

Si이 첨가된 Al_{0.33}Ga_{0.67}As에서의 Electroreflectance에 관한 연구

10-7-7

A Study on Electroreflectance in Si-Doped Al_{0.33}Ga_{0.67}As

김근형*, 김동렬*, 김종수*, 김인수*, 배인호*, 한병국**

(Geun-Hyoung Kim, Dong-Lyeul Kim, Jong-Su Kim, In-Soo Kim, In-Ho Bae, Byung-Kuk Han)

Abstract

The silicon doped Al_{0.33}Ga_{0.67}As were grown by molecular beam epitaxy. The electroreflectance(ER) spectra of Schottky barrier Au/n-Al_xGa_{1-x}As have been measured at various modulation voltage(V_{ac}) and dc bias voltage(V_{bias}). From the observed Franz-Keldysh oscillations(FKO) peak, the band gap energy of the Al_xGa_{1-x}As is 1.91 eV which corresponds to an Al composition of 33%. The internal electric field(E_i) of this sample is 2.96×10^5 V/cm. As the modulation voltage(V_{ac}) is changed, the line shape of ER signal does not change but its amplitude varies linearly. The amplitude as a function of modulation voltage has saturated at 0.8 V. The internal electric field has decreased from 6.47×10^5 V/cm to 2.00×10^5 V/cm as the dc bias voltage(V_{bias}) increases from -3.5 V to +0.8 V. The values of built-in voltage(V_{bi}) and carrier concentration(N) determined from the plot of V_{bias} versus E_i^2 are 0.855 V and 3.83×10^{17} cm⁻³, respectively.

Key Words(중요용어) : Al_xGa_{1-x}As, Electroreflectance, Molecular beam epitaxy(분자선 에피택시), FKO, Space charge region (공간전하영역), Built-in voltage(내부 전압), Internal electric field(내부 전기장)

1. 서 론

Al_xGa_{1-x}As/GaAs 이종접합 형태는 실리콘과 비교하여 전자 이동도가 크고 두 물질의 격자상수가 거의 일치하며, Al_xGa_{1-x}As의 조성비 x(0.4이하)에 따라 다양한 에너지-갭을 가지는 직접 천이형 밴드구조¹⁾를 가지기 때문에 heterojunction transistor, high electron mobility transistor (HEMT)와 같은 고속전자소자(high-speed electronic device)나 light emitting diode (LED), quantum well laser 등의 광전자 소자(optoelectronic device)의 물질로서 많은 연구대상이 되어왔다²⁻⁵⁾. 그리고 GaAs나 Al_xGa_{1-x}As 합금의 특성을 연구하는 방법으로 전기적 방법과 광학적 방법이 있으며, 이중 반도체의 전기-광학적(electro-optic) 특성을 연구하는 electroreflectance(ER)^{6,7)}는 반도체 공간전하영역(space charge

region : SCR)의 전기장을 변화시켜 반사율의 변화를 측정하는 방법으로서, 상온에서도 뚜렷하고 날카로운 미분형 신호를 가지기 때문에 띠틈격 에너지를 높은 정밀도로 측정할 수 있을 뿐아니라 표면이나 계면의 상태에 대해서 민감하게 변하는 신호를 가진다. 따라서 이러한 미분형의 신호로 인해, 반도체의 박막구조(thin film/bulk)⁸⁾, 표면과 계면구조⁹⁾, 미세구조(quantum wells, superlattices, heterojunctions)^{10,11)} 등을 연구하는데 중요한 도구가 되어왔다. SCR의 전기장을 변조시키는 방법으로는 semiconductor-electrolyte, metal-insulator-semiconductor(MIS), Schottky barrier 등의 구조들이 있으며¹²⁻¹⁴⁾ 이중 MIS와 Schottky barrier구조는 쉽게 SCR의 전기장을 제어할 수 있고, 실제 소자로 많이 사용되고 있기 때문에 GaAs나 InP 등을 연구하는데 많이 적용되어 왔으나, Al_xGa_{1-x}As 합금에 대한 ER 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 Si이 첨가된 Al_{0.33}Ga_{0.67}As에 Au를 증착하여 Schottky barrier diode를 제작하였으며, 상온에서 변조 전압과 dc 바이어스 전압에 따른 ER 신호를 측정하였다.

