

반절연성 GaAs에서 열자극 전류에 관한 연구

논문
7-5-3

A Study on Thermally Stimulated Current in Semi-Insulating GaAs

배인호*, 김기홍*, 김인수*, 최현태*, 이철욱*, 이정열*

(In-Ho Bae, Ki-Hong Kim, In-Soo Kim, Hyun-Tae Choe, Chul-Wook Lee, Jung-Yeul Lee)

Abstract

Deep levels in semi-insulating GaAs were observed by thermally stimulated current(TSC) measurement In the temperature ranges of 100-300K T1($E_c-0.18eV$), T2($E_c-0.20eV$), T3($E_c-0.31eV$), T4($E_c-0.40eV$), and T5($E_c-0.43eV$) traps have been observed. The T1, T2, and T5 traps seem to be related to the V_{As} , V_{Ga} -complex, and As_{Ga}^{**} , respectively. T4 trap is considered with respect to $V_{Ga}-V_{As}$ complex.

Key Words(중요용어) : Deep level(깊은 준위), Thermally stimulated current(열자극 전류), Dark current(암전류), Optical quenching(광소멸).

1. 서 론

반도체 소자의 개선을 위하여 공정기술의 개발에도 불구하고 결정성장 과정에서 피할 수 없는 결함들이 발생하게 된다. 이러한 결함들은 단일 반도체인 Si에는 구조적인 점결함 즉, 빈 격자(vacancy) 및 격자간 위치(interstitial site)가 존재하는 반면에, 화합물 반도체인 GaAs에는 격자간에 위치한 Ga(Ga_i), 격자간에 위치한 As(As_i), As 빈 격자(V_{As}), Ga 빈 격자(V_{Ga}), As 자리에 점유한 Ga(Ga_{As}) 및 Ga 자리에 점유한 As(As_{Ga}) 등이 존재한다¹⁾. 이들 결함들은 반도체 소자 제작시 소자의 전기 및 광학적 성질에 크게 영향을 미친다는 것을 최근 여러 연구자들^{2,3)}에 의해 밝혀졌다. 특히 이들 결함 중에서 일부는 준 안정상태를 보여 주며²⁾, 이들의 원인이 되는 결함들의 미세구조 현상 및 발생 근원은 아직 확실하게 알려지지 않고 있다³⁾. 따라서 반도체의 물성연구에서 결함의 깊은준위에 대한 정보와 해석은 매우 중요시 된다. 이러한 깊은준위에 대한 측정 방법에는 광유도 분광법(photoinduced current transient spectroscopy; (PCTS))⁴⁾, 깊은준위 과도 분광법(deep level transient spectroscopy; (DLTS)) 그리고 열

자극 전류(thermally stimulated current; TSC⁵⁾ 방법등이 있다. 이들 중에서 TSC 방법은 실험장치가 간편하고, 분해능이 좋으며, 그리고 하나의 실험결과로부터 여러가지 변수를 결정할 수 있는 장점이 있다.^{3,6)}

본 연구에서는 TSC 방법으로 반절연성 GaAs내에 존재하는 깊은 준위들을 규명하였으며, 또한 시료를 광조사 시간 및 열처리 온도의 변화에 따라 깊은 준위들의 거동을 조사 분석하였다.

2. 실험

2.1. 시료 제작

본 연구에 사용된 시료는 수평 Bridgman으로 성장된 반절연성 GaAs를 사용하였다. 시료를 $5 \times 3 \text{ mm}^2$ 의 크기로 자른 후 끓는 트리클로로에틸렌(trichloroethylene), 아세톤(acetone), 메타놀(methanol)의 순서로 각각 10분간 담근 다음, 탈이온수로 10분간 세척하였다. 세척한 시료는 $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O(6:1:1)$ 용액으로 60초간 에칭한 후 다시 탈이온수로 행군 다음 질소 가스로 건조시켰다.

