

PICTS 방법에 의한 Boron 이온을 주입시킨 반절연성 GaAs의 깊은준위에 관한 연구

논문
8-4-5

A Study on the Deep Levels in Boron Ion Implanted Semi-Insulating GaAs by PICTS

최현태*, 김인수*, 이철욱*, 손정식*, 김영일**, 배인호*

(Hyun-Tae Choi, In-Soo Kim, Chul-Wook Lee, Jung-Sik Son, Young-Eil Kim, In-Ho Bae)

Abstract

Effect of boron in GaAs have been investigated by photo-induced current transient spectroscopy(PICTS). The starting material was undoped liquid encapsulated Czochralski(LEC) semi insulating GaAs and boron ion implantation at 150keV energy was conducted with dose of 10^{12} and 10^{13} ions/cm². In ion implanted samples, the peaks related arsenic vacancy(V_{As}) were decreased but complex lattice defect was increased with annealing temperature. U band was observed at ion implanted(10^{13} ions/cm²) and thermally treated(550°C) sample. More negative peak was detected after annealing at temperature between 600 and 700°C. The measurement of dark current showed that the formation of $B_{Ga}-V_{As}$ complex defect and complex lattice defect by ion implantation were a reasonable explanation for the decrease in dark current.

Key Words(중요용어) : PICTS(광여기 과도전류 분광법), Ion Implantation(이온주입), Deep Level(깊은 준위), Dark Current(암전류)

1. 서 론

이온주입(ion implantation)은 반도체내에 불순물을 분포시키는 방법으로서 확산(diffusion)에 비해 불순물량을 정확하게 제어할 수 있고 또한 원하는 부분에 국소적으로 불순물을 주입할 수 있기 때문에 현재 고밀도 집적회로의 제작 공정에 필수적으로 사용되고 있는 중요한 기술이다. 반면 이온주입시 반도체 표면의 손상 및 결정내 격자상태의 파괴, 그리고 이로 인한 깊은준위의 생성이라는 중대한 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 이온주입시 발생된 시료의 물성변화를 정확하게 분석하는 것이 무엇보다도 선결되어야만 한다¹⁾.

현재 GaAs microwave 소자의 절연층을 형성시키는 데 있어 널리 이용되는 방법 중의 하나가 boron 이온을 주입시키는 것이며, 이에 대한 연구로서 1982년 Martin²⁾ 등은 boron 이온주입에 의한 두 가지 보상원리(compensation mechanism) 즉, 이온주입에 의한 complex 격자결함에 의한 보상과 시료에 이미 존재하는 불순물들과 주입된 boron과의 complex에 의한 보상을 보고하였고, 1986년 Morante³⁾ 등은 boron 주입에 의해 As 자리에 점유된 boron(B_{As}) 또는 As 자리에 점유된 Ga(Ga_{As})에 의한 깊은준위의 생성을 관찰하였으며, 같은 해에 Samitier⁴⁾ 등은 boron 이온이 주입된 GaAs에 있어 EL2에 관련된 U 밴드의 광에 의한 반응을 발표하였고, 1992년 Anderson⁵⁾ 등은 boron 이온주입에 의해 $E_v+0.27\sim 0.35$ eV의 활성화 에너지를 가진 정공덫의 생성을 보고하였다. 그러나 이와 같은 연구결과에도 불구하고 boron 이온주입시 절연층의 형성에 대한 일관된 이론이 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 시료에 광펄스를 인가하였을 때 나타나는 광전류의 과도현상을 분석하는 방법으로써

* : 영남대학교 물리학과

** : 경북대학교 센서기술연구소

접수일자 : 1995년 3월 7일

심사완료 : 1995년 6월 10일

저항 반도체의 깊은준위를 검출하는데 있어 매우 유용한⁶⁾ photo-induced current transient spectroscopy(PICTS)를 이용하여 liquid encapsulated Czochralski(LEC)법으로 불순물을 첨가하지 않고 성장된 반절연성 GaAs의 깊은준위들을 열처리 온도(450~800°C)에 따라 조사하였고, 다음으로 이 기판에 boron 이온을 150keV의 에너지와 10^{12} 및 10^{13} ions/cm²의 dose로 주입시킨 후 벌크(bulk) GaAs시료와 동일하게 열처리시켜 이온주입에 따른 깊은준위들의 변화를 관찰하였다.

2. 이 론

PICTS에 있어 깊은준위들에 대한 정보는 광전류의 소멸 과정으로부터 얻어진다. 고저항을 가진 물질에 있어 PICTS 방법을 설명하기 위해 하나의 전자 덩어리가 존재한다고 가정한다.

