

## AlGaIn/GaN 이중 이종접합구조의 광여기 유도방출 특성

김선태 · 문동찬\*

대전산업대학교 재료공학과  
\*광운대학교 전자재료공학과

### Optically Pumped Stimulated Emission from AlGaIn/GaN Double-Heterostructure

S.T. Kim and D.C. Moon\*

Department of Materials Engineering, Taejon National University of Technology

\*Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

초 록 AlN 완충층을 이용하여 대기압 유기금속에피택설 (MOVPE)법으로 사파이어 기판위에 성장시킨 AlGaIn/GaN 이중 이종접합구조 (double heterostructure: DH)의 고밀도 광여기에 의한 자외선 영역에서의 단면모드 유도방출 특성에 대하여 조사하였다. 실온에서 여기광 밀도 200 kW/cm<sup>2</sup>에서 방출된 AlGaIn/GaN DH의 유도방출 피크파장과 반치폭은 각각 369 nm와 22.4 meV이었으며, 80 K의 온도에서는 각각 360.1 nm와 13.4 meV이었다. 고밀도 광여기에 의하여 단면모드 자외선 영역 유도방출을 얻기에 필요한 입사광 밀도의 임계치는 실온과 80 K의 온도에서 각각 89 kW/cm<sup>2</sup>와 44 kW/cm<sup>2</sup>이었다.

**Abstract** An AlGaIn/GaN double heterostructure (DH) was fabricated by atmospheric pressure metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) method on a sapphire substrate using an AlN buffer-layer, and the edge-mode stimulated emission was investigated in the ultraviolet region by the high density optical pumping method. The peak wavelength and the full width at half-maximum of the stimulated emission at optical pumping power density of 200 kW/cm<sup>2</sup> were 369 nm and 22.4 meV at room temperature, and 360.1 nm and 13.4 meV at 80 K, respectively. The threshold pumping power density for the edge-mode stimulated emission at room-temperature and 80 K were 89 kW/cm<sup>2</sup> and 44 kW/cm<sup>2</sup>, respectively.

### I. 서 론

청색과 자외선영역에서 동작하는 단파장 발광소자를 제작하기 위한 반도체재료는 에너지갭이 2.7 eV 이상이어야 하고, 높은 변화효율을 얻기 위해서는 직접천이형의 에너지대 구조를 갖아야 한다. 이러한 조건을 만족하는 재료로서는 III족 질화물 반도체인 GaN와 II-VI족 화합물 반도체인 ZnSe 및 이들을 중심으로 한 3원 또는 4원 혼정계가 있다. 다른 화합물 반도체에 비하여 상대적으로 커다란 에너지갭을 갖는 III족 질화물 반도체 즉, AlN, GaN, InN 및 이들의 혼정을 이용하여 청색 영역 혹은 자외선영역에서 동작하는 단파장 반도체 레이저다이오드 (LD)를 제작하기 위하여 많은 노력이 이루어지고 있다. AlN, GaN 및 InN는 결정구조가 육방조밀구조일 때 실온에

서 직접천이형 에너지대 구조를 갖으며, 에너지갭은 각각 6.2 eV, 3.4 eV 및 1.9 eV로서 200 nm부터 650 nm까지의 파장영역에서 동작하는 발광소자를 제작할 수 있게 된다.<sup>1)</sup> 또한 III족 질화물 반도체는 견고하고, 열적·화학적으로 안정하므로 화학약품에 대하여 용이하게 에칭되지 않는 특징이 있다. 이와 같은 것은 소자의 제작 프로세스상 상당히 불리하지만, 소자동작의 안정성과 고온 안정성 및 내 환경특성 등의 점에서 매우 유리하다고 여겨지므로 단파장 영역에서 동작하는 발광소자로서의 응용이 기대된다.