* : 영남대학교 물리학과

** : 경산대학교 물리학과

접수일자 : 1997년 4월 21일

심사완료 : 1997년 7월 20일

또한, 바이어스 전압에 따른 Franz-Keldysh oscillation(FKO)의 주기와 ER 진폭의 변화로 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 띠간격 에너지(E_0)와 Al의 조성비 (composition), spin-orbital split에 의한 에너지 차 (Δ_0), 내부 전기장(E_i), 내부 전압(V_{bi}), 그리고 운반자 농도(N)를 구하였다.

2. 이 론

ER에서 규격화된 반사율의 변화는 $\hbar\Omega < \Gamma/3$ 일 때, 다음과 같이 3차 미분 함수 형태(third derivative functional form : TDF)로 나타난다.¹⁰⁾

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

여기서 C 와 θ 는 각각 진폭과 위상을 나타내고 변조 신호의 대칭성으로부터 구할 수 있으며, E_0 와 Γ 는 각각 시료의 띠간격 에너지와 평탄인자이다. n 은 임계점 형태(critical point type)와 관계되며 엑시톤, 3차원 밴드갭 전이, 2차원 밴드갭 전이에 대해 각각 $n = 2, 2.5, 3$ 의 값을 가진다.

또한 $\hbar\Omega > \Gamma/3$ 일 때 띠간격 에너지(E_0)보다 큰 영역에서 진동 형태의 신호가 나타나며 이를 Franz-Keldysh oscillation(FKO)이라고 한다. 이 신호는 다음과 같이 점근적 (asymptotic) 형태로 표현된다.^{15,16)}

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

여기서 d 는 임계점 차원이며 직접 전이에 대해서는 3이다. $\hbar\Omega$ 는 섭동 특성에너지로서 내부전기장 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 e 는 전자의 전하, \hbar 는 Planck 상수이고, μ 는 환산질량이다. 그리고 FKO 피이크의 위치는 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$E_j = \hbar\Omega(F_j) + E_0, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$F_j = \{ 3\pi[(j-1/2)/4] \}^{2/3} \quad (5)$$

여기서 E_j 는 FKO의 j 번째 피이크의 위치이다. 따라

서 F_j 에 대한 E_j 의 그래프로부터 기울기가 $\hbar\Omega$ 이며, y 축과의 절편이 띠간격 에너지(E_0)인 직선이 된다.

또한 띠간격 에너지가 결정되면 다음과 같은 방법으로 내부 전기장을 구할 수 있다. FKO 피이크의 위치는 다음 식으로 주어지며

$$\frac{4}{3\pi} (E_m - E_0)^{3/2} = (\hbar\Omega)^{3/2} \left[m - \frac{\theta}{\pi} \right] \quad (6)$$

이 식에서 FKO index m 은 FKO의 m 번째 피이크의 위치이고, θ 는 임의의 위상, 그리고 E_m 은 m 번째 진동 정점의 에너지이다. 따라서 m 에 대한

$\frac{4}{3\pi} (E_m - E_0)^{3/2}$ 의 그래프에서 기울기는 $(\hbar\Omega)^{3/2}$ 으로 섭동 특성 에너지와 관계되며, 이를 식 (3)에 대입하여 내부 전기장을 구할 수 있다.

한편 n -형 반도체에서 dc 바이어스전압(V_{bias})의 변화에 따른 시료 내의 공간전하층 폭(W)과 내부 전기장(E_i)사이의 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.¹⁷⁾

$$W = \left[\left(\frac{2k_s \epsilon_0}{eN} \right) (V_{bi} - V_{bias} - \frac{KT}{e}) \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$E_i = \left[\left(\frac{2eN}{k_s \epsilon_0} \right) (V_{bi} - V_{bias} - \frac{KT}{e}) \right]^{1/2} \quad (8)$$

여기서 N 은 캐리어 농도, k_s 는 유전상수, ϵ_0 는 진공에서의 유전율, V_{bi} 는 내부 전압, K 는 Boltzmann 상수, 그리고 T 는 절대온도이다.

3. 실험

본 실험에서는 molecular beam epitaxy (MBE)법으로 성장시킨 Si이 첨가된 $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ ($N = 3.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)를 사용하여 $Au/Al_xGa_{1-x}As$ 형태의 Schottky barrier diode를 제작하였다. Schottky barrier diode 제작은, 먼저 시료들을 trichlorethylene(TCE), acetone 및 methanol 순으로 각 5분간 세척한 후, 탈이온수를 시료에 충분히 흘린 다음 N_2 가스로 건조시켰다. ER 측정을 위하여 세척한 시료에 Schottky 접합과 오믹접합으로 각각 Au 및 In을 진공 증착하였다. ER 측정은 변조 전압으로 정현파(square wave)를 사용하여 0.1 V ~ 1.2 V의 영역에서 변조하였고, 바이어스 전압(V_{bias}) 신호는 -3

$V \sim +1.2$ 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 초점거리가 0.25 M인 분광기(monochromator; Spex 270M)를 사용하여 단색화된 빛을 얻었고, 이 빛을 렌즈로 집속시켜 시료에 입사 시켰다. 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 Amp.의 ratio function을 이용하여 규격화된 변조 반사율($\Delta R/R$)을 얻었다. 그리고 시료의 상대 반사율 측정시 외부로부터 빛을 차단하기 위해 암상자를 사용하였다. 측정은 300 K에서 수행하였다.

