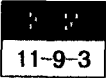


# Electroreflectance 측정에 의한 Si이 첨가된 $Al_{0.32}Ga_{0.68}As$ 에서의 $E_1$ 전이에 대한 연구



## A Study on $E_1$ Transition in Si-Doped $Al_{0.32}Ga_{0.68}As$ by Electroreflectance Measurement

김동렬\*, 손정식\*, 김근형\*, 이철욱\*, 배인호\*, 한병국\*\*

(Dong-Lyeul Kim, Jeong-Sik Son, Geun-Hyoung Kim, Chul-Wook Lee, In-Ho Bae, Byung-Kuk Han)

### Abstract

Silicon doped  $Al_{0.32}Ga_{0.68}As$  were grown by molecular beam epitaxy. Electroreflectance(ER) spectra of the  $E_1$  transition of Schottky barrier Au/n- $Al_{0.32}Ga_{0.68}As$  have been measured at various modulation voltage( $V_{ac}$ ) and dc bias voltage( $V_{bias}$ ). From the  $E_0$  peak, band gap energy of the  $Al_{0.32}Ga_{0.68}As$  is 1.883 eV which corresponds to an Al composition of 32%. As the modulation voltage( $V_{ac}$ ) is changed, a line shape at the  $E_1$  transition does not change, but its amplitude varies linearly. The amplitude of  $E_1$  signal decreases with increasing the forward dc bias voltage( $V_{bias}$ ), but the line shape does not change. It suggests that the low field theory rather than Franz-Keldysh oscillation is required to interpret spectra. Also, spectra at the  $E_1$  transition were broadened with increasing the reverse dc bias voltage( $V_{bias}$ ), which suggests the presence of field-induced broadening.

**Key Words (중요용어)** :  $Al_xGa_{1-x}As$ , Electroreflectance,  $E_1$  transition, Spin-orbital split, Molecular beam epitaxy Flat band condition, Field-induced broadening

### 1. 서 론

반도체의 특성을 연구하는 방법 중에 전기-광학적인 특성을 연구하는 electroreflectance (ER)<sup>1,2)</sup>는 반도체 공간 전하 영역의 전기장을 변화시켜 반사율의 변화를 측정하는 방법으로서, 반도체의 임계점에 대하여 상온에서도 뚜렷하고 날카로운 미분형 신호를 가지므로 물질의 띠구조를 연구하는데 있어서 아주 유용하다 할 수 있다. 또한 반도체의 표면이나 계면의 상태에 대해서 민감하게 변하기 때문

에 bulk나 박막<sup>3,4)</sup> 반도체 뿐만 아니라 양자 우물, 초격자<sup>5,6)</sup>와 같은 미세 구조 반도체를 연구하는데 많이 이용되고 있다.

그러나 대부분의 연구들은 띠간(band-to-band)의 전이인  $E_0(\Gamma_{8v}-\Gamma_{6c})$ 에 초점이 맞추어져 있으며 Brillouin zone에서의  $\Lambda$ 축에 따른 영역의 임계점인  $E_1$  전이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.  $E_1$  전이의 흡수 계수는  $E_0$  전이의 흡수 계수보다 더 크기 때문에,  $E_1$ 에 의한 ER 신호는 반도체 표면 가까이 좁은 영역에서만 나타나고, 따라서 다층 구조 반도체를 연구하는데 있어서 중요한 이점을 가질 수 있다<sup>7)</sup>. 또한 Burstein-Moss 효과<sup>8)</sup>를 통한 운반자 농도 변조에 의한 신호의 왜곡이  $E_1$ 에 대한 ER 신호에서는 기대하기 어렵다. 따라서  $E_1$ 에 대한 ER

\* : 영남대학교 물리학과  
(경북 경산시 대동 214-1, Fax : 053-814-6141  
E-mail : dlkim@physics.yengnam.ac.kr  
\*\* : 경산대학교 물리학과  
1998년 4월 10일 접수, 1998년 8월 5일 심사완료

신호의 연구는 많은 장점을 가진다고 할 수 있다.

