

Er 이온 주입된 GaN의 광학적 특성

Optical Properties of Er-implanted GaN

손창식^{1,a}
(Chang-Sik Son^{1,a})

Abstract

We have investigated the optical properties of Erbium (Er)-implanted GaN by photoluminescence (PL). Various doses of Er ion were implanted on GaN epilayers by ion implantation. Visible green emission lines due to inner 4f shell transitions for Er³⁺ were observed from the PL spectrum of Er-implanted GaN. The emission spectrum consists of two narrow green lines at 537 and 558 nm. The green emission lines are identified as Er³⁺ transitions from the ⁵H_{11/2} and ⁴S_{3/2} levels to the ⁴I_{15/2} ground state. The stronger peaks in the case with the dose of 5×10¹⁴cm⁻², together with the relatively higher intensity of the Er³⁺ luminescence in the lower doped sample. It implies that some damage remains in the case with the dose of 1×10¹⁶cm⁻². The peak positions of emission lines due to inner 4f shell transitions for Er³⁺ do not change with increasing temperature. It indicates that Er³⁺ related emission depends very little on the ambient temperature.

Key Words : Er, Implantation, GaN, Photoluminescence

1. 서 론

Erbium (Er), Europium (Eu), Thulium (Tm), Praseodymium (Pr) 등의 희토류 (rare earth) 원소에 관해서는 독특한 광학적 특성 및 발광소자로서의 응용성으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다 [1-6]. 희토류 원소에 의한 발광은 주위 온도나 희토류 원소가 주입된 모체의 성질에 거의 영향을 받지 않는다고 보고 되고 있다.

GaN은 다소 높은 결함 밀도의 조건에서도 광학적 특성이 우수하고 광역 밴드갭 (wide band-gap) 을 가지므로, 단파장 영역의 광전소자 제작을 위한 최적의 화합물 반도체 재료로서 각광받고 있다. 효율적인 광전소자 제작을 위해서는 우수한 발광 특성을 가지는 재료의 개발이 필수적이므로 희토

류 도핑된 GaN는 디스플레이 및 발광소자 제작에서 최근 많이 연구되고 있는 분야이다[7-9]. 희토류 도핑된 GaN로부터의 발광은 분광학적으로 피크의 반칙폭이 좁고, 희토류 이온 내부 준위간의 천이 (transition)에 의해 발생하므로 색 여과 (color filtering)가 필요 없다. 최근에는 Si이나 사파이어 위에 성장된 Er, Eu, Tm 및 Pr 도핑된 GaN의 광학적 특성에 관해 많은 연구결과가 보고 되고 있다[2-5].

Er은 몇몇 반도체 모체 내에 주입되었을 때 강한 녹색 발광을 일으키는 효과적인 활성체로 알려져 있다. GaN를 기초로 한 반도체 재료로 만들어진 녹색 발광소자의 개발은 적색, 녹색 및 청색 발광소자로 구성된 단일집적 발광소자 제작의 관점에서 중요한 연구과제이다. 이온 주입 (ion implantation)은 반도체 내에 불순물 원자를 주입하기 위해 널리 사용되고 있으며, 반도체 모체 내의 국부적인 영역에 고농도의 도판트 (dopant) 원자를 주입할 수 있는 현대 반도체소자 제작에서 필수적인 공정기술이다[10,11].

1. 신라대학교 광전자공학과

(부산시 사상구 과법동 산 1-1)

a. Corresponding Author : csson@silla.ac.kr

접수일자 : 2005. 10. 19

1차 심사 : 2005. 11. 9

심사완료 : 2005. 11. 18

본 연구에서는 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition)로 사파이어 위에 성장된 GaN 박막에 Er 이온을 주입하여 Er 도핑된 박막의 PL (photoluminescence) 스펙트럼 (spectrum) 으로부터 광학적 특성에 대해 고찰하고자한다. Er 도핑된 GaN 박막으로부터 Er 이온에 의한 반치폭이 좁은 가시광 영역의 녹색 발광을 관찰할 수 있었다. 또한, 다양한 도즈량으로 Er 도핑된 GaN의 광학적 특성을 조사하였다.

2. 실험

GaN에 희토류 원소를 도핑하는 방법으로는 MOCVD나 MBE (molecular beam epitaxy)로 성장 중에 Er을 도핑하거나, GaN 박막을 성장 후 박막에 이온 주입으로 Er을 주입할 수 있다. 본 실험에서는 MOCVD에 의해 성장된 GaN 박막에 이온 주입으로 Er을 주입하여 Er 도핑된 GaN 박막을 제작하였다.