광여기 하의 고정된 상태에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 잘 알려져 있다⁷⁾.

$$\frac{dn}{dt} = g_L + e_{nt} \cdot n_t - C_{nt} \cdot n \cdot (N_t - n_t) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dn_t}{dt} = C_{nt} \cdot n \cdot (N_t - n_t) - e_{nt} \cdot n_t = 0 \quad (2)$$

$$e_{nt} = e_{nt}^t + e_{nt}^o \cdot C_{nt} = \sigma_{nt} \cdot V_{thn} \quad (3)$$

여기서 n 은 자유전자의 농도이며, e_{nt} 는 전자들의 방출률이며, C_{nt} 는 전자들의 포획계수이다. g_L 은 광여기에 의해 생성된 전자-홀쌍들의 생성률이며, n_t 는 포획된 전자들의 농도이고, N_t 는 전자 덩어리의 농도이다. e_{nt}^t 는 전자들의 열에 의한 방출률이며 e_{nt}^o 는 광에 의한 전자들의 방출률이다. σ_{nt} 는 전자 덩어리의 포획 단면적이고, V_{thn} 는 전자들의 열 평균 속도이다. 식 (1), (2) 및 (3)에서는 광이 없는 상태 하에서의 자유 전하 운반자들의 농도는 무시하였다.

위의 식들로부터 포획된 전자들의 농도 n_t 는 다음과 같이 주어진다.

$$n_t = \left\{ \frac{g_L \cdot \tau_n \cdot C_{nt} / e_{nt}}{(g_L \cdot \tau_n \cdot C_{nt} / e_{nt}) + 1} \right\} \cdot N_t \quad (4)$$

여기서 τ_n 은 자유전자들의 수명(life time)이다.

광여기가 중단된 후에 비어 있는 덩어리로부터 자유전자들의 재 가둠(retrapping)의 가능성이 무시

될 수 있다면 그 비율 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dn}{dt} = e_{nt}^t \cdot n_t - C_{nr} \cdot n \cdot (N_r - n_r) \quad (5)$$

$$\frac{dn_t}{dt} = -e_{nt}^t \cdot n_t \quad (6)$$

식 (5)와 (6)으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{n}{\tau_n} + \frac{dn}{dt} = n_{t0} \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-e_{nt}^t \cdot t) \quad (7)$$

이 식에서 n_{t0} 는 광여기가 끝난 바로 직전의 포획된 전자들의 초기 밀도이다. 이것은 식 (4)에 의해 주어진다.

여기서 τ_n 은 아주 짧아서 (n/τ_n) 이 (dn/dt) 보다 매우 큰 값이 되는 상수라 가정하면, 자유 전자 농도의 과도 반응은 다음과 같이 주어진다.

$$n = n_{t0} \cdot \tau_n \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-e_{nt}^t \cdot t) \quad (8)$$

만약 광전류가 단지 전자들에 의한 것이라 가정한다면 광여기의 중단 후 과도전류 $i(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$i(t) = \mu_n(T) \cdot \tau_n(T) \cdot A(\lambda) \cdot q \cdot E \cdot n_{t0} \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-e_{nt}^t \cdot t) \quad (9)$$

여기서 $\mu_n(T)$ 는 전자의 이동도, q 는 전자의 전하량, $A(\lambda)$ 는 유효 단면적, T 는 절대온도, λ 는 여기 광의 파장, E 는 인가한 전장이다.

규격화된 PICTS 신호($I_n(T)$)를 다음과 같이 정의한다⁸⁾.

$$I_n(t) = \frac{1}{K(T)} \cdot (i(t_1) - i(t_2))$$

$$= e_{nt}^t \cdot (\exp(-e_{nt}^t \cdot t_1) - \exp(-e_{nt}^t \cdot t_2)) \quad (10)$$

$$K(T) = \mu_n(T) \cdot \tau_n(T) \cdot A(\lambda) \cdot q \cdot E \cdot n_{t0} \quad (11)$$

여기서 t_1 과 t_2 는 sampling time이다.

