

불순물이 첨가되지 않은 n -GaAs에서의 Electroreflectance에 관한 연구

김인수 · 김근형 · 손정식 · 이철욱 · 배인호 · 김상기*

영남대학교 물리학과, *한국전자통신연구소 반도체연구단
(1997년 1월 27일 접수)

A study on electroreflectance in undoped n -GaAs

In-Soo Kim, Geun-Hyoung Kim, Jeong-Sik Son, Chul-Wook Lee,
In-Ho Bae and Sang-Gi Kim*

Department of Physics, Yeungnam University, Gyongsan, Gyongbuk, 712-749, Korea

*Semiconductor Technology Division, ETRI, Taejon 305-600, Korea

(Received January 27, 1997)

요 약 - Au/ n -GaAs(100) Schottky 장벽 diode를 제작하여 변조전압(V_{ac}) 및 dc 바이어스 전압(V_{bias}) 변화에 따른 electroreflectance(ER)를 측정하였다. 관측된 Franz-Keldysh oscillation(FKO) 피크로부터 이 시료의 내부 전기장(E_i)은 5.76×10^4 V/cm였다. V_{ac} 를 변화시킴에 따라 ER 신호의 모양은 변화가 없고, 진폭만 선형적으로 증가하였다. 순방향 및 역방향의 V_{bias} 변화에 따라 ER 신호의 진폭은 감소하였으며, V_{bias} 가 -5.0~0.6 V로 증가함에 따라 E_i 는 $19.3 \times 10^4 \sim 4.39 \times 10^4$ V/cm로 감소하였다. 그리고 V_{bias} 변화에 대한 E_i^2 의 그래프로부터 built-in 전압(V_{bi})은 0.70 V였으며, 이 값은 V_{bias} 변화에 따른 FKO 피크의 진폭 관계 그래프에서 얻은 결과와 잘 일치하였다. 또한 이 시료의 캐리어 농도(N)와 전위장벽(Φ)은 300 K에서 각각 2.4×10^{16} cm⁻³와 0.78eV의 값을 얻었다.

Abstract - Au/ n -GaAs(100) Schottky barrier diode has been investigated by using electroreflectance(ER). From the observed Franz-Keldysh oscillations(FKO), the internal electric field(E_i) of this sample is 5.76×10^4 V/cm at 300 K. As the modulation voltage(V_{ac}) is changed, the line shape of ER signal does not change but its amplitude varies linearly. For increasing forward and reverse dc bias voltage(V_{bias}), the amplitude of ER signal decreases. The internal electric field decreased from 19.3×10^4 V/cm to 4.39×10^4 V/cm as V_{bias} increases from -5.0 V to 0.6 V. For Au/ n -GaAs the value of built-in voltage(V_{bi}) determined from the plot of V_{bias} versus E_i^2 is 0.70 V. This value agrees with that observed in the plot of V_{bias} versus amplitude of FKO peak. In addition, the carrier concentration(N) and potential barrier(Φ) of the sample at 300 K are found to be about 2.4×10^{16} cm⁻³ and 0.78 eV, respectively.

1. 서 론

전기장을 변조원으로 사용하는 electromodulation spectroscopy는 Brillouin zone에서 임계점 전이에 의해 변화하는 예리한 미분형의 신호로서[1, 2], 반도체의 표면 및 계면에 존재하는 표면 및 내부 전기장에 따라 민감하게 변화하는 신호형태를 가진다[3, 4]. 그리고 시료의 절대 흡수율이나 반사를 측정시 미약한 신호를 검출할 때의 어

려움을 많이 개선하였다. 따라서, electromodulation spectroscopy는 반도체의 전기 및 광학적 특성을 연구하는 데 유용한 도구로써 많은 연구가 수행되고 있다[5, 6].

전기장을 변조시키는 방법에는 각각 접촉 및 비접촉 형태가 있다. 접촉형인 Schottky 장벽 diode, metal-insulator-semiconductor(MIS) 및 electrolyte-semiconductor 구조에서는 인가된 전기장이 변조되며[1-4], 비접촉형에서는 이차 광원에 의해 주입된 전자-양공쌍에 의해 전기장이 변조

된다[7].

Electroreflectance(ER)법은 접촉형으로 외부에서 전기장을 인가시켜 반도체의 내부 전기장(E_i)을 변조할 때 이에 따른 반사율의 변화를 측정하는 방법으로 Franz-Keldysh oscillation(FKO)가 존재하고, 이때의 진동주기는 공핍층 내에서 내부 전기장과 관계가 있다[8].