200 KeV의 이온 주입 에너지에서 세 가지의 도즈 (dose), $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$, $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 및 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$, 양으로 GaN 박막에 Er을 각각 주입하였다. GaN 박막 내의 프로젝티드 (projected) 영역 및 피크 농도는 각각 약 40 nm 및 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 로 조절하였다. 주입 후에 시편들은 Er 주입으로 인한 격자 내의 결함을 완화하고, Er 이온의 활성화를 위해서 N_2 로 희석된 33 % NH_3 분위기에서 1050 °C로 30분 동안 열처리되었다. 시편의 광학적 특성은 16 K에서 He-Cd (325 nm) 레이저에 의한 PL 발광을 측정하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$, $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 및 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 의 각기 다른 도즈로 Er 도핑된 GaN에 대해서 16 K에서 측정된 PL 스펙트럼을 나타낸다.

Er 도핑된 GaN으로부터 400 nm에서의 밴드-밴드 천이에 기인한 발광 및 500 ~ 600 nm 영역에서의 깊은 준위 (deep level)와 관련된 발광이 나타났다. 또한 반치폭 (FWHM; full width half maximum)이 좁은 가시광 영역의 녹색 발광 피크들을 관찰할 수 있었다. 4f-4f 내부 준위간 천이과정에 의한 이러한 좁은 녹색 발광 피크에 관한 원인은 다음과 같이 고찰할 수 있다. GaN 밴드갭 에너지 이상의 에너지를 가지는 높은 광여기 원을

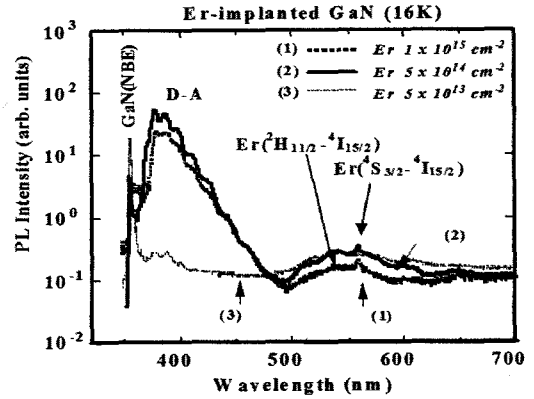


그림 1. 16 K에서 Er 도핑된 GaN의 PL스펙트럼.
Fig. 1. PL spectra of Er-doped Ga.

사용하면 전자가 가전자대로부터 전도대로 강하게 여기될 수 있기 때문에 GaN 박막 내에서 Er 이온에 대한 효과적인 에너지 전달이 가능하다. GaN 밴드갭 이상의 여기 에너지를 가지는 He-Cd (325 nm) 레이저에 의해 광여기 (photoexcitation) 될 때, GaN 내에 주입된 희토류 이온은 GaN의 전도대 및 가전자대에 생성된 전자-정공의 재결합으로부터 발생한 에너지의 전달 과정에 의해 여기될 수 있다. 즉, He-Cd 레이저에 의해 여기된 GaN 모체 내의 전자-정공의 재결합에 의해 간접적으로 Er의 발광이 여기되게 된다. 500 ~ 600 nm 영역에서의 발광은 열처리 후에 생성되는 점결함과 관련된 깊은 준위 (deep level)에 의한 것이다.

그림 2는 그림 1의 PL 스펙트럼을 보다 자세하게 나타낸 것이다. 4f-4f 천이에 기인한 반치폭이 좁은 발광 피크는 도즈량에 무관하게 일정한 위치에서 발광되는 것을 알 수 있다. 558 nm에서 발광되는 피크는 $^4\text{S}_{3/2}$ 준위에서 $^4\text{I}_{15/2}$ 기저 상태로의 천이에 기인한 것이고, 537 nm에서 발광되는 피크는 $^5\text{H}_{11/2}$ 준위에서 $^4\text{I}_{15/2}$ 기저 상태로의 천이에 기인한 것이다[10,12].

발광특성 및 PL 피크의 기원은 그림 3으로부터 고찰할 수 있다. 그림 3은 Er 도핑된 GaN의 PL 스펙트럼에서의 상대적인 에너지 준위를 나타낸다 [13]. GaN 밴드갭 에너지 (3.39 eV) 및 Er 내부 준위간의 천이 에너지가 나타나 있다. 광학적으로 활성화된 준위의 에너지는 Er 도핑된 GaN의 PL 스펙트럼에서 관찰된 피크들의 에너지를 반영하도록 조절된 것이다. 4f-4f 내부 준위간 천이에 기인한 피크들은 그림 1 및 그림 2에서 보여진 Er 도핑된