PICTS 스펙트럼의 피크점 온도 T_m 에서 열에

의한 방출률 e_{ntm}^t 은 e_{nt}^t 에 대해 $I_n(T)$ 를 미분하여 얻을 수 있다. 그 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dI_n(T)}{de_{nt}^t} = [(1-t_1 \cdot e_{nt}^t) \cdot \exp(-t_1 \cdot e_{nt}^t)] - [(1-t_2 \cdot e_{nt}^t) \cdot \exp(-t_2 \cdot e_{nt}^t)] = 0 \quad (12)$$

열에 의한 방출률(e_{ntm}^t)은 다음과 같이 상세 균형 원리에 의한 띳의 활성화 에너지($E_c - E_t$)와 포획 단면적에 관계를 가진다.

$$e_{ntm}^t = \sigma_{nt} \cdot V_{thn} \cdot N_c \cdot g^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k \cdot T_m}\right) \quad (13)$$

여기서 N_c 는 전도대의 유효 상태 밀도, g 는 띳의 축퇴도이고, k 는 볼츠만 상수이다.

여러 가지 sampling time으로 PICTS 측정을 하게 되면 많은 수의 e_{ntm}^t 과 T_m 의 조합이 주어지기 때문에 띳의 활성화 에너지($E_c - E_t$)와 포획 단면적(σ_{nt})은 $\log(e_{ntm}^t)$ 대 $1000/T_m$ 의 그래프에서 기울기와 절편 값으로부터 각각 구할 수 있다.

3. 실험 방법

본 연구에 사용된 시료는 LEC법으로 불순물을 첨가시키지 않고 성장된 반절연성 GaAs(100)이다. 시료를 trichloroethylene, acetone, methanol의 순서로 5분간 담근 후, 탈이온수로 헹구고 질소 가스로 건조시켰다. 그리고 표면처리된 GaAs 시료에 boron 이온을 150keV의 에너지와 10^{12} 및 10^{13} ions/cm²의 dose로 주입시킨 후 온도 450~800℃에서 아르곤 가스 분위기로 20분간 열처리하였다. 열처리 후 모든 시료들은 PICTS 측정을 위해 표면에 In으로 ohmic 접합을 형성시켰다.

PICTS 장치는 그림 1에 나타내었다. PICTS 측정시 이용된 광원은 639nm의 파장을 가진 고회도 light emitting diode(LED)이며, 시료에 인가한 전압은 25V이고, 측정 온도는 100~320K이다. 측정 방법은 시료에 20ms의 지속 시간을 가진 광을 4.5Hz의 주기로 조사시키면서, 미리 조정된 sampling time으로 온도에 따른 신호를 컴퓨터를 이용하여 저장, 분석하였다.

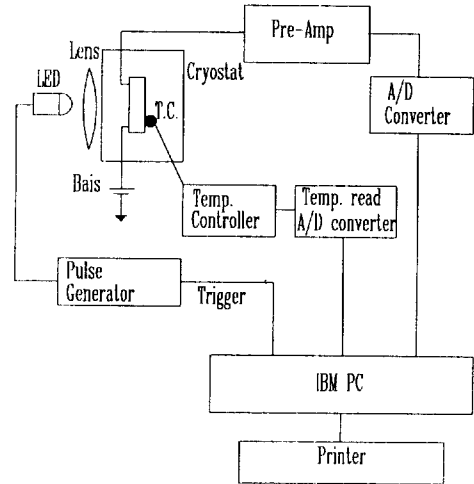
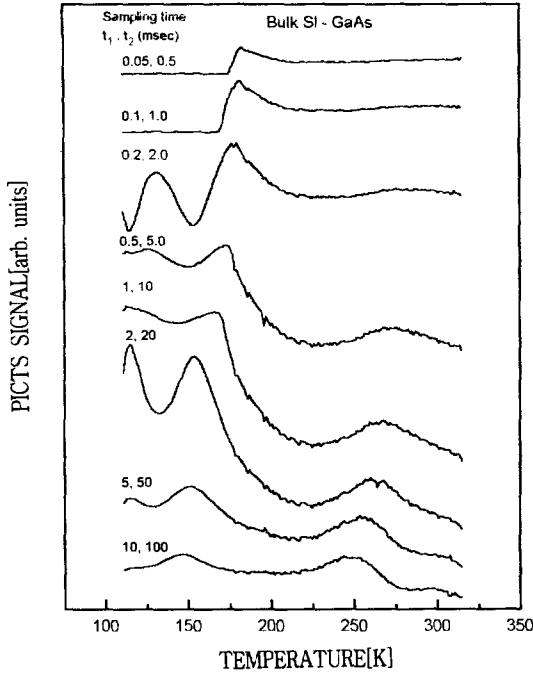


그림 1. PICTS 실험 장치도.

