

## DLTS를 이용한 AlGaAs 에피층의 깊은준위 거동에 관한 연구

최영철\*, 박용주\*\*, 김태근\*

광운대학교 전자재료공학과\*, 한국과학기술원 나노소자센터\*\*

### A Study on Behavior of Deep Levels for AlGaAs Epi-layers using DLTS

Young-Chul Choi\*, Young-Ju Park\*\*, Tae-Geun Kim\*

Dept. of Electronic Material Engineering, KwangWoon University\*,

Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology\*\*

본 논문에서는 780 nm 고출력 레이저 다이오드의 신뢰성을 향상시키기 위하여 DLTS (deep level transient spectroscopy)을 이용하여 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) 성장 조건 변화에 따른  $Al_{0.48}Ga_{0.52}As$ 와  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  물질에서의 깊은준위 (deep level)의 거동을 조사하였다. DLTS 측정결과, MOCVD로 성장된 막에서만 나타나는 결함 (defect)으로 추정되는 trap A (0.3 eV), DX center로 알려진 trap B, 갈륨(Ga) vacancy와 산소 ( $O_2$ ) 원자의 복합체 (complex)에 의한 결함인 trap D (0.6 eV) 및 EL2 라고 불리우는 trap E (0.9 eV)의 네 가지 깊은준위들이 관측되었고, 성장 조건의 변화에 따라 깊은 준위들의 농도가 감소하는 것을 관측함으로써 최적 성장 조건을 찾을 수 있었다.

**Key Words** : 고출력 레이저 다이오드, DLTS, 깊은준위

#### 1. 서 론

780 nm 단파장 영역의 AlGaAs 레이저 다이오드 (laser diode: LD)는 광디스크 기록장치, 레이저 빔 프린터, 광측정용 고체레이저 펄스 광원 등의 용도로 널리 사용된다. 특히, 고밀도 광디스크 기록장치와 같은 광 정보처리 시스템 응용분야에서 정보 처리 속도와 기록 밀도는 광출력을 증가함에 의하여 향상될 수 있기 때문에 고출력을 갖는 AlGaAs 레이저 다이오드를 제작하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1, 2]. MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition)로 성장된  $Al_xGa_{1-x}As$  에피층 (epi-layer)을 사용하여 고출력을 갖는 레이저 다이오드를 제작함에 있어서, 에피층은 결함(defect)이 없는 우수한 단결정이 요구되지만, 실제 결정 성장 과정에서는 성장온도와 Al 조성비 등의 성장 조건의 변화에 따라 전기적 광학적 특성 및 신뢰성에 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있다 [3, 4]. 이는 산소 ( $O_2$ )나 수분 등이 리액터 (reactor) 내로 유입되어 Al과 산소의 복합체 (complex)로 이루어진 깊은준위 (deep-level)를 형성하기 때문이다.

지금까지 보고되고 있는 MOCVD로 성장된

$Al_xGa_{1-x}As$ 의 대표적인 깊은준위 5가지를 살펴보면 0.25 eV 정도의 활성화 에너지 (activation energy)를 갖는 trap A[5]는 현재까지 정확히 밝혀지지 않았지만, MOCVD로 성장한 막에서만 드러나는 결함으로 탄소와 관련된 결함이거나 III족 vacancy로 추측되고 있다. 0.35 eV 정도의 trap B[5]는 DX center로 불리우며, x가 0.2 이상에서 주로 나타나는데 Si 등의 도너 (donor)와 관련된 결함으로 알려져 있다. 0.47 eV 정도의 trap C[6]는 주로 낮은 Al 조성에서 나타나는 결함으로 trap A처럼 정확한 원인은 밝혀지지 않고 있다. 0.57 ~ 0.70 eV 정도의 trap D[3]는 산소와 관련된 깊은준위로 알려져 있으며 특히, 갈륨 (Ga) vacancy와 산소 원자의 복합체에 기인한 결함으로 보고되고 있다. 마지막으로 0.8 ~ 1.0 eV 정도의 활성화 에너지를 갖는 trap E[7]는 EL2라고 불리우며 As와 관련된 결함으로 III족 자리에 V족 원자가 들어감으로써 발생하는 결함으로 알려져 있다. 그러므로 레이저 다이오드의 에피층 성장시 주입하는 가스의 양에 기인하는 캐리어 농도 변화 및 결정 결함들에 의해 생성되는 깊은준위의 거동에 관한 연구는 레이저 다이오드의 효율

을 증대시키는데 효과적일 것으로 생각된다.