본 논문에서는 Au/n-GaAs Schottky 장벽 diode 구조를 제작하여 변조전압(V_{ac})을 0.05~0.4 V의 범위로 변화시키면서 300 K에서 ER을 측정하였으며, 특히 V_{ac} 을 고정시키고 dc 바이어스 전압(V_{bias})을 -5.0~0.6 V의 범위로 변화시켰을 때 ER 신호의 변화를 관측하였다. 측정 결과 주어진 V_{bias} 영역에서 내부 전기장은 $19.3 \times 10^4 \sim 4.39 \times 10^4$ V/cm로 역방향 및 순방향의 바이어스 전압에 대해서 각각 증가 및 감소하였다. 또한 V_{bias} 변화에 대한 E_i^2 관계 그래프로부터 300 K에서 캐리어 농도 (N)와 built-in 전압(V_{bi})은 각각 2.4×10^{16} cm⁻³와 0.70 V였고, Au/n-GaAs 시료의 전위장벽(Φ)으로는 0.78 eV의 값을 얻었다.

2. 이 론

ER 측정시 띠틈격 에너지(E_0)보다 큰 영역에서 관측되는 Franz-Keldysh oscillation(FKO)은 시료의 공간전하층에서 고전기장의 형성으로 나타나는 피크들로서 이 피크들의 거동은 다음 식으로 표현된다[9, 10].

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

여기서 d 는 임계점 차원이며, $\hbar \Omega$ 는 섭동 특성에너지 즉,

$$\hbar \Omega = \left(\frac{e^2 E_i^2 \hbar^2}{8\mu} \right)^{1/3} \quad (2)$$

이다. 이 식에서 e 는 전자의 전하, \hbar 는 Planck 상수, μ 는 환산질량 및 E_i 는 내부 전기장의 세기이다. 그리고 FKO 피크의 위치[11]는

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

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

으로 근사시킬 수 있다. 여기서 j 는 FKO 정점의 지수이고, F_j 에 대한 E_j 의 그래프로부터 기울기가 $\hbar \Omega$ 이고, y 축과의 교점이 띠틈격 에너지인 직선이 된다. 따라서 식

(3)으로부터 E_0 를 쉽게 얻을 수 있으며, 기울기 $\hbar \Omega$ 를 식 (2)에 대입하여 내부 전기장을 구할 수 있다.

또한, 띠틈격 에너지가 결정되면 다음과 방법으로도 내부 전기장을 구할 수 있다. 여기서 FKO 피크의 위치는 다음 식으로 주어진다[8].

$$m \pi = \Theta + \frac{4}{3} \left[\frac{(E_m - E_0)}{\hbar \Omega} \right]^{3/2} \quad (5)$$

이 식에서 m 은 m 번째 피크의 위치이며, 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 그래프는 기울기가 $(\hbar \Omega)^{3/2}$ 으로 섭동 특성 에너지와 관계되며, 이를 식 (2)에 대입하여 내부 전기장을 구할 수 있다.

한편 n -형 반도체에서 dc 바이어스 전압(V_{bias}) 변화에 따른 시료 내의 공간전하층 폭(W)과 내부 전기장(E_i) 사이의 관계를 다음 식으로 표현할 수 있다[12].

$$W = \left[\left(\frac{2k_s \epsilon_0}{eN} \right) (V_{bi} - V_{bias} - \frac{kT}{e}) \right]^{1/2} \quad (6)$$

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

여기서 N 은 캐리어 농도, k_s 는 유전상수, ϵ_0 는 진공에서 유전율, V_{bi} 는 built-in 전압, k 는 Boltzmann 상수, 그리고 T 는 절대온도이다.

그리고 금속-반도체 접합시 V_{bias} 변화에 따른 시료 내의 전위장벽(Φ)[13]은

$$\Phi = e (V_{bi} + \Delta) \quad (8)$$

으로 나타내며, 이 식에서 Δ 는

$$\begin{aligned} \Delta &= E_c - E_f \\ &= \frac{kT}{e} \ln(N_c / N) \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 식 (9)에서 E_c 와 E_f 는 각각 반도체의 전도띠에서 최저 에너지 준위와 Fermi 준위이고, N_c 는 전도띠에서 상태밀도이다.

