

## AlGaIn/GaInN 이중 이종접합구조의 광여기 유도방출과 편광특성

김 선 태 · 문 동 찬\*

대전산업대학교 재료공학과

\*광운대학교 전자재료공학과

### Properties of Optically Pumped Stimulated Emission and Its Polarization from an AlGaIn/GaInN 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** AlGaIn/GaInN 이중이종접합구조 (double heterostructure: DH)를 대기압 유기금속기상에 피택설(MOVPE)법으로 AlN 완충층을 이용하여 사파이어 기판위에 성장하고, 실온에서의 광여기법에 의한 청색영역의 단면모드 유도방출특성과 편광특성을 조사하였다. 여기광원의 광밀도가 증가함에 따라 청색 영역에서의 유도방출 피크는 낮은 에너지 쪽으로 이동하였고, 유도방출 피크파장은 여기광 밀도가  $200\text{kW}/\text{cm}^2$ 일 때  $402\text{nm}$ 이었으며, 스펙트럼의 반치폭은  $18\text{meV}$ 이었다. 또한 유도방출에 필요한 여기광밀도의 임계치는  $130\text{kW}/\text{cm}^2$ 이었다. AlGaIn/InGaIn DH로부터 방출되는 유도방출 광은 임계치 이상에서 TE-mode로 편광 되었다.

**ABSTRACTS** An AlGaIn/GaInN double heterostructure (DH) was fabricated on sapphire substrates using an AlN buffer-layer by atmospheric pressure metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) method, and edge-mode stimulated emission and its polarization characteristics in the blue region were investigated by optical pumping method at room temperature. With increasing the optical pumping density, the peak energy of stimulated emission was shifted to the lower energy, and the peak wavelength and the full width at half-maximum of stimulated emission at optical pumping power density of  $200\text{kW}/\text{cm}^2$  were  $402\text{nm}$  and  $18\text{meV}$ , respectively. The threshold of optical pumping power density to obtain the stimulated emission was about  $130\text{kW}/\text{cm}^2$ . The light of stimulated emission from optically pumped AlGaIn/GaInN DH was linearly polarized to the TE-mode above the threshold power density.

### 1. 서 론

청색의 파장영역에서 동작하는 발광다이오드와 반도체 레이저다이오드(LD)등은 전 색 상 표시소자, 평판 표시소자 및 compact 디스크와 고밀도 광기록 저장 시스템의 실현에 있어 매우 중요하다. 특히, 반도체 LD가 광디스크 메모리와 광통신 시스템에 사용되기 위해서는 이로부터 방출되는 광은 단일모드 이어야 하며, 편광에 민감한 coherent 통신과 자기광학 디스크 시스템에 사용되기 위해서는 단일 모드로 편광 되어야 한다<sup>1)</sup>.

최근 청색 반도체레이저의 개발을 위하여 ZnSe계 II-VI족 화합물반도체와 GaN계 III족 질화물 반도체 분야에서 집중적인 연구가 이루어지고 있으며, 실용가능한 청색 반도체

LD의 출현에 대하여 많은 관심이 모아지고 있다. III족 질화물반도체는 InN (Eg:  $1.9\text{eV}$ )부터 AlN (Eg:  $6.2\text{eV}$ )에 이르기까지 전 조성 영역에서 동작하는 발광소자를 제작하는데 있어 유망시 되고 있는 소재이다. 특히 GaN와 InN의 3원 혼정인 GaInN를 활성층으로 이용하면 그 발진파장을  $370\text{nm}$ 부터  $650\text{nm}$ 까지, 즉 가시광 전 영역으로부터 근 자외영역을 포함할 수 있게 된다<sup>2)</sup>.

III족 질화물반도체의 결정성장은 많은 연구자들이 지적한 바와 같이 격자상수와 열팽창 계수가 유사한 기판재료의 입수가 곤란한 관계로 고품질의 III족 질화물반도체를 에피택설 방법으로 성장하는 것이 커다란 과제이었다. 그러나, 최근 Amano 등<sup>3)</sup>과 Nakamura는<sup>4)</sup> 각각 저온에서 성장한 AlN와 GaN을 완충층으

로 사용하여 양질의 GaN를 사파이어 기판위에 성장하였으며, 이 방법에 의하여 성장된 III족 질화물반도체는 전기적, 광학적 성질뿐만 아니라 동시에 결정학적 특성이 현저하게 개선되었다.