반도체 내에 존재하는 깊은준위를 조사하는 방법으로는 TSC (thermally stimulated current)[8], TSCAP (thermally stimulated capacitance)[9] 및 DLTS (deep level transient spectroscopy)[10] 등이 있다. 그러나 TSC법은 높은 전도성을 갖는 반도체에 대해서는 특성을 알아내기 힘들며, TSCAP법은 trap의 농도가 큰 시료만 가능할 뿐만 아니라 측정 조건에 따라 결과가 달라진다는 단점이 있다. 이에 반해, 1974년 D. V. Lang에 의해 고안된 DLTS는 공간전하영역의 정전용량 변화를 "rate window" 개념을 도입하여 매우 정확하고 편리하게 관측함으로써 TSC와 TSCAP가 갖고 있는 문제점을 개선할 수 있는 장점을 갖는다.

본 연구에서는 DLTS 방법을 이용하여  $Al_xGa_{1-x}As$  에피층의 깊은준위 거동을 조사하였다. 본 연구에 사용된 시료에서는 trap A, B, D, E의 4가지 깊은준위를 찾아내었고, Al 조성 및 성장 조건에 따라 결함 밀도 (defect density)가 다르게 나오는 것을 관측하였다. 이러한 DLTS 결과를 통하여 현재 소자 제작 공정에서의 최적 성장 조건을 찾을 수 있었다.

## 2. 실험

본 연구에 사용된 48%의 Al 조성을 갖는 AlGaAs 에피층은 깊은준위의 거동을 살펴보기 위하여 740 °C 와 790 °C로 성장 온도를 변화하였고, 현 공정에서 V/III ratio 가 리액터의 구조를 고려할 때, 높은 것으로 판단되어  $AsH_3$  flow를 줄이는 쪽으로 선택하여 각각 성장 조건이 다른 4개의 샘플을 1  $\mu m$  두께로 성장시켰다. 10%의 Al 조성을 갖는 AlGaAs 에피층은 성장율을 제외한 다른 공정은 동일시하여 2개의 샘플을 성장하였다. 7 Å/s의 성장율은 클래딩층 (cladding layer)에 비해 매우 낮은데, 일반적으로 Al 조성이 낮은 경우 원자들의 평균 migration length가 클래딩층에 비해 길고, 현재 사용되고 있는 0도 off 웨이퍼의 경우 terrace width가 2도 기판에 비해 매우 길기 때문에, 적절히 낮은 성장 조건일 수 있다고 생각되어 성장율이 10 Å/s로 증가된 시료와 비교하였다.

DLTS 측정은 시료를 액체 질소 온도까지 냉각시킨 후 400 K까지 가열하면서 펄스 (pulse)를 인가하여 전기 용량의 과도 반응을 측정하였다. 이 때, 가해진 펄스폭 (injection pulse width)은 1 ms, 펄스

스 바이어스는 1 V 와 rate window  $t_1/t_2$  는 2/16으로 측정하였고, 이를 그림 1에 나타내었다.

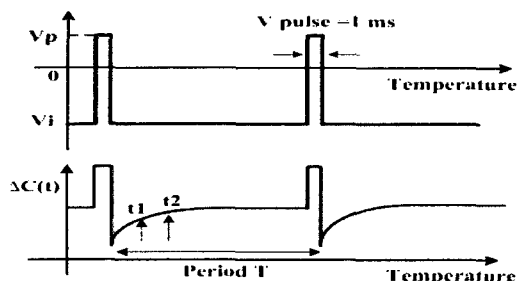


그림 1. DLTS 측정 파라미터 셋업.