3. 실험

본 실험에서 시료는 liquid encapsulated Czochralski (LEC)법으로 성장된 불순물이 첨가되지 않은 n-GaAs

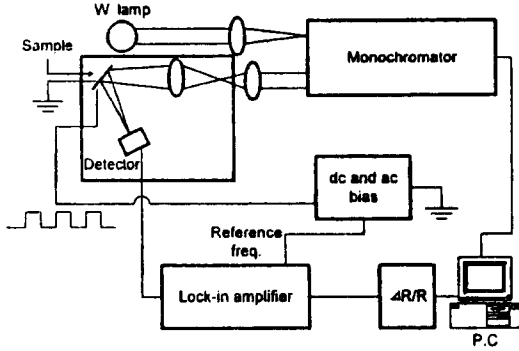


Fig. 1. Block diagram of ER system.

(100)를 사용하였다. 먼저 시료를 trichlorethylene(TCE), acetone 및 methanol 순으로 각 5분간 세척한 후, 탈이온수를 시료에 충분히 흘린 다음 N_2 가스로 건조시켰다.

ER 측정을 위하여 세척한 시료에 전극과 오믹접합으로 각각 Au 및 Au-Ge을 진공 증착하였다. 오믹접합을 한 후, Ar 가스가 흐르는 온도 $300^\circ C$ 에서 1분간 열처리를 실시하여 Au/n-GaAs Schottky 장벽 diode를 제작하였다.

ER 측정은 변조전압(V_{ac})을 0.05~0.4 V로 변화시켜 ER 신호를 관측하였으며, V_{ac} 를 고정시키고 dc 바이어스 전압(V_{bias})을 -5.0~0.6 V의 범위로 변화시켰을 때 ER 신호의 변화를 관측하였다. 측정시 변조 주파수는 800 Hz로 고정하였으며, probe 빔은 500 W 텅스텐 광원을 사용하였다. 그리고 ER 측정은 300 K에서 수행하였으며, 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

4. 결과 및 논의

불순물이 첨가되지 않은 GaAs($n=2.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)을 기판으로 하여 제작한 Au/n-GaAs Schottky 장벽 diode에 대한 300 K에서 측정된 electroreflectance(ER) 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다. 이때 측정 조건은 변조전압(V_{ac})과 dc 바이어스 전압(V_{bias})을 각각 0.1 및 0 V로 하였으며, 변조 주파수는 800 Hz로 고정하여 측정하였다.

그림에서 표시된 약 1.40 eV부근에서 관측된 E_0 는 GaAs 시료의 띠틈 전이에 의한 피크이고, $E_0 + \Delta_0$ 는 전도띠와 spin orbital split 띠틈 전이에 의한 피크로서 에너지는 1.764 eV였다. 이 값은 Blackmore 등[14]이 photoreflectance(PR)로 측정된 값과 거의 일치하였다. 그리고 광자 에너지 $h\nu$ 가 $E_0 < h\nu < E_0 + \Delta_0$ 에너지 영역에서 관측된 FKO는 시료의 공간전하층에서 고전기장의 형성으로 나타나는 피크들이다. 따라서 관측된 FKO 피크들로부터

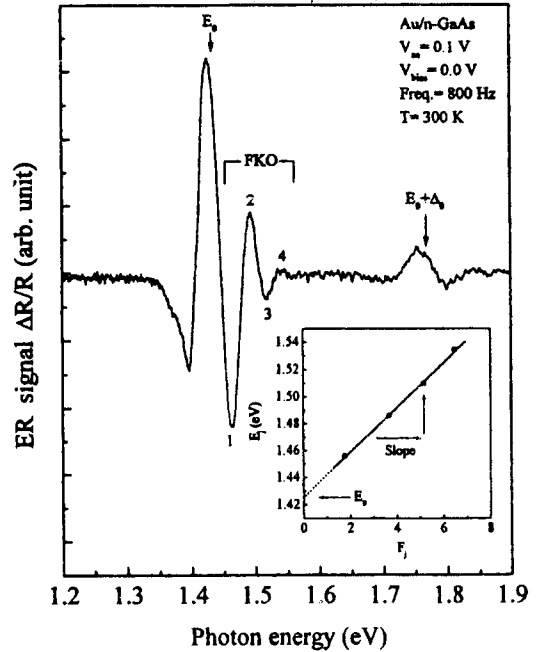


Fig. 2. ER spectra of Au/n-GaAs Schottky barrier diode at 300 K.

기판으로 사용된 GaAs의 띠틈격 에너지(E_0) 및 내부 전기장(E)를 구할 수 있는데, 이를 알아보기 위해 FKO 수(F_1)에 따른 광자 에너지(E_i) 사이의 관계를 Fig. 2에 삽입하여 나타내었다.