본 논문에서는 molecular beam epitaxy에 의해 성장된  $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 에 대하여 Au를 증착하여 Schottky barrier diode를 제작하였고, 상온에서 변조 전압과 dc 바이어스 전압에 따른  $E_I$ 의 에너지 영역에서의 ER 신호에 대해 연구하였다. ER 측정예 의해  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 에서의 Al의 조성(composition),  $E_I$  전이 에너지, spin-orbital split에 의한 에너지차( $\Delta_I$ )를 구하였으며, dc 바이어스 전압에 따른 ER 진폭과 broadening의 변화에 대하여 연구하였다.

## 2. 이론

ER에서 규격화된 반사율 R의 변화는  $\hbar\Omega < \Gamma/3$  일 때, 다음과 같이 3차 미분 함수 형태(third derivative functional form : TDF)로 나타난다[5].

$$\Delta R/R = \text{Re}[\Sigma C e^{i\theta} (E - E_0 + i\Gamma)^{-n}] \quad (1)$$

여기서 C와  $\theta$ 는 각각 진폭과 위상을 나타내고 변조 신호의 대칭성으로부터 구할 수 있으며,  $E_0$ 와  $\Gamma$ 는 각각 시료의 띠간격 에너지와 평탄인자(broadening parameter)이다. n은 임계점 형태(critical point type)와 관계되며 엑시톤, 3차원 띠간 전이, 2차원 띠간 전이에 대해 각각  $n = 2, 2.5, 3$ 의 값을 가진다.

또한  $\hbar\Omega > \Gamma/3$  일때 임계점 에너지보다 큰 영역에서 진동 형태의 신호가 나타나며 이를 Franz-Keldysh oscillation(FKO)이라고 한다. 이 신호는 다음과 같이 점근적(asymptotic) 형태로 표현된다<sup>9,10)</sup>.

$$\Delta R/R \propto \cos\left[\frac{4}{3}\{(E - E_0)/\hbar\Omega\}^{3/2} + \pi(d-1)/4\right]; E > E_0 \quad (2)$$

여기서 d는 임계점 차원이며 직접 전이에 대해서는 3이다.  $\hbar\Omega$ 는 섭동 특성에너지로서 내부 전기장  $E_I$ 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\hbar\Omega = \left(\frac{e^2 E_I^2 \hbar^2}{2\mu}\right)^{1/3} \quad (3)$$

여기서 e는 전자의 전하,  $\hbar$ 는 Planck 상수이고,  $\mu$ 는 환산 질량이다.

## 3. 실험

본 실험에서는 molecular beam epitaxy(MBE)법으로 성장시키고 Si를 약  $3.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  정도 도핑시킨  $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 를 사용하여 Au/ $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$  형태의 Schottky barrier diode를 제작하였다.

Schottky barrier diode 제작은, 먼저 시료들을 trichloroethylene(TCE), acetone 및 methanol 순으로 각 5 분간 세척한 후, 탈이온수를 시료에 충분히 흘린 다음  $\text{N}_2$  가스로 건조시켰다. ER 측정을 위하여 세척한 시료에 Schottky 접합과 오믹 접합으로 각각 Au 및 In을 진공 증착하였다. ER 측정은 변조 전압( $V_{ac}$ )으로 사각파(square wave)를 사용하여 -6.0 V ~ +1.2 V의 영역에서 변조하였고, dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ ) 신호는 -5.0 V ~ +3.0 V 사이로 하였다. 이를 시료에 인가하기 위해 adder를 제작하여  $V_{ac} + V_{bias}$ 를 시료에 공급하였다. 변조 주파수는 800 Hz로 하였으며, probe 빔은 235 W 텅스텐-할로겐 광원을 사용하였다. 이를 초점 거리가 0.25 m인 분광기(monochromator; Spex 270M)를 사용하여 단색화된 빛을 얻었고, 이 빛을 렌즈로 집속시켜 시료에 입사시켰다. 반사된 빛은 p-i-n Si photodiode를 사용하여 검출하였고, 이 신호는 PSD(phase sensitive detector)인 Lock-in Amplifier(EG&G PAR5209)로 증폭하였으며, Lock-in Amplifier의 ratio function을 이용하여 규격화된 변조 반사율( $\Delta R/R$ )을 얻었다. 그리고 시료의 상대 반사율 측정시 외부로부터 빛을 차단하기 위해 암상자를 사용하였다. 측정은 실온에서 수행하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

