

PICTS 방법에 의한 급속열처리시킨 반절연성 InP(100)에서 깊은준위에 관한 연구

논문
10-8-7

A Study on Deep Levels in Rapid Thermal Annealed PICTS Semi-Insulating InP(100) by PICTS

김중수*, 김인수*, 이철욱*, 이정열*, 최현태**, 배인호*

(Jong-Su Kim, In-Soo Kim, Chul-Wook Lee, Jung-Yeul Lee, Hyun-Tai Choi and In-Ho Bae)

Abstract

The behavior of deep levels in rapid thermal annealed Fe-doped semi-insulating InP(100) was studied by photoinduced current transient spectroscopy(PICTS). In bulk InP, T2($E_c - 0.24$ eV), T3($E_c - 0.30$ eV) and T5($E_c - 0.62$ eV) traps were observed. After annealing, the T2 trap was annihilated at 200 °C and recreated at 350 °C. T3 trap was not affected below 400 °C. With increasing temperature, the concentration of T5 trap reduced and it was annihilated at 300 °C. However, the T1($E_c - 0.16$ eV) and T4($E_c - 0.42$ eV) traps were began to appear at 400 °C and these concentrations were increased with annealing temperature. The T1 and T4 traps seem to be related to the isolated phosphorus vacancy(V_P) and V_P -indium antisite(V_P-P_{In}) or V_P -indium interstitial(V_P-In_i), respectively.

Key Words(중요용어) : Photoinduced current transient spectroscopy(PICTS), Semi-insulating InP(반절연성 InP), Activation energy(활성화 에너지), Deep level(깊은준위),

1. 서 론

반절연성 InP는 고속 소자와 광전자 직접회로의 소재로 많이 사용되고 있지만¹⁾, 소자 제작시 소자 내에 존재하는 native 및 불순물에 관련된 결함들이 소자의 효율을 저하시키는 요인으로 작용하고 있다²⁾. 특히 Fe가 첨가된 반절연성 InP에서는 Fe와 관련된 결함들이 소자의 구조를 오염시키고³⁾, field effect transistor(FET) channel 안에서 전자이동도의 감소 현상을 일으키기도 한다⁴⁾. 그리고 이 시료로 소자를 제작할 때 거치는 공정 중에서 열처리에 의한 결함들이 형성될 수도 있다. 특히 온도 600~900 °C에서 열처리시켰을 때 발생하는 결함들에 관한 거동은 보고 되었다^{2,4-5)}. 그러나 InP를 온도 360 °C 부근에서 열처리하면 P가 외부로 손실²⁾되기 때문에 저온에서 열처리시켰을 때 발생하는 결함들에 관한 거동을 연구함으로써 시료 내에 존재하는 결함들의

근원을 조사할 수 있다.

본 연구에서는 Fe가 첨가된 반절연성 InP(100) 내에 존재하는 결함들을 photoinduced current transient spectroscopy(PICTS) 방법으로 조사 분석하였다. 특히 온도 200~750 °C에서 급속열처리시켰을 때 발생하는 결함들의 거동을 조사하여 결함이 형성되는 열처리 온도와 근원을 조사하였다.

2. 이 론

Photoinduced current transient spectroscopy(PICTS)는 Fig. 1과 같이 광 펄스에 의해 자유 캐리어가 생성되고, 광 펄스가 조사되는 동안 포획과 재결합이 균형을 이루어서 광전류는 평형 상태에 도달한다. 그 다음 광 펄스를 제거하고 나면 자유 캐리어의 재결합에 의해 광전류가 빠르게 감소하고 이후에 트랩에 포획되어 있던 캐리어들의 방출로 인해 지수 함수적으로 감소하게 된다. 이러한 지수함수적 감소는 characteristic time constant를 가지고 열적 방출과정의 의해 나타난다. 온도의 변화에 따른 트랩들의 방출에 의한 전류는 전자 트랩인 경우에 전자 방출률(e_n)이 정공방출률(e_p)보다 매우 크다는 가

*: 영남대학교 물리학과

** : 한국전자통신연구소

접수일자 : 1997년 6월 22일

심사완료 : 1997년 8월 7일

정($e_n \gg e_p$)하에서 시간에 따른 전류의 변화량은 다음과 같이 표현된다⁶⁾.

$$\Delta I(t) = KN_T e_n \exp(-e_n t) \quad (1)$$

여기서, N_T 는 트랩 농도, K 는 ohmic 접촉사이의 표면상태와 광 침투깊이, 그리고 인가된 전기장에 의존하는 상수이다. 또한 e_n 은 전자 방출률로서 다음과 같이 주어진다.

$$e_n = \sigma_n A_n T^2 \exp(-\Delta E_T / K_B T) \quad (2)$$

여기서, σ_n 은 전자의 포획단면적이고, A_n 은 $16\pi^{3/2} m_e^* K_B^2 / h^3$ 로 상수이며, ΔE_T 는 트랩의 활성화 에너지이다.