이 그래프에서 y축과의 교점으로부터 구한 띠틈격 에너지 $E_0=1.425 \text{ eV}$ 로 이 값은 300 K의 GaAs에서 일반적으로 사용되는 값과 잘 일치하였으며[15], 직선의 기울기 $\hbar\Omega$ 를 식 (2)에 대입하여 내부 전기장 $E_i=5.76 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 의 값을 얻었다. 이 값은 Batchelor 등[16]이 ER로 측정된 값과 거의 일치하였다. 이때 계산에 사용된 환산 질량 $\mu=0.055 m_0$ [8]를 이용하였으며, m_0 는 자유전자의 질량이다.

Au/n-GaAs Schottky 장벽 diode에 대하여 dc 바이어스 전압(V_{bias})을 0 V로 하고 변조전압(V_{ac})을 0.05~0.4 V로 변화시켜 가면서 측정된 ER 스펙트럼을 Fig. 3(a)에 나타내었다.

V_{ac} 가 증가함에 따라 관측된 E_0 , FKO 및 $E_0 + \Delta_0$ 피크들의 위치는 V_{ac} 에 전혀 영향을 받지 않은[17] 반면, ER 신호들의 진폭은 증가하였다. 여기서 $V_{ac}=0.4 \text{ V}$ 일 때 E_0 , FKO 및 $E_0 + \Delta_0$ 피크들의 진폭은 $V_{ac}=0.05 \text{ V}$ 에 비해 각각 약 9, 9.3 및 7.1배 증가하였으며, V_{ac} 변화에 따른

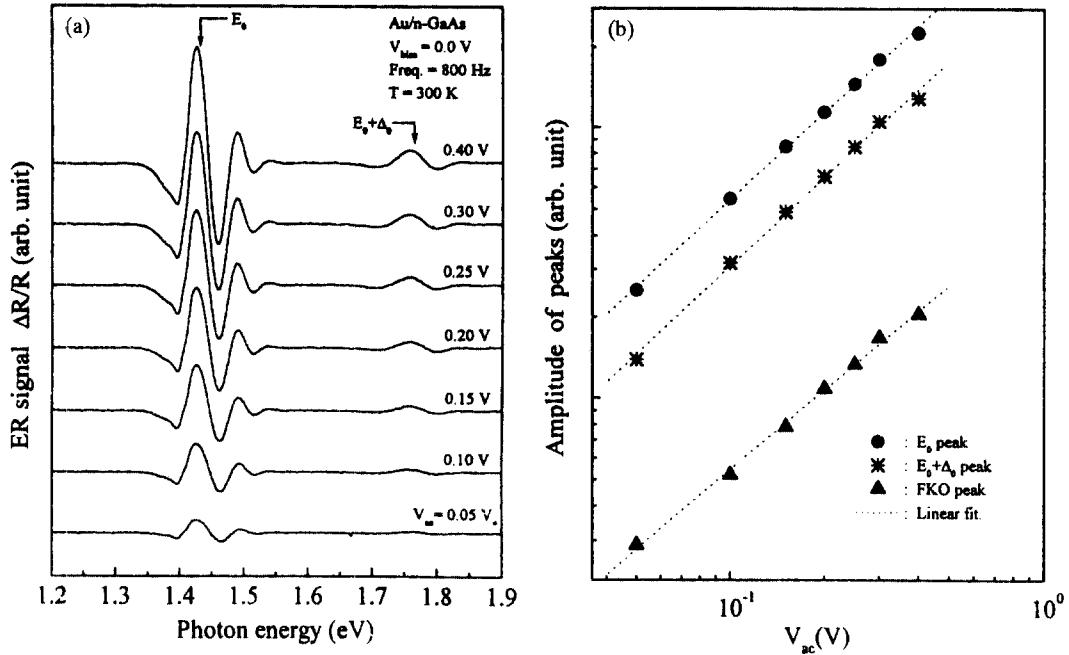


Fig. 3. (a). ER spectra of Au/*n*-GaAs Schottky barrier diode for various modulation voltage(V_{ac}) at 300 K, (b). Amplitude of peaks versus modulation voltage(V_{ac}) in ER spectra.