Si이 첨가된  $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 를 이용한 Au/n- $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$  Schottky barrier diode에 대하여 실온에서 측정된 ER 신호를 그림 1에 나타내었다. 이때 dc 바이어스 전압  $V_{bias}$ 는 인가지 않은 상태에서 변조 전압  $V_{ac}$ 를 0.2 V로 하였으며, 변조 주파수는 800 Hz로 하였다. 그림 1에서 약 1.8 eV 이상의 에너지에서  $E_0$ 와  $E_0 + \Delta_0$ 에 의한 피크가 나타났으며, 이 피크들은 각각  $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$  시료의 Brillouin zone에서  $\Gamma$ 축에 따른 영역의 띠간 전이( $\Gamma_{8v} - \Gamma_{6c}$ ) 및 가전자대의 spin-orbital coupling에 기인한 전이( $\Gamma_{7v} - \Gamma_{6c}$ )이다. 또한 3.0 eV 이상의 에너지에서  $E_I$ 에 의한 피크가 나타남을 알 수 있다.  $E_0$ 와  $E_0 + \Delta_0$ 에 대한 ER 측정값을 식 (1)에 의해 피팅(fitting)한 결과, 각각의 에너지값은 약 1.883 eV와 2.217 eV

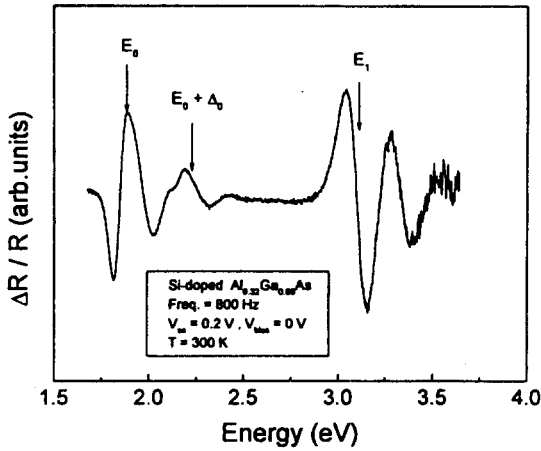


그림 1. Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼.

Fig. 1. ER spectra of Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode.

이었다. 이로부터 Al의 조성에 따른  $E_0$  관계식<sup>11)</sup>을 사용하여 구한 조성의 값은  $\sim 0.32$ 로 나타났고, 이는 성장 조건에 의한 값과 잘 일치하였다. 또한  $E_1$ 에 의한 피크들은 Brillouin zone에서의  $\Gamma$ 축에 따른 영역의 임계점인  $E_1(\Gamma_{4.5v}-\Gamma_{6c})$ 과 가전자대의 spin-orbital coupling에 의해 split된  $E_1+\Delta_1(\Gamma_{6v}-\Gamma_{6c})$ 에 의한 피크가 중첩이 되어서 나타나는 것으로 보인다. 이것에 대해서는 뒤에 다시 설명이 될 것이다.

그림 2(a)는 변조 전압  $V_{ac}$ 의 세기를 0.1 V ~ 1.2 V까지 변화시켰을 때,  $E_1$  과  $E_1+\Delta_1$  전이에 의한 피크의 ER 신호를 나타내었다. 각 피크의 위치는 변조 전압이 증가함에 따라 변하지 않았고, 단지 신호의 진폭만 증가함을 알 수 있다. 또한 변조 전압  $V_{ac}$ 의 세기를 -0.2 V ~ -6.0 V 까지 변화시켰을 때의  $E_1$  과  $E_1+\Delta_1$  피크를 그림 2(b)에 나타내었다.  $V_{ac}$ 의 세기가 양의 값일 때와 마찬가지로 음의 값일 때에도 신호의 진폭만 증가하였다.