Ohmic 접합은 시료의 앞면 양쪽에 $1 \times 3 \text{ mm}^2$ 의 크기로 Au-Ge를 진공증착한 후, 온도 450°C 의 Ar 분위기에서 1분간 열처리시켰다. 증착시 진공도는 5.6×10^{-6} Torr 였고, 진공증착장치는 Anelva(EDV-500A)을 사용하였다. 그리고 시료내에 존재하는 깊은준위들의 열적거동을 조사하기 위하여 시료를 온도 400, 500, 600 및 800°C 에서 face to

* : 영남대학교 물리학과

접수일자 : 1994년 1월 10일

실사완료 : 1994년 6월 16일

face 방법으로 Ar 분위기에서 각각 5분간 열처리 시켰다.

2.2. TSC 측정 장치 및 방법

TSC 측정시 사용된 장치는 자체 제작하였으며, 개략도는 그림 1과 같다.

TSC 측정은 시료를 항냉기 내부에 장착한 다음 액체 질소를 부어 온도를 90K까지 냉각시킨 후 시료내에 트랩들을 채워주기 위하여 100W의 백색광 또는 적외선($h\nu \leq 1.12\text{eV}$)으로 일정시간 동안 조사하였다. 그리고 빛을 완전히 차단한 후 일정한 온도 상승률(β)로 온도를 300K까지 상승시키면서

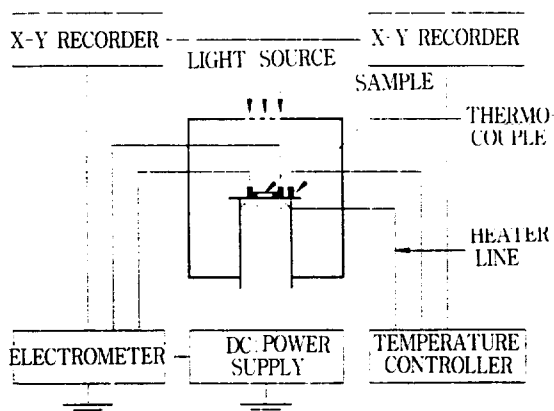


그림 1. TSC 실험장치의 블록선도.

Fig. 1. Block diagram of TSC experimental device.

측정하였다. 이때 측정되는 TSC 신호는 전류(Keithly 485 Picoammeter)를 Y축, 그리고 열전쌍으로 부터 나오는 기전력을 X축으로 하여, X-Y 기록계(YEM 3086)로 기록하였다.

3. 결과 및 검토

그림 2에서는 아무런 처리를 하지 않은 반절연성 GaAs에 여기광원에 따라 온도 상승률(β)을 0.16K/sec로 측정한 TSC 결과를 나타내었다.

그림에서 점선은 여기광원을 조사시키지 않은 상태 즉, 암전류(dark current)로써 피크가 관측되지 않은 반면에, 백색광과 적외선($h\nu \leq 1.12\text{eV}$)을 저온에서 60초간 조사시켰을 때 온도 120K(T1), 145K(T2), 170K(T3), 200K(T4) 및 214K(T5) 부근에서 다섯개의 피크가 관측되었다. 이들 피크들은 반절연성 GaAs에서 관측되는 전형적인 트랩⁷⁾들이다.

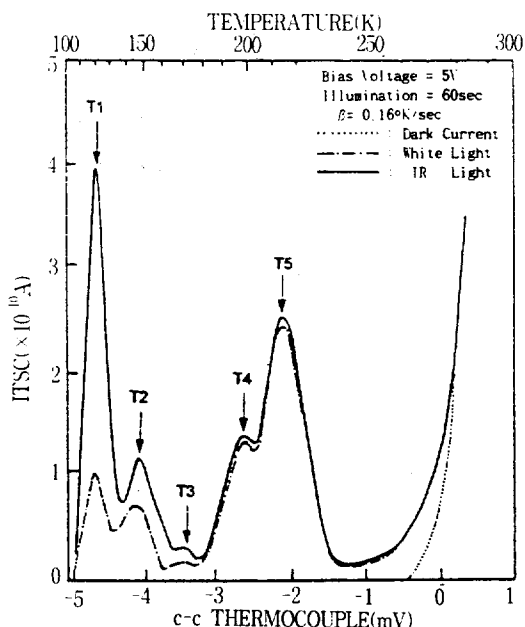


그림 2. 여러가지 여기광원에 따른 반절연성 갈륨 비소의 열차극 전류 스펙트라.

Fig. 2. TSC spectra for semi-insulating GaAs due to effect of vaious initial excitation.