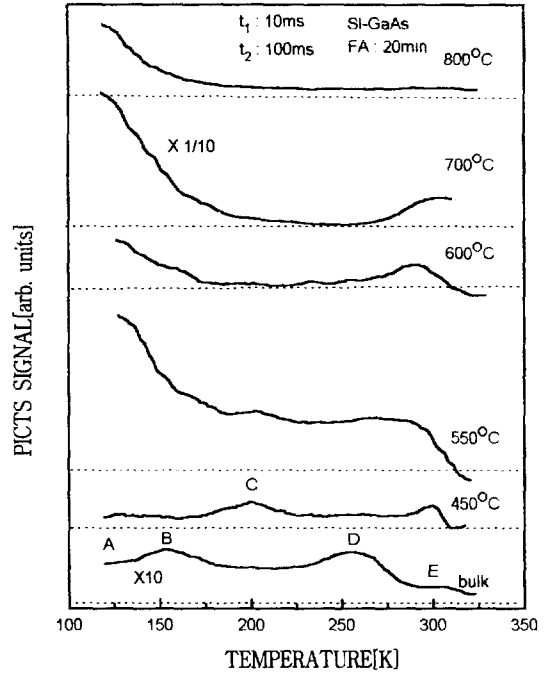
Fig. 1. Schematic of experimental arrangement used for PICTS.

4. 실험 결과 및 논의

그림 2는 이온을 주입하지 않은 즉 반절연성 GaAs 시료에 대한 PICTS 신호를 sampling time에 따라 나타내었고 또한 열처리 시간을 20분으로 하여 열처리 온도에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 열처리 전의 시료에서 4개의 깊은 준위, 즉 A, B, D 및 E 준위가 관측되었으며, sampling time의 증가에 따라 피크의 크기가 감소하면서 피크점의 위치가 저온쪽으로 이동됨을 볼 수 있다. 본 연구에서 이후로 나타내는 PICTS 신호는 이들 sampling time에 따른 신호 중에서 t_1 과 t_2 가 각각 10msec와 100msec인 신호만을 선택하여 나타내었다. 이들 준위 중에서 A, B준위에 대한 신호의 크기는 열처리 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있으며, 특히 700℃의 열처리 온도에서 급격히 증가되었다가 800℃의 열처리 온도에서 다시 감소함을 볼 수 있다. D 준위는 450℃의 열처리 온도 이상에서는 거의 모두 나타나지 않았으며, E 준위는 700℃의 열처리 온도까지 관측되었으나 그 이상의 온도에서는 관측되지 않았다. 450℃로 열처리한 시료에서는 열처리를 하지 않았던 시료에서 볼 수 없었던 C 준위가 관측되었는데 이 준위는 550℃ 이상에서 열처리된 시료에서는 나타나지 않았다. 이상과 같은 깊은준위들의 열적 반응으로 미루어 보아 A와 B 준위는 시료 자체에 이미 존재하는 준위들로서 열처리 온도에



(1)



(2)

그림 2. 이온주입 전의 시료에 대한 PICTS 신호.

(1) sampling time에 따른 PICTS 신호

(2) 열처리 온도에 따른 PICTS신호

Fig. 2. PICTS signals of samples before implantation.

(1) PICTS signals of sampling times

(2) PICTS signals of annealing temperatures

따라 증가하는 것으로 보아 As 빈자리(V_{As})와 관련이 있으며^{9,10}, 특히 A 준위는 열처리시 열 충격에 기인하며, 이는 EL2와 서로 관련되어 나타나는 EL6로서, As 빈자리와 Ga 자리에 점유된 As과의 complex 즉, $V_{As}-As_{Ga}$ ¹¹ 피크로 보고되어 있다. 또한 V_{As} 는 GaAs를 700°C 정도로 가열하면 As가 증발되면서 증가한다는 Shigefusa 등의¹² 연구 결과와 일치한다. C 준위는 문헌에 의하면 Santic¹³ 등은 thermally stimulated current(TSC) 및 thermoelectric effect spectroscopy(TEES) 실험 결과를 비교하여 정공덫이라 하였고 Fang¹⁴ 등은 As_{Ga}^{++} 결함으로 발표한 것을 고려하여 보면 본 실험에서 450~550°C의 열처리 결과 V_{As} 와 관련된 A 및 B 준위와 함께 나타나는 것으로 보아 As_{Ga}^{++} 에 의한 정공덫이라 생각된다. D 준위는 피크점의 온도(245K)로 보아 GaAs에 있어 전형적인 전자덫인 EL3이며¹⁰, E 준위는 현재 정확한 생성 근원이 알려지지 않은 정공덫으로 격자 결함에 관련된 것으로 보여진다¹⁵. 관측된 모든 깊은준위들에 대한 $\log(e'_{ntm})$ 대 $1000/T_m$ 의 그래프를 그림 3에 나타내었고, 그래프로부터 계산된 활성화 에너지와 포획단면적을 표 1에 요약하였다.

