

In_{1-x}Ga_xP의 깊은 준위 특성

논문
7-4-6

Properties of Deep Levels in In_{1-x}Ga_xP

김 선 태*, 문 동 찬**
(Seon-Tai Kim, Dong-Chan Moon)

Abstract

In this study, In_{1-x}Ga_xP alloy crystal which has different compositions were grown by the temperature gradient solution(TGS) method, and the properties of deep levels were measured in the temperature range of 90K~450K.

We find the four deep levels of E₁, E₂(248meV), E₃(386meV) and E₄(618meV) in GaP, which has composition of Ga in In_{1-x}Ga_xP is one, and the trap densities of E₃ and E₄ levels were 7.5×10¹⁴cm⁻³ and 9×10¹⁴cm⁻³, respectively. A broad deep level spectra was revealed in In_{1-x}Ga_xP whose composition of Ga, x, were 0.56 and 0.83, and the activation energy and trap densities were about 430meV and 6×10¹⁴cm⁻³, respectively.

Key Words(중요용어): InGaP alloy(인듐갈륨인 혼정), temperature gradient solution(온도구배용액), deep levels(깊은준위), trap density(트랩밀도), activation energy(활성화에너지).

1. 서 론

III-V족 3원 혼정반도체 In_{1-x}Ga_xP는 Ga의 조성 x가 0.5부근에서 GaAs기판과 완전한 격자 정합이 이루어지며, 이때의 직접천이형 에너지갭이 실온에서 약 1.9eV이므로 단파장을 발진하는 반도체 레이저다이오드와 고효율, 고회도 발광다이오드 및 고속동작을 하는 이중접합 바이폴라 트랜지스터(HBT)의 wide gap emitter등에 응용되고 있으며,^{1,2)} 특히 In_{1-x}Ga_xP/GaAs 이중접합 구조는 고속 전자이동 트랜지스터(HEMT)와 같은 고속논리소자에 채택되고 있다.³⁾

고속 전자이동 트랜지스터는 통상적으로 AlGaAs/GaAs의 이중접합 구조로 제작되어 왔다. 그러나 AlGaAs는 Al이 산화되는 경향이 있으며, 결정내에 존재하는 donor-complex들이 형성하는 소위 DX중심이라 불리는 깊은 준위가 많은 농도로 존재하여 소자의 동작 특성에 나쁜 영향을 미치게 된다.^{4,5)} DX중심은 도너 원자와 관계가 있으며, 캐리어의 동결과 낮은 온도에서 지속적인 광전도의

주된 원인이 된다.⁶⁾ 이러한 성질은 AlGaAs내의 DX중심 뿐만 아니라 다른 3원 또는 4원 혼정반도체내에 존재하는 도너와 관련된 깊은 준위에서도 관찰되어 졌다. Tachikawa등⁵⁾은 임의의 조성을 갖는 In_{1-x}Ga_xP에 대하여 도너와 관련된 깊은 준위를 관측할 수 있을 것으로 예측하였으며, AlGaAs에 존재하는 DX중심의 농도보다 낮은 농도로 존재할 것이라고 하였다.

In_{1-x}Ga_xP내의 도너와 관련된 깊은 준위에 관한 연구는 주로 GaAs와 격자 정합을 이루는 x=0.5부근에 대해서 이루어졌으며⁷⁾ In_{1-x}Ga_xP의 Ga조성에 따른 깊은 준위에 관한 연구는 그다지 많이 이루어지지 않았다.⁸⁾

이 연구에서는 Ga의 조성 x가 1인 GaP와 x가 0.56과 0.83인 서로 다른 조성의 In_{1-x}Ga_xP 결정을 온도구배용액법⁹⁾으로 직접 성장시키고, In_{1-x}Ga_xP의 깊은 준위를 DLTS(deep level transient spectroscopy)방법으로 측정하여 조사하였다.