그림 3은 변조 전압  $V_{ac}$ 의 세기에 따른  $E_1$  신호의 진폭을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 변조 전압에 따라 진폭이 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 이는  $E_0$  피크가 변조 전압이 증가함에 따라 flat band 조건 이상의 전압에서는 변조량이 포화되는 것과는 다르다는 것을 알 수 있다<sup>12)</sup>. 이것은  $E_1$  에너지 값이 상대적으로  $E_0$  에너지보다 크기 때문에 변조 전압  $V_{ac}$ 의 세기에 큰 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

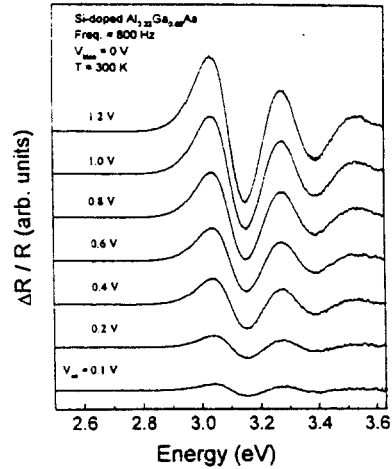


그림 2(a). 300K에서의 변조전압(+ $V_{ac}$ )에 따른 Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode의  $E_1$ 에 대한 ER 스펙트럼.

Fig. 2(a). ER spectra of  $E_1$  transition of Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode obtained for various modulation voltage(+ $V_{ac}$ ) at 300 K.

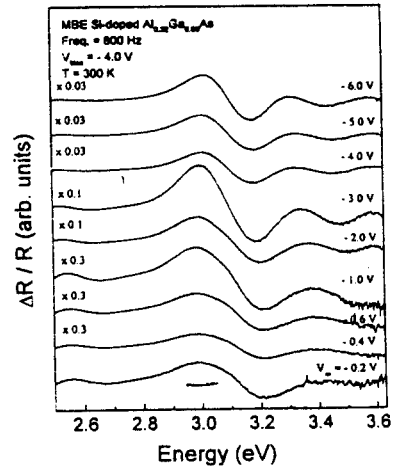


그림 2(b). 300K에서의 변조전압(- $V_{ac}$ )에 따른 Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode의  $E_1$ 에 대한 ER 스펙트럼.

Fig. 2(b). ER spectra of  $E_1$  transition of Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode obtained for various modulation voltage(- $V_{ac}$ ) at 300 K.

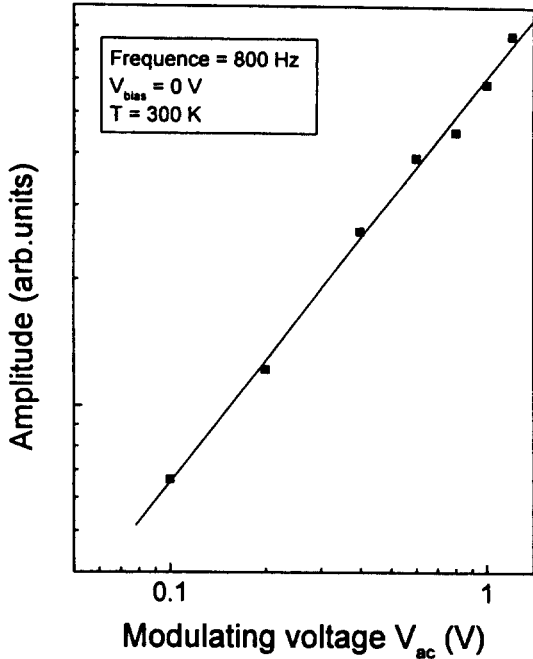


그림 3. Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼에서 변조전압( $V_{ac}$ )에 따른  $E_1$  피크의 크기.

Fig. 3. Amplitude of  $E_1$  peaks versus modulation voltage( $V_{ac}$ ) in ER spectra of Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode.

그림 4에서는 변조 전압을 0.2 V로 고정하고 순방향 dc 바이어스 전압을 0.0 V ~ +3.0 V로 변화시켜 가면서 측정한 ER 신호이다. 순방향 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )이 증가함에 따라  $E_1$  피크는 진폭만 작아지면서 위치의 변화는 없었다. 이것은 순방향 dc 바이어스 전압이 가해짐으로 인해 시료 내부의 공간 전하층에 있는 내부 전기장이 줄어들며, 밴드 휘어짐이 감소되어  $E_1$  피크의 진폭에 영향을 주는 것으로 보인다. 그러나  $E_1$  과  $E_1 + \Delta_1$  에 의한 피크 모양은 변하지 않았고, 이로부터  $E_1$  과  $E_1 + \Delta_1$  에 대한 ER 신호가 FKO에 의한 신호가 아니라, 낮은 전기장 영역에 의한 신호임을 알 수 있다.