그림 4는 반절연성 GaAs 시료에 boron 이온을

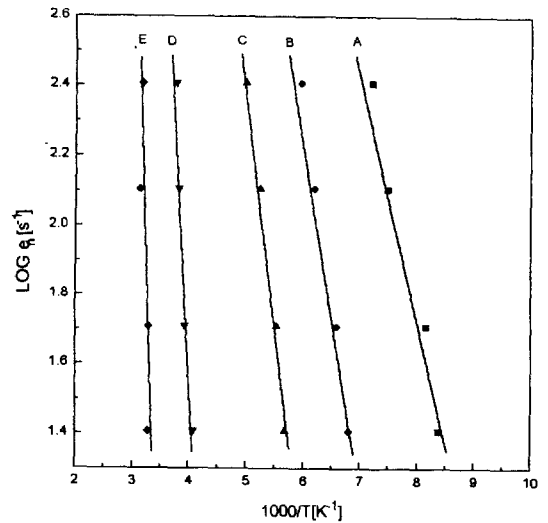


그림 3. $\log(e'_{ntm})$ 대 $1000/T_m$ 의 그래프.

Fig. 3. The graph of $\log(e'_{ntm})$ vs $1000/T_m$.

표 1. 깊은준위들의 활성화 에너지 및 포획 단면적.

Table 1. Activation energies and capture cross sections of deep levels.

Trap	Activation energy(eV)	Capture cross section(cm ²)	Commonly used trap level
A	0.25	1.76×10^{-12}	EL6 group
B	0.31	8.37×10^{-12}	"
C	0.42	1.43×10^{-12}	HB4
D	0.60	1.94×10^{-9}	EI3
E	0.67	3.01×10^{-8}	HB2

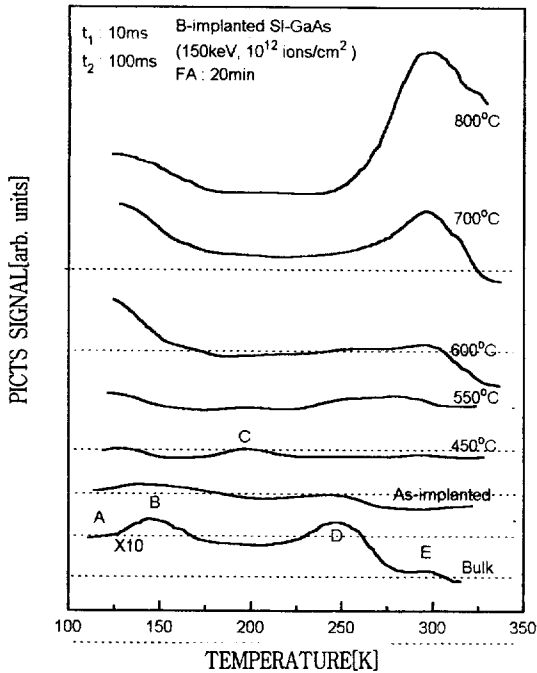


그림 4. 10^{12} ions/cm²으로 boron이온을 주입시킨 시료의 PICTS 신호.

Fig. 4. PICTS signals of boron ion implanted sample(10^{12} ions/cm²).

150keV의 주입 에너지와 10^{12} ions/cm²의 dose로 주입시킨 후, 열처리 온도에 따른 PICTS 신호를 이온주입 전의 시료와 비교하기 위해 함께 나타내었다. 열처리 시간은 벌크 GaAs 경우와 동일하게 20분간 하였다.

이온주입 후 열처리를 하지 않은 시료의 경우 매우 넓은 두개의 밴드가 B 및 D 준위의 피크 위치를 중심으로 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이는 이온주입에 의한 결정성의 저하와 이로 인한 표면

상태의 증가로 인한 결과로 볼 수 있다. 450°C에서 열처리한 시료의 경우, 이온을 주입하기 전의 시료에서와 같은 모습을 보이나, 전반적으로 피크의 형태가 완만해졌으며, 550°C의 열처리 영역에서는 D 및 E 준위가 서로 중첩된 모습으로 관측되었으며 600°C이상의 열처리 영역에서는 이온을 주입하기 전의 시료에서 관측되었던 A 및 B 준위에 대한 신호가 급격히 증가하였다가 감소하는 현상과는 달리 일정한 크기로 유지되었다. 이는 주입된 boron 이온들이 열처리에 의해 증가된 V_{As}에 자리 잡음으로써 일어난 현상으로 생각된다. 한편 이온 주입 전 800°C의 열처리에서 사라졌던 E 준위의 신호는 열처리 온도에 따라 계속 증가하였다. 이는 이온주입에 의해 형성된 격자결함에 boron 원자 또는 이와 관련된 복합적인 결합이 800°C의 열처리에서도 안정적으로 유지되고 있다고 볼 수 있다.