III족 질화물 반도체의 결정성장에 사용되는 사파이어 기판과 III족 질화물 사이에는 커다란 격자상수 차와 열팽창계수 차가 있으므로 크랙이 없는 양질의 III족 질화물 반도체를 성장하는데 있어서는 많은 제약이 따르고 있다.<sup>1)</sup>

그러나, 사파이어 기판과 III족 질화물 반도체 사이에 저온에서 성장한 AlN 혹은 GaN 등의 완충층을 개입하는 방법으로 Amano 등<sup>2)</sup>과 Khan 등<sup>3)</sup> 및 Nakamura 등<sup>4)</sup>은 양질의 GaN, AlGaIn 및 GaInN 박막을 유기금속기상에 피택시 (MOVPE)법으로 성장할 수 있었다. 이러한 결정성장기술의 진보에 의하여 III족 질화물 반도체를 이용한 1 cd급의 청색 발광다이오드가 상품화 되기에 이르렀다.<sup>5)</sup> 그러나, 현재까지 III족 질화물 반도체에서는 전류주입에 의한 레이저 발진이 실현되지 않고 있으며, 저온 혹은 실온에서 고밀도 광여기에 의한 유도방출만이 보고되고 있다.<sup>6~9)</sup>

이 연구에서는 MOVPE법으로 성장된 AlGaIn/GaN DH의 전류주입에 의한 레이저 발진의 실현 가능성을 알아보기 위하여 실온과 80 K의 온도에서 고밀도 광여기에 의한 자외영역의 단면모드 유도방출특성에 관하여 조사하였다.

## 2. 실험방법

III족 질화물 반도체의 결정성장을 위하여 수평형 대기압 MOVPE장치를 사용하였다. 연마된 (11 $\bar{2}$ 0)면의 사파이어를 기판으로 사용하였다. 우선 사파이어 기판을 수소분위기 중에서 1150 °C의 온도로 약 5 분간 열처리한 후 400 °C의 온도에서 사파이어기판 위에 50 nm 두께의 AlN 완충층을 성장시켰다. 이 완충층 위에 두께 2  $\mu$ m의 GaN 중간층을 약 1000 °C의 온도에서 성장시킨 후, 그 위에 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN DH를 연속적으로 성장하였다. 그림 1은 AlGaIn/GaN DH의 성장과정에 있어 성장온도와 시간 및 성장과정 중에 공급한 원료가스를 함께 나타낸 것이다. Trimethylaluminum (TMA), trimethylgallium (TMG) 및 암모니아를 각각 III족과 V족 원소의 원료가스를 사용하였고, 수소 혹은 질소를 캐리어가스로 사용하였다. 결정성장시 III족가스와 V가스의 기생반응을 방지하기 위하여 이중 flow channel을 사용하였으며, TMA와 TMG의 유량을 변화시켜 GaN와 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N를 동시에 연속적으로 성장하였다. GaN와 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N는 사파이어 기판의 (11 $\bar{2}$ 0)면에 평행하게 (0001) 방향으로 성장되었다. Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N 크래드층의 두께와 GaN 활성층의 두께는 각각 0.4  $\mu$ m와

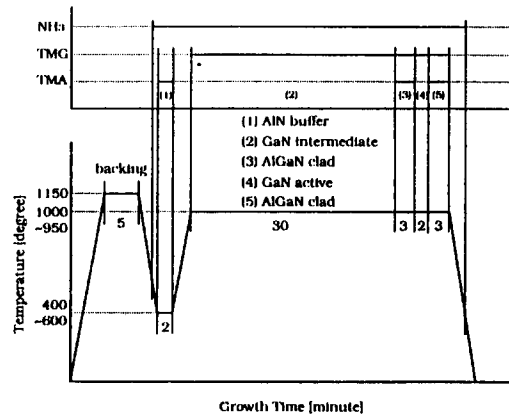


Fig. 1. Time schedule of AlGaIn/GaN DH growth by MOVPE with thin AlN buffer layer.

0.2  $\mu$ m이었다.

고밀도 광여기 실험에 있어, 시편은 Feby-Perot 공진기 길이가 1 mm가 되도록 성장층의 표면에 수직하게 절단하여 cryostat의 cold-finger에 부착한 후 측정하였다. 발진파장 337.1 nm, 펄스폭 8 nm, 펄스간격 10 Hz인 펄스발진 질소레이저 빔을 수정렌즈로 집속하여 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN DH의 표면에 수직방향으로 조사하였다. 이 실험에서 레이저 빔의 크기는 약 0.5×0.6 mm<sup>2</sup>이었다. 레이저 빔의 최대 출력은 neutral density filter로 보정하여 200 kW/cm<sup>2</sup>이 되도록 하였다. 그림 2에 고밀도 광여기방법으로 단면모드 유도방출을 측정하기 위한 개략적인 장치도와 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN DH의 단면을 개략적으로 나타내었다. Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN DH의 단면으로부터 방출되는 광을 수정렌즈로 집광하여 길이 1 m 분광기로 분광한 후 액체질소에 의하여 냉각된 CCD로 검출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

