

Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN 및 Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN/Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 이종접합 구조에서 운반자 구속 효과와 이차원 전자가스의 광학적 특성

곽호상¹, 이규석², 조현익³, 이정희³, 조용훈^{1*}

¹충북대학교 물리학과, 청주 361-763

²한국전자통신연구원 IT융합·부품연구소, 대전 305-350

³경북대학교 전기전자공학과, 대구 702-701

(2008년 7월 4일 받음, 2008년 7월 17일 수정, 2008년 7월 22일 확정)

금속 유기화학 증착기 (metal-organic chemical vapor deposition)를 이용하여 사파이어 기판 위에 Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN 및 Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN/Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 이종접합 구조들을 성장하고, 이들 시료의 전자와 정공들 간의 구속 효과를 조사하기 위하여 광학적, 구조적 특성을 비교하였다. 저온 (10 K) photoluminescence 실험으로부터 Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN 단일 이종접합 구조의 경우 3.445 eV에서 단일의 이차원 전자가스 (two-dimensional electron gas; 2DEG) 관련된 발광을 관찰한 반면, Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN/Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 다중 이종접합 구조의 경우 3.445 eV에서 뿐만 아니라, 3.42 eV에서 추가적인 2DEG 관련된 발광을 관찰 할 수 있었다. 이 두 개의 2DEG 관련 신호들의 근원을 조사하기 위하여 Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN/Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 다중 이종접합구조에서의 에너지 밴드 구조를 이론적으로 계산하여 실험과 비교한 결과, 하나의 2DEG에 의한 서로 다른 버금 띠로부터가 아닌 다중 구조에 형성된 두 개의 2DEG로부터의 신호로 해석되었다.

주제어 : AlGaN/GaN, 이차원 전자가스, photoluminescence, 금속 유기화학 증착기

I. 서 론

정보산업의 급속한 발전에 따라 고집적, 고효율, 고속의 특성을 갖는 고도의 정보처리 기술이 필요해지면서 보다 빠른 정보처리를 구현할 수 있는 신기능 소자의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 특히 마이크로파에서 밀리미터파의 통신을 위한 소자의 필요성이 대두되고 있으며, 이에 부합되는 고주파 RF 전력 소자의 제작을 위하여 사용되는 예로서는 금속-반도체 전계효과 트랜지스터 (metal semiconductor field effect transistor), 이종접합 바이폴라 트랜지스터 (heterojunction bipolar transistor), 바이폴라 상보형 금속 산화물 반도체 (bipolar complementary metal oxide semiconductor), 고전자 이동도 트랜지스터 (high electron mobility transistor; HEMT) 등이 있다 [1-4]. 그 중에서도 HEMT 소자는 고속으로 높은 주파수의 밀리파 처리가 가능한 차세대 통신 소자로서 생각되고 있

으며, 기존의 바이폴라, MOS (metal-oxide-semiconductor) 에 이은 제 3의 트랜지스터로서 저전압, 저소비전력, 초고속 LSI (large scale integration)를 실현할 수 있는 소자로서 현재 pseudomorphic HEMT, InP 기반의 HEMT, metamorphic-HEMT 등을 비롯한 다양한 부분에서 연구가 이루어지고 있다 [5-6].

이러한 요구에 부합하기 위한 가장 적합한 소재로서, 질화물 반도체는 광범위한 파장영역에 대한 광소자 분야의 응용 뿐만 아니라 열적, 화학적 그리고 기계적으로 뛰어난 내구성의 장점을 활용할 수 있는 고온, 고효율의 전자소자 분야로의 응용 가능성을 보여주고 있다 [7-8]. 특히, HEMT 소자는 밴드갭 (band-gap) 에너지가 서로 다른 두 종류의 이종접합 계면에서 발생하는 아주 얇은 삼각형 포텐셜 우물 (triangular potential well)에 구속된 이차원 전자가스 (two-dimensional electron gas; 2DEG)로 인하여 이종접합 계면에서의 높은 면전하 밀도 (sheet carrier

* [전자우편] yonghcho@chungbuk.ac.kr

density) 및 높은 이동도 (mobility)를 가지게 된다 [9].