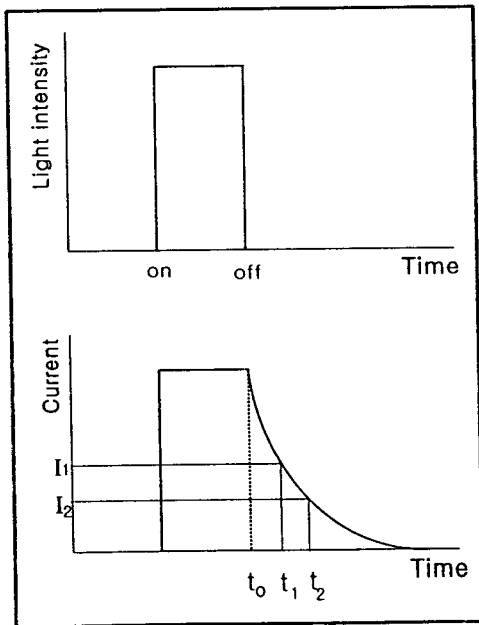


그림 1. 전류 응답
Fig. 1. Current response.

3. 실험

본 실험에서 시료는 Fe가 첨가된 liquid-encapsulated Czochralski(LEC)법으로 성장시킨 반절연성 InP(100)를 사용하였다. 먼저 시료를 trichloroethylene(TCE), 아세톤 및 메탄올 순으로 각각 5분간 세척하였으며, HF : H₂O(10 : 1) 용액으로 etching하여 표면 산화막을 제거하였다. 세척과

etching을 끝낸 시료를 N₂ 분위기의 온도 200~750 °C 영역에서 급속열처리(rapid thermal annealing : RTA)을 30초간 수행하였다. 그리고 시료 표면에 In을 진공증착하여 ohmic하였다.

PICTS 장치는 참고문헌⁷⁾과 동일하며, 측정시 인가된 광원은 red 계열의 6400 Å 정도의 고휘도 light emitting diode(LED)를 사용하였으며, 광 펄스의 유지시간은 10 msec.이며, 주기는 6.25 Hz 였다. 인가전압은 열처리 전과 후, 시료 모두에 16 V를 인가하여 측정하였다. Sampling time(t)는 0.05~100 msec.로 하였고, t₂ / t₁은 4로 일정하게 하였다. Current transient는 Fig. 1에서처럼 t₁ 및 t₂일 때 전류값을 sampling하였으며, 그 차이인 $\Delta I = I(t_1) - I(t_2)$ 를 온도의 함수로서 plot하여 PICTS 신호를 computer로 저장 분석하였다.

4. 결과 및 논의

반절연성 InP(100)를 열처리시키기 전과 후에 관측된 PICTS 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 시료의 급속 열처리는 온도 300 °C에서 30초간 수행하였다.

열처리를 시키지 않은 시료의 PICTS 신호에서는

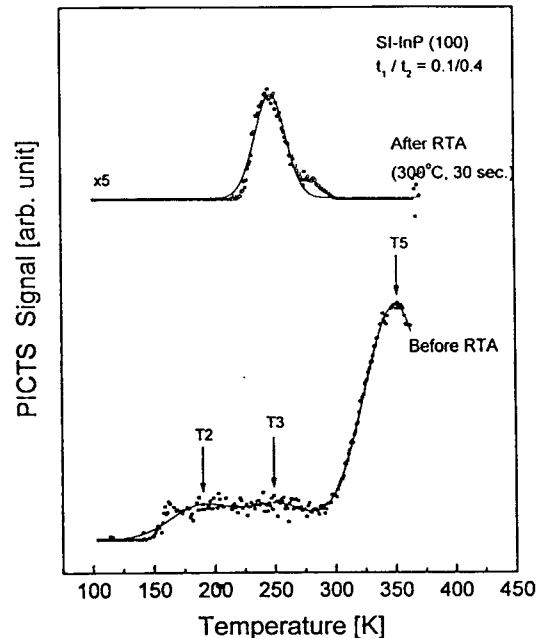


그림 2. 급속열처리 전후의 Fe가 첨가된 SI-InP에 대한 PICTS 신호

Fig. 2. PICTS signals for Fe-doped SI-InP of before and after rapid thermal annealing