AlGaIn크래드층의 화학적 조성은 이중결정 X선 회절장치를 이용하여 측정하였다. 그림 3은 그림 2-b)에 보인 AlGaIn/GaN DH의 (0004)면에 대한 이중결정 X선 회절곡선을 보인 것이다. 가장 회절강도가 강한 피크는 중간층과 활성층인 GaN에 의한 것이다. GaN에 비하여 격자상수가 작은 AlGaIn에 의한 회절피크는 GaN보다 높은 각도 쪽에서 나타

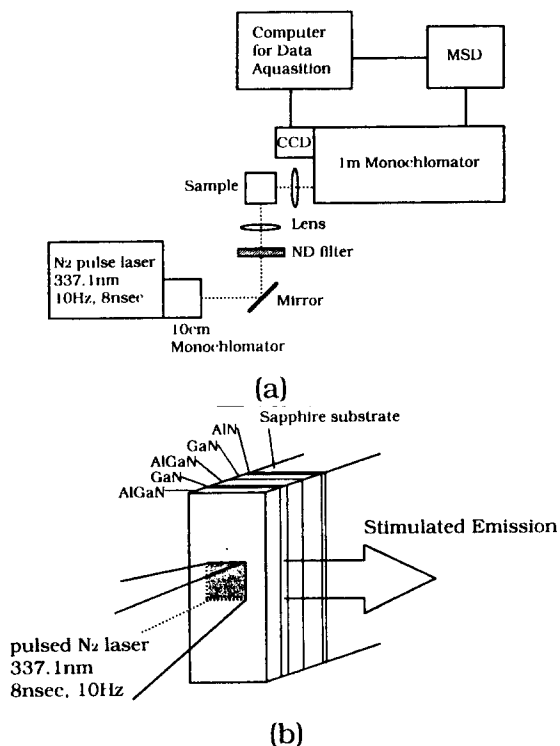


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental system for measuring optically pumped stimulated emission (a), and measurement configuration for edge-mode emission and structure of DH (b).

났다. 그림에서 점선은 피크의 위치와 반치폭을 결정하기 위하여 Lorentzian 분포함수를 이용하여 curve-fitting한 결과를 함께 나타낸 것이다. AlN-GaN 혼정의 격자상수가 Vegard 법칙에 따른다는 가정으로부터<sup>10)</sup> GaN에 대한 AlGaIn 회절피크의 회절각 차를 이용하여 AlGaIn 혼정의 화학적 조성을 결정하였으며, AlGaIn 크래드층의 화학적 조성은 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N이었다. AlGaIn 크래드층으로부터의 회절피크 반치폭은 468 초로서 GaN로부터의 회절피크 반치폭 588 초에 비하여 다소 작게 나타났다. AlN 완충층 위에 GaN를 성장하는 경우, 이들 경계면에는 많은 결정결함이 존재하는 영역이 형성되고, AlN 완충층으로부터 멀어질수록 결함이 없는 GaN가 성장된다.<sup>11)</sup> 따라서, 결함이 적은 GaN 위에 성장한 AlGaIn 혼정으로부터의 회절피크 반치폭이 GaN로부터의 회절피크 반치폭에 비하여 작게 나타난 것으로 사료된다.

그림 4는 80 K의 온도에서 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/

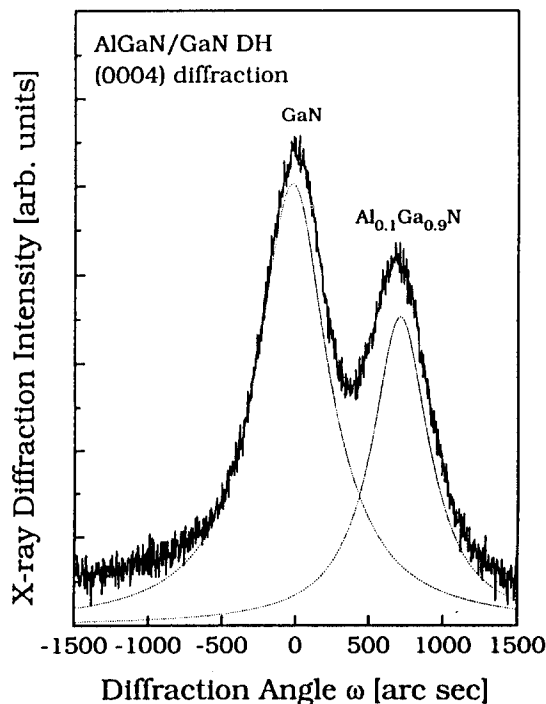


Fig. 3. Double crystal X-ray rocking curve from AlGaIn/GaN DH shown in Fig. 2(b).