이종접합 계면에서 발생하는 밴드구조를 이해하는데 있어서 이차원 전자가스와 광여기된 정공(holes) 간의 발광 재결합에 대한 이해와 연구는 매우 중요하다. 이미 AlGaAs/GaAs 계열의 이종접합 구조에서 생기는 2DEG 재결합에 관계된 광학적 실험들이 상대적으로 많이 보고되어져 있다 [10]. 하지만, 보다 고온에서 고속, 고출력을 갖는 소자들이 요구되어지면서 AlGaAs/GaAs 이종접합 구조에 비해 압전 분극 (piezoelectric polarization)이 강하고, 같은 Al 물분율을 가진 AlGaAs/GaAs 이종접합 구조에 비해 가전도대의 불연속이 큰 AlGaN/GaN 이종접합 구조가 잠재적 가능성에 의해 중요성이 부각 되어지고 있다 [11].

II. 실험

이러한 2DEG 특성 향상을 위해, 금속 유기화학 증착기 (metal-organic chemical vapor deposition)를 이용하여 사파이어 기판 위에 2.5 μm GaN 완충층을 성장한 후 40 nm의 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 층만을 성장한 단일 구조 시료 (A), GaN 완충층 위에 50 nm $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 층과 50 nm GaN을 성장한 후에 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 층을 성장한 이중 구조 시료 (B), 그리고 시료 (B) 구조의 50 nm의 GaN 층 위에 10 nm $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 와 50 nm의 GaN 층을 삽입하고 40 nm의 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 층을 성장한 다중 구조 시료 (C)를 Fig. 2의 삽화에서와 같이 준비하였으며, 상온에서 Hall effect 측정을 통하여 얻은 이동도 및 면전하 밀도는 (A) 1200 cm^2/Vs , $1.40 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, (B) 1100 cm^2/Vs , $2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 그리고 (C) 1300 cm^2/Vs , $1.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 각각 측정 되었다. 단일 구조를 갖는 시료 (A) AlGaN/GaN 이종접합 구조에 비해 시료 (B)는 높은 면전하 밀도를, (C)에서는 보다 높은 이동도와 면전하 밀도를 관찰 할 수 있었다 [12]. 시료 (A), (B), (C)에 대해서 고분해능 X-선 회절 실험을 통하여 $\omega-2\theta$ scan을 측정하였다. 측정된 시료 중 Fig. 1 (a)에서는 시료 (B)에 대한 rocking curve만을 나타내었다. 이를 시뮬레이션 curve와 비교하여 다중 구조에서의 각 Al의 조성이 $x \sim 30\%$ 와 $y \sim 15\%$ 임을 확인 할 수 있었다. Fig. 1 (b)에서 (105) 역격자 공간상의 역격자점 주위의 X-선 산란강도 (scattering intensity)를 측정된 reciprocal space mapping 결과를 보여준다. 수직 기준선을 따라 GaN,