3개의 신호 즉, T2, T3 및 T5 트랩이 관측 되었으며, 온도 300 °C에서 열처리시킨 시료에서는 T2와 T5 트랩은 사라지고, T3 트랩만 관측 되었다. 이 결과로 InP 시료 내에 존재하는 native 결함들은 낮은 온도의 열처리에서도 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 반절연성 InP을 열처리시켰을 때 발생하는 트랩들의 거동을 세밀히 조사하기 위하여 온도 250~750 °C 범위에서 30초간 급속 열처리시킨 후, 관측된 PICTS 신호들을 Fig. 3에 나타내었다.

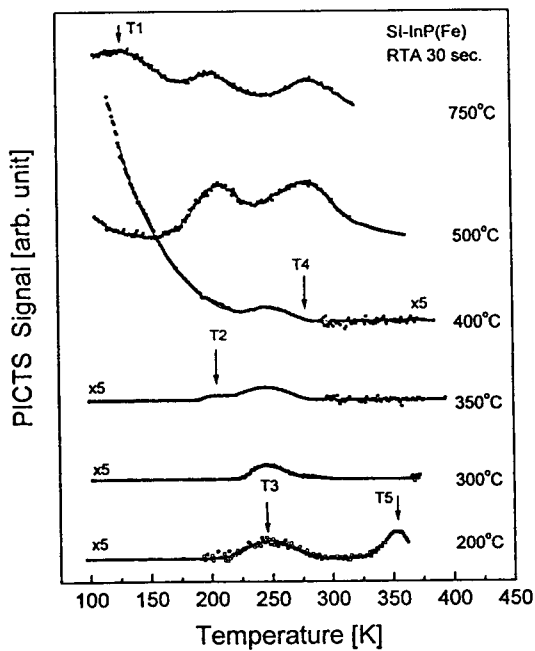


그림 3. SI-InP에 대한 급속열처리 온도에 따른 PICTS 신호

Fig. 3. PICTS signals with rapid thermal annealing temperature for SI-InP.

그림을 살펴보면 온도 200 °C에서 열처리시킨 시료에서는 열처리 전에 관측된 트랩 중에서 T2 트랩만 소멸되었으며, 열처리 온도 300 °C에서는 T5 트랩은 소멸되고, T3만 관측되었다. 온도 350 °C에서 열처리시킨 시료에서는 트랩 T3에 의한 신호 외에 열처리 전에 나타난 트랩 T2가 미약하게 다시 나타났다. 그리고 온도 400 °C에서 열처리시킨 시료에서는 T2와 T3 트랩은 여전히 나타났으며, 각 트랩들의 농도도 거의 변화없음을 알 수 있었다. 그리고 126 K와 285 K 부근에서 트랩 T1 및 T4로 추정되는 새로운 신호가 형성되었다. 열처리 온도 500 °C

에서는 T3 트랩에 의한 신호가 T2와 T4 트랩에 중첩되어 관측되었으며 T1도 관측되었다. 온도 750 °C에서 열처리시킨 시료에서는 3개의 신호 즉, T1, T2 및 T4 트랩이 뚜렷이 관측되었다.

열처리 전과 후에 관측된 각 트랩들의 활성화 에너지(ΔE_T) 및 포획단면적을 구하기 위해 식 (2)를 $\ln[e_n/T^2]$ 와 $1000/T$ 로 plot한 결과들을 각각 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다.