GaN DH의 단면모드 발광스펙트럼의 입사 여기광 밀도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 여기광의 밀도가 증가함에 따라 약 360.1 nm의 자외 파장부근에서 유도방출에 의한 강도가 큰 피크가 나타났으며, 그림 5에 보인 것과 같이 피크의 반치폭이 감소함과 동시에 피크가 낮은 에너지 쪽으로 이동하였다. 여기광의 밀도가 200 kW/cm<sup>2</sup>일 때 80 K에서의 에너지 갭 보다 낮은 에너지에서 반치폭이 13.4 meV인 단면모드 유도방출이 나타났다. 이와 같이 여기광 밀도가 증가함에 따라 피크강도의 비선형적인 증가와 반치폭의 감소 및 낮은 에너지 쪽으로의 피크 이동은 유도 방출의 존재를 의미한다.<sup>7)</sup>

실온에서의 입사광밀도 변화에 따른 스펙트럼을 그림 6에 나타내었다. 낮은 입사광 밀도에서는 반치폭이 크고, 강도가 적은 스펙트럼이 관찰되었으며, 입사광 밀도가 증가함에 따라 그림 7에 보인 것과 같이 유도방출이 나타나는 임계치 이상에서 피크의 반치폭이 감소하고, 스펙트럼이 낮은 에너지 쪽으로 이동

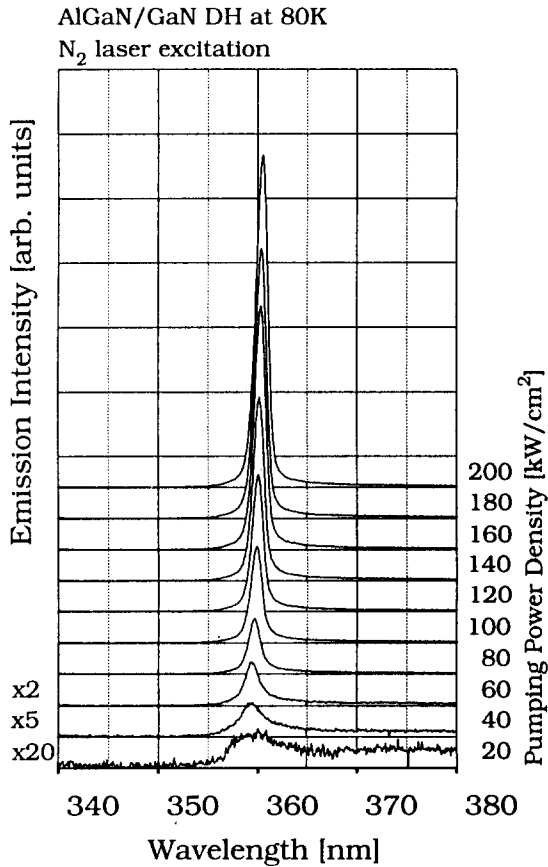


Fig. 4. Edge-mode emission spectra of the AlGa<sub>0.9</sub>N/GaN DH with different pumping power densities at 80K.

하였다. 여기광 밀도가 200 kW/cm<sup>2</sup>일 때 실온에서의 단면모드 유도방출은 369 nm의 파장에서 나타났고, 이때 스펙트럼의 반치폭은 약 22.4 meV이었다. 실온에서의 유도방출은 80 K 온도에서의 유도방출에 비하여 약 83 meV 정도 낮은 에너지에서 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 온도에 따른 에너지 갭의 변화에 의한 것이라 여겨진다. 또한 시료의 온도가 상승함에 따라 포논에 의하여 반치폭이 증가하였음을 알 수 있다.