여기광원으로 백색광보다 적외선을 사용했을 때 TSC 피크는 전반적으로 증가하였으나 피크의 위치는 변하지 않았다²⁾. 특히 T1 피크는 4배 정도 크기의 변화를 일으키는 것으로 보아 T1 트랩은 적외선 영역에서 광소멸(optical quenching)현상을 보이고 있으며, 이러한 현상은 As_{Ga} 를 포함하는 복합적인 결함으로 이루어진 준위 즉, EL2 준위가 원자배열 변화에 의해 안정상태에서 준 안정상태로의 전이와 관련된 것으로,^{2,7)} 열에너지에 의해 준 안정상태에 있던 캐리어들이 안정상태로 재여기되어 TSC에 기여한다고 설명할 수 있다⁸⁾. 그러나 T1 트랩에 대한 광소멸 현상을 정확히 이해하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

그림 2에 나타난 각 트랩들의 활성화 에너지를 조사하기 위하여 백색광을 여기광원으로 사용하여 온도 상승률($0.08\text{K/sec} \leq \beta \leq 0.31\text{K/sec}$)을 변화시키면서 측정한 TSC 곡선을 그림 3에 나타내었다.

그림에서 본 바와 같이 온도 상승률이 클수록 전반적으로 피크가 커짐과 동시에 피크가 고온쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이를 Arrhenius plot로 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4에서 직선의 기울기와 Y축 절편 값으로부터 활성화 에너지 및 포획 단면적(σ)을 구한 결

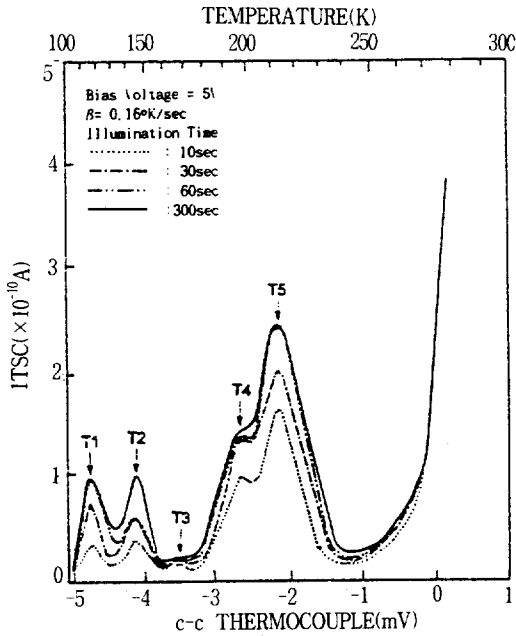


그림 3. 온도 상승률에 따른 열자극 전류 스펙트럼.
 Fig. 3. TSC spectra versus at various heating rates.

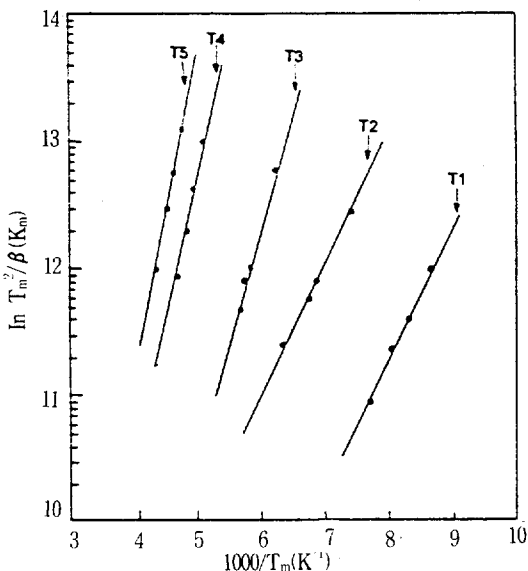


그림 4. 반절연성 갈륨 비소의 열자극 전류에 대한 아레누이스 플롯.
 Fig. 4. Arrhenius plot for TSC spectra of the SI-GaAs

과를 표 1에 나타내었다.
 여기서 활성화 에너지 E_a , $E_a^{\#}$ 및 E_a^* 는 각각 다

표 1. 반절연성 갈륨 비소에서 측정된 깊은준위의 값들.