Fig. 1. DLTS measurement parameter setup.

## 3. 결과 및 고찰

Al 조성이 48%인 AlGaAs 시료의 성장온도와  $AsH_3$  flow를 각각 변화시킨 4개의 샘플에서 측정된 DLTS 스펙트럼을 그림 2에 나타내었고, 관측된 깊은준위를 Arrhenius plot하여 구한 활성화 에너지 ( $E_a$ )와 트랩농도 ( $N_t$ )를 표 1에 요약하였다. 피크 (peak)의 중첩으로 인하여 약간의 측정 오차는 존재하지만, 온도가 낮은 경우에 있어서  $AsH_3$ 이 300 sccm인 샘플 LM의 경우는 0.8 eV의 활성화 에너지를 갖는 깊은준위가 관찰되었고,  $AsH_3$ 을 500 sccm으로 증가시킨 샘플 LH의 경우는 0.6 eV와 1.0 eV의 활성화 에너지를 갖는 깊은준위가 관측되었다. 이에 대한 해석은 740 °C,  $AsH_3$  300 sccm인 조건에서의 0.8 eV의 활성화 에너지를 갖는 깊은준위를 trap D로 판단하느냐, trap E로 판단하느냐에 따라 달라지게 된다. 활성화 에너지 만으로 분석한다면, EL2로 판단하는 것이 옳고, 790 °C의 샘플의 경우는 trap E가 관측되지 않았기 때문에, 온도가 낮은 경우 As 형태의 결함이 발생한다고 해석할 수 있다. 합리적으로 생각해서, susceptor 온도가 높다면 온도에 의한 와류가 susceptor 표면에 형성될 가능성이 높아지기 때문에 결과적으로  $AsH_3$  분압의 감소에 따른 효과가 온도가 높은 경우 발생한다고 볼 수도 있다. 만약, 0.8 eV의 활성화 에너지가 피크의 중첩으로 인하여 계산결과의 오차가 있을 것이라 가정하고 trap D라고 해석하면,  $AsH_3$ 의 유량이 증가함에 따라 EL2가 발생했다고 볼 수 있다. 이 경우 또한 온도가 높다면 EL2가 발생하지 않는다는 결론은 유효하다.

두가지 가능한 해석 중에서, 어떤 것을 따르더라도 740 °C보다는 790 °C에서 성장한 시료의 경우

EL2가 줄어든다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 근원적으로 접근하여 살펴보면, trap D는 앞서 언급하였다시피, 갈륨 vacancy와 산소의 복합체에 기인한 결함으로 알려져 있는데, 740 °C, AsH<sub>3</sub> 300 sccm인 조건에서의 0.8 eV의 깊은 준위를 EL2로 판단할 경우에 온도를 높이고 AsH<sub>3</sub>를 증가시킬 때 산소의 유입이 증가한다는 비논리적인 결과를 얻게 된다. 그러므로 샘플 LM에서의 깊은준위는 trap D로 보는 것이 옳다. 790 °C, AsH<sub>3</sub> 500 sccm인 경우에는, 0.3 eV의 깊은준위가 추가로 나타났는데 AsH<sub>3</sub>의 유량이 증가함에 따라 결함이 발생한 것으로 생각된다. 위의 결과들을 종합하여 볼 때, 48 % 조성을 갖는 AlGaAs의 MOCVD 최적 성장 조건은 성장온도가 790 °C, AsH<sub>3</sub> flow는 300 sccm인 경우로 결정하였다.