그림 5(a)에 역방향 dc 바이어스 전압을 0 V ~ -5.0 V로 변화시켜 가면서 측정한 ER 스펙트럼을 나타내었다. 역방향 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )을 증가시키기에 따라 순방향 dc 바이어스 전압이 증가할 때와 마찬가지로 신호의 진폭이 감소하였다. 이것은 dc 바이어스 전압의 방향과는 상관이 없이 전압의

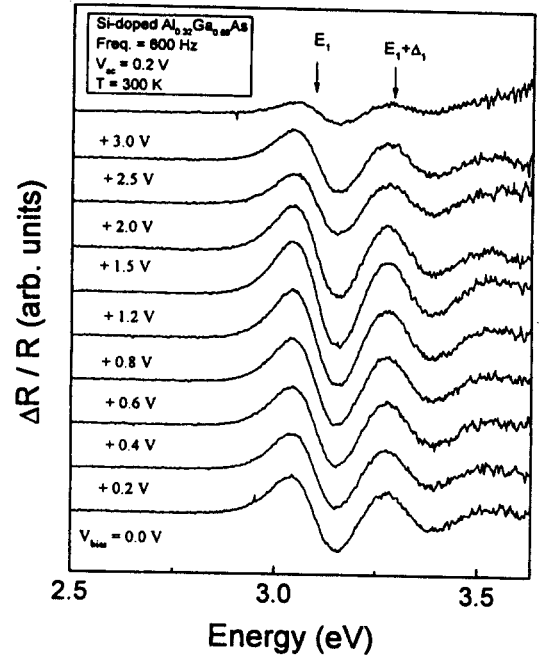


그림 4. 순방향 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )에 따른 Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼.

Fig. 4. ER spectra of Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode obtained for various forward dc bias voltage( $V_{bias}$ ).

크기가 증가하면  $E_1$  신호의 진폭이 감소한다는 것을 알 수 있다<sup>13</sup>. 그리고 순방향 dc 바이어스 전압과는 달리, 역방향 dc 바이어스 전압이 증가함에 따라  $E_1$  신호의 모양이 급격히 변화한다는 것을 알 수 있고, 특히 broadening이 증가함을 알 수 있다. 이는 역방향 dc 바이어스 전압에 따른 field-induced broadening<sup>7,14</sup>이 존재한다는 것을 보여주고 있다. 따라서 낮은 전기장 영역에서 broadening 값이 역방향 dc 바이어스 전압에 의존함을 알 수 있다. 역방향 dc 바이어스 전압에 따른 broadening 값을 그림 5(b)에 나타내었다.

그림 6은 300 K에서 dc 바이어스 전압  $V_{bias}$ 는 인가하지 않은 상태에서 변조전압  $V_{ac}$ 를 0.2 V로 하여 측정한  $E_1$  과  $E_1 + \Delta_1$  에 대한 ER 실험값(실선)과 식 (1)에 의한 피팅값(점선)을 보여주고 있다. 여기서 n 값은 3차원 띠간 전이에 대한 값을 사용하였다.  $E_1$  임계점에 대한 정확한 형태는 불분명하며, 2차원이나 3차원 띠간 전이에 대한 값을 동시에 사

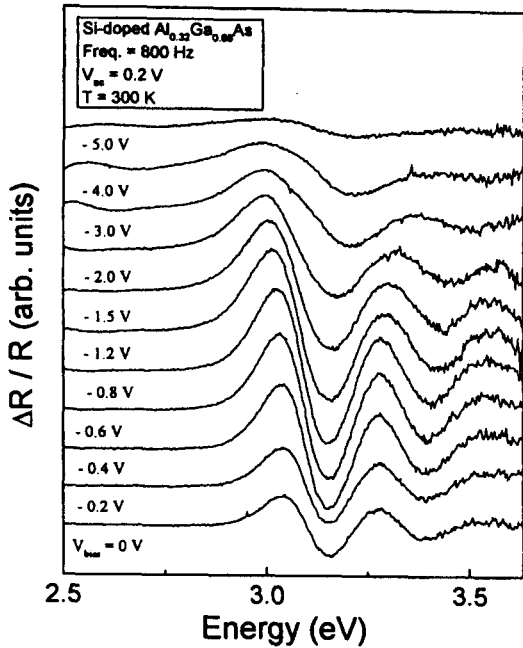


그림 5(a). 역방향 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )에 따른 Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼.