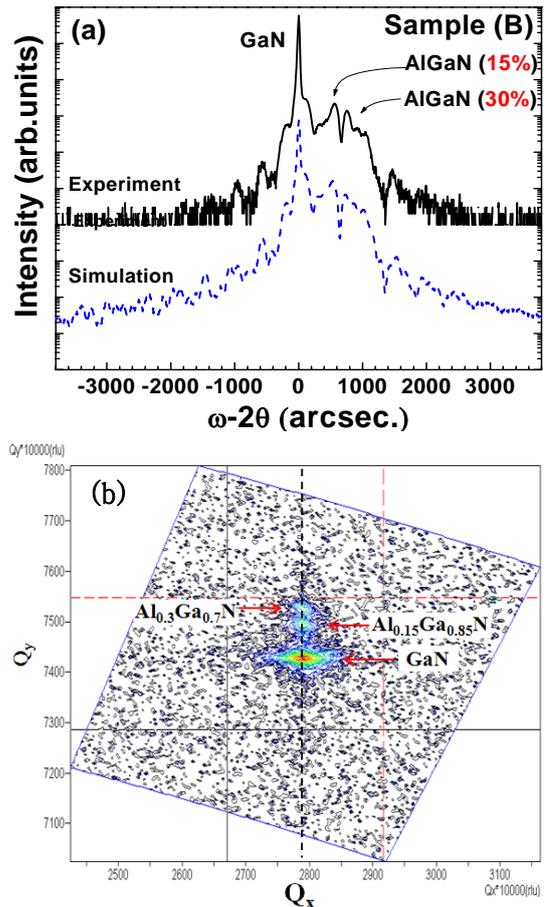


Figure 1. (a) Comparison of the $\omega-2\theta$ diffraction curve of sample B with the simulated curves. The simulated curve is displaced vertically for clarity. (b) The reciprocal space mapping (RSM) around the GaN (105) reflection.

$\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$, $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 의 신호들이 일직선상에 잘 일치하고 있음을 모든 시료들에서 확인하였는데, 이는 모든 GaN와 AlGaN 층들 사이가 완전히 strained 된 격자 상태를 이루고 있음을 나타낸다. 이들 시료에서 광학적 특성을 조사하기 위해 He-Cd 레이저를 이용하여 10 K에서 300 K까지 온도 변화에 대한 photoluminescence (PL) 특성과 저온에서 레이저 여기광 세기에 따른 PL 실험을 수행 하였으며, 다중 구조에 대한 이해를 위해 성장된 구조의 포텐셜 에너지를 바탕으로 2DEG로 인한 버금띠 에너지 레벨 시뮬레이션을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 2는 온도 변화에 따른 2DEG의 특성을 알아보기 위

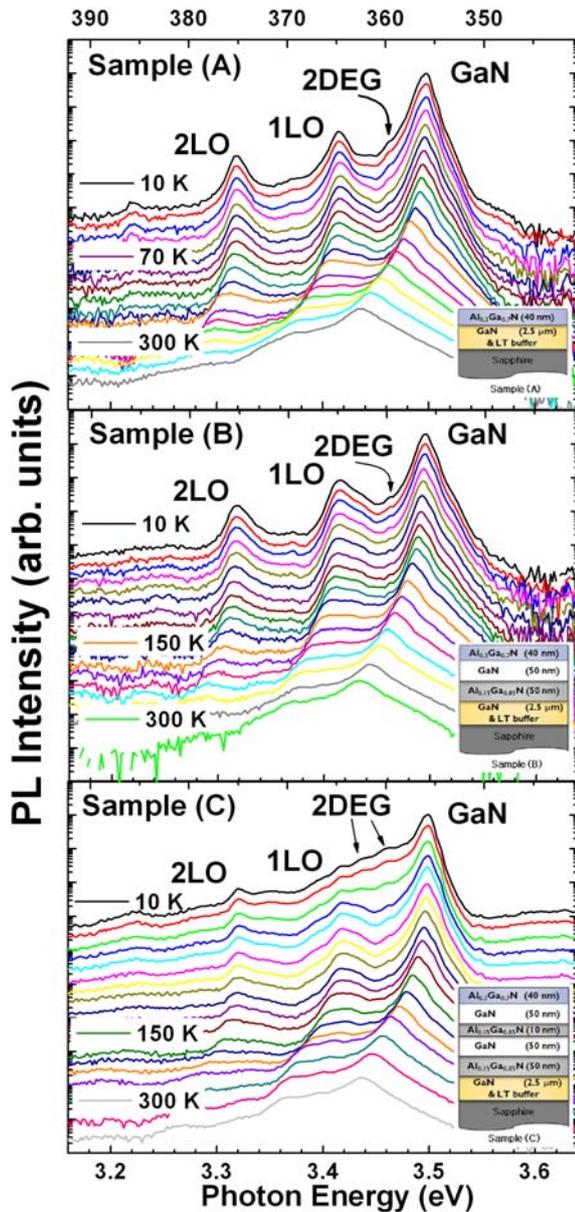


Figure 2. Temperature-dependent PL spectra of samples (A), (B), and (C) in the temperature range 10 to 300 K. The PL spectra are displaced vertically for clarity.