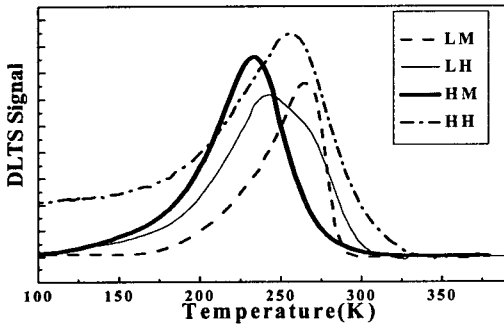


그림 2. Al<sub>0.48</sub>Ga<sub>0.52</sub>As 시료의 DLTS 스펙트럼.  
Fig. 2. DLTS spectrum of Al<sub>0.48</sub>Ga<sub>0.52</sub>As samples.

표 1. Al<sub>0.48</sub>Ga<sub>0.52</sub>As 시료의 성장 조건과 활성화 에너지 및 트랩농도.

Table 1. Grow conditions, activation energy and trap concentration of Al<sub>0.48</sub>Ga<sub>0.52</sub>As samples.

샘플	LM	LH	HM	HH
성장온도 (°C)	740	740	790	790
AsH <sub>3</sub> flow (sccm)	300	500	300	500
E <sub>a</sub> (eV)	0.8	0.6 1.0	0.6	0.3 0.6
N <sub>t</sub> (cm <sup>-3</sup> )	3.35E+15	3.85E+15 3.10E+15	3.85E+15	1.50E+15 4.25E+15

그림 3은 Al 조성이 10 % 인 AlGaAs 시료에 대한 성장율의 변화에 따른 DLTS 측정 결과를 나타내었고, 2개의 샘플 GR7과 GR10에서 측정된 깊은 준위를 Arrhenius plot하여 구한 활성화 에너지와 트랩 농도를 표 2에 요약하였다. 측정 결과, 저온 부근에서 측정된 0.3 eV의 활성화 에너지를 갖는 깊은준위는 DX center라고 볼 수도 있고, MOCVD 방법으로 성장한 막에서만 드러나는 결함으로도 보인다. 하지만, 일반적으로 DX center는 Al 조성이 20 % 이상에서 드러난다는 연구결과들[8]로 유추할 때, MOCVD 성장법 자체에 기인한 결함인 trap A로 판단된다. 실은 부근에서 측정된 0.6 eV 정도의 활성화 에너지를 갖는 깊은준위는 갈륨 vacancy와 산소의 복합체에 의한 결함인 trap D로 보이고, 고온 부근에서 측정된 0.8 ~ 0.9 eV의 활성화 에너지를 갖는 깊은준위는 AlGaAs에서 통상적으로 발생하는 native 결함인 EL2와 관련된 trap E로 생각된다. DLTS 스펙트럼을 비교할 때, 성장율이 7 Å/s인 경우는 스펙트럼의 중첩으로 인하여 피크가 명확하지 않고 넓은 에너지 영역에 걸쳐 존재한 반면, 성장율이 10 Å/s로 증가된 경우는 피크의 형태가 명확히 보이고 피크 강도 (intensity)가 다소 감소되는 것을 관찰하였다. 결과적으로 성장율이 증가함에 따라 0.3 eV 와 0.9 eV 위치의 깊은준위의 트랩농도가 감소하는 경향을 보였고, EL2 결함은 AsH<sub>3</sub> 분압을 낮춤으로써 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

위의 DLTS 결과를 종합하여 볼 때, 0.1 %의 Al 조성을 갖는 AlGaAs의 최적 성장 조건은 성장율이 10 Å/s, AsH<sub>3</sub> flow는 현재에 비해 낮추는 것이 좋다고 결론지었다.

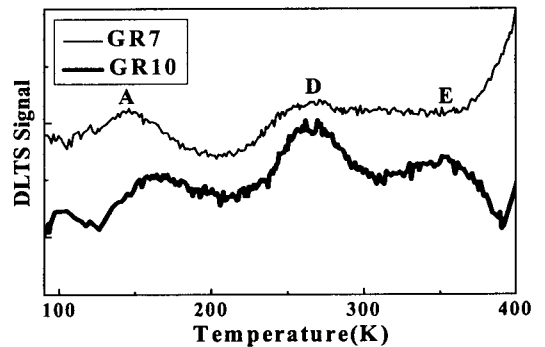


그림 3. Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 시료의 DLTS 스펙트럼.  
Fig. 3. DLTS spectrum of Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As samples.