2. 실험방법

In_{1-x}Ga_xP 결정의 깊은준위 성질을 조사하기 위하여, 온도구배용액법⁹⁾으로 성장된 결정을 다이아몬드 절단기를 사용하여 0.6mm의 두께로 절단하여 웨이퍼를 만들고, 1200메쉬의 사포에 갈아 면을

* : 대전산업대학교 재료공학과

** : 광주대학교 공대 전자재료공학과

접수일자 : 1993년 3월 24일

심사완료 : 1994년 6월 30일

고르게 한 후 입경이 0.05mm인 Al₂O₃분말을 뿌리며 패드에서 연마하여 경면 처리하였다. 이와같이 준비된 웨이퍼를 삼염화에틸렌, 아세톤, 메탄올 순으로 80℃의 온도에서 각각 5분 동안 끓여 세척하고, 탈 이온수로 세척하여 건조시킨 후 5H₂SO₄:1H₂O₂:1H₂O(vol%) 용액에서 35-40℃의 온도를 유지하며 60초 동안 에칭하였다.

DLTS특성을 조사하기 위하여 쇼트키 다이오드를 제작하였다. 웨이퍼의 전면에 Au-(12%)Ge합금을 직경 1mm의 크기로 10⁻⁶torr의 진공중에서 증착하고, 450~500℃의 온도에서 1-3분 동안 질소 분위기에서 열처리하여 음성접촉을 형성하였다. 웨이퍼를 HF:H₂O=1:10(vol%)용액으로 1분 동안 에칭한 후 쇼트키 접촉을 위하여 Au를 금속 마스크를 통하여 직경 0.5mm의 크기로 진공 증착하였다.

DLTS특성은 test-signal주파수가 1 MHz인 Boonton 73B capacitance meter를 사용한 PORA-LON-BIORAD DL 4600장치를 사용하여 90~450 K의 온도범위에서 측정하였다. DLTS특성 측정시 쇼트키 접촉에 인가하는 바이어스 전압은 1.5V 또는 2V로 하였고, rate window는 1000/s, 400/s, 200/s, 80/s, 50/s 및 20/s 등으로 변화시키며 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

In_{1-x}Ga_xP의 조성이 1인 GaP에 대하여 바이어스 전압을 2V로 일정하게 하고 rate window를 1000/s, 400/s, 50/s 및 20/s로 하여 90K부터 450K까지의 온도 영역에서 측정된 DLTS 스펙트럼을 그림 1에 나타내었다. 그림으로 부터 DLTS신호가 서로 다른 위치에서 나타난 E₁, E₂, E₃ 및 E₄ 네개의 깊은 준위를 관찰할 수 있었으며, rate window의 크기가 작아짐에 따라 DLTS 신호의 최대점이 낮은 온도쪽으로 이동하였고, 특히 고온측에 나타난 E₃와 E₄ 준위에 의한 신호는 두 트랩이 서로 근접한 관계로 확실하게 분리되지 않았다.

에너지 준위가 E_i인 트랩으로부터 전자의 방출률 e_n은 다음과 같다.^{6,10)}

$$e_n = c_n N_c \exp[-(E_c - E_i)/kT] \\ = A \sigma_n (m_e^*/m_e) T_2 \exp(-\Delta E_i/kT)$$

여기서 A와 ΔE_i는 다음과 같고 σ_n은 전자의 포획단면적, m_e*는 전자의 질량이다.

$$A = 8(3\pi^2)^{1/2} m_e k^2 / h^3 \\ \Delta E_i = E_c - E_i$$

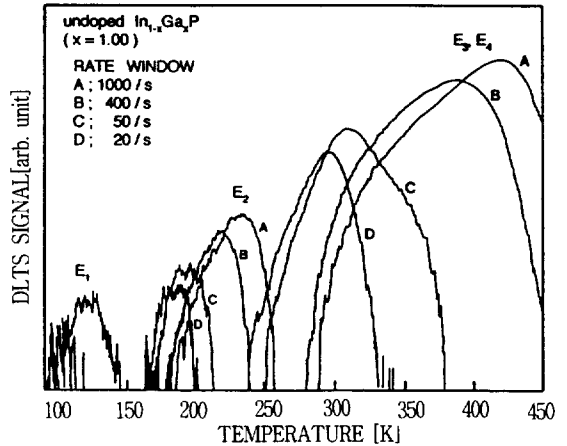


그림 1. 정 바이어스 전압을 2V 인가하였을 때 GaP의 DLTS신호.

