각  $E_{ex}^{Free}(E_x^U)$

=0.2676 eV와  $E_{ex}^{Free}(E_x^L) = 0.2430$  eV로서 Tell과 Kasper[28]가 reflectivity로부터 계산한 exciton의 결합에너지는 0.2800 eV와 Yu와 Park[29]등이 구한 exciton의 결합에너지 0.2600 eV와 거의 잘 일치한다. 414.3 nm(2.9926 eV)와 415.1 nm(2.9868 eV)의 광발광 봉우리는 free exciton( $E_x$ )의 upper polariton과 lower polariton인  $E_x^U$ 와  $E_x^L$ 로 관측되었다. 423.6 nm(2.9269 eV)의 peak는 bound exciton emission spectrum으로 여겨진다. Bound exciton은 중성 혹은 대전된 주개와 받개에 free exciton이 속박되어 그 주위궤도를 운동하는 계를 bound exciton이라 한다. Bound exciton complex가 소멸할 때 생기는 발광스펙트럼은 free exciton보다 장파장대에 나타난다. Bound exciton이 방사 재결합할 때 방출되는 photon의 에너지는

$$h\nu = E_g - E_{ex}^{Free} - E_{ex}^B \quad \text{----(4)}$$

이다. 여기서  $E_{ex}^B$ 는 결합중심에 exciton이 결합된 에너지이다.

423.6 nm(2.9269 eV)의 I는 bound exciton emission에 의한 peak로 관측되었다. (4)식으로 부터 계산된 bound exciton의 결합에너지  $I=0.4695$  eV이다. 455 nm(2.7249 eV)의 peak는 donor-acceptor pair(DAP)에 기인하는 광발광 봉우리로 고찰되었다. 293 K에서 150 K까지는 broad-line emission 영역에서 donor-acceptor pair에 기인하는 광발광 봉우리가 관측되었고 100 K와 50 K에서는 425.5 nm(2.9138 eV)와 424.1 nm(2.9234 eV)에서 bound exciton에 의한 광발광과 broad-line emission 영역에서 donor-acceptor pair(DAP)에 기인하는 광발광 봉우리가 관측되었다.

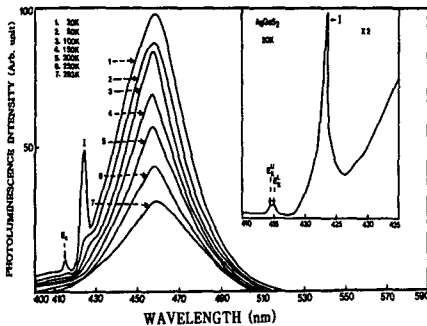


그림 10. Photoluminescence spectra of AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer.

#### 4. 결론

HWE 방법으로 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer를 성장하여 기본 물성과 광전기적 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 합성된 AgGaS<sub>2</sub> 다결정의 X-선 회절 무늬로부터 외삽법으로 구한 격자상수는  $a_0 = 5.756$  Å,  $c_0 = 10.305$  Å 였다. AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer은 기판의 온도가 440°C, 증발원의 온도가 590°C로 성장하였을 때 반폭치값이 124 arcsec로 가장 작아 최적 성장 조건이었다.

2) HWE 방법으로 성장한 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 광흡수 특성 조사에 의해 상온에서 에너지 띠간격이 2.61 eV임을 알았다.

3) 광전류 봉우리 에너지 띠간격의 온도 의존성은 Varshni 방정식을 잘 만족하고 있었으며  $E_g(0) = 2.7284$  eV,  $\alpha = 8.695 \times 10^{-4}$  eV/K,  $\beta = 332$  K 였다.

4) AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 광전류 봉우리들은 가전자대에서 전도대로 들뜬 전자들에 의한 광전류 봉우리(photocurrent peak)와 단파장대에서 crystal field splitting에 의한 광전류 봉우리로 관측되었다. 20 K일 때 AgGaS<sub>2</sub>/GaAs epilayer의 광전류 봉우리는 454.9 nm(2.7255 eV)와 412.5 nm(3.0056 eV)에서 가전자대의 crystal field splitting에 의한  $\Delta Cr$ 은 0.28 eV 였다.