Fig. 5(a). ER spectra of Au/n-Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Schottky barrier diode obtained for various reverse dc bias voltage( $V_{bias}$ ).

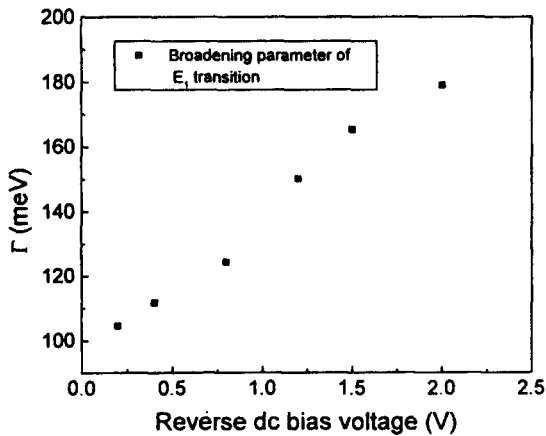


그림 5(b). 역방향 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )에 따른  $E_1$  전이의 broadening 값.

Fig. 5(b). Broadening values of  $E_1$  transition for various reverse dc bias voltage( $V_{bias}$ ).

용하고 있다. 두 경우에 있어서 전기-광학적 함수의 형태는 아주 비슷하다는 것이 알려져 있다<sup>14)</sup>.  $E_1$  과  $E_1+\Delta_1$  에 대하여 피팅한 결과,  $E_1$ 의 에너지 값은 약 3.110 eV 이었고 broadening 값인  $\Gamma=104$  meV 이었다. 또한  $E_1+\Delta_1$ 의 에너지 값은 약 3.332 eV 이었고  $\Gamma=110$  meV 이었다. Adachi에 의해 보고된 Al의 조성에 따른  $E_1$  에너지의 관계식<sup>15)</sup>과 비교해 보면 약간의 오차가 있으며, 이는  $E_0$ 에 의한 값의 오차에서 발생한다고 볼 수 있다. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As에서의 조성에 따른  $E_1$ 의 에너지 값에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

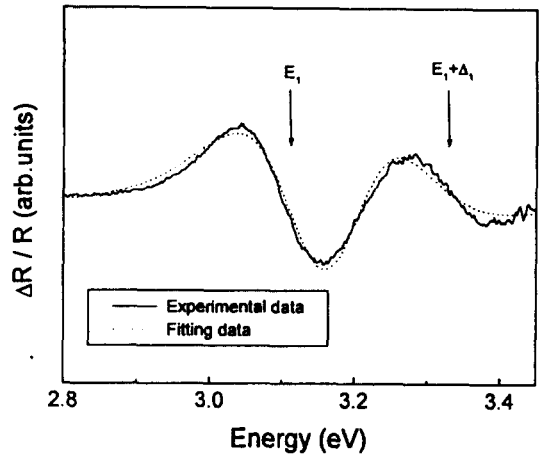


그림 6.  $E_1$  과  $E_1+\Delta_1$  에 대한 ER 측정값(실선)과 피팅값(점선).

Fig. 6. The experimental(solid line) and fitting (dotted line) data of the  $E_1$ ,  $E_1+\Delta_1$  transitions.

## 5. 결 론

Si이 첨가된 n형 Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As를 MBE법으로 성장시킨 후 Au를 진공 증착하여 Au/Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As 형태의 Schottky barrier diode를 제작하였다. 특성 조사를 위해 변조 전압( $V_{ac}$ ) 및 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )의 변화에 따른 electroreflectance(ER)를 300 K에서 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 약 1.8 eV 이상의 에너지에서  $E_0$  와  $E_0+\Delta_0$ 에 의한 피크가 나타났으며, 3.0 eV 이상의 에너지에서  $E_1$ 에 의한 피크가 나타났다.  $E_0$  와  $E_0+\Delta_0$ 의 에너지 값은 약 1.883 eV와 2.217 eV 이었고, 이로부터

Al의 조성의 값은  $\sim 0.32$  이었다.