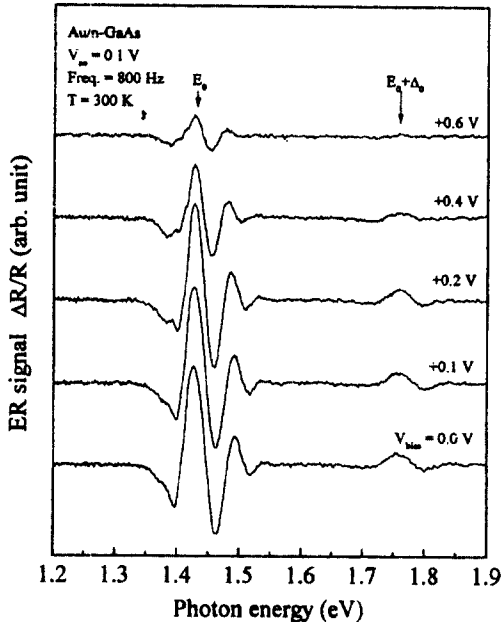


Fig. 4. ER spectra of Au/*n*-GaAs Schottky barrier diode for various forward dc bias voltage (V_{bias}).

ER 신호에서 관측된 각 피크들의 진폭을 나타내면 Fig. 3(b)와 같다.

그림에서 본 바와 같이 측정된 V_{ac} 의 영역 내에서 각 피크들의 진폭은 V_{ac} 가 증가함에 따라 선형적으로 변함을 볼 수 있다. 이는 ER 신호 즉, $\Delta R/R$ 이 시료의 공간전하층을 지나는 ac장의 세기에 의존하기 때문이다.

Fig. 4는 Au/*n*-GaAs Schottky 장벽 diode에 변조전압 (V_{ac})을 0.1 V로 고정하고, 순방향의 바이어스 전압(V_{bias})을 0~0.6 V로 변화시켜 가면서 측정된 ER 스펙트럼을 나타내었다.

순방향의 바이어스 전압을 증가시킴에 따라 관측된 E_0 와 $E_0 + \Delta_0$ 피크들의 위치는 거의 이동이 없고, 피크들의 진폭만 감소한 반면, FKO 피크는 약 15 meV 정도 저에너지로 미소하게 이동함과 동시에 진동주기는 짧아지면서 피크의 세기는 점차로 감소하였다. 이러한 현상은 순방향의 바이어스 전압에 의해 시료 내의 공간전하층 폭이 감소되어 밴드 휨이 줄어들어 내부 전기장이 감소되었기 때문이다.

그리고 Au/*n*-GaAs 시료에 역방향의 바이어스 전압 (V_{bias})을 0~-5.0 V로 변화시켜 가면서 측정된 ER 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다.

역방향의 바이어스 전압을 증가시킴에 따라 시료 내의 공간전하층 폭이 증가하기 때문에 ER 신호의 형태가 완만하게 관측되었으며, FKO 피크의 진동주기는 길어

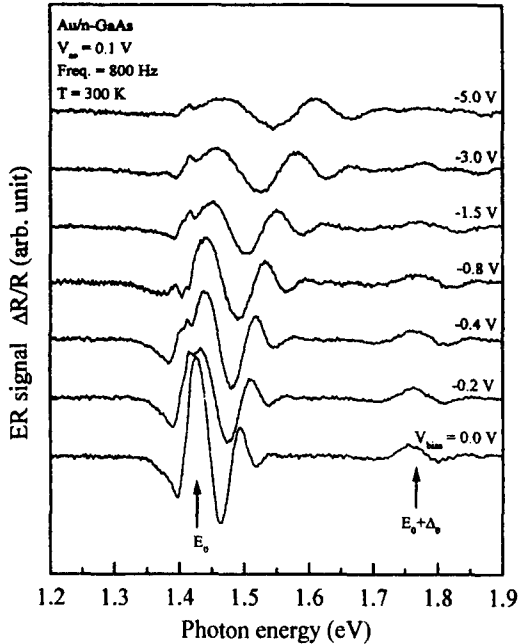


Fig. 5. ER spectra of Au/n-GaAs Schottky barrier diode for various reverse dc bias voltage (V_{bias}).

지면서 약 113 meV 정도 고에너지로 이동함과 동시에 피크의 진폭 또한 감소하였다. 이러한 현상은 역방향의 바이어스 전압에 의해 시료의 공간전하층의 폭이 증가하므로 시료의 내부에서 반사되는 빔의 광흡수가 증가되기 때문이다. 따라서 Aspnes[18]가 지적한 것처럼 dc 바이어스 전압을 변화시키기에 따라 시료의 전기 및 광학적 효과는 V_{bias} 의 크기에 의존하지만, V_{bias} 의 방향에는 무관하다는 결과와 일치한다. 그리고 시료에 $V_{bias} = -0.2$ V 이상의 전압을 인가시켰을 때 E_0 보다 약 11 meV 정도 낮은 에너지 영역에서 shoulder의 형태로 피크가 관측되었다. 이러한 현상은 GaAs ER에서 관측되며, Batchelor 등[19]이 실온의 p-GaAs 시료에서도 이와 유사한 진동이 관측됨을 보고하였다. 이는 공간전하층의 불균일장으로 인한 간섭효과 때문으로 생각된다. 또한 V_{bias} 변화에 따른 ER 신호의 진폭은 순방향과 역방향 바이어스 전압 양쪽 모두 감소하는데, 특히 순방향의 바이어스 전압 경우가 역방향보다 더 빨리 감소하였다. 이러한 현상은 Wang[8]이 보고한 결과와 일치하였다.