Amano 등<sup>5)</sup>은 위에서 기술한 방법으로 성장된 GaN 단독층에 대하여 실온에서 광여기에 의한 단면모드 유도방출을 보고하였으며, Khan 등<sup>6)</sup>은 실온에서 표면모드 유도방출을 보고하였다. 또한 Amano 등<sup>6)</sup>은 AlGaIn/GaN 이종 이종접합구조 (double heterostructure: DH)를 채택함으로써 광여기에 의한 유도방출의 임계치가 GaN 단독층의 단면모드 임계치에 비하여 1/6정도 감소함을 보였다.

반도체 LD를 실현하기 위해서는 광의 물입뿐만 아니라 캐리어의 물입 또한 중요하다. 이를 위해서는 활성층과 크래드층 사이의 전도대와 가전도대에 커다란 밴드의 불연속이 존재하여야 한다. Harrison의 강결합법<sup>7)</sup>에 의하면 AlGaIn/GaN계는 AlGaIn/GaN계에 비하여 전도대 뿐만 아니라 가전도대의 커다란 불연속이 존재할 것으로 기대되므로 반도체 LD의 실현을 위하여 응용될 수 있다. 최근 Nakamura 등<sup>8)</sup>은 AlGaIn/GaN DH를 채택한 고효율 발광다이오드의 특성에 대하여 보고한 바 있다.

그러나 현재까지 AlGaIn/GaN DH에서 전류주입에 의한 유도방출은 실현되지 않고 있다. 고밀도 광여기에 의한 유도방출의 관찰은 전류주입에 의한 유도방출의 가능성을 평가할 수 있는 방법으로서, 이 연구에서는 AlGaIn/GaN DH를 대기압 MOVPE법으로 사파이어 기판위에 제작하고, 실온에서의 광여기법으로 AlGaIn/GaN DH의 단면모드 청색 유도방출 특성과 편광특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

III족 질화물반도체 GaN, GaInN 및 AlGaIn를 성장하기 위하여 수평형 대기압 MOVPE 장치를 사용하였다. Trimethylaluminum (TMA), trimethylgallium (TMG), trimethylindium (TMI)와 암모니아를 각각 III족과 V족의 원료가스로 사용하였고, 수소를 캐리어가스로 사용하였다. 결정성장이 진행되는 동안 III족 유기금속과 암모니아 사이의 기생반응을 억제

하기 위하여 이종 flow-channel 반응관을 채택하였다. 연마된 (0001)면의 사파이어를 기판으로 사용하였다. 결정의 성장에 있어 우선 TMA와 암모니아를 반응관에 흘리면서 400°C의 온도에서 50 nm 정도 두께의 AlN 완충층을 성장하였다. 그 위에 두께가 3μm 정도인 GaN 중간층을 성장하고, 연속적으로 TMA, TMG 및 TMI의 유량을 변화시켜 Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N/Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N DH를 성장하였다. Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N 크래드층과 Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N 활성층의 두께는 각각 0.3μm 와 0.1μm 이었다. AlGaIn 크래드층과 GaInN 활성층은 불순물을 첨가하지 않고 성장하였으며, 성장층의 화학적 조성은 복결정 X선 회절법으로 측정하였다.

광여기에 의한 AlGaIn/GaN DH의 단면모드 유도방출을 측정하기 위하여 발진파장이 337.1 nm이고, 펄스길이가 8 ns, 펄스간격이 10 Hz인 펄스발진 질소레이저를 여기광원으로 사용하였다. 질소 레이저빔의 최대출력밀도는 neutral-density filter로 보정하여 약 200 kW/cm<sup>2</sup>이 되도록 하였으며, 석영렌즈를 사용하여 그림 1에 보인 것과 같이 시료의 표면에 수직으로 0.5x0.6 mm<sup>2</sup>의 크기로 초점을 맞추었다. AlGaIn/GaN DH의 단면으로부터 방출되는 광을 수정렌즈로 집속한 후 1m 단색광장치로 분광하여 액체질소에 의하여 냉각된 CCD로 검출하였다. 한편, AlGaIn/GaN DH와 단색광분광기 사이에 Glan-Thomson 프리즘을 설치한 후 편광기의 회전각도 θ를