하여 10 K에서 300 K까지 변화를 주며 시료 (A), (B), 그리고 (C)에 대해 광학적인 특성을 조사하였다. 각 시료에 325 nm 파장을 갖는 He-Cd 레이저를 사용하여 약 4.0 mW의 파워로 여기 하였다. 약 3.483 eV에서 GaN 신호를 얻었으며 이로부터 ~38 meV 정도 떨어진 3.445 eV에서 AlGa_{0.3}N/GaN의 이종접합 계면에 존재하는 2DEG 신호를 관찰하였다. 온도가 증가할수록 GaN 신호의 PL 세기는 감소하고 발광 위치도 적색 편이가 일어나는 것으로 조사되

었으며, 시료 (A)에서는 자발 방출에 의한 GaN 신호가 온도 증가에 따라 낮은 에너지 쪽으로 움직이고 있는 반면에 2DEG 신호 위치는 (세기가 줄어들어 보기 힘든 70 K까지 관측한 결과) 크게 변화하지 않는 것으로 관측되었다. 따라서 GaN의 신호와 2DEG 발광 신호의 에너지 차이는 온도가 증가함에 따라 점차 감소하는 것으로 조사되었다 [13]. Joshikin 그룹과 Pankove 그룹에서도 이와 비슷한 2DEG 신호와 관련된 특성이 보고되었는데, 이는 AlGa_{0.3}N 층과 GaN 층 계면사이의 전도대에서 큰 불연속성과 GaN 위의 AlGa_{0.3}N 층에서의 강한 압전 효과로서 해석될 수 있다 [14, 15]. 반면, 시료 (B)에서는 2DEG 신호에 대해 온도가 증가함에 따라 GaN 신호가 장파장으로 이동하여 2DEG 신호와 겹쳐 구별이 어려운 150 K 까지 관찰이 가능하였는데, 이러한 특성은 시료 (A)에 비해 시료 (B)에서는 가전자대의 AlGa_{0.3}N 장벽이 flat-band로 이동하는 정공의 이동을 제한함으로써 2DEG의 재결합에 기여하는 운반자가 증가하는 것으로 설명될 수 있다. 본 그룹에서는 AlGa_{0.3}N/GaN 이종접합에서 2DEG와 관련된 발광에 관한 운반자가 GaN 밴드로부터 공급되는 현상을 밝힌 바 있다 [11,13].

한편, 시료 (C)의 온도 변화 PL에서는 시료 (A), (B)와는 좀 다른 2DEG 특성이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 우선 10 K에서 각 밴드의 PL 신호가 겹치면서 뚜렷한 구별이 나타나지 않는 것이 관찰되었다. 이는 2DEG의 신호가 같은 여기광 세기에 대하여 시료 (A)나 (B) 보다도 상대적으로 강하게 나타남으로써 다른 신호들과 중첩이 되기 때문이며, 온도가 증가함에 따라 2DEG와 각 밴드의 신호가 서로

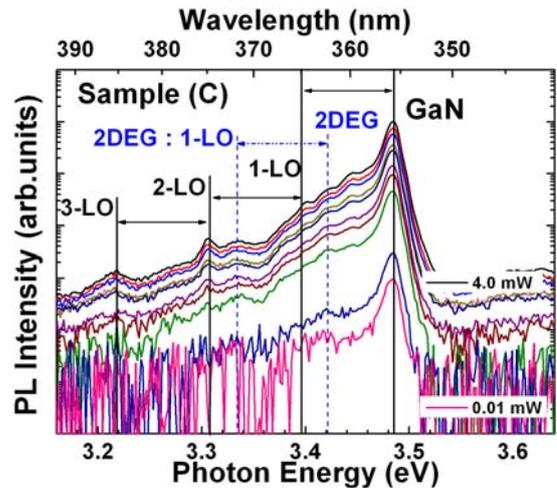


Figure 3. PL spectra for the sample (C) as a function of excitation power ranging from 0.01 to 4.0 mW at 10 K.