순방향 및 역방향의 V_{bias} 변화에 따른 Au/n-GaAs Schottky 장벽 diode의 내부 전기장(E_i)을 구하기 위해 $4/3\pi(E_m - E_0)^{3/2}$ 을 FKO 지수 m 의 함수로 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 실선은 식 (5)을 최소제곱법으로 fitting한 것

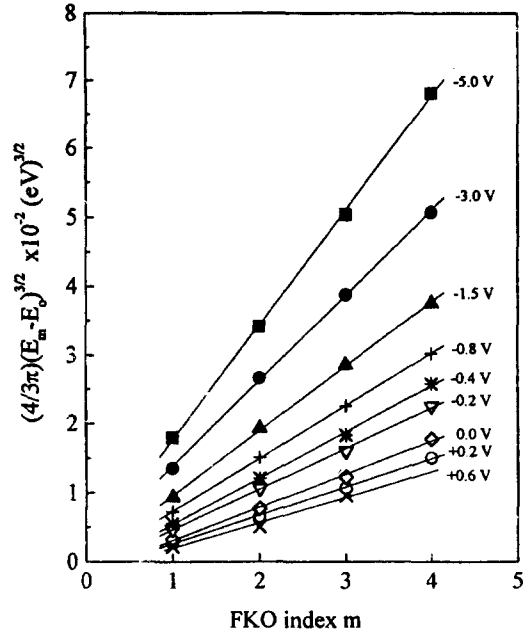


Fig. 6. Relationship between $4/3\pi(E_m - E_0)^{3/2}$ and index of FKO with various dc bias voltage (V_{bias}).

으로 기울기로부터 내부 전기장을 구하면 측정된 V_{bias} 영역에서 $E_i = 19.3 \times 10^4 \sim 4.39 \times 10^4$ V/cm였으며, 이 값은 Fig. 2에 삽입된 그래프로부터 구한 결과와 잘 일치하였다. 그리고 이 계산에서 유전상수(k_s)와 환산질량(μ)을 각각 $k_s = 13.1$ [8]과 $\mu = 0.055 m_0$ [8]을 사용하였다. 따라서 E_i 는 역방향의 바이어스 전압이 증가할수록 증가하는 반면, 순방향의 바이어스 전압이 증가함에 따라 감소함을 볼 수 있었다. 이는 역방향 및 순방향의 바이어스 전압에 의해 시료의 공간전하층 폭이 각각 증가 및 감소되기 때문이다. dc 바이어스 전압에 따른 E_i 및 FKO 피크의 에너지 차이를 계산한 결과를 나타내면 Table 1과 같다.

내부 전기장(E_i)을 dc 바이어스 전압(V_{bias})의 함수로 나타내면 Fig. 7과 같다.

실선은 식 (7)을 fitting한 것으로 그림에서 본 바와 같이 시료의 공간전하층에서 E_i 는 V_{bias} 에 의존하며, 표면으로부터 거리에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 E_i^2 과 V_{bias} 사이의 선형적인 관계가 유지되는 바이어스 전압 영역에서 기울기와 x축의 교점으로부터 캐리어 농도(N) 및 built-in 전압(V_{bi})를 구할 수 있으며, 또한 바이어스 전압 변화에 따라 내부 전기장이 flat되는 점 즉, x축과의 교점이 V_{bi} 임을 알 수 있다. 따라서, 이 값들은 각각 $N = 2.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 와 $V_{bi} = 0.70$ V였다. 여기서

Table 1. Internal electric field and energy difference of FKO obtained from 4, 5 and 6