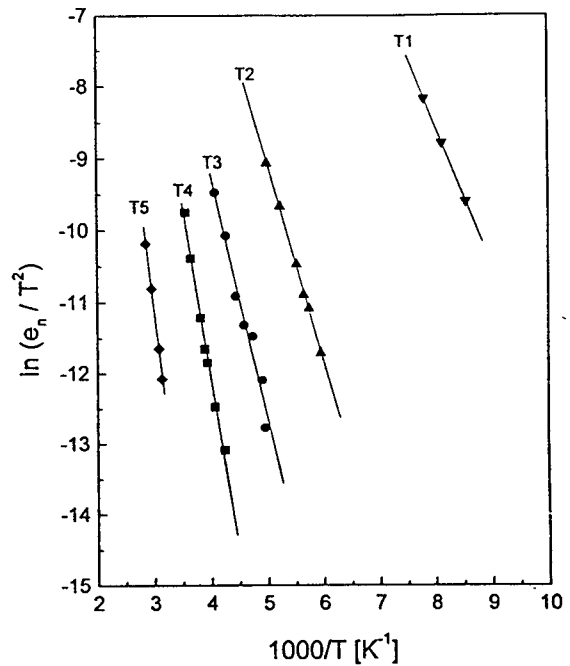


그림 4. SI-InP의 PICTS 신호들에 대한 Arrhenius 플롯

Fig. 4. Arrhenius plot for PICTS spectra of the SI-InP.

실험 조건이 동일하다면 식 (1)과 같이 PICTS 신호의 세기는 트랩 농도에 비례하므로 열처리 온도를 변화시켰을 때 각 트랩들의 PICTS 신호의 세기 변화를 나타내면 Fig. 5와 같으며, 이 결과로부터 각 트랩들의 열처리에 따른 농도 변화를 추정할 수 있다.

그림에서 트랩들의 상대적인 농도의 증감 비교는 T2, T3 및 T5는 열처리 전의 시료에서 관측된 트랩을 기준으로 하였으며, T1과 T4는 트랩이 형성되기 시작한 온도인 400 °C에서 관측된 트랩을 기준으로 하였다. T3 트랩의 농도는 400 °C까지 열처리시킨

표 1. SI-InP에서 측정된 깊은준위 parameter들의 요약

Table 1. The summary of deep level parameters measured in SI-InP.

Trap	Max. temperature of signal observed(K)	Activation energy(eV)	Capture cross section(cm^2)
T1	126	0.16	2.43×10^{-15}
T2	202	0.24	2.90×10^{-16}
T3	246	0.30	2.14×10^{-16}
T4	285	0.42	4.53×10^{-15}
T5	350	0.62	1.79×10^{-14}

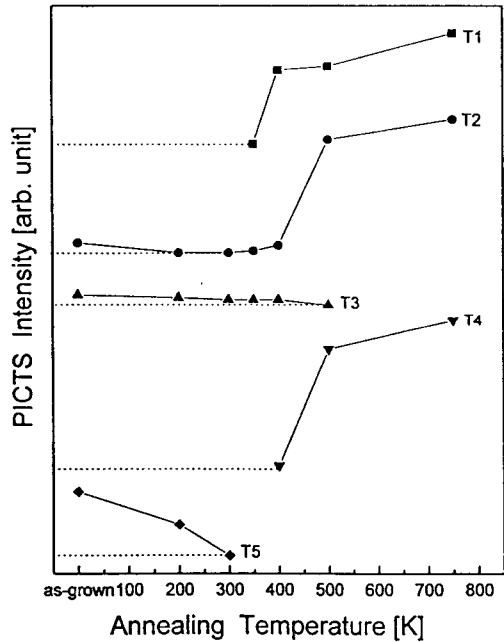


그림 5. 그림 3으로부터 관측된 PICTS 신호의 강도 변화

Fig. 5. Variation of intensity for PICTS signals observed from Fig. 3.

시료와 열처리 전 시료의 농도가 거의 변화가 없으나, T5는 열처리 온도를 증가시킴에 따라 점차 감소하다가 온도 300 °C 이상에서는 소멸되었다. 그리고 T2 트랩의 농도는 온도 200~300 °C까지 열처리시 일시적으로 소멸되었다가, 온도 350 °C에서 다시 증가하였으며, 그 이상 온도에서 열처리시켰을 때 급격한 증가를 보였다. 또한 T1 및 T4 트랩의 농도는

이 트랩들이 형성되기 시작한 온도인 400 °C 이상으로 온도를 증가시킴에 따라 증가함을 알 수 있었다.