4. 실험결과 및 분석

Si이 첨가된 $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ 의 Au/n- $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ Schottky 장벽 diode에 대해 300 K에서 측정한 ER 신호를 그림 1에 나타내었다. 이때 변조전압은 0.2 V, 변조 주파수는 800 Hz 로 하였으며 바이어스 전압은 인가하지 않았다. 그림 1에서 약 1.91 eV 이상의 에너지에서 밴드간 전이(E_0)에 의한 FKO 피이크가 나타났으며, 1.91 eV 아래에 A 로 표시된 shoulder가 관측되었다. A 피이크는 다음에 언급하겠지만 엑시톤에 의한 피이크로 사료된다. 또한 약 2.18 eV 에서 spin orbital split에 의한 $E_0+\Delta_0$ 피이크가 관측되었으며, 시료의 공간전하 영역(SCR)에서의 고 전기장 형성에 의해 FKO 피이크와 $E_0+\Delta_0$ 피이크가 중첩된 형태로 관측되었다.

시료의 내부 전기장과 띠틈격 에너지를 구하기 위해 식(4)에서의 E_g 와 F_g 의 관계를 그림 1에 삽입하였다. 이를 선형 함수(linear function)로 피팅한 결과, y축 절편으로부터 구한 띠틈격 에너지(E_0)는 1.915 eV 로 나타났다. 이 결과는 Al의 조성비에 따른 에너지-갭 관계식¹⁸⁾을 사용하여 Al의 조성비가 $x=0.33$ 임을 얻었다 그리고 기울기로 부터 식 (3)을 사용하여 구한 내부전기장(E_i)은 2.956×10^5 V/cm의 값을 얻었다. 이때 계산에 사용한 환산질량은 $\mu = 0.0827m_0$ ¹⁹⁾를 사용하여 계산하였다.

그림 2(a)는 바이어스 전압을 인가하지 않고 변조 전압을 0.1 V ~ 1.2 V 로 변화시켜 가면서 측정한 ER 스펙트럼을 나타내었다. E_0 와 A, $E_0+\Delta_0$ 그리고 FKO 피이크의 위치는 변조 전압이 증가함에 따라 변하지 않았고 단지 신호의 진폭만 증가하였다.

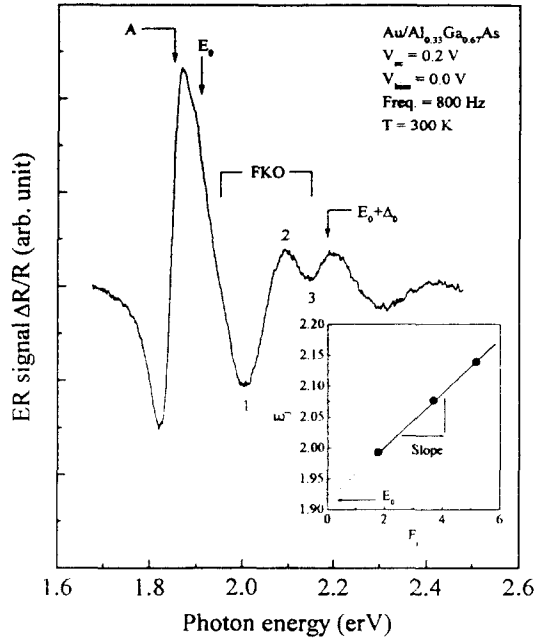


그림 1. 300K에서 측정된 Au/n- $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼.

Fig. 1. ER spectra of Au/n- $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ Schottky barrier diode at 300 K.

여기서 각 피이크들의 변조 전압에 따른 증가량과 A 피이크의 근원을 알아보기 위해 변조 전압에 따른 각 피이크들의 진폭을 그림 2(b)에 나타내었다.