Forward bias		
Voltage (V_{bias})	Internal electric field $\times 10^6$ (V/cm)	Energy difference of FKO(meV)
0.6	4.39	24.4
0.5	4.55	26.1
0.4	4.94	27.6
0.3	5.23	29.0
0.2	5.44	29.2
0.1	5.49	29.6
0.0	5.76	29.9
Reverse bias		
Voltage (V_{bias})	Internal electric field $\times 10^6$ (V/cm)	Energy difference of FKO(meV)
-5.0	19.30	64.7
-4.0	16.90	58.3
-3.0	14.80	57.5
-2.5	13.30	56.7
-2.0	12.40	52.9
-1.5	11.30	47.0
-1.0	9.95	41.5
-0.8	9.17	40.8
-0.6	8.39	38.9
-0.5	8.03	38.2
-0.4	7.95	37.2
-0.3	7.49	35.9
-0.2	7.05	34.3
-0.1	6.59	33.8
0.0	5.76	29.9

얻은 V_{bi} 값은 V_{bias} 변화에 따른 FKO 피크의 진폭과 관계 그래프로부터 구한 결과와 동일하였으며, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

그리고 식 (9)에서 반도체의 전도띠의 최저 에너지 준위와 Fermi 준위 사이의 에너지 차이 Δ 는 0.08 V이므로 Au/*n*-GaAs 시료의 전위장벽(Φ)은 식 (8)로부터 구한 결과 0.78 eV였다. 이 값은 Wang과 Shen[20]이 PR 측정으로 얻은 값 0.76 eV와 거의 비슷하였다. 여기서 GaAs 경우 300 K에서 전도띠의 상태밀도(N_c)는 $4.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [8]을 사용하였다.

5. 결 론

불순물이 첨가되지 않은 LEC *n*-GaAs(100)을 기판으로 하여 제작한 Au/*n*-GaAs Schottky 장벽 구조의 diode를 시료로 사용하여 변조전압(V_m) 및 dc 바이어스 전압

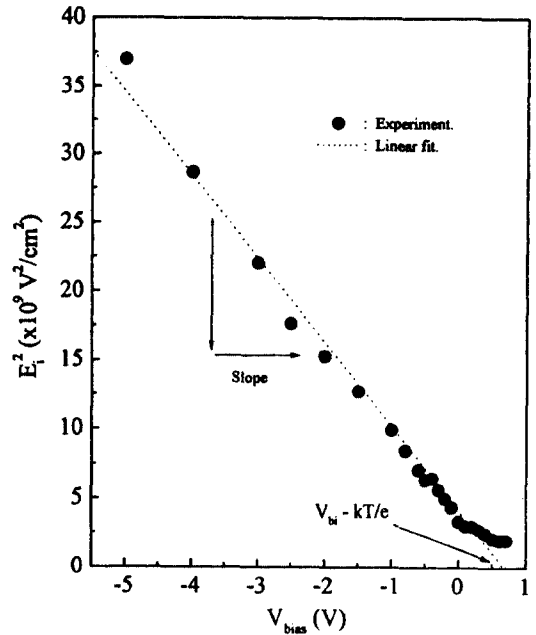


Fig. 7. Relationship between E_i^2 and dc bias voltage(V_{bias}).

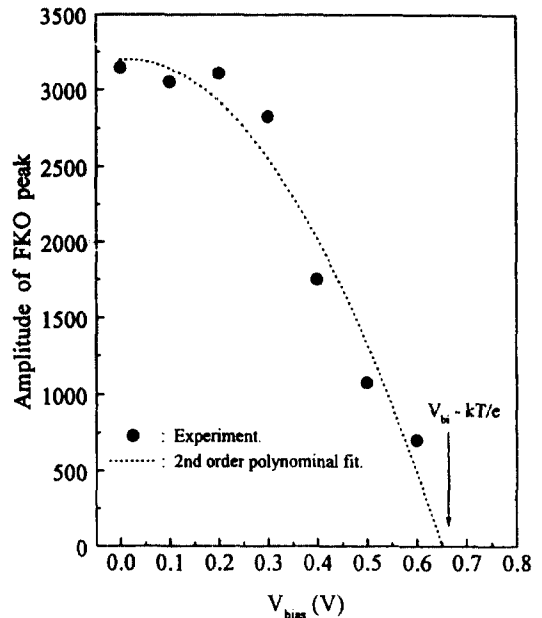


Fig. 8. Relationship between amplitude of FKO peak and dc bias voltage(V_{bias}).

(V_{bias})의 변화에 따른 ER을 300 K에서 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기판으로 사용된 GaAs의 띠틈간격 에너지(E_g)는 1.425

eV로 이는 GaAs 시료의 띠간 전이에 의한 피크이고, 1.764 eV에서 관측된 $E_0 + \Delta_0$ 는 전도띠와 spin orbital split 띠간 전이에 의한 피크이다.