그림 8은 입사 광밀도의 변화에 따른 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN DH로부터의 단면모드 광출력 사이의 관계를 나타낸 것이다. 입사광 밀도가 증가함에 따라 광출력은 비선형적으로 증가하였으며, 고밀도 광여기에 의하여 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN DH로부터 단면모드 유도방출을 얻기에 필요한 입사광 밀도의 임계치는 실온과 80 K

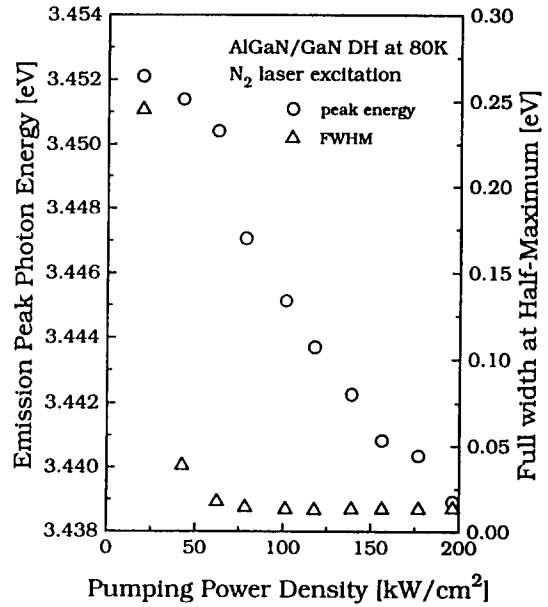


Fig. 5. Dependence of the peak photon energy and FWHM on the pumping power density at 80K.

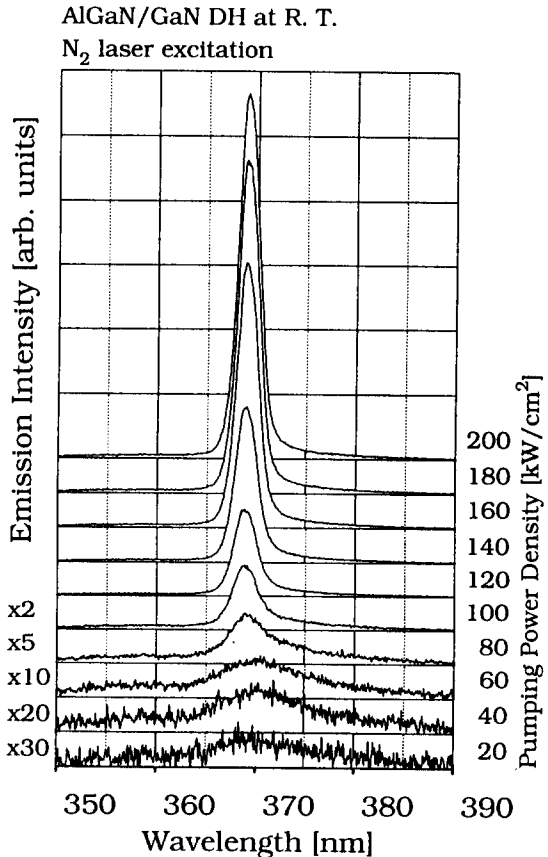


Fig. 6. Room-temperature edge-mode emission spectra from the AlGa<sub>0.9</sub>N/GaN DH with different pumping power densities.

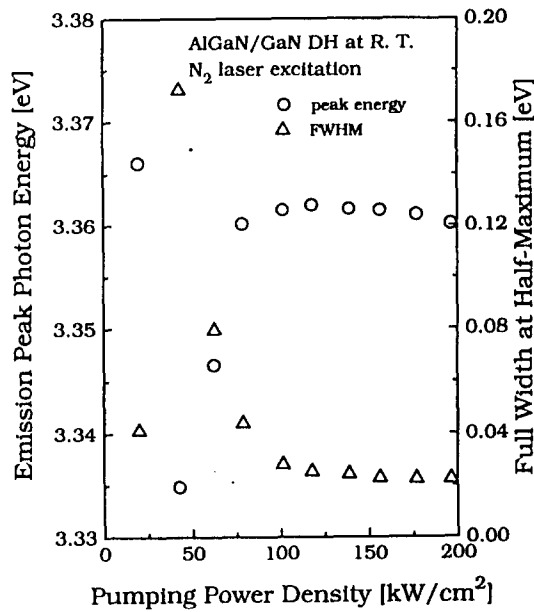


Fig. 7. Dependence of the peak photon energy and FWHM on the pumping power densities at room temperature.