그림 2(b)에서 알 수 있듯이 각 피이크들은 거의 비슷한 증가량을 보이고 있다. 변조 전압에 따른 진폭의 증가량을 선형함수로 피팅한 결과 기울기는 약 1이었다. 변조량에 따른 진폭변화를 나타내는 기울기는 불순물에 의한 피이크와 밴드간 전이에 의한 것과는 다르기 때문에²⁰⁾, E_0 피이크와 중첩되어 나타난 A 피이크는 불순물이 아닌 엑시톤에 의한 피이크로 생각된다.

변조 전압이 약 0.8 V 이상에서는 변조량에 대한 진폭의 변화량이 포화되기 시작하였다. 이 현상은 flat band 조건 이상의 변조는 변조량에 비해 공간전하층(SCR)의 내부 전기장이 크게 변화를 하지 않기 때문에 포화된다고 생각되며, 이 결과로 부터 내부 전압(V_{bi})가 0.8 V 근처의 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 3에서는 변조 전압을 0.2 V로 고정하고 순방향 바이어스 전압을 0.0 V ~ +0.8 V로 변화시켜 가면서 측정한 ER 신호이다. 바이어스 전압(V_{bias})이 증가함에 따라 E_0 피이크와 $E_0+\Delta_0$ 피이크는 진폭만 작아지면서 위치의 변화는 없었다. 또한 FKO 피이

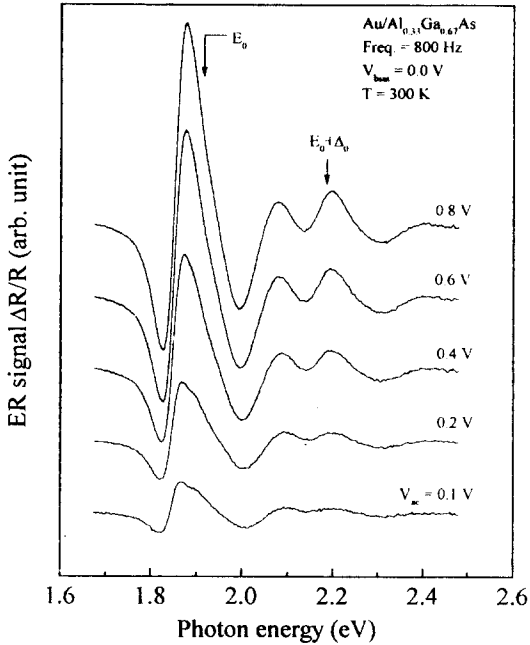


그림 2(a). 300K에서의 변조전압(V_{ac})에 따른 $Au/n-Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼.

Fig. 2(a). ER spectra of $Au/n-Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ Schottky barrier diode for various modulation voltage(V_{ac}) at 300 K.

크는 저 에너지로 이동하면서 진동 주기가 짧아지고 있음을 알 수 있다. 그리고 바이어스 전압이 가해지지 않았을 때 $E_0 + \Delta_0$ 피크와 중첩되어 있는 FKO의 3번 피크가 바이어스가 가해짐으로 인해 $E_0 + \Delta_0$ 피크로부터 분리되고 있음을 알 수 있다. 따라서 순방향 바이어스 전압이 가해짐으로 인해 시료내부의 공간전하 층에 있는 내부 전기장이 줄어들며, 밴드휘어짐이 감소됨을 알 수 있다.

그림 4는 역방향 바이어스 전압을 0 V ~ -3.5 V로 변화시켜 가면서 측정된 ER 스펙트럼 나타내었다. 역방향 바이어스 전압(V_{bias})을 증가시키기에 따라 순방향 바이어스 전압이 증가할 때와 마찬가지로 신호의 진폭이 감소하였다. 이것은 바이어스 전압의 방향과는 상관 없이 전압의 크기가 증가하면 신호의 진폭이 감소한다는 것을 알 수 있다.²¹⁾ 그리고 A 피크와 E_0 피크가 분리되기 시작하였으며 약 -1.5 V 이상의 바이어스 전압에서는 거의 완전히 분리 되었다. 또한 FKO 주기가 증가하면서 $E_0 + \Delta_0$ 피크와 완전히 중첩이 되었다. 따라서 역방향 바이어스 전압이 가해짐으로 인해 시료내부의 공간전하