2. 변조전압(V_{ac})을 증가시키에 따라 ER 신호의 위치는 거의 변화가 없고 진폭만 증가되어 관측 되었다. 이는 ER 신호 즉, $\Delta R/R$ 이 공간전하층을 지나는 ac장의 세기에 의존하기 때문이다.

3. dc 바이어스 전압(V_{bias})이 증가할수록 ER 신호의 진폭이 순방향과 역방향 모두 감소하였다. 이는 ER 신호의 진폭이 V_{bias} 의 크기에 의존하기 때문이다.

4. 순방향 및 역방향의 dc 바이어스 전압(V_{bias})이 증가할수록 FKO 피크의 진동주기는 각각 짧아지고, 길어졌다. 이는 순방향일 경우 바이어스 전압에 의해 시료 내에서 공간전하층 폭의 감소로 인해 밴드 휨이 줄어들었기 때문이고, 역방향일 경우 바이어스 전압에 의해 공간전하층의 폭이 증가하므로 시료 내부에서 반사되는 빛의 광흡수가 증가되기 때문이다.

5. V_{bias} 를 -5.0~0.6 V로 증가시키에 따라 내부 전기장 (E)은 $19.3 \times 10^4 \sim 4.39 \times 10^4$ V/cm로 감소 하였다. 이는 바이어스 전압 증가함에 따라 시료의 공간전하층 폭이 감소하기 때문이다.

6. V_{bias} 에 따른 E^2 관계의 그래프로부터 300 K에서 캐리어 농도(N)와 built-in 전압은 각각 2.4×10^{16} cm⁻³와 0.70 V였고, 그리고 Au/n-GaAs 시료의 전위장벽(Φ)은 0.78 eV의 값을 얻었다.

참고문헌

- [1] M. Cardona, *Modulation Spectroscopy* (Academic, New York, 1969).
- [2] D.E. Aspnes, *Handbook of Semiconductors* 2nd. (North-Holland, Amsterdam 1980), p. 109.
- [3] D.E. Aspnes and A.A. Studna, *Phys. Rev.* **B7**, 4605 (1973).
- [4] A. Ksendzov, F.H. Pollak, J.A. Wilson and V.A. Cotton, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 648 (1986).
- [5] O.J. Glembocki, B.V. Shanabrook, N. Bottka, W.T. Beard and J. Comas, *Appl. Phys. Lett.* **46**, 970 (1985).
- [6] O.J. Glembocki and B.V. Shanabrook, *Spectroscopy of Semiconductors*, R.K. Willardson, A.C. Beer and E.R. Weber, *Semiconductors and Semimetals* **36** (Academic, San Diego, 1992), p. 221.
- [7] J.L. Shay, *Phys. Rev.*, **B2**, 803 (1970).
- [8] D.P. Wang, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B12**, 3103 (1994).
- [9] H. Shen, F.H. Pollak and Y.M. Woodall, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8**, 413 (1990).
- [10] X. Yin, H.M. Chen, F.H. Pollak, P.A. Motano, P.D. Kirchner, G.D. Petti and J.M. Woodall, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 260 (1991).
- [11] N. Bottka, D.K. Gaskill, R.T.M. Griffiths, T.B. Joyce, C. Ito and D. McIntyre, *J. Cryst. Growth*, **3**, 481(1988).
- [12] H. Shen, F.H. Pollks, *Phys. Rev.*, **B42**, 7097 (1990).
- [13] S.M. Sze, 2nd. ed. (*Physics of Semiconductor Device*, Wiley, New York, 1981).
- [14] J.S. Blackmore, *J. Appl. Phys.*, **53**, R123 (1982).
- [15] A.N. Pikhtin, V.M. Airaksinen, H. Lipsanen and T. Tuomi, *J. Appl. Phys.*, **65**, 2556 (1989).
- [16] R.A. Batchelor, A. Hamnett, R. Peat and L.M. Peter, *J. Appl. Phys.*, **70**, 266 (1991).
- [17] R.N. Bhattacharya, H. Shen, P. Parayanthal, F.H. Pollak, T. Coutts and H. Aharoni, *Phys. Rev.*, **B37**, 4044 (1988).
- [18] D.E. Aspnes, *Surf. Sci.*, **37**, 418 (1973).
- [19] R.A. Batchelor, A.C. Brown and A. Hamnet, *Phys. Rev.* **B41**, 1401 (1990).
- [20] D.P. Wang and T.L. Shen, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 1253 (1994).