그림 5는 10^{13} ions/cm²으로 boron 이온을 주입시킨 시료에 대한 PICTS 신호를 나타낸 것이다. 450°C의 열처리 온도까지는 10^{12} ions/cm²으로 이온을 주입시킨 시료와 같은 양상을 보이지만 그 이상의 온도에서는 매우 특이한 현상을 보였다.

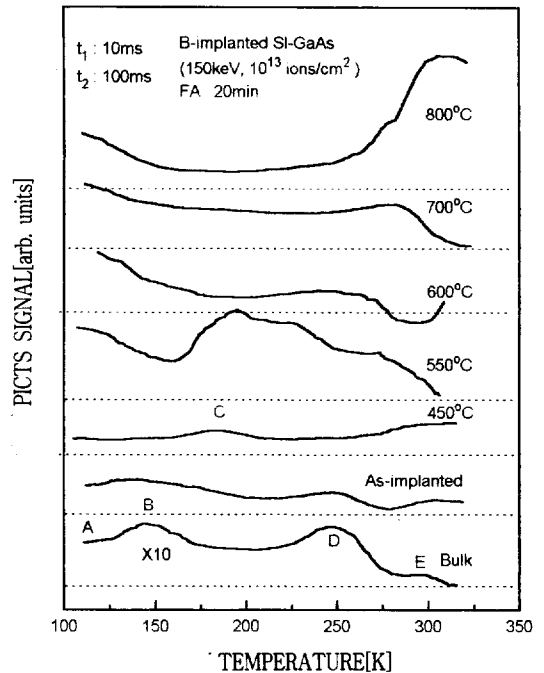


그림 5. 10^{13} ions/cm²으로 boron이온을 주입시킨 시료의 PICTS 신호.

Fig. 5. PICTS signals of boron ion implanted sample(10^{13} ions/cm²).

즉, 550°C의 열처리 후에는 C 준위 부근에 Martin¹⁶⁾ 등이 보고한 U 밴드로 불려지는 전자 덩의 무리가 관측되었으나, 600°C의 열처리에서는 U 밴드가 급격히 감소하면서 E 피크가 음으로 반전된 모습으로 관측이 되었다가 700°C 이상의 온도에서는 다시 양의 피크가 되었다. 이와 같은 현상들은 Martin²⁾ 등에 의해 관측된 현상과 비슷한 경우로써 주입된 boron 이온이 550°C 부근의 열처리 온도에서 U 밴드의 상승과 $E_V+0.70\text{eV}$ 부근의 정공 덩의 형성에 관련이 있다고 볼 수 있다. 그러나 600°C에서 관측된 음의 피크에 관해서는 여러 문헌에도 언급이 되어 있으나^{1,17)} 아직 이에 대한 확실한 설명이 주어지지 않고 있으며, 본 연구에서도 이에 대한 근거를 아직 찾지 못하고 있다. 이상과 같은 PICTS 실험 결과로부터 10^{12} 과 10^{13}ions/cm^2 의 이온주입에서 피크의 모양이 서로 비슷한 양상을 띠는 것으로 보아 본 실험에서 택한 이온주입의 농도에서는 거의 같은 특성을 보임을 알 수 있다.

그림 6은 300K에서 25V의 전압을 인가하여 측정된 암전류를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 600°C의 열처리 온도 부근에서 이온을 주입하지 않은 시료와 주입된 시료 사이에 상반된 현상을 보이고 있다. 즉, 이온을 주입하지 않은 경우 700°C의 열처리 온도 이상에서는 급격한 암전류의 상승을 보여주고 있으나 이온을 주입한 경우에는 있어서는 오히려 감소된 양으로 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는 이온주입을 하지 않은 경