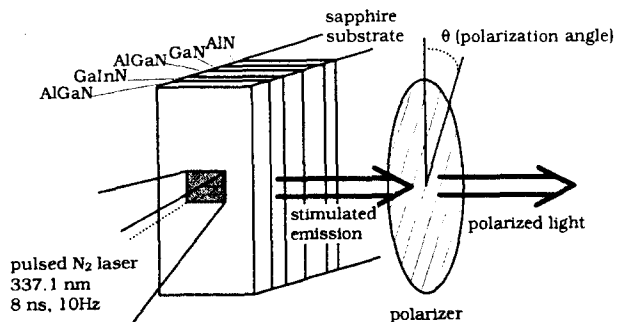


Fig. 1. Schematic drawing of the AlGaIn/GaN DH and the configuration for the measurement of the polarization properties of emitted light by optical pumping.

변화시키며 편광기를 통과한 광을 검출하여 편광특성을 조사하였다. 편광기의 회전각도  $\theta$  는 AlGa<sub>0.17</sub>N/GaN 활성층의 계면을 기준으로 하여 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 유도방출특성

그림 2는 그림 1에 보인 AlGa<sub>0.17</sub>N/GaN DH의 (0004)면에 대한 복결정 X선회절곡선을 보인 것이다. 가장 회절강도가 강한 피크는 중간층인 GaN에 의한 것이다. AlN-GaN와 GaN-InN사이의 격자상수와 조성의 관계로부터<sup>1,9)</sup> GaN에 대한 이들 3원 혼정피크의 회절각 편차로부터 AlGa<sub>0.17</sub>N와 GaInN 혼정의 화학적 조성을 결정하였으며, 이로부터 결정된 AlGa<sub>0.17</sub>N 그래드층은 화학적 조성이 Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N이고 GaInN 활성층의 화학적 조성은 Ga<sub>0.1</sub>In<sub>0.9</sub>N 이었다. 그림에서 점선은 피크의 위치와 반치폭을 결정하기 위하여 Lorentzian 분

포함수를 이용하여 curve-fitting한 결과를 함께 나타낸 것이다. AlGa<sub>0.17</sub>N 그래드층으로부터의 회절피크의 반치폭은 639 초로서 GaN의 반치폭 540 초에 비하여 다소 컸으며, InGa<sub>0.1</sub>N 활성층으로부터의 회절피크의 반치폭은 1025 초로서 GaN의 반치폭에 비하여 약 두배정도 크게 나타났다.

그림 3은 실온에서 광여기에 의한 Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N/Ga<sub>0.1</sub>In<sub>0.9</sub>N DH의 단면모드 발광스펙트럼의 입사여기광 밀도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 여기광의 밀도가 20 kW/cm<sup>2</sup>로 낮은 경우에는 395 nm의 파장부근에서 자연방출에 의한 넓은 반치폭을 갖는 스펙트럼이 나타났으며, 여기광 밀도가 증가하여도 이 피크의 강도는 크게 증가하지 않았다. 여기광의 밀도가 증가함에 따라 약 400 nm의 청색파장부근에서 유도방출에 의한 강도가 큰 피크가 나타났고, 피크의 반치폭이 감소함과 동시에 피크

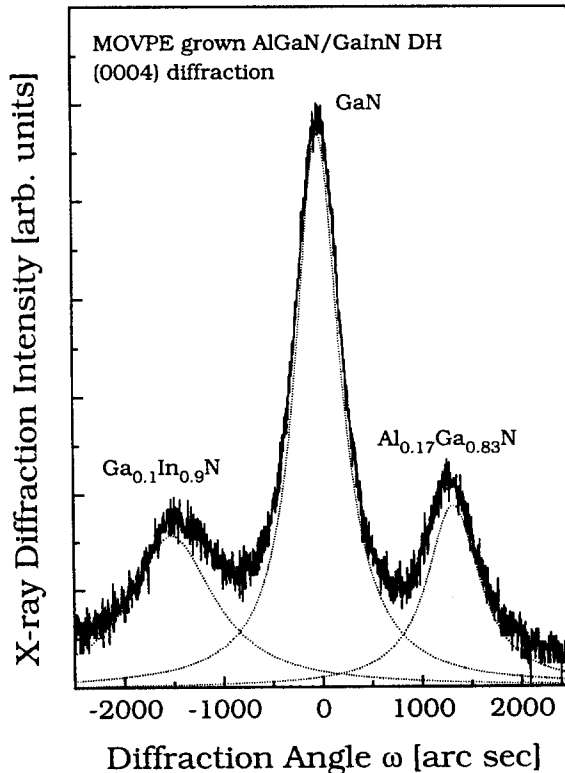


Fig. 2. Double crystal X-ray rocking curve from AlGa<sub>0.17</sub>N/GaN DH.