따라서 이상의 실험 결과로 미루어 보아 벌크 InP 시료에는 T2, T3 및 T5 트랩이 존재하며, 이 중에서 먼저 T2(0.24 eV) 트랩은 온도 350 °C 이상에서 열처리시켰을 경우에도 관측된 것으로부터 다음과 같이 가정할 수 있다. 첫째 T2의 일시적인 소멸은 P vacancy(V_p)에 관련된 T2가 열처리에 의해서 V_p 자리가 열적유동으로 인해 옮겨지거나 다른 원소나 불순물이 점유함으로 인해 트랩의 농도가 일시적으로 감소하는 것이다. 둘째 열처리에 의해 P가 시료 외부로 손실되어 시료 내부에 V_p 가 증가하므로 인해 상대적으로 벌크 시료에서보다 T2에 관련된 트랩의 농도가 증가했기 때문으로 추정된다. 그리고 Marrakchi 등⁴⁾이 P의 압력을 변화시켜 InP를 열처리시킨 후, PICTS 측정으로부터 0.22 eV의 활성화 에너지(ΔE_T)를 가진 트랩을 관측하여 이 트랩의 농도는 P 압력이 감소함에 따라 신호의 세기가 증가함을 보고하였으며, 이 트랩은 V_p 에 관련된 것이라고 하였다. 따라서 T2 트랩은 V_p 와 불순물에 의한 것으로 생각된다. T3(0.30 eV) 트랩은 온도 500 °C까지 열처리시켰을 경우 관측되었다. Bradeleben 등⁸⁾은 Fe가 첨가된 반질연성 InP를 고온에서 장시간 열처리시켜 electron paramagnetic resonance(EPR) 측정으로부터 활성화 에너지(ΔE_T)가 0.34 eV인 트랩은 온도 700 °C 이상의 고온에서 장시간 열처리할 때 발생하는 V_p 트랩으로 보고하였으며, Sugino 등⁹⁾은 온도 350 °C에서 열처리시킨 n-type InP를 isothermal capacitance transient spectroscopy (ICTS) 측정으로 ΔE_T 가 0.32 eV인 트랩은 역시 열처리시 생성된 V_p 에 기인된 것으로 제안하였다. 이와같이 이 트랩이 V_p 와 관련이 있다면 열처리 온도를 증가시킴에 따라 트랩의 농도는 증가해야만 한다. 그러나 Fig. 5에서 밝힌 바와 같이 트랩 T3의 농도는 열처리 온도 변화에 따라 거의 변화가 없었으므로 본 연구결과와는 상이하였다. 그리고 이와같은 현상은 본 실험에서 관측된 T3는 비교적 낮은 온도(200~500 °C)에서 열처리시 영향을 받지 않는 트랩으로 이에 대한 설명은 아직 보고되어 있지 않으며, 많은 연구가 필요하다. 그리고 트랩 T5(0.62 eV)는 InP 시료에 첨가된 Fe가내부에 있는 shallow donor level을 보상하여¹⁰⁻¹²⁾ 시료 내의 잉여전자(residual electron)을 고립시켜 반질연성을 만드는 반면, 이런 작용에 기여하지 못한 Fe들이 결함준위를 형성하여 생성된 결함으로 추정된다. 또한 이 트

랩은 온도 200 °C에서 열처리시킨 경우 결합준위를 형성하는 대부분 Fe들이 shallow donor level을 보상이므로 열처리 전보다 트랩의 농도가 감소하여 신호의 세기가 줄어든 반면, 온도 300 °C 이상에서 열처리하면 신호가 소멸되는 것으로 보아 이는 Fe에 관련된 트랩임을 알 수 있다. 또한 이 트랩은 Fe^{3+} 라고 제안할 수 있으며, 이에 관한 근거는 전자가 Fe^{3+} 에 포획되어 Fe^{2+} 상태로 되었다가 다시 열적 비평형상태로 되면서 전자를 방출하여 전도대로 전이시킬 때 필요한 에너지가 트랩의 활성화 에너지와 거의 일치하기 때문이다¹³⁾. Fang¹⁴⁾은 Fe가 첨가된 SI-InP에서 0.6 eV의 ΔE_T 를 가진 트랩을 보고하였으며, Kadoun²⁾은 0.66 eV인 트랩은 Fe와 관련된 것으로 single acceptor level로 작용한다고 보고하였다. 그리고 Marrakchi²⁾는 Fe에 관련된 트랩의 ΔE_T 가 0.6 eV이라고 하였으며, Kalboussi⁵⁾는 온도 663~820 °C에서 열처리시킨 시료에서는 0.63 eV의 ΔE_T 를 가지는 트랩을 관측하지 못한 반면, 열처리시키지 않은 시료에서만 관측하여 이것이 $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e_{C,B}$ 에 필요한 에너지와 일치한다고 보고한 결과들로부터 이 트랩은 Fe와 관련된 것임을 알 수 있었다.