Fig. 1. DLTS signals at quiescent bias of 2V for GaP which composition of Ga, x, is one in In_{1-x}Ga_xP with the rate windows.

이 식의 양변에 자연대수를 취하여 ln(e_n/T²)과 1/T의 그래프를 그리면 직선이 된다. 이 그래프를 아레니우스(Arrhenius) plot이라 한다. 이 그래프의 기울기로부터 트랩의 활성화 에너지 ΔE_i를 구할 수 있다. 일반적으로 트랩의 활성화 에너지 ΔE_i가 커질수록 측정온도 영역은 고온으로 이동하게 되어 DLTS 스펙트럼은 높은 온도에서 관측된다.^{6,10)}

GaP에 대하여 서로 다른 rate window에서 측정된 그림 1의 DLTS스펙트럼의 피크점을 ln(e_n/T²)와 1/T의 관계로 아레니우스 plot하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 기울기로부터 각 트랩에 대하여 구한 활성화 에너지는 각각 E₂(248meV), E₃(386meV) 및 E₄(618meV)이었으며, E₁준위에 대한 활성화 에너지는 자료의 부족으로 구할 수 없었다.

전도대 아래 248meV에 형성된 E₂의 깊은 준위의 근원은 아직까지 확실하게 밝혀지지 않고 있다. Lang과 Kimerling은¹¹⁾ GaP에 1MeV의 전자선을 쬐었을 때의 DLTS 스펙트럼에서 230meV의 전자 방출에 필요한 활성화 에너지를 갖는 깊은 준위를 관찰하였고, Wessel은¹²⁾ 기상 에피택셜 성장(vapor phase epitaxy; VPE)법으로 성장한 GaP의 기판과 에피택셜 계면에 집중적으로 형성된 결함에 의한 230meV의 활성화 에너지를 갖는 깊은 준위를 보고하였다. 또한 Wessel은¹³⁾ VPE-GaP에서 나타나는 200meV부근의 깊은 준위는 Cu-O complex에 의한 것이라고 보고한 바 있다. 따라서 248

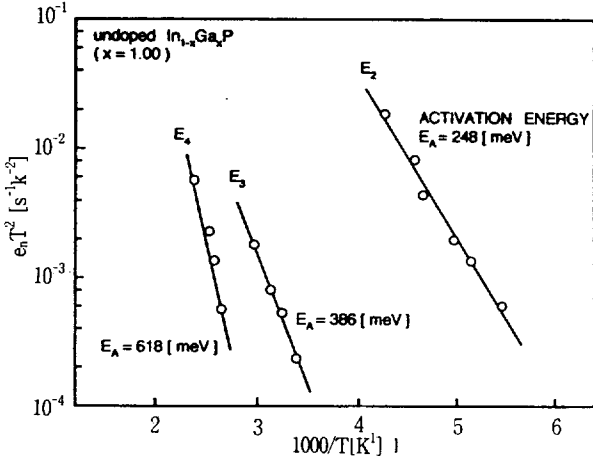


그림 2. 그림 1에 보인 DLTS신호로부터 GaP의 전자트랩에 대한 방출과정의 아레니우스도.

Fig. 2. Arrhenius plot of the emission process for the electron traps in GaP based on DLTS spectra in Fig. 1.

meV에 형성된 깊은 준위는 결정의 결함에 의한 것으로 여겨진다.

활성화 에너지가 386meV인 E₃의 깊은 준위는 Wessel이¹²⁾ N이 첨가된 GaP에서 관찰한 A₁준위의 활성화 에너지 390meV와 Lang과 Kimerling이¹¹⁾ 보고한 A준위의 활성화 에너지 380meV와 잘 일치하며, Smith등¹⁴⁾이 액상에피택셜(LPE)법으로 성장된 N이 첨가된 GaP에 대하여 열자극전류(thermally stimulated current:TSC)법으로 관찰한 도너와 관련된 깊은 준위와 거의 같은 활성화 에너지를 갖는다.