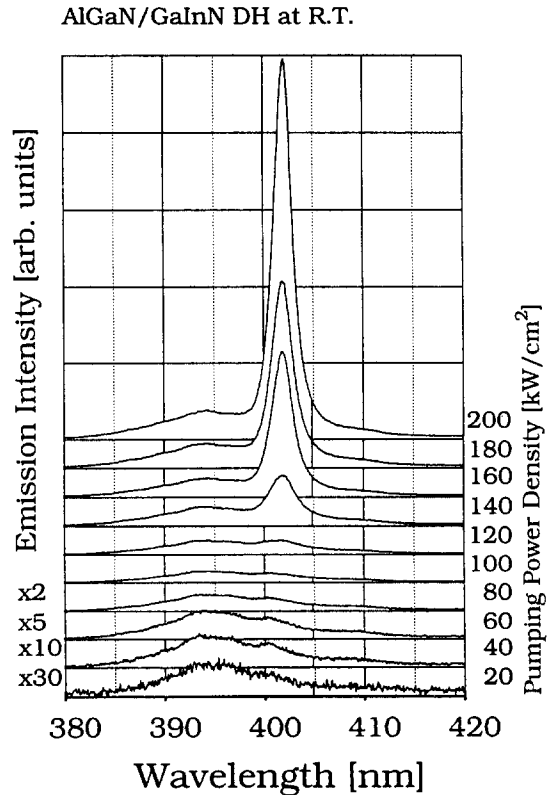


Fig. 3. Edge-mode emission spectra of the AlGa<sub>0.17</sub>N/GaN DH with different pumping power densities at room temperature.

의 위치가 그림 4에 보인 것과 같이 낮은 에너지 쪽으로 이동하였다. 실온에서 Ga<sub>0.1</sub>In<sub>0.9</sub>N 활성층으로 부터의 자연방출 피크의 에너지는 다른 연구자들<sup>9,10)</sup>에 의하여 GaN-InN의 조성 의존성과 잘 일치하였다. 청색 유도방출이 현저하게 나타나는 임계치 이상에서 여기광의 밀도가 200 kW/cm<sup>2</sup> 일 때 약한 자연방출과 함께 402 nm의 파장에서, 즉 자연방출에 의한 피크보다 약 70 meV 낮은 에너지 측에서 반치폭이 18 meV인 단면모드 유도방출이 나타났다.

편광특성

그림 5는 편광각  $\theta$ 를 AlGaIn 크래드층과 GaInN 활성층의 계면에 대하여 수직방향으로 설정(TM-mode)하고 입사광 밀도를 변화시켰을 때의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 입사광 밀도가 증가함에 따라 자연방출에 의한 390 nm 부근에서의 피크는 서서히 단파장쪽으로 이동하였고, 유도방출과 관련된 400 nm 부근에서의 피크는 서서히 장파장 쪽으로 이동하였지만, 피크의 강도는 크게 변화하지 않았으며 전체적으로 스펙트럼의 반치폭이 넓었다.

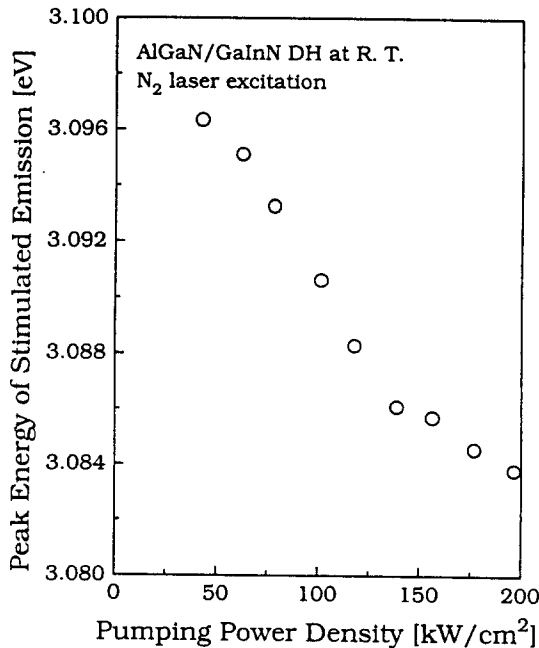


Fig. 4. Dependence of the peak photon energy on the pumping power density at room temperature.