한편 열처리시 새로이 생성된 트랩 즉, T1 및 T4 중에서 온도 400 °C 이상 열처리시 126 K 부근에서 관측된 T1(0.16 eV) 트랩은 열처리 온도를 증가시킴에 따라 PICTS 신호의 세기가 급격히 증가하므로 열처리시 발생하는 P 손실에 의한 트랩 즉, isolated phosphorus vacancy만의 결합으로 추정된다. Kalboussi 등⁵⁾이 InP를 온도 663~820 °C에서 열처리시켰을 때 ΔE_T 가 0.14 eV인 트랩이 생성됨을 관측하여 이것은 shallow donor level 증가와 관련이 있음을 보고하였다. 또한 Marrakchi 등⁴⁾과 Fornari 등¹⁵⁾은 InP를 phosphorus 분위기에서 열처리시 ΔE_T 가 0.16eV인 트랩이 P 압력을 감소시킴에 따라 신호의 세기가 증가한다고 보고한 결과들로부터 T1 트랩은 고립된 P vacancy(V_P)만의 결합임을 알 수 있다. 그리고 온도 400 °C 이상 열처리시 285 K 부근에서 관측된 T4(0.42 eV) 트랩은 열처리에 의해서 P가 손실됨으로 인해 V_P 가 증가하므로 열처리 온도를 증가시킴에 따라 신호의 세기가 증가되어 관측되었다. 그러나 Fig. 3을 살펴보면 온도 400 °C에서 시료를 열처리시켰을 때 T1과 T4 트랩이 동시에 관측되었으며, 이후에 열처리 온도를 증가시키면 T4 트랩이 T1보다 급격한 증가를 보였다. 이것은 온도 400 °C에서 열처리시 시료 내부에 V_P 가 형성되므로

인해 이에 관련된 T1이 주된 트랩으로 작용한 반면 열처리 온도를 증가시킴에 따라 V_P 가 증가함으로 이에 관련된 복합결합이 형성된 것으로 생각된다. Hirano¹⁶⁾ 등은 ΔE_T 가 0.44 eV인 트랩은 시료의 캐리어 농도 변화에 영향을 준다고 보고하였으며, Kalboussi⁵⁾와 Yamazoe¹⁷⁾는 ΔE_T 가 0.41 및 0.42 eV인 트랩은 V_P 에 관련있다고 보고하였다. 이상의 결과로부터 T4 트랩은 열처리로 인해 P의 외부 손실로 인해 생성된 V_P 가 indium antisite(P_{In}) 및 indium interstitial(In_i) 등과 결합하여 형성된 복합결합으로 추정된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Fe가 첨가된 SI-InP(100)를 온도 200~750 °C 범위에서 30초간 급속 열처리시켰을 때 발생하는 트랩들의 거동을 PICTS 측정으로 조사 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

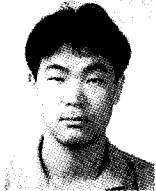
1. 열처리하지 않은 시료에서는 3개의 트랩 즉 $T_2(E_C - 0.24 \text{ eV})$, $T_3(E_C - 0.30 \text{ eV})$ 및 $T_5(E_C - 0.62 \text{ eV})$ 트랩들이 관측되었다. 반면에 이 시료를 온도 200~750 °C 영역에서 30초간 열처리시킨 시료에서는 기존의 트랩 이외에 $T_1(E_C - 0.16 \text{ eV})$ 및 $T_4(E_C - 0.42 \text{ eV})$ 트랩이 새로이 형성되었다.
2. T2는 열처리하지 않은 시료와 온도 350 °C 이상에서 열처리시킨 시료에서 관측된 트랩으로 V_P 와 불순물에 관련된 것이며, T3 트랩은 비교적 낮은 온도 200~400 °C에서 열처리시 영향을 받지 않았다. 그리고 T5는 Fe에 관련된 트랩으로 이 결합의 중심은 Fe^{3+} 이다.
3. T1은 온도 400 °C 이상에서 열처리시 발생하는 트랩으로 P 손실에 의한 고립된 P vacancy(V_P)만의 결합인 반면, T4는 T1 트랩과 같이 열처리에 의해서 P가 손실됨으로 인해 생성되며, V_P 가 indium antisite(P_{In}) 및 indium interstitial(In_i) 등과 관련된 복합결합으로 추정된다.