Table 1. Summary of deep level parameters measured in semi-insulating GaAs.

| Peak | $T_m(K)$ | Activation energy | | | Capture cross section $\sigma(cm^2)$ | Remark |
|------|----------|-------------------|----------------|-------------|--------------------------------------|-------------------|
| | | $E_a(eV)$ | $E_a^{\#}(eV)$ | $E_a^*(eV)$ | | |
| T1 | 120 | 0.18 | 0.24 | 0.22 | 1.7×10^{-16} | V_{As} |
| T2 | 145 | 0.20 | 0.29 | 0.27 | 4.3×10^{-17} | V_{Ga} -complex |
| T3 | 170 | 0.31 | 0.34 | 0.33 | 3.4×10^{-15} | - |
| T4 | 200 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 1.8×10^{-14} | $V_{As}-V_{Ga}$ |
| T5 | 214 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 1.6×10^{-14} | As_{Ga} |

음 식으로 부터 구하였다. 온도 상승률(β)에 의한 식⁶⁾은

$$\frac{E_a}{k_B T_m} = I_n \left(\frac{T_m^2}{\beta} \right) + I_n \left(\frac{N_c \sigma V_{th} k_B}{E_a} \right) \quad (1)$$

으로 표현되며, 준평형에 의한 분석법인 Bube 식⁹⁾

$$E_a^{\#} = k_B T_m \ln \left[\frac{N_c(T_m)}{n^m} \right] = 23k_B T_m \quad (2)$$

이다. 식 (2)에서는 온도 상승률을 무시한 경우이며, 온도 상승률의 의존성을 고려한 더 적절한 근사식¹⁰⁾은 다음 식으로 표현된다.

$$E_a^* = k_B T_m \ln(T_m^4/\beta) \quad (3)$$

여기서 k_B 와 T_m 은 각각 Boltzmann 상수 및 TSC 피크점의 온도이고, N_c 는 온도 T_m 에서 전도대의 유효상태 밀도이며, σ 와 V_{th} 는 각각 포획 단면적과 전자의 열속도이다. 그리고 n^m 은 온도 T_m 에서 전자농도이다. 식 (1)에 비해 식 (2)와 (3)은 저온에서 잘 맞지 않는 단점이 있으나, 간단한 방법으로 활성화 에너지를 구할 수 있다는 이점도 있다. 이들 중에서 T5 트랩을 peak shape⁶⁾법으로 분석한 결과 이 곡선은 재결합이 지배적인 1차 kinetics임을 알았다.

그림 5에서는 트랩이 채워지는 률(filled rate)을 조사하기 위하여 광조사 시간만 변화시켜 측정된 TSC 결과를 나타내었다.

그림에서 보여 주듯이 TSC 피크는 트랩마다 광양(광 강도×광조사 시간)에 따라 다르며¹¹⁾ 광조사 시간이 60초 이상일 때 모든 피크는 거의 포화된 반면에, T2 피크는 광조사 시간에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.^{3,7)} 이는 각기 다른 포획 단면적으로 인해 트랩이 채워지는 률이 다르기 때문이다.¹¹⁾

그리고 반도체의 열처리 효과에 대한 연구는 손쉽게 반도체의 물성을 변화시켜 준다는 점과 물성 변화의 과정을 조사 추정함으로써 많은 정보를 얻

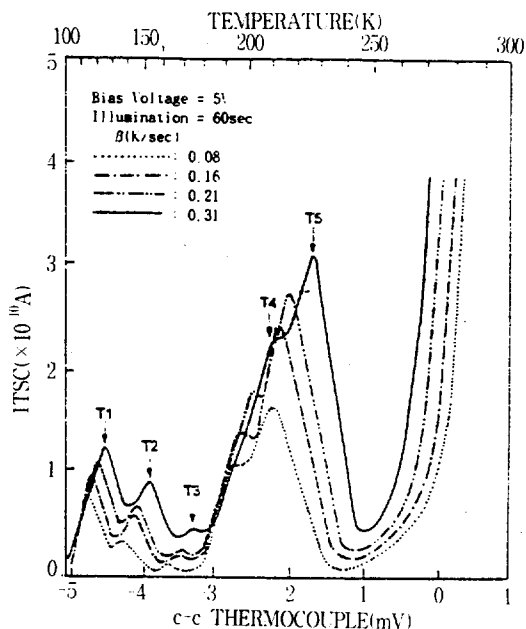


그림 5. 반절연성 갈륨 비소에 대한 열차극 전류의 광조사 시간 효과.