한편, 618meV의 활성화 에너지를 갖는 E₄의 깊은 준위는 Lang과 Kimerling이¹¹⁾ 관찰한 E₅준위의 활성화 에너지 620meV와 잘 일치하며, Tell과 Kuipers가¹⁵⁾ 관찰한 E₆ 준위의 활성화 에너지 560 meV와 거의 같은 값을 보였다. Brunwin등¹⁶⁾은 GaP에 Fe를 확산하였을 때 DLTS 신호가 나타났으며, 이때의 활성화 에너지를 640meV로 보고하였다. 따라서 618meV에 형성된 E₄의 깊은 준위는 Ga 또는 P의 공격자점과 관련이 있을 것으로 여겨진다.

GaP에서 E₃과 E₄ 준위의 트랩 밀도를 알아보기 위하여 측정된 DLTS 스펙트럼을 컴퓨터로 자료 처리하여 그림 3에 나타내었으며, E₃준위와 E₄준위의 트랩 밀도는 각각 $7.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 과 $9 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 이었다. 이와같이 측정된 트랩의 밀도는 선행 연구자들¹¹⁻¹⁵⁾의 결과와 잘 일치하였다.

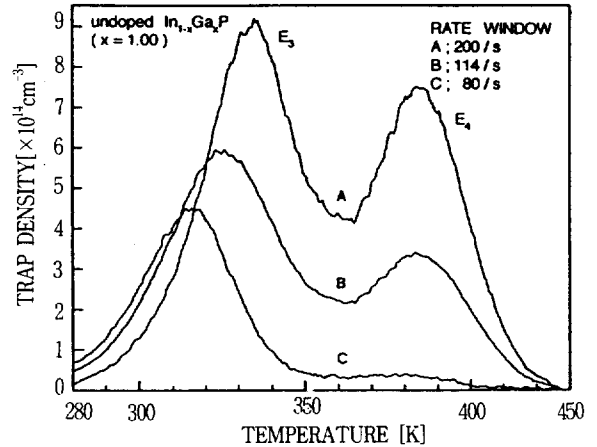


그림 3. 서로 다른 rate window에 따른 GaP의 E₁과 E₂ 준위의 트랩밀도 분포.

Fig. 3. Trap density distribution of E₁ and E₂ levels in GaP with the different rate windows.

불순물이 첨가되지 않고 조성이 각각 0.56과 0.83인 In_{1-x}Ga_xP에 대하여 바이어스 전압을 1.5V로 일정하게 하고, rate window를 변화시키면서 측정된 DLTS신호를 그림 4과 그림 5에 나타내었다.

In_{1-x}Ga_xP에 대한 DLTS 스펙트럼에서는 GaP와는 달리 전자의 방출에 의한 반치전폭이 큰 피크 한개가 검출되었다.

이와같이 DLTS 스펙트럼에서 반치전폭이 넓은 피크가 나타나는 것은 정전용량이 시간에 따라 지수함수적으로 변화되지 않기 때문이다.^{6,8,10)} 그 원인으로서는 (1) 캐리어의 방출률이 전기장에 의하여 자극되거나, 전기장의 분포가 공핍층 영역내에서 균일하게 분포되지 않으므로 공핍층 영역내에 분포되어 있는 트랩준위로부터 캐리어의 방출에 의한 정전용량의 변화가 지수함수적으로 감소하지 않았기 때문이며, (2) 낮은 준위의 도너 밀도보다 트랩 밀도가 매우 높으면 정전용량이 포획된 전자의 밀도에 대하여 복잡한 함수관계를 갖으므로 정전용량이 지수함수적으로 변화되지 않게 된다. 또한, (3) 혼정반도체에서 트랩준위의 포획 단면적 또는 이온화 에너지는 결함 주위에서 원자들의 미세한 변동에 의하여 섭동되기 때문이다.