그러나 편광각  $\theta$ 를 크래드층과 활성층의 계면에 평행하게 설정(TE-mode)하고 입사광 밀도를 변화시키었을 때 그림 6에 보인 것과 같이 특정의 입사광 밀도 이상에서 유도방출에 의한 강도가 큰 피크가 현저하게 나타났다. 이 AlGaIn/GaN DH로부터 유도방출의 존재와 좁은 반치폭은 AlGaIn 크래드층에 의하여 GaInN 활성층에 광의 물입이 효과적으로 일어나고 있음을 보여주는 것이다.

앞에서 보인 그림 5와 그림 6의 입사광 밀도 변화에 따른 스펙트럼에 대하여 적분강도를 구한 후 그림 7에 함께 나타내었다. 입사광 밀도가 증가함에 따라 광출력은 비선형적으로 증가하였으며, 고밀도 광여기에 의하여 AlGaIn/GaN DH로부터 단면모드 유도방출을 얻기에 필요한 입사광 밀도의 임계치는 TE-mode의 경우 약 130 kW/cm<sup>2</sup>이었다. 그러나 TM-mode의 경우에는 입사광의 밀도가 증

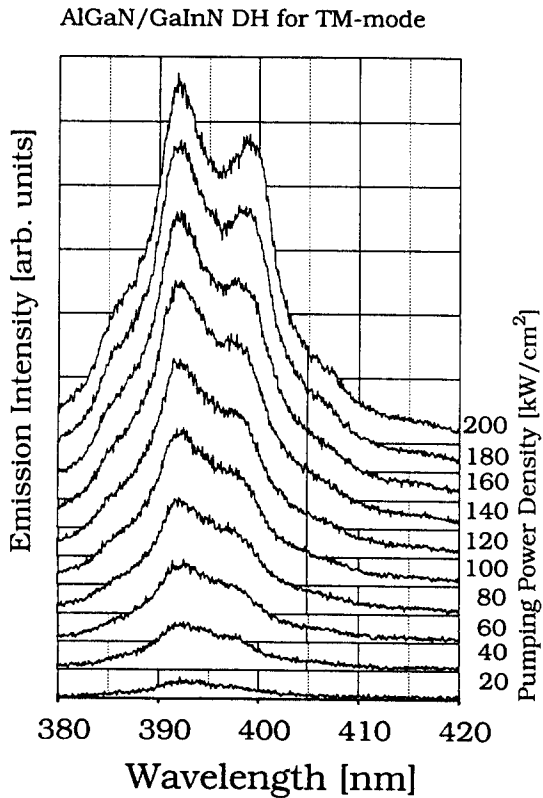


Fig. 5. TM-mode emission spectra of the AlGaIn/GaN DH at room temperature with different pumping power densities.

가하여도 광출력은 그다지 크게 증가하지 않았다. 이는 일반적으로 TM-mode에 비하여 TE-mode의 이득이 높기 때문이며, 이론적인 해석과도 잘 일치하는 것이다<sup>11)</sup>. TE-mode의 유도방출을 얻는데 필요한 입사광 밀도의 임계치를 전류밀도로 환산하면 약  $42 \text{ kA/cm}^2$ 으로서 여기서 제작한 소자구조에 대하여 실온에서 전류주입에 의한 유도방출을 실현하기에는 다소 높은 값이다. 광여기와 전류주입에 의하여 AlGaIn/GaN DH로부터의 유도방출을 얻는데 필요한 임계치를 낮추기 위해서는 보다 양질의 GaInN 활성층의 결정성 개선과 소자구조의 최적화 및 유도방출기구에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

또한 입사광 밀도를  $200 \text{ kW/cm}^2$ 로 일정하게 하고 편광각  $\theta$ 를 변화 시키었을 때 편광각  $\theta$ 에 따른 스펙트럼의 적분 강도를 그림 8에 나타내었다. 고밀도 광여기에 의하여 AlGaIn/