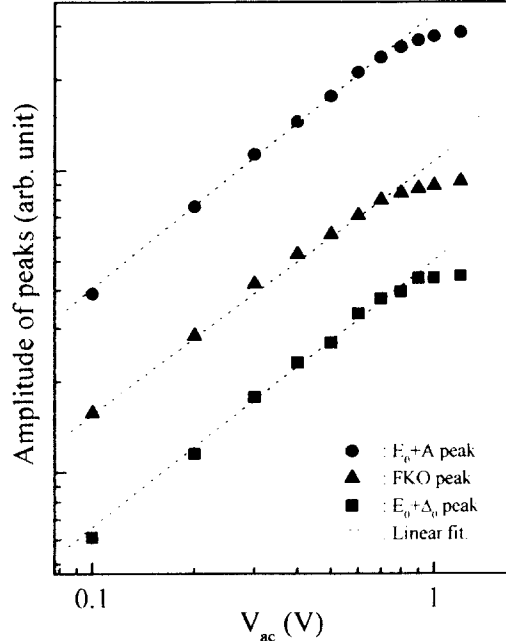


그림 2(b). $Au/n-Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼에서 변조전압에 따른 피크의 크기.

Fig. 2(b). Amplitude of peaks versus modulation voltage(V_{ac}) in ER spectra of $Au/n-Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ Schottky barrier diode.

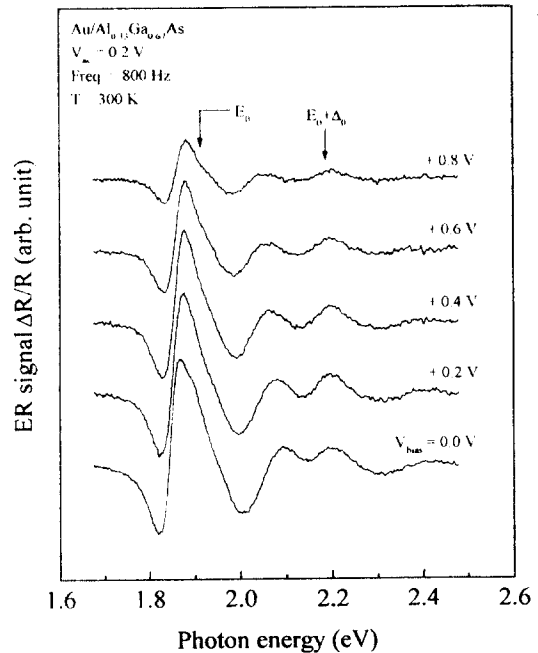


그림 3. 순방향 dc 바이어스 전압(V_{bias})에 따른 Au/ n -Al_{0.33}Ga_{0.67}As Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼.

Fig. 3. ER spectra of Au/ n -Al_{0.33}Ga_{0.67}As Schottky barrier diode for various forward dc bias voltage(V_{bias}).

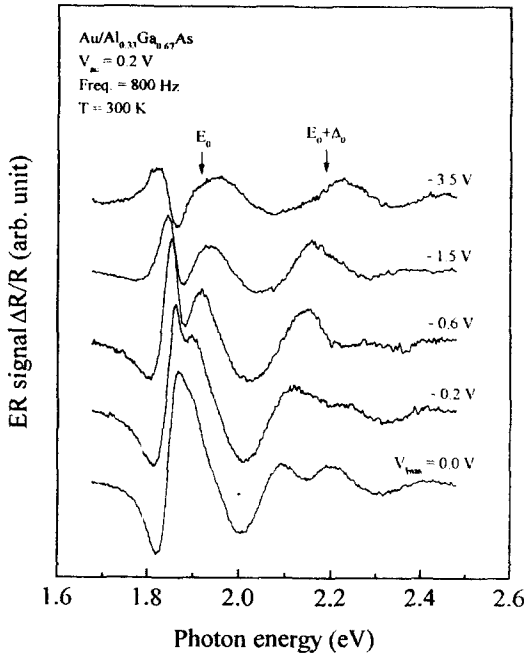


그림 4. 역방향 dc 바이어스에 따른 Au/ n -Al_{0.33}Ga_{0.67}As Schottky barrier diode의 ER 스펙트럼.

Fig. 4. ER spectra of Au/ n -Al_{0.33}Ga_{0.67}As Schottky barrier diode for various reverse dc bias voltage(V_{bias}).

층에 있는 내부 전기장(E_i)이 증가하고, 밴드휘어짐이 커짐을 알 수 있다.

특히 A 피이크의 위치는 -3.5 V의 역바이어스 전압에서 저에너지 방향으로 45.4 meV 이동하였다. 이는 공핍층 폭(W)과 내부 전기장(E_i)이 역바이어스 전압이 증가할 수록 커지므로 공간전하 층의 높은 전장에 의해 엑시톤은 해리되기 때문에 공간전하 층 밖의 엑시톤과의 간섭에 의한 효과로 설명된다.