중첩되는 것으로 해석 되어 질 수 있다.

시료 (C)에 대해 보다 자세한 각 밴드에서의 PL 신호 구별을 위하여, Fig. 3에서는 여기광 세기를 변화시키며 측정된 저온 (10 K) PL 스펙트럼을 나타내었다. 여기광 세기를 0.01 mW에서 4.0 mW까지 변화시키기에 따라 각 신호의 PL 세기와 발광 위치 변화를 살펴보았다. 모든 신호가 일정한 간격으로 PL 세기의 증가를 보이며 위치 변화는 거의 보이지 않고 있는 것으로 조사되었다. 약 92 meV의 에너지 차이를 보이는 GaN의 첫 번째와 두 번째 longitudinal optical (LO) phonon replica 간격을 Fig. 3에 선으로 표시하였다 [16]. 2DEG의 신호에 있어서 기존 단일 구조를 갖는 AlGaIn/GaN 이종접합 구조는 삼각형 형태의 양자 우물 구조로 인해 2DEG의 재결합 운반자중 정공이 GaN flat-band로 쉽게 빠져나가는 현상이 나타나기 때문에 광학적 2DEG 신호 및 그의 LO phonon replica 신호에 대한 관찰이 어려웠었다. 하지만 시료 (C)의 경우 뚜렷한 2DEG-1LO 신호가 관찰되고 있음을 알 수 있는데, 이러한 특성은 가전자대 AlGaIn 장벽층이 정공에 대한 구속을 강하게 함으로써 2DEG 신호에 기여하는 운반자 재결합을 유도하여 광학적으로 우수한 특성이 나타나는 결과를 얻을 수 있는 것으로 해석되었다.

또한, 시료 (C)의 경우 3.445 eV에서의 신호이외에 3.42 eV에서도 새로운 신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 시료 (B)에서도 약하게 나타나는 것으로 보이나 GaN의 1-LO 신호와 중첩되어 두드러지지 않게 보이는 것으로 생각된다. 따라서 시료 (A)에서 보이지 않던 3.42 eV의 신호는 시료 (A)에는 포함되어 있지 않던 다중 구조의 $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$

GaN 로부터 나타나는 것으로 생각이 되며, Al 조성비에 따라 각 층에서의 구속 효과가 서로 다르게 형성되어 있을 것으로 예상이 된다. 이를 확인하기 위하여, 성장된 구조의 포텐셜 에너지를 바탕으로 2DEG로 인한 버금띠 에너지 레벨과 파동 함수를 시뮬레이션 하였으며 그 중 시뮬레이션된 밴드 구조를 Fig. 4에 나타내었다. AlGaIn/GaN 이종접합 구조의 경우, 분극은 [0001] 축 방향의 압전 분극장과 자발적 분극장의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 효과를 고려한 포아송 (Poisson) 방정식과 준2차원 자유전자 채널에서의 슈뢰딩거 (Schrodinger) 방정식을 모두 만족하는 해를 풀기 위해 유효질량 어림법 (effective mass approximation)을 바탕으로 하는 자유 전자 버금띠의 파동함수의 싸개선 (envelope) 함수 및 퍼텐셜을 수치적 계산 (numerical calculation) 방법으로 수행하였다 [18,19].

시료 (A) 즉, 단일 AlGaIn/GaN 이종접합 구조에서는 보이지 않던 단과장 2DEG 신호가 이중 및 다중 이종접합 구조 시료인 (B)와 (C)에서 나타남에 따라 이 원인을 규명하기 위해 밴드 구조에 대한 시뮬레이션을 하였으며, 그 결과 구조적으로 2개의 2DEG 밴드가 형성되어 있음을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 따라서, 저온 PL 측정에서 보인 2개의 2DEG 신호에 대한 원인을 각각 다른 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ 이종접합 계면으로부터 나타남으로 해석하였다.