우 Orito¹⁸⁾ 등이 LEC법으로 성장된 반절연성 GaAs에 있어 Ga 자리에 점유된 boron(B_{Ga})과 As 빈자리와의 complex($B_{Ga}-V_{As}$) 결합이 시료 면의 전하 운반자 농도를 감소시키는 역할을 하고 있으며 고온의 열처리에서 $B_{Ga}-V_{As}$ 가 감소하면서 전하 운반자 농도가 증가한다고 보고한 것과 최근 고온의 열처리에서 Cu 원자의 시료 내부로의 확산과 시료 표면에서 생긴 V_{As} 등과 관련된 GaAs 내부 결합에 의해서 P형으로 전환이 되어진다는 연구 결과와 일치하고 있으며¹⁹⁾, 본 연구에서 700°C 이상의 열처리에서 V_{As} 등과 관련된 A 및 B 준위에 대한 신호의 급격한 증가로 볼 때 이러한 연구 결과들이 타당성이 있음을 알 수 있다. 이온을 주입한 경우 신호의 암전류가 증가하지 않은 것은 그림 4와 5의 PICTS 신호에서 열처리 온도가 증가하여도 A 및 B 준위에 대한 신호의 크기가 이온을 주입하지 않은 시료와 비교할 때 그리 크게 증가하지 않고 일정한 수준을 유지하고 있는 것으로 보아 주입된 boron 원자가 $B_{Ga}-V_{As}$ 결합을 이루어 열처리에 의해 벌크 GaAs에 있어 감소된 $B_{Ga}-V_{As}$ 결합의 양보다 많은 양으로 존재함으로써 시료의 전하 운반자 농도를 감소시키는 것으로 생각된다. 또한 boron 이온을 주입시킨 시료에 있어 열처리에 따라 격자결함에 관련된 E 준위가 증가하는 것으로 보아 E준위 역시 시료의 전하 운반자 농도의 감소에 관련이 있다는 것을 말해 준다.

5. 결 론

본 연구에서는 LEC법으로 불순물을 첨가시키지 않고 성장된 반절연성 GaAs(100)에 boron 이온을 150keV의 주입 에너지로 10^{12} 및 10^{13}ions/cm^2 의 dose로 주입시킨 후 PICTS 방법으로 깊은준위들을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이온을 주입하지 않은 시료의 경우 열처리 결과 온도 700°C에서 V_{As} 에 관련된 A 및 B 준위에 대한 신호가 가장 크게 나타난 것으로 보아 이 온도에서 V_{As} 가 가장 많이 생성되었다는 것을 알 수 있다.
- 2) 10^{12}ions/cm^2 의 dose로 boron 이온을 주입한 결과 A 및 B 준위가 열처리의 영향을 크게 받지 않는 것으로 보아 주입된 boron 이온들이 열처리를 함으로써 V_{As} 자리로 이동한다고 생각되며, 반면 이온주입에 의해 E 준위는 열처리에 따라 증가한다.
- 3) 10^{13}ions/cm^2 의 dose로 boron 이온을 주입한 결과 550°C의 열처리에서 U 밴드가 형성되었으

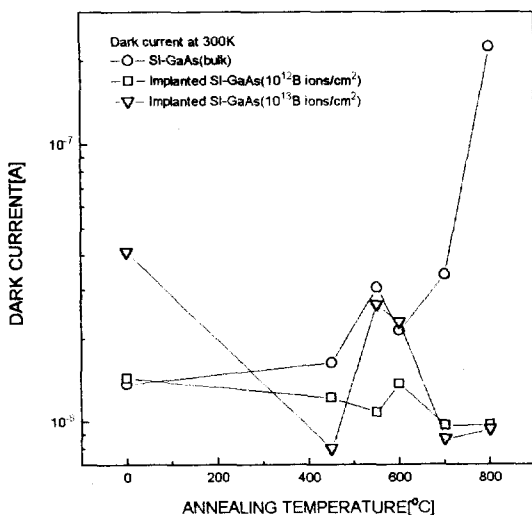


그림 6. 300K에서 측정된 암전류.

Fig. 6. Dark current at 300K.

며, 600~700°C의 열처리에서 E 피크가 반전되어 나타났다. 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

- 4) 이온을 주입하지 않은 경우 700°C 이상의 열처리 온도에서 시료의 암전류가 크게 증가하였으나 이온을 주입한 경우 800°C의 열처리 온도에서도 초기의 벌크 시료에서 측정된 암전류 값으로 유지되었다. 이는 boron 이온주입에 의한 $B_{Ga}-V_{As}$ 결함의 증가와 격자결함에 의한 E 준위의 증가로 인한 결과이다.

참 고 문 헌

[1] Maria J.S.P. Brasil and D. Motisuke, "Deep center characterization by photo-induced transient spectroscopy.", *J. Appl. Phys.*, **68**(7), pp. 3370-3376, 1990.

[2] G.M. Martin, P. Secordei, and C. Venger, "Compensation mechanisms related to boron implantation in GaAs.", *J. Appl. Phys.*, **53**(12), pp. 8706-8715, 1982.