그림 5는 바이어스를 가했을 때, FKO 피이크의 지수 m 과 $4/3\pi(E_m - E_0)^{3/2}$ 과의 관계를 나타내었다. 순방향 바이어스 전압을 가했을 때는 기울기가 작아지고 역방향 바이어스 전압을 가했을 때, 전압의 크기가 증가할 수록 기울기가 증가함을 알 수 있다.

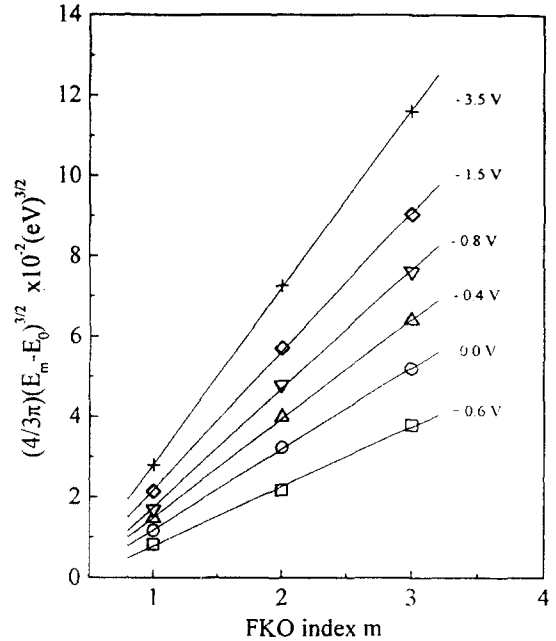


그림 5. dc 바이어스 전압(V_{bias})에 따른 FKO 번호와 $4/3\pi(E_m - E_0)^{3/2}$ 사이의 관계.

Fig. 5. Relationship between $4/3\pi(E_m - E_0)^{3/2}$ and index of FKO with various dc bias voltage(V_{bias}).

이 값을 선형함수로 피팅하여 구한 기울기로 부터 식 (6)을 사용하여 내부 전기장을 구하면 $E_i = 2.00 \times 10^5 \sim 6.47 \times 10^5$ V/cm 였으며, 표 1에 바이어스 전압에 따른 내부 전기장 값을 나타내었다.

그림 6은 캐리어 농도와 내부 전압을 구하기 위해 E_i^2 와 V_{bias} 의 관계를 나타내었다. 여기서 -2.5 V ~ +0.2 V까지는 선형적으로 E_i^2 는 감소하고 있으며 이 범위 밖에서는 포화가 되는 현상이 일어났다. 식 (8)을 사용하여 선형함수로 피팅한 결과 x 절편 값은 0.83 V 이며, 기울기는 -1.14658×10^{11} 이었다. 이 값으로 식 (8)을 사용하여 계산된 농도(N)와 내부 전압(V_{bi})는 각각 3.83×10^{17} cm⁻³, 0.855 V 이었다. 이 계산에 사용된 유전상수(k_s)는 12.1 로서, 이 값은 GaAs의 유전상수 $k_s=13.1$ 과 AlAs의 $k_s=10.06^{21)}$ 의 값으로부터 Al의 조성비 0.33을 사용하여 구하였다.

그림 7은 순방향 바이어스에 따른 FKO의 진폭을 나타내었다. $V_{bias} + V_{bi} = 0$ 에서 전도대는 평탄(flat) 되기 때문에 FKO는 나타나지 않는다는 조건으로부터 내부 전압(V_{bi})를 구할 수 있다. 그림 7에서 점선은 실험값을 2차 다항식으로 피팅한 값으로서, x 축과의 절편으로 부터 내부 전압을 구한 결과 0.856 V

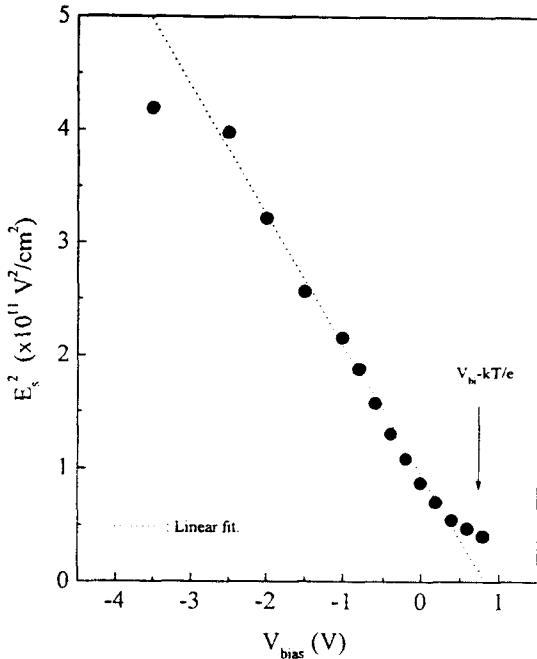


그림 6. dc 바이어스 전압(V_{bias})과 E_i^2 사이의 관계.
 Fig. 6. Relationship between E_i^2 and dc bias voltage(V_{bias}).