Fig. 5. Effect of illumination time on TSC for SI-GaAs.

을 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 열처리에 따른 GaAs내에 존재하는 깊은준위들의 거동에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 따라서 반절연성 GaAs에 대한 열처리 효과를 조사하기 위하여 온도 400°C~800°C의 범위에서 5분간 face to face 방법으로 열처리시킨 시료의 TSC 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림에서 본 바와 같이 T1 트랩은 열처리 온도 600°C까지 거의 변화가 없으나, 800°C에서 크게 증가하였으며, T2 트랩은 600°C에서 12배 증가를 보이며 800°C에서 약간 감소하면서 저온쪽으로 이동함을 볼 수 있고, T3 트랩은 600°C에서 소멸되었다가 800°C에서 복원되면서 약간 증가하였다. T4 트랩은 500°C에서 최대가 되었다가 열처리 온도가 증가할 수록 피크가 감소하였다. 그리고 T5 트랩은 600°C에서 최대가 되었다가 800°C에서 소멸하였다.

열처리 결과 이들 트랩들은 GaAs의 깊은준위인 EL2 준위와 상당한 관련이 있는 것으로 생각되며, EL2 준위의 근원인 As_{Ga} 를 포함한 원자적 구조의 변화로 사료된다. 이러한 EL2 준위와 다른 깊은준위들과의 상호간에 영향이 있음을 Fang¹²⁾ 등이 보고 하였는데 HB로 성장된 n-GaAs를 온도 800°C에서 열처리하여 DLTS 실험을 수행한 결과

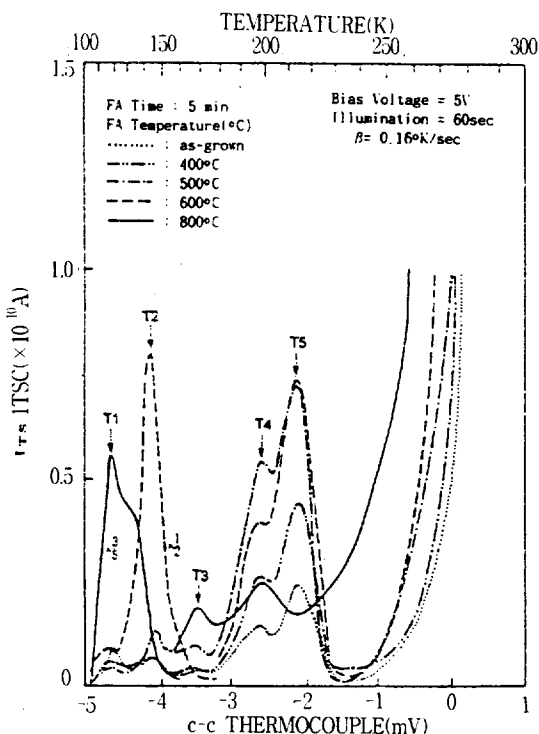


그림 6. 반절연성 갈륨 비소에 대한 열차극 전류의 열처리 시간의 효과 반응 방향

Fig. 6. Effect of annealing temperature on TSC for SI-GaAs.

GaAs의 표면에서 EL2 준위는 감소하지만 내부에서 EL2 준위의 증가로 인해 EL6 준위는 감소됨과 동시에 EL9 준위가 생성됨을 밝힌 바 있다. 또한 Desnica¹³⁾ 등은 적외선 조사($0.9\text{eV} \leq 1.3\text{eV}$)로써 광전도도(photoconductivity; PC)와 TSC 실험 결과로 이들 다섯개의 트랩들이 EL2 준위를 포함하는 복합적인 결함들로 추정하였으며, 이 경우에 EL2 준위는 어떠한 변화에도 성질이 바뀐다고 보고하였다. 따라서 측정된 이들 깊은준위들은 EL2 준위를 포함하는 복합적인 결함으로써 시료의 내부에 존재하는 트랩 중심의 역할을 할 수 있다는 것이다. 더욱기 잘 알려진대로 어떤 깊은준위들은 native defect의 nucleation point 역할을 한다. 그러므로 GaAs에서 EL2 준위는 다른 깊은준위들(EL3, EL5, EL6, EL8, EL9)¹⁴⁾과 관련있는 것으로 알려져 있다.