IV. 결 론

금속 유기화학 증착기를 이용하여 사파이어 기판 위에 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ 및 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN/Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN$ 이종접합 구조들을 성장하고, 이들 시료의 전자와 정공들 간의 구속 효과를 조사하기 위하여 광학적, 구조적 특성을 비교하였다. 10 K PL 실험으로부터 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ 이종접합의 경우 ~3.445 eV에서 2DEG 관련된 발광을 관찰하였으며, $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN/Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN$ 다중 이종접합의 경우 ~3.445 eV에서 뿐만 아니라 ~3.42 eV에서 추가적인 2DEG 발광을 관찰 할 수 있었다. 이 추가적인 2DEG 신호의 원인을 밝히기 위해, 성장된 구조의 포텐셜 에너지를 바탕으로 밴드 구조를 시뮬레이션한 결과, 서로 다른 이종접합 구조에서 2개의 2DEG가 형성되어 있음을 확인하였고, 각각의 2DEG 신호가 위치적으로 다른 위치에서의 2DEG의 신호로 해석되었다. 실험 결과, 이종접합계

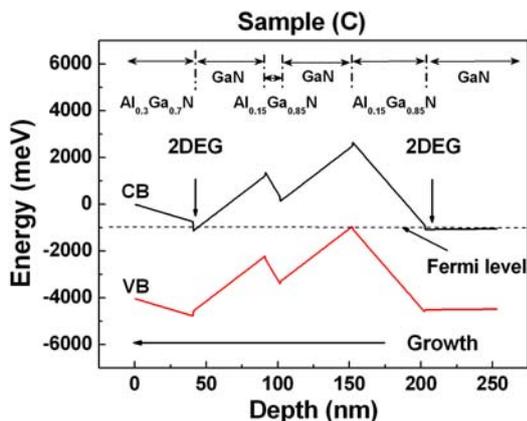


Figure 4. Simulation data of energy level for sample (C) with multiple heterostructure.