특히, 이 연구에서와 같이 온도구배용액성장법으로 성장한 In_{1-x}Ga_xP 결정에서는 (3)의 원인은 심각하게 DLTS 특성에 영향을 주며 DLTS 스펙트럼의 폭이 넓게 나타나는 것은 V족 원소 P의 공격자점과 관련이 있다.^{6,8,17)} P공격자점 주위에 In

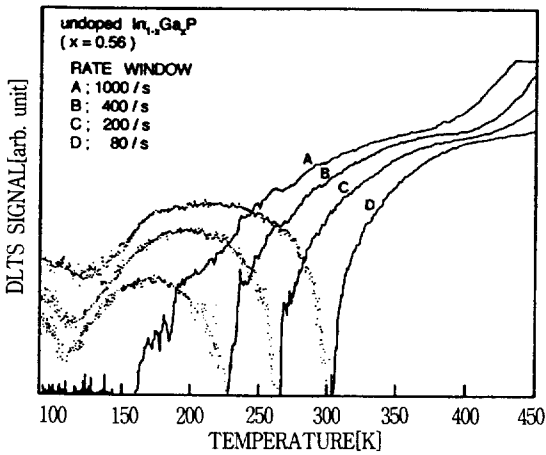


그림 4. 조성 x가 0.56인 $In_{1-x}Ga_xP$ 에 정바이어스 전압을 1.5V인가하였을 때 서로 다른 rate window에 따른 DLTS 신호.

Fig. 4. DLTS signals at quiescent bias of 1.5V for $In_{1-x}Ga_xP$ which composition of Ga, x is 0.56 with the rate windows.

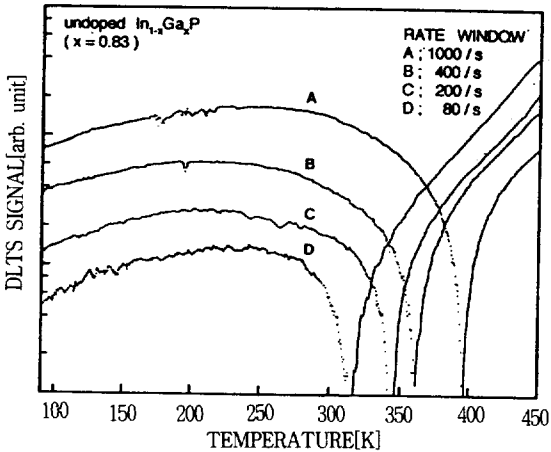


그림 5. 조성 x가 0.83인 $In_{1-x}Ga_xP$ 에 정바이어스 전압을 1.5V인가하였을 때 서로 다른 rate window에 따른 DLTS 신호.

Fig. 5. DLTS signals at quiescent bias of 1.5V for $In_{1-x}Ga_xP$ which composition of Ga, x is 0.83 with the rate windows.

과 Ga원자가 배열하는 방법에 따라 서로 다른 다섯가지의 결정결합을 생성하게 되며, 이들 결합준위에 관련된 포획 단면적과 캐리어 방출률이 서로 다르며, 이에 의하여 반치 전폭이 넓은 DLTS 스펙트럼이 나타난다.

$In_{1-x}Ga_xP$ 의 조성이 0.56과 0.83인 시료에 대해

여 서로 다른 rate window에서 측정한 DLTS 스펙트럼의 피크점들을 아레니우스 plot하여 구한 깊은 준위의 활성화 에너지는 약 430meV이었으며, 트랩 밀도는 약 $6 \times 10^{14} cm^{-3}$ 이었다. 이는 최근 Yoshino등¹⁷⁾과 Wu등¹⁸⁾은 조성이 0.5인 $In_{1-x}Ga_xP$ 에 대하여 트랩의 활성화 에너지와 트랩 밀도를 각각 0.4eV, $2 \times 10^{14} cm^{-3}$ 과 0.39eV, $10^{14} cm^{-3}$ 으로 보고한 것과 잘 일치하는 결과이다. 이와같은 전자의 트랩은 결정 결함에 의한 strain의 이완에 의한 것으로 여겨진다.

4. 결 론

이 연구에서는 서로 다른 조성의 $In_{1-x}Ga_xP$ 결정을 온도구배용액(TGS)법으로 직접 성장시키고, 깊은 준위의 성질을 90K~450K의 온도영역에서 조사하였다.

조성이 1인 GaP에서 E_1 , E_2 (248meV), E_3 (386 meV) 및 E_4 (618meV)의 깊은 준위 네개를 관찰하였으며, 깊은준위의 트랩 밀도는 E_3 과 E_4 가 각각 $7.5 \times 10^{14} cm^{-3}$ 과 $9 \times 10^{14} cm^{-3}$ 이었다. E_2 의 깊은 준위는 결정 결함에 관련이 있고, E_3 의 깊은 준위는 불순물과 관련이 있으며, E_4 의 깊은 준위는 Ga의 공격자점과 깊은 관련이 있는 것으로 판단된다.