GaN DH의 단면으로부터 방출되는 광의 출력은 통상적인 GaAs LD와<sup>12)</sup> II-VI족 양자우물구조 LD와<sup>13)</sup> 동일하게 편광각에 대하여 선형적으로 편광되었다. 이와 같은 결과로부터 AlGaIn/GaN DH의 유도방출 광은 입사광 밀도의 임계치 이상에서 GaInN 활성층의 단면에 평행한 전기장의 방향으로 즉 TE-mode로 편광됨을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

III족 질화물반도체를 이용한 극단과장 반도체 LD의 실현이 아직 이루어지지 않고 있는 시점에서 이 연구에서는 대기압 MOVPE법으로 성장한 AlGaIn/InGaIn DH로부터 실온 고밀도 광여기에 의하여 방출되는 단면모드 유도방출특성과 편광특성을 조사하여 전류주입에 의한 유도방출의 가능성을 알아보았다. 여기광의 밀도가  $200 \text{ kW/cm}^2$ 일 때 유도방출의

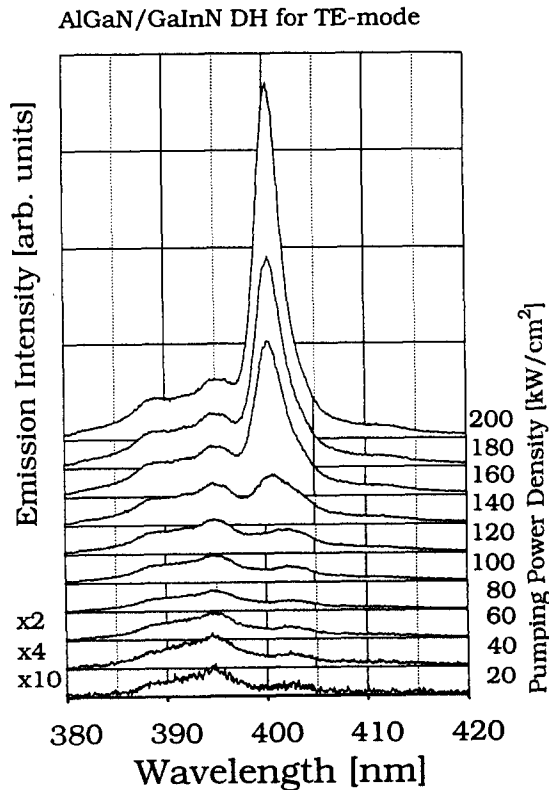


Fig. 6. TE-mode emission spectra of the AlGaIn/GaN DH at room temperature with different pumping power densities.

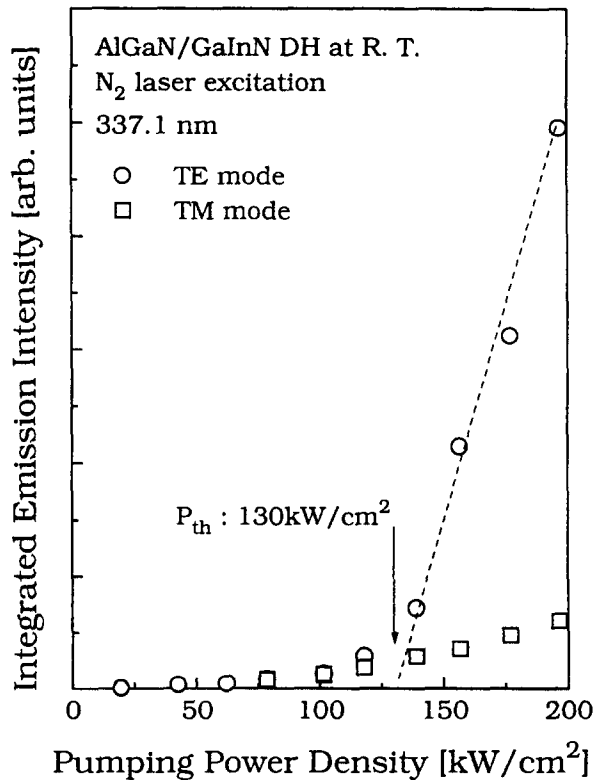


Fig. 7. The optical pumping power density dependence of the integrated emission intensity of the TE and TM-modes.