표 2. Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 시료의 성장조건, 활성화 에너지 및 트랩농도.

Table 2. Grow conditions, activation energy and trap concentration of Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As samples.

샘플	GR7		GR10	
	7 Å/s		10 Å/s	
Trap	E <sub>a</sub>	N <sub>t</sub>	E <sub>a</sub>	N <sub>t</sub>
A	0.30	5.75E+13	0.30	2.50E+13
D	0.58	6.25E+13	0.65	5.00E+13
E	0.8~0.9	~high E+13	0.8~0.9	~high E+13

#### 4. 결론

본 논문에서는 DLTS를 이용하여 MOCVD 성장 조건 변화에 따른 Al<sub>0.48</sub>Ga<sub>0.52</sub>As와 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 에피층의 깊은준위의 거동을 조사함으로써 780 nm 고출력 레이저 다이오드의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. DLTS 측정결과, MOCVD로 성장된 막에서만 나타나는 결함으로 추정되는 trap A, DX center로 알려진 trap B, 갈륨 vacancy와 산소 원자의 복합체에 의한 결함인 trap D 및 As와 관련된 EL2로써 불리우는 trap E 등 네 가지 깊은준위들이 관측되었다.

관측된 깊은준위의 분석을 통하여 고출력 레이저 다이오드 제작을 위한 최적의 성장 조건은 Al 조성이 48%인 AlGaAs의 경우는 성장온도 790 °C, AsH<sub>3</sub> 300 sccm이었고, Al 조성이 10%인 경우는 성장율은 10 Å/s, AsH<sub>3</sub> flow는 현재에 비해 낮추는 것이 신뢰성을 향상시키는 최적 성장 조건으로 DLTS 측정 결과를 통해 제시할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-041-D00373)

#### 참고 문헌

[1] Chang Hee Hyung and Nam Young Kim, "AlGaAs-GaAs hetero-junction bipolar transistor", J. of KIEEME(in Korea), Vol. 9, No. 10, p. 1066, 1996.

[2] P. L. Tihanyi, F. C. Jain, M. J. Robinson, J. E. Dixon, J. E. Williams, K. Meehan, L. S. Heath and D. M. Beyea, " High power AlGaAs-GaAs visible diode lasers", IEEE Photo. Tech. Lett., Vol. 6, p. 775, 1994.

[3] H. Ishii, T. Shinagawa, S. Tanaka and T. Okumura, "Characterization of oxygen-related defects in P-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As by DLTS", J. Crystal Growth, Vol. 210, p. 242, 2000.

[4] E. E. Wagner, D. E. Mars, G. Hom and G. B. Stringfellow, "Deep electron traps in organometallic vapor phase grown Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As", J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 10, p. 5434, 1980.

[5] M. Sakamoto, T. Okada and Y. Mori, "Electron traps with similar concentrations in n-type Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As grown by metalorganic chemical vapor deposition", J. Appl. Phys., Vol. 58, No. 1, p. 337, 1985.

[6] R. Ajjel, L. Bouzrara, M. A. Zaidi, H. Maaref and G. Bremond, "Electron traps in metalorganic chemical vapor deposition grown Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As", Physica B, Vol. 323 p. 15, 2003.

[7] M. Taniguchi and T. Ikoma, "Variation of the midgap electron traps (EL2) in liquid encapsulated czochralski GaAs", J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 11, p. 6448, 1983.

[8] H. S. Woon, H. S. Tan and S. C. Ng, "A computer controlled system for transient capacitance measurements of deep levels in semiconductor", IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. 37, No. 1, p. 86, 1988.

[9] C. T. Sah, W. W. Chan, H. S. Fu and J. W. Walker, "Thermally stimulated capacitance in p-n junctions", J. Appl. Lett., Vol. 20 p. 193, 1972.

[10] D. V. Lang, "Deep-level transient spectroscopy", J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 7, p. 3023, 1974.