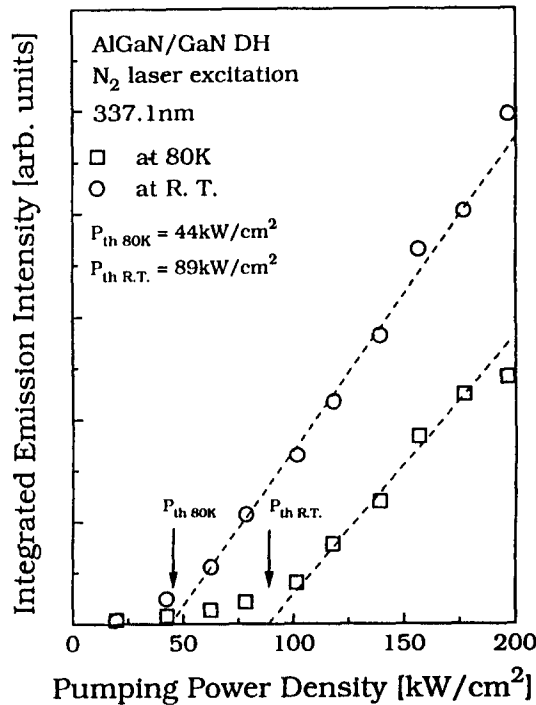


Fig. 8. Dependence of the integrated emission intensities on the pumping power densities at both 80K and room temperature for AlGaIn/GaN DH.

의 온도에서 각각 89 kW/cm<sup>2</sup>와 44 kW/cm<sup>2</sup>이었

다. 실온에서의 임계치를 전류밀도로 환산하면 약 27 kA/cm<sup>2</sup>으로서 실온에서 전류주입에 의하여 유도방출을 실현할 수 있을 정도의 값이다. 또한, 실온에서 AlGaIn/GaN DH의 단면모드자의 유도방출을 위한 입사광 밀도의 임계치는 단층 GaN DH에 대한 값<sup>6)</sup> 700 kW/cm<sup>2</sup>보다 약 1/8정도 낮은 값이며, 이는 AlGaIn/GaN DH구조를 채택하므로써 광의 가둠 (confinement)과 캐리어의 가둠이 동시에 효과적으로 이루어졌기 때문이라 여겨진다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 대기압 수평 MOVPE법으로 성장한 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN DH에 대하여 80K와 실온에서 고밀도 광여기에 의한 단면모드 유도방출 특성을 조사하였다. 실온에서 여기광 밀도가 200kW/cm<sup>2</sup>일 때 유도방출의 피크와 반치폭은 각각 369nm와 22.4meV이었고, 유도방출을 얻는데 필요한 입사광 밀도의 임계치는 89kW/cm<sup>2</sup>로서 전류주입에 의해서도 실온 레이저발진을 실현할 수 있을 정도이었다. 이와 같은 결과는 AlGaIn/GaN DH가 자외영역의 파장을 발진하는 반도체 레이저 다이오드의 실현에 공헌할 것으로 기대되며, 아울러 전류주입에 의한 레이저발진을 실현하기 위해서는 소자구조 및 관련된 물성에 관한 연구들이 함께 이루어져야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 일본 Meijo대학 전기전자공학과 I. Akasaki교수의 연구실에서 수행된 것임을 밝히며, 아울러 I. Akasaki교수와 H. Amano교수에게 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. R.F. Davis, Proc. IEEE, 79, 702 (1991).
2. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett, 48, 353 (1986).
3. M.A. Khan, R.A. Skogman, J.M. Van Hove, S. Krishnakutty, and R.M. Kolbas, Appl. Phys. Lett, 56, 1257 (1990).
4. S. Nakamura, M. Senoh, and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys, 30, L1708(1991).

5. Nichia Chemical Industries, Ltd, Product Guide NLPB500, Cat. No. 9312.
6. R. Dingle, K.L. Shaklee, R.F. Leheny, and R.B. Zetterstrom, Appl. Phys. Lett, 19, 5 (1971)
7. R. Cingolani, M. Ferrara, and M. Lugara, Solid State Commun, 60, 705 (1986)
8. H. Amano, T. Asahi, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys, 29, L205 (1990)
9. M. A. Khan, D. T. Olson, J. M. Van Hove, J. N. Kuzinia, Appl. Phys. Lett, 58, 1515 (1991)
10. S. Sakai, Y. Ueta and Y. Tadauchi, Jpn. J. Appl. Phys., 32,4413 (1993)