로 나타났다. 이 값은 그림 6을 선형함수로 피팅하여 구한 0.855 V와 잘 일치하였다.

표 1. 그림 5로부터 계산된 내부전기장.

Table 1. Internal electric field calculated from Fig. 5.

Forward bias	
Voltage(V_{bias})	Internal electric field $\times 10^5$ (V/cm)
0.8	2.00
0.6	2.17
0.4	2.34
0.2	2.65
0.0	2.96

Reverse bias	
Voltage(V_{bias})	Internal electric field $\times 10^5$ (V/cm)
-3.5	6.47
-2.5	6.30
-2.0	5.67
-1.5	5.07
-1.0	4.64
-0.8	4.34
-0.6	3.97
-0.4	3.61
-0.2	3.29
0.0	2.96

5. 결 론

MBE법으로 성장한 Si이 첨가된 n-형 $Al_xGa_{1-x}As$ 에 Au를 진공증착하여 $Au/Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ 형태의 Schottky barrier diode를 제작하였다. 특성조사를 위해 변조전압(V_{ac}) 및 dc 바이어스전압(V_{bias})의 변화에 따른 electroreflectance(ER)를 300 K에서 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Si이 첨가된 $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ 시료의 띠틈간격 에너지(E_o)와 spin orbital split에 의한 $E_o + \mathcal{L}_o$ 는 각각 1.91 eV 와 2.18 eV 이었고, Al의 조성비는 0.33 이었다.

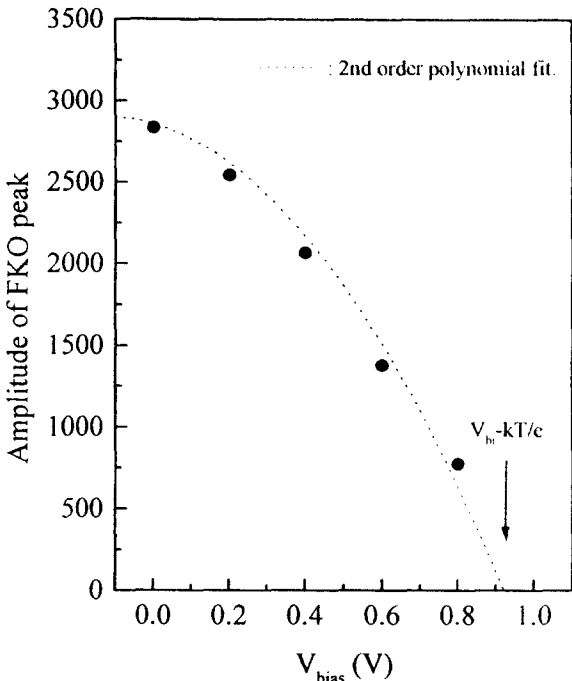


그림 7. dc 바이어스 전압(V_{bias})와 FKO 피크 크기와의 관계.

Fig. 7. Relationship between amplitude of FKO peak and dc bias voltage(V_{bias}).

2. 변조 전압(V_{ac})을 증가시킴에 따라 ER 신호의 위치는 거의 변화없이 진폭만 증가하였다. 변조 전압에 따른 신호의 크기를 조사한 결과 약 0.8 V에서 포화되기 시작하였으며, 이 결과로부터 내부 전압을 추정할 수 있었다.
3. 순방향 및 역방향 바이어스 전압(V_{bias})의 증가에 대하여 신호의 진폭은 두 방향 다같이 감소하였다. 그리고 순방향 바이어스 전압(V_{bias})이 증가할수록 FKO 피이크의 진동주기는 짧아졌으나, 역방향 바이어스 전압이 증가할수록 FKO 피이크의 진동주기는 길어졌다. 이는 반사되는 빛의 광흡수가 V_{bias} 에 따른 공간전하층의 폭에 의존하기 때문이다.
4. V_{bias} 를 $-3.5 \sim +0.8$ V로 증가시킴에 따라 시료의 공간전하층의 폭의 감소로 내부 전기장(E_i)은 $6.47 \times 10^5 \sim 2.00 \times 10^5$ V/cm로 감소하였다.
5. V_{bias} 에 따른 E_i^2 관계의 그래프로부터 300 K에서 캐리어 농도(N)와 내부 전압(V_{bi})는 각각 $3.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 와 0.855 V였다. 특히 V_{bi} 값은 바이어스에 따른 FKO 진폭의 값으로 부터 2차 다항식 피팅으로 얻은 값 0.856 V와 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