이상의 실험 결과로부터 T1 트랩($T_m=120\text{K}$)은 적외선을 조사하면 광소멸 현상¹⁵⁾이 일어나며, 온도 800°C에서 열처리시킨 결과 큰 변화를 일으키므로 이는 V_{As} 와 관련이 있으며,¹⁵⁾ T2 트랩은 온도 600

℃에서 열처리시킨 결과 크게 변하는 것으로 보아 Abele⁴⁾, Desnica³⁾, 그리고 Fang⁷⁾등이 관측한 V_{Ga} -복합체와 관계있는 것으로 생각된다. 그리고 T3 트랩은 165K~175K 사이에서 완만한 피크를 이루고 있으며, 이는 Lin¹⁶⁾등에 의해 보고된 트랩과 같은 것이라 생각되며, 다른 연구자²⁾에 의해서도 이 온도 범위에서 역시 본 연구 결과와 같은 완만한 피크를 보고하였다. 피크점이 200K인 T4 트랩은 Bube와 Line^{16,17)}에 의해 보고된 Cr이 첨가된 GaAs 시료에서 관측된 $E_a=0.35eV$ ($\sigma=10^{-16}cm$)인 피크와 같은 트랩으로 생각되며, Zhao¹⁸⁾는 이 피크가 화학양론적(Ga-rich시료가 As-rich시료보다 큰 피크가 나타남)으로 큰 영향을 받으며, 근원적인 결합인 $V_{As}-V_{Ga}$ 와 관계있다고 하였다. Fang⁷⁾등도 역시 이 피크의 세기가 화학양론적에 의존하며 V_{As} 또는 Ga_{As} 결합과 관계있다고 보고하였으나, 본 연구의 열처리 결과 온도 500℃에서 피크가 최대가 되었다가 줄어들기 시작하므로 $V_{Ga}-V_{As}$ 결합과 관계있다고 생각된다. T5 트랩($T_m=214K$)은 Santic¹⁹⁾ 등은 TSC 및 TEES(thermoelectric effect spectroscopy) 실험 결과를 비교하여 정공 트랩이라 하였다. 그러나 Lin¹⁶⁾은 이 준위가 특히 짧은 광조사할 경우 전자 트랩에 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. 그리고 Auret²⁰⁾는 이 피크가 Cu와 관계있는 것이라고 제안하였으나, Fang⁷⁾등은 214K~218K 범위의 피크는 As_{Ga}^{++} 결합으로 발표한 것을 고려하면 본 실험에서 온도 600℃ 열처리 결과 T2 트랩과 함께 증가하는 것으로 보아 As_{Ga}^{++} 결합으로써 정공 트랩이라 생각된다.

4. 결 론

반절연성 GaAs에서 깊은준위의 거동에 관한 열 자극 전류를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TSC 측정 결과 다섯개의 피크 즉, T1(120K), T2(145K), T3(170K), T4(200K) 및 T5(214K) 트랩이 관측되었으며, 이 트랩들의 활성화 에너지는 전도대의 하단으로부터 0.18~0.43eV 범위였다.
2. 시료에 적외선($h\nu \leq 1.12eV$)을 조사시킬 경우 백색광보다 진반적으로 피크가 약간 증가한 반면에, T1 트랩은 큰 증가를 보였다. 이는 광소멸 현상으로 설명된다.
3. 광조사 시간의 변화에 따른 시료내의 트랩이 채워지는률은 광조사 시간에 따라 다르게 나타나는데, 이는 자유 캐리어의 포획 단면적과 관련이 있으며 특히 T2 트랩은 광조사 시간에 큰

영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 열처리 결과 T1과 T2 트랩은 각각 V_{As} 및 V_{Ga} -복합체 결합과 관계 있으며, T4와 T5 트랩은 각각 $V_{Ga}-V_{As}$ 복합체와 As_{Ga}^{++} 결합에 기인된 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