2. 변조 전압( $V_{ac}$ )을 증가시키에 따라  $E_I$  과  $E_I + \Delta I$  전이에 의한 ER 신호의 위치는 변화없이 진폭만 선형적으로 증가하였다. 이것은  $E_I$  에너지 값이 상대적으로  $E_0$  에너지보다 크기 때문에 변조 전압  $V_{ac}$ 의 세기에 큰 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

3. 순방향 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )이 증가함에 따라  $E_I$  피크는 진폭만 작아지면서 위치의 변화는 없었다. 이로부터  $E_I$  과  $E_I + \Delta I$  에 대한 ER 신호가 FKO에 의한 신호가 아니라, 낮은 전기장 영역에 의한 신호임을 알 수 있다.

4. 역방향 dc 바이어스 전압( $V_{bias}$ )이 증가함에 따라  $E_I$  신호의 진폭은 감소하였으나, broadening이 증가하였고, 이는 역방향 바이어스 전압에 따른 field-induced broadening이 존재한다는 것을 보여 주었다.

5.  $E_I$  과  $E_I + \Delta I$  에 대한 ER 스펙트럼을 TDFP에 의해 피팅한 결과, 각각의 에너지값은 약 3.110 eV 와 3.332 eV 이었고, broadening 값은 104 meV 와 110 meV 이었다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Cardona, "Modulation spectroscopy", Academic Press, New York, (1969).
2. B. O. Seraphin, "Semiconductors and Semimetals", vol 9, Academic Press, New York, (1972).
3. P. M. Raccah, J. W. Garland, S. E. Buttrell, Jr. L. Francke, and J. Jackson, "Electron beam electroreflectance studies of GaAs and CdTe surfaces", Appl. Phys. Lett. 52, 1584 (1988).
4. F. H. Pollak and H. Shen, "Photoreflectance characterization of semiconductors and semiconductor heterostructures", J. Electron. Mater. 19, 399 (1990).
5. M. Gal, J. S. Yuan, J. M. Viner, P. C. Taylor and G. B. Springfellow, "Modulate-reflectance spectroscopy of InP doping superlattices", Phys. Rev. B33, 4410 (1986).
6. O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook and W. T. Beard, "Temperature-dependence of photoreflectance in GaAs-AlGaAs multiple quantum wells", Surf. Sci. 174, 206 (1986).
7. Ali Badakhshan, R. Glosser and S. Lambert, "Correlation between the photoreflectance response at  $E_I$  and carrier concentration in n- and p-GaAs", J. Appl. Phys. 69, 2525 (1991).
8. E. Burstein, "Anomalous optical absorption limit in InSb", Phys. Rev. 93, 632 (1954).
9. B. O. Seraphin and N. Bottka, "Band-structure analysis from electroreflectance studies", Phys. Rev. 145, 628 (1966).
10. D. E. Aspnes, "Handbook on semiconductors", edited by T. S. Moss, North-Holland, vol 2 (1980).
11. D. Huang, G. Ji, U. K. Reddy and H. Morkoc, "Photoreflectance, absorption, and nuclear-resonance reaction studies of  $Al_xGa_{1-x}As$  grown by molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys. 63, 5447 (1988).
12. 김근형, 김동렬, 김종수, 김인수, 배인호, 한병국, "Si이 첨가된  $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ 에서의 Electroreflectance에 관한 연구", 전기전자재료학회지. 10, 692 (1997).
13. D. P. Wang, "Electroreflectance of Ag/GaAs", J. Vac. Sci. Technol. B12, 3103 (1994).
14. R. A. Batchelor and A. Hamnett, " $E_I$  electrolyte electroreflectance of GaAs modeled by Franz-Keldysh theory", J. Appl. Phys. 71, 1376 (1992).
15. S. Adachi, "GaAs, AlAs, and  $Al_xGa_{1-x}As$  - Material parameters for use in research and device Applications", J. Appl. Phys. 58, R1 (1985).