참 고 문 헌

1. A. Seidl, F. Mosel, G. Müller, "Non-uniformity of Fe doping in semi-insulating LEC-grown InP and its characterization by various mapping methods", Mater. Sci. Eng., **B28**, 107, 1994.
2. A. Kadoun, G. Marrakchi, A. Kalboussi, D. Barbier, and G. Guillot, "Study of deep level

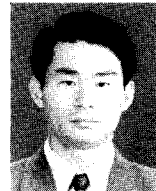
- defect behaviour semi-insulating InP", Mater. Sci. Eng., **B33**, 188, 1995.
3. D.E. Holmes, R.G. Wilson and P.W. Yu, "Redistribution of Fe in InP during liquid phase epitaxy", J. Appl. Phys., **52**, 3396, 1981.
 4. G. Marrakchi, K. Cherkaoui, A. Karoui, G. Hirt, G. Müller, "Traps in undoped semi-insulating InP obtained by high temperature", J. Appl. Phys., **79**, 6947, 1996.
 5. A. Kalboussi, G. Marrakchi, G. Guillot, K. Kainosho, and O. Oda, "Characterization of deep level defects in thermally annealed Fe-doped semi-insulating InP by photoinduced current transient spectroscopy", Appl. Phys. Lett., **61**, 2583, 1992.
 6. O. Yoshie and M. Kamihara, Jpn. J. App. Phys., **22**, 621, 1983.
 7. 최현태, 김인수, 이철욱, 손정식, 김영일, 배인호, "PICTS 방법에 의한 Boron 이온을 주입시킨 반질연성 GaAs의 깊은준위에 관한 연구", 한국 전기전자재료학회지, **8**, 426, 1995.
 8. H. J. V. Bradeleben, J. C. Bourgoin, K. Kainosho and O. Oda, "Thermal donor formation in Fe-doped semi-insulating InP", Appl. Phys. Lett., **57**, 2464, 1990.
 9. T. Sugino, H. Ninomiga, T. Yamada, J. Shirafuji and K. Matsuda, "Creation and passivation of electron traps in n-InP treated with hydrogen plasma", Appl. Phys. Lett., **60**, 1226, 1992.
 10. G. Müller, Phys. Sur., **T35**, 201, 1991.
 11. S.G. Bishop, "Deep Centers in Semiconductors", edited by S.T. Pantelides(Gordon and Breach, New York, 1986), Ch. 8.
 12. M. Avella, "Photocurrent study of Fe-doped semi-insulating InP", Mater. Sci. Eng., **B28**, 111, 1994.
 13. S.G. Bishop, "Deep Centers in Semiconductors", edited by S.T. Pantelides(Gordon and Breach, New York, 1985), p. 541.
 14. Z.Q. Fang, D.C. Look and J.H. Zhao, "Traps in semi-insulating InP studied by thermally stimulated current spectroscopy", Appl. Phys. Lett., **61**, 589, 1992.
 15. R. Fornari, A. Brinciotti, A. Sentiri, T. Görög, M. Curti and G. Zuccalli, "Pressure of phosphorus in equilibrium with solid InP at different temperature", J. Appl. Phys., **75**, 2406, 1994.
 16. R. Hirano and T. Kanazawa, J. Cryst. Growth, **106**, 530, 1990.
 17. Y. Yamazoe, Y. Sasai, T. Nishio and Y. Hamakawa, Jpn. J. Appl. Phys., **20**, 347, 1981.

지자소개



김중수

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



이정열

1970년 3월 21일생. 1993년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정. 영남대학교 물리학과 조교.



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.



최현대

1963년 4월 18일생. 1990년 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 영남대학교 대학원 물리학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 물리학과 졸업(이박). 1996년 8.-97년 9. 한국전자통신연구원 박사후 연수 연구원. 1997년 10월 1-현재 (주)아펙스 화학물반도체본부 차장.



이철욱

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



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.