1. 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).
2. O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. Beard and J. Comas, "Photoreflectance characterization of interband-transitions in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells and modulation-doped heterojunctions", Appl. Phys. Lett. 46, 970(1985).
3. H. Shen, P. Parayantal, F. H. Pollak, M. Tomkiewicz, T. J. Drummond and J. N. Schulman, "Photoreflectance study of GaAs/AlAs superlattices-fit to electromodulation theory", Appl. Phys. Lett. 48, 653(1986).
4. T. N. Theis, B. D. Parker, P. M. Solomon, and S. L. Wright, "Hot-electron capture to DX centers in $Al_xGa_{1-x}As$ at low Al mole fractions(x less than 0.2)", Appl. Phys. Lett. 49, 1542(1986).
5. X. Yin, F. H. Pollak, L. Pawlowicz, T. O. Neill and M. Hafizi, "Characterization of GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ heterojunction bipolar-transistor structures using photoreflectance", Appl. Phys. Lett. 56, 1278(1990).
6. M. Cardona, "Modulation spectroscopy", Academic Press, New York(1969).
7. B. O. Seraphin, "Semiconductors and Semimetals", vol 9, Academic Press, New York,(1972).
8. P. M. Raccach, 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).
9. F. H. Pollak and H. Shen, "Photoreflectance characterization of semiconductors and semiconductor heterostructures", J. Electron. Mater. 19, 399(1990).
10. 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).
11. 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)
12. D. E. Aspnes and A. A. Studna, "Schottky-Barrier Electroreflectance : Application to GaAs", Phys. Rev. B7, 4605(1973).
13. A. Ksendzov, F. H. Pollak, J. A. Wilson and V. A. Cotton, "Electroreflectance study of HgCdTe in the metal-insulator-semiconductor configuration at 77K", Appl. Phys. Lett.. 49, 648(1986).
14. X. Yin and F. H. Pollak, "Novel contactless mode of electroreflectance", Appl. Phys. Lett. 59, 2305(1991).
15. B. O. Seraphin and N. Bottka, "Band-structure analysis from electroreflectance studies", Phys. Rev. 145, 628(1966).
16. D. E. Aspnes, "Handbook on semiconductors", edited by T. S. Moss, North-Holland, vol 2 (1980).
17. H. Shen, F. H. Pollak and Y. M. Woodall, "Photoreflectance study of fermi level changes in photowashed GaAs", J. Vac. Sci. Technol. B8, 413(1990).
18. T. F. Kuech, D. J. Wolford, R. Potemski, J. A. Bradley and K. H. Kelleher, D. Yan, J. P. Farrell, P. M. S. Lesser and F.H.Pollak,

"Dependence of the $Al_xGa_{1-x}As$ band edge on alloy composition based on the absolute measurement of x ", Appl. Phys. Lett. 51, (1987)

19. H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, "Heterostructure Lasers", Academic, New York, Part A (1978).

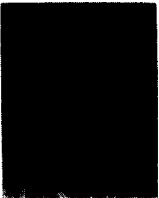
20. D. Huang, G. Ji, U. K. Reddy and H. Morkoc, "Photoreflectance, absorption, and nuclear-resonance reaction studies of $Al_xGa_{1-x}As$ grown by molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys. 63, 5447(1988).

21. D. P. Wang, "Electroreflectance of Ag/GaAs", J. Vac. Sci. Technol. B12, 3103(1994).

시 사 : 개

김근형

1972년 10월 26일생. 1995년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



김인수

1961년 8월 19일생. 1985년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1987년 8월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1994년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 영남대학교 및 신일전문대학 강사.



김동렬

1967년 4월 2일생. 1990년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1997년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 영남대학교 강사.



배인호

1949년 10월 13일생. 1973년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1978년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1991년 8월 동국대학교 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 영남대학교 물리학과 교수.



김중수

1969년 1월 16일생. 1992년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



한병국

1957년 12월 22일생. 1984년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1986년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1991년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 경산대학교 교수.