- (1) M. Tomozane and Y. Nannichi, "Improved thermally stimulated current spectroscopy to characterize levels in semi-insulating GaAs.", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 25, L273(1986).
- (2) Z. Q. Fang and D. C. Look, "Infrared quenching and thermal recovery of thermally stimulated current spectra in GaAs.", *Appl. Phys. Lett.*, 59, 48(1991).
- (3) U. V. Desnica, B. Satic, D. Desnica, and M. Pavlovic, "Trapping and recombination processes via deep level T_3 in semi-insulating gallium arsenide.", *J. Electron Mater.*, 22, 403(1993).
- (4) J. C. Abele, R. E. Kremer, and J. S. Blakemore, "Transient photoconductivity measurements in semi-insulating GaAs.", *J. Appl. Phys.*, 62, 2432(1987).
- (5) M. Taniguchi and T. Ikoma, "Variation of the midgap electron traps(EL2) in liquid encapsulated Czochralski GaAs.", *J. Appl. Phys.*, 54, 6448(1983).
- (6) R. Chen and Y. Kish, "Analysis of thermally stimulated process.", Pergamon Press, Oxford, 144-182(1981).
- (7) Z. Q. Fang and D. C. Look, "Comparison of deep centers in semi-insulating liquid encapsulated Czochralski and vertical-gradient freeze GaAs.", *J. Appl. Phys.*, 69, 8177(1991).
- (8) Y. H. Lee and T. W. Kang, "Thermally stimulated current of Si-ion-implanted GaAs.", *J. Appl. Phys.*, 71, 5419(1992).
- (9) A. G. Milness, "Deep impurity in semiconductor.", Wiley, New York, 226-266(1973).
- (10) W. S. Lan, T.C. Chong, L. S. Tan, C.H. Goo, K. S. Goh, and K. M. Lee, "Study of electron traps in semi-insulating gallium arsenide buffer layers for the suppression of backgating by the zero-bias thermally stimulated current technique.", *Appl. Phys. Lett.*, 61, 49(1992).

- (11) M. Tomozane and Y. Nannichi, "A simple to determine the capture cross section of deep levels in GaAs by thermally stimulated current", Jpn. J. Appl. Phys., 26, L283(1987).
- (12) Z. Q. Fang, T. Kikuta, T. E. Schlesiger, and A. G. Milnes, "Evidence for EL6 (Ec-0.35eV) acting as a dominant recombination center in n-type horizontal Bridgman GaAs.", J. Appl. Phys., 61, 5047 (1987).
- (13) U. V. Desnica, D. L. Desnica, and B. Santic, "EL2 related deep traps in semi-insulating GaAs.", Appl. Phys. Lett., 58, 278(1991).
- (14) M. Hoinkis and E. R. Weber, "Differentiation of electron-paramagnetic-resonance signals of arsenic antisite defects in GaAs.", Phys. Rev., B40, 3872(1989).
- (15) D. I. Desnica, "Characterization of deep traps in semi-insulating GaAs.", J. Electron mater., 21, 463(1992).
- (16) A. L. Lin and R. H. Bube, "Photoelectronic properties of high-resistivity GaAs:Cr.", J. Appl. Phys., 47, 1859(1976).
- (17) A. L. Lin, E. Omelianovski and R. H. Bube, "Photoelectronic properties of high-resistivity GaAs:O.", J. Appl. Phys., 47, 1852(1976).
- (18) J. H. Zhao, "Defects due to nonstoichiometric growth in semi-insulating GaAs and their effects on Si implantation activation efficiency." J. Appl. Phys., 66, 5440(1989).
- (19) B. Santic and U. V. Desnica, "Thermoelectric effect spectroscopy of deep levels-application to semi-insulating GaAs.", Appl. Phys. Lett., 56, 2636(1990).
- (20) F. D. Auret, A. W. R. Leith, and J. S. Vermaak, "A deep level transient spectroscopy analysis of electron and hole traps in bulk-grown GaAs.", J. Appl. Phys., 59, 158(1986).

저자소개

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.

최현태



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

김기홍



1966년 4월 27일생. 1992년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1994년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사).

이철욱



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

김인수



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

이정열



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