[3] J.R. Morante, J. Samitier, A. Perez, and H. Altelarrea, "Analysis of the near-intrinsic and extrinsic photocapacitance due to EL2 level in boron implanted GaAs.", *J. Appl. Phys.*, **60**(5), pp. 1661-1669, 1986.

[4] J. Samitier and J.R. Morante, "Optical behavior of the U band in relation to EL2 and EL6 levels in boron implanted GaAs.", *Appl. Phys. Lett.*, **48**(17), pp. 1138-1140, 1986.

[5] L. He and W.A. Anderson, "The effect of boron, oxygen, and fluorine in ion implanted GaAs.", *J. Electronic Materials*, **22**, No. 3, pp. 323-329, 1992.

[6] R.E. Kremer, M.C. Arikian, J.C. Abele, and J.S. Blakemore, "Transient photoconductivity measurements in semi-insulating GaAs.", *J. Appl. Phys.*, **62**(6), pp. 2424-2431, 1987.

[7] A.G. Milnes, *Deep Impurities in Semiconductors*, John Wiley, pp. 114-140, 1973.

[8] O. Yoshie and M. Kamihara, "Photo-induced current transient spectroscopy in high-resistivity bulk material.", *J. J. Appl. Phys.*, **22**, No. 4, pp. 621-628, 1983.

[9] 배인호, 김기홍, 김인수, 최현태, 이철욱, 이정렬, "반절연성 GaAs에서 열자극 전류에 관한 연구.", *한국전기전자재료학회지*, **7**권 5호, pp. 383-388, 1994.

[10] D. Pons, P.M. Mooney and J.C. Bourgoin, "Energy dependence of deep level introduction in electron irradiated GaAs.", *J. Appl. Phys.*, **51**(4), pp. 2038-2042, 1979.

[11] 심규환, 편광의, 이종람, 박형무, 강진영, 마동성, "Si 이온 주입된 GaAs의 급속 열처리에 의한 활성화 특성.", *한국물리학회지*"응용물리", **2**, No. 4, pp. 400-406, 1989.

[12] S. Chichibu, N. Ohkubo, and S. Matsumoto, "Effects of controlled As pressure annealing on deep levels of liquid encapsulated Czochalski GaAs single crystals.", *J. Appl. Phys.*, **64**(8), pp. 3987-3993, 1988.

[13] B. Santic and U.V. Desnica, "Thermoelectric effect spectroscopy of deep levels-application to semi-insulating GaAs.", *Appl. Phys. Lett.*, **56**(2), pp. 2636-2638, 1990.

[14] Q. Fang and D.C. Look, "Infraed quenching and thermal recovery of thermally stimulated current spectra in GaAs.", *Appl. Phys. Lett.*, **59**(1), pp. 48-50, 1991

[15] 김은규, 조훈영, 김성일, 민석기, "Excimer 레이저 Annealing된 HB-GaAs내의 깊은준위 연구.", *한국물리학회지*"새물리", **29**, No. 5, pp. 591-595, 1989.

[16] G.M. Martin, E. Esteve, P. Langlade, and S. Markram-Ebeid, "Kinetics of formation of the midgap donor EL2 in neutron irradiated GaAs materials.", *J. Appl. Phys.*, **56**(10), pp. 2655-2657, 1984.

[17] S.R. Blight, H. Thomas, "Investigation of the negative peak in photoinduced transient spectra of semi-insulating gallium arsenide.", *J. Appl. Phys.* **65**(1), pp.215-226, 1988.

[18] F. Orito, K. Fujii, and Y. Okada, "Formation and behavior of $B_{Ga}V_{As}$ complex defects in gallium arsenide grown by liquid-encapsulated Czochralski method.", *J. Appl. Phys.*, **68**(11), pp. 5696-5699, 1990.

[19] 고석중, 최병두, 박승환, 임한조, "열처리에 의

하여 p-형으로 반전된 반절연성 GaAs의 전기적 특성.”, 한국물리학회지“새물리”, 34, No. 4, pp. 440-444, 1994.

저자소개

최현대

1963년 3월 12일생. 1990년 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학중.



손정식

1967년 9월 9일생. 1990년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1995년 현재 동 대학원 물리학과 박사과정.



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.



김영일

1967년 1월 2일생. 1989년 충남대학교 물리학과 졸업. 1991년 동교 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 경북대학교 센서기술연구소, 주임연구원.



이철욱

1967년 8월 13일생. 1990년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 8월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학중.



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.