한편, 조성이 0.56과 0.83인 $In_{1-x}Ga_xP$ 에서는 결정의 성장과정중에 형성된 결정결함 주위에서 원자들의 섭동에 의하여 반치전폭이 큰 피크 하나만이 나타났으며, 활성화 에너지와 트랩 밀도는 각각 약 430meV와 $6 \times 10^{14} cm^{-3}$ 이었다.

끝으로 이 연구를 토대로 $In_{1-x}Ga_xP$ 의 깊은 준위 성질을 보다 정확하게 규명하기 위해서는 결정결함 밀도가 적은 양질의 시료를 제작하여야 할 것이며, 이에 관한 연구가 진행중에 있다.

※ 이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 일반과제[과제번호:921-0600-010-1]의 결과임을 밝히며, 아울러 이에 감사드립니다. 또한, DLTS측정에 도움을 주신 전북대학교 반도체물성연구센터의 신용규씨께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Katsuyama, I. Yoshida, J. Shikai, J. Hashimoto, and H. Hayashi, Electron. Lett, 26,1357 (1990).

2. P.I. Rockett, M.A. Pate, and P.A. Claxton, IEEE trans. Electron Devices, 37, 810(1990).
3. Y.J. Chan, D. Pavlidis, M. Razeghi, and F. Omnes, IEEE trans. Electron Devices, 37, 2141(1990).
4. J. Criado, A. Gomez, E. Munoz, and E. Calleja, Appl. Phys. Lett, 49, 1970(1986).
5. M. Tachikawa, M. Mizuta, and H. Kukitomo, Jpn. J. Appl. Phys., 23, 1594(1984).
6. M. Jaros, Deep Levels in Semiconductors, (Adam Hilger, Bristol, 1982).
7. J.F. Chen, J.C. Chen, Y.S. Lee, Y.W. Choi, K. Xie, P.L. Liu, W.A. Anderson, and C.R. Wie, J. Appl. Phys, 67, 3711(1990).
8. T. Matsumoto, T. Kato, M. Takiguchi, and T. Ishida, Jpn. J. Appl. Phys, 28, 410(1989).
9. 김선태, 문동찬, 정중현, 응용물리, 1, 127(1988).
10. 元山裕孝, 半導體材料の 缺陷評價技術,(Science Forum, 日本, 1985).
11. D.V. Lang and L.C. Kimerling, Appl. Phys. Lett, 28, 248(1976).
12. B.W. Wessels, J. Appl. Phys, 48, 1656(1977).
13. B.W. Wessels, J. Appl. Phys, 46,21243(1975).
14. B.L. Smith, T.J. Hayes, A.R. Peaker, and D. R. Wight, Appl. Phys. Lett, 26, 122(1975).
15. B. Tell and F.P.J. Kuijpers, J. Appl. Phys, 49, 5938(1978).
16. R.F. Brunwin, B. Hamilton, J. Hodgkinson, A.R. Peaker, and P.J. Dean, Solid State Electron, 24, 249(1981).
17. J. Yoshino, M. Tachikawa, N. Matsuda, M. Mizuta, and H. Kukimoto, Jpn. J. Appl. Phys, 23, L29(1984).
18. M.C. Wu, Y.K. Su, K.Y. Cheng and C.Y. Chang, Jpn. J. Appl. Phys, 25, L90(1986).

저자소개



과 조교수.

김선태

1956년 9월 11일생. 1981년 광주대학교 공대 전자재료공학과 졸업. 1984년 동대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박사). 1993년 일본 명성대학 초빙과학자. 1994년 현재 대전산업대학 재료공학과



전자재료공학과 교수.

문동찬

1935년 2월 25일생. 1957년 연세대 이공대 물리학과 졸업. 1965년 연세대 대학원 물리학과 졸업(석사). 1981년 연세대 대학원 물리학과 졸업(이학박사). 1982년 미국 라이트-패더슨 공군연구소 초빙과학자. 1994년 현재 광주대학교 공대