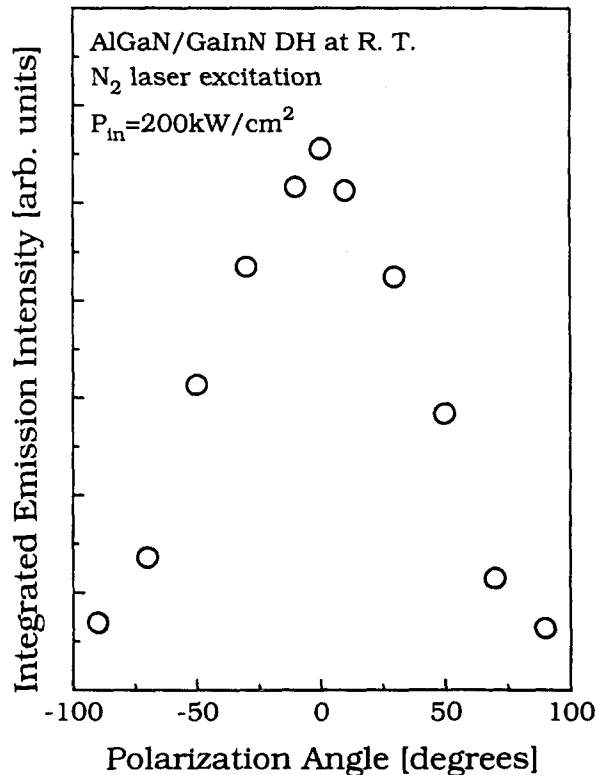


Fig. 8. The polarization angle dependence of the integrated emission intensity of the TE-mode at room temperature.

피크와 반치폭은 각각 402 nm와 18 meV 이었고, 유도방출을 얻는데 필요한 입사광 밀도의 임계치는  $130 \text{ kW/cm}^2$  이었다. 광여기에 의하여 AlGaN/InGaN DH의 단면으로부터 방출되는 유도방출 광은 임계치 이상에서 TE-mode로 선형적으로 편광 되었다. 이와 같은 결과는 AlGaN/GaN/GaN DH가 가시 단파장 LD 뿐만 아니라 근자의 반도체 LD의 실현에 공헌 할 것으로 기대되며, 아울러 전류 주입에 의한 유도방출을 실현하기 위해서는 보다 양질의 결정성장과 소자구조 및 관련된 물성에 관한 연구들이 함께 이루어져야 할 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 일본 메이조대학 전기전자공학과 I. Akasaki교수의 연구실에서 이루어진 것임을 밝히며, 연구시설을 제공하여 준 I. Akasaki교수와 H. Amano교수에게 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. A. Arimoto, Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Jap, 68, 395 (1985)
2. S. Strike and H. Morkoc, J. Vac. Sci. Technol, B 10, 1237 (1992).
3. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett, 48, 353 (1986).
4. S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys, 30, L1705 (1991).
5. H. Amano, T. Asahi, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys, 29, L205 (1990)
6. M. A. Khan, D. T. Olson, J. M. Van Hove, and J. N.Kuznia, Appl. Phys. Lett, 58, 1515 (1991)
7. W. A. Harrison, Electronic structure and the properties of solids, (W. H. Freeman and Company, San Francisco) p. 78 (1980)
8. S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, Appl. Phys. Lett, 64, 1687 (1994).
9. S. Sakai, Y. Ueta and Y. Terauchi, Jpn. J. Appl. Phys, 32, 4413 (1993)
10. K. Osamura, K. Nakajima, Y. Murakami, P. H. Shingu, and A. Ohtsuki, Solid State Commun, 11, 617 (1972)
11. H. Kobayashi, H. Iwamura, T. Saku and K. Otsuka, Electron. Lett, 19, 166 (1983)
12. T. L. Paoli, Appl. Phys. Lett, 24, 187 (1974)
13. Z. Y. J. Ren, Y. Lansari, B. Sneed, K. A. Bowers, C. Boney, D.B. Eason, R. P. Vaudo, K. J. Gossett, J. W. Cook Jr. and J. F. Schtzina, Jpn. J. Appl. Phys., 32, 663 (1993)