면에서 형성되어지는 2DEG의 양자화 현상을 높이기 위하여 사용된 다중 접합 구조가 단일 접합 구조에서 보다 높은 효율의 2DEG의 광학적 특성 및 이동도를 보여줌으로서 다중 구조를 갖는 HEMT 소자에 응용될 경우 보다 향상된 특성을 보일 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] K. Nishihori, Y. Kitaura, M. Hirose, M. iharam M. Nagaoka, and N. Uchitomi, *IEEE Trans. Electron Devices*, **45**, 1385 (1998).
- [2] K. Mochizuki, T. Okam and I. Ohbu, *Electron. Lett.* **37**, 252 (2005).
- [3] T. O. Dickson, R. Beerkens, and S. P. Voinigescu. *IEEE J. Solid-State Circuits* **40**, 994 (2005).
- [4] C. H. Oxley and M. J. Uren, *IEEE Trans. Electron Devices*, **52**, 165 (2005).
- [5] J. Ao, Q. Zeng, Y. Zhao, X. Ki, W. Liu, S. Liu, and C. Liang, *IEEE electron Device Lett.* **21**, 200 (2000).
- [6] Y. G. Xie, S. Kasai, H. Takahashi, C., Jiang, and H. Hasegawa, *IEEE electron Device Lett.* **22**, 312 (2001).
- [7] H. S. Kwack, K. S. Lee, H. J. Kim, E. Yoon, and Y. H. Cho, *J. Korean. Vac. Soc.* **17**, 34 (2008).
- [8] S. J. Lee, J. O. Kim, C. S. Kim, S. K. Noh, and K. Y. Lim, *J. Korean. Vac. Soc.* **16**, 27 (2007).
- [9] T. Wan, Y. Ohno, M. Lachab, D. Nakagawa, T. shirahama, S. Sakai, and H. Ohno, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3531 (1999).
- [10] Q. X. Zhao, J. P. Bergmanm, P. O. Holtz, B. Monemar, C. Hallin, M. Sundaram, J. L. Merz, and A. C. Gossard, *Semicond. Sci. Technol.* **5**, 884 (1990).
- [11] H.-S. Kwack, Y. H. Cho, G. H. Kim, M. R. Park, D. H. Youn, S. B. Bae, K. S. Lee, J. H. Lee, J. H. Lee, T. W. Kim, T. W. Kang, and K. L Wang, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 041909 (2005).
- [12] S. M. Kim, H. S. Kwack, S. W. Hwang, Y. H. Cho, H. I. Cho, J. H. Leem and K. L. Wang, *Phys. Stat. Sol. (c)* **3**, 2113 (2006).
- [13] H. S. Kwack, Y. H. Cho, G. H. Kim, M. R. Park, D. H. Youn, S. B. Bae, K.-S. Lee, J. H. Lee, and J. H. Lee, *Phys. Stat. Sol. (c)* **3**, 2109 (2006).
- [14] V. A. Joshikin, C. A. Parker, S. M. Bedair, J. F. Muth, I. K. Shmagin, R. M. Kolbas, E. L. Piner, and R. J. Molnar, *J. Appl. Phys.* **86**, 281 (1999).
- [15] J. I. Pankove and T. D. Moustakas, *Semiconductors and Semimetals, Volume* **50** (1998).
- [16] D. Kovalev, B. Averboukh D. Volmm and B. K. Meyer, *Phys. Rev. B* **54**, 2518 (1996).
- [17] K. Fleishcer, M. Toth, M. R. Phillips, J. Zou, G. Li, and S. J. Chua, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 1114 (1999).
- [18] F. Stern and S. D. Sarma, *Phys. Rev. B* **30**, 840 (1984).
- [19] H.-S. Kwack, S. B. Bae, K. S. Lee, J. H. Lee, J. H. Lee, and Y. H. Cho, *Sae mulli* **53**, 412 (2006).

Effect of Carrier Confinement and Optical Properties of Two-dimensional Electrons in $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ and $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ Heterostructures

H. S. Kwack¹, K. S. Lee², H. E. Cho³, J. H. Lee³, Y. H. Cho^{1*}

¹*National Research Laboratory for Nano-Bio-Photonics, Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 361-763*

²*IT Convergence & Components Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), Daejeon 305-350*

³*Department of Electric and Electronic Engineering, Kyungpook National University, Taegu 702-701*

(Received July 4, 2008, Revised July 17, 2008, Accepted July 22, 2008)

We have investigated optical and structural properties of $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ and $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures (HSs) grown by metal-organic chemical vapor deposition, by means of Hall measurement, high-resolution X-ray diffraction, and temperature- and excitation power-dependent photoluminescence (PL) spectroscopy. A strong GaN band edge emission and its longitudinal optical phonon replicas were observed for all the samples. At 10 K, a 2DEG-related PL peak located at ~ 3.445 eV was observed for $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ HS, while two 2DEG peaks at ~ 3.42 and ~ 3.445 eV were observed for $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ HS due to the additional $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ layers. Moreover, the emission intensity of the 2DEG peak was higher in $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ HS than in $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ HS probably due to an effective confinement of the photo-excited holes by the additional $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ layers. The 2DEG-related emission intensity decreased with increasing temperature and disappeared at temperatures above 150 K. To investigate the origin of the new 2DEG peaks, the energy-band structure for multiple AlGa_xN/GaN HSs were simulated and compared with the experimental data. As a result, the observed high- and low-energy peaks of 2DEG can be attributed to the spatially-separated 2DEG emissions formed at different AlGa_xN/GaN heterointerfaces.

Keywords : AlGa_xN/GaN, two-dimensional electron gas, photoluminescence, metalorganic chemical vapor deposition

* [E-mail] yonghcho@chungbuk.ac.kr