5) 광발광 봉우리는 20 K에서 414.3 nm(2.9926 eV)와 415.1 nm(2.9868 eV)는 free exciton( $E_x$ )의 upper polariton과 lower polariton인  $E_x^U$ 와  $E_x^L$ , 423.6 nm(2.9269 eV)는 bound exciton emission에 의한 I로 관측되었다. 또한 455 nm(2.7249 eV)의 peak는 donor-acceptor pair(DAP)에 기인하는 광발광 봉우리로 관측되었다.

#### 참고 문헌

- [1] S.Wagner, J.L. Shay, P. Migliorato and H. M. Kasper, Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 434.
- [2] I. Shih, A. Vahid Shahidi and C.H. Champness, J. Appl. Phys. 56 (1984) 421.
- [3] P. Migliorato, J.L. Shay and H. M. Kasper, J.

- Elec. Mate. 4 (1975) 209.
- [4] L.L. Kazmerski, P.J. Ireland, F.R. White and R.B. Cooper, 13th. IEEE Photovoltaic Specialistic Conf. Record (IEEE, Princeton 1978) p. 184.
- [5] I.W.F. Russel, B.N. Baron and R.E. Rocheleau, J. Vac. Sci. Technol. B2 (4) (1984) 840.
- [6] D.C. Hanna, V.V. Rampel and R. C. Smith, Opt. Commun. 8 (1973) 151.
- [7] W. Jantz and P. Koidi, Appl. Phys. Lett. 31 (1977) 99.
- [8] R.J. Seymour and F. Zernike, Appl. Phys. Lett. 29 (1976) 705.
- [9] J.C. Bergman and S. Kurtz, Mat. Sci. Eng. 5 (1970) 235.
- [10] B. Tell and H.M. Kasper, Phys. Rev. B6. (1972) 3008.
- [11] P.W. Yu and Y.S. Park, J. Appl. Phys. 45 (1974) 825.
- [12] H. Matthes, R. Viehman and N. Marschell, Appl. Phys. Lett. 26 (1975) 237.
- [13] P.W. Yu, J. Manthuruthil and Y.S. Park, J. Appl. Phys. 45 (1974) 3694.
- [14] H.A. Chedzey, D.J. Marshall, H. J. Pakfitt and D.S. Robertson, J. Appl. Phys. 4 (1971) 1320.
- [15] P. Korczak and C.B. Staff, J. Crystal Growth 24 125 (1974) 386.
- [16] A. Smith, J. Vac. Sc. Technol., 15 (1987) 353.
- [17] J. Arias, M. Zandman, J.G. Pasko, S. H. Shin, L.D. Bubulac, R. E. Dewanes and W.E. Tennart, J. Appl. Phys. 69 (1991) 2143.
- [18] K.K. Muravyeva, I.P.K. Kinm, V. B. Aleakvsky and I.N. Anikin, Thin Solids Films 10 (1972) 355.
- [19] J.T. Calow, D.L. Kirr and S. J. T. Owen, Thin Soild Films 9 (1970) 409.
- [20] J.E. Genthe and R.E. Aldrich, Thin Solid Films 8 (1971) 149.
- [21] B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffractions,(Addson-Welsey,1985) Chap. 11.
- [22] J.I. Pankove, Optical Process in Semiconductors,( Dover,Publications, New York, 1971) p. 36.
- [23] B. Gudden and R. Pohl, Z. Physik 3 (1920) 98.
- [24] B. Gudden and R. Pohl, Z. Physik 5 (1921) 176.
- [25] R.H. Bube, Photoconductivity of Solids, (Wiley, New York, 1960) p. 130.
- [26] Y.P. Varshni, Physica 34 (1967) 149.
- [27] G.D. Boyd, H. Kasper and J. H. Mcfee, IEE, J. Quantum Electronics, QE-7,(1971) 563.
- [28] B. Tev and H.M. Kasper, Phys. B4 (1971) 4455.
- [29] P.W. Yu and W.J. Auderson, Y.S. Park, Solid State Comun. 13 (1973) 1883.