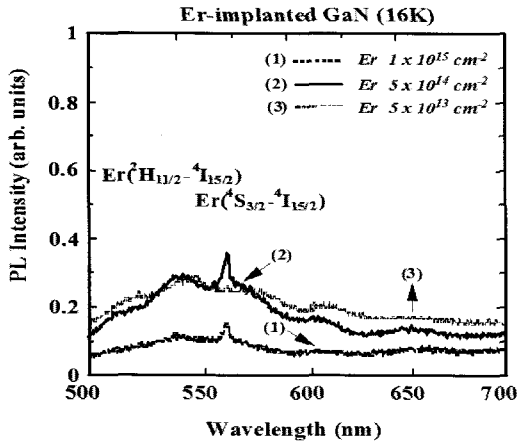


그림 2. Er 도핑된 GaN의 상세 PL 스펙트럼.
Fig. 2. PL spectra of Er-doped Ga.

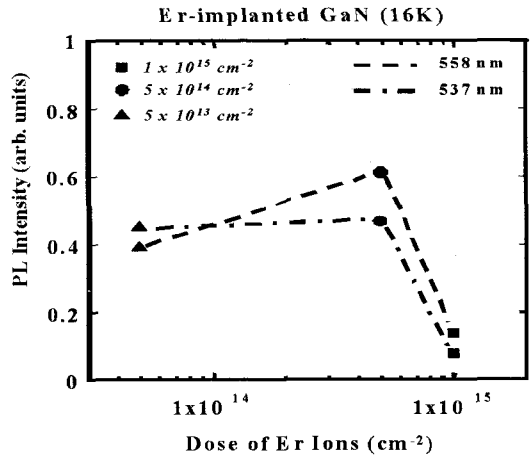


그림 4. 도즈량의 변화에 따른 537 nm 및 558 nm의 PL 피크 변화.
Fig. 4. The intensity of the PL peaks of 537 nm and 558 nm as a function of the implanted dose density.

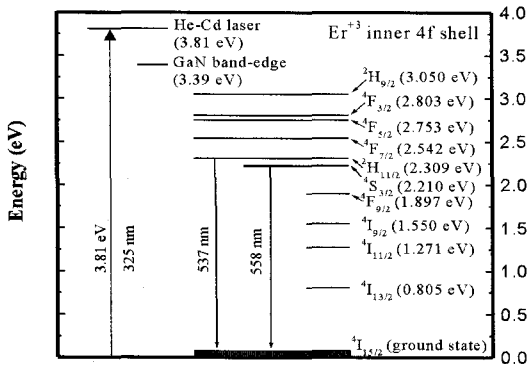


그림 3. Er 도핑된 GaN의 PL 스펙트럼에서의 상대적인 에너지 준위.
Fig. 3. Relevant energy levels in the PL spectrum of Er-doped GaN.

GaN의 PL 스펙트럼의 결과와 잘 일치한다. 그림 3에서 보듯이 가시광 영역의 반치폭이 좁은 피크들은 GaN 전도대로부터 4족 Er 이온으로 전달되는 에너지에 의한 발광된 것임을 알 수 있다. 대부분의 여기된 운반자들은 Er과 관련된 등가(isovalent) 트랩(trap)에 포획된다. He-Cd 레이저에 의해 여기된 많은 운반자들은 이들이 가진 에너지를 전달할 수 있는 Er 원자의 다양한 내부 에너지 준위에 도달할 때까지 비발광(nonradiative) 천이를 한다.

삼가의(trivalent) 희토류 이온들은 GaN 격자 내의 금속이온으로 구성된 부격자(sublattice)에서

치환형 자리(substitutional sites) 및 침입형 자리(interstitial sites)로 주입된다. 주입 후에 Er 원자들은 주로 이완된 Ga 치환형 자리에 공급된다. 이러한 Ga 자리에 주입된 Er^{3+} 에 대한 사면체 결합(tetrahedral bonding)은 일반적으로 금지된(forbidden) Er^{3+} 내부 4f-4f 준위간 천이를 가져온다. III-V족 화합물 반도체에서 희토류 불순물은 등전자(isoelectronic) 트랩을 생성한다고 알려져 있다 [14]. 그러나 III-V족 화합물 반도체에서 희토류 이온은 치환형 뿐만 아니라 다른 자리도 차지할 수 있다. 이들은 다른 불순물 또는 선천적인(native) 결함을 포함하는 복합 중심(complex center)을 생성하여 발광효율이 저하되는 원인을 제공한다.

그림 4는 도즈량의 변화에 따른 4f-4f 천이에 기인한 537 nm 및 558 nm의 PL 피크들의 변화를 나타낸다. 도즈량이 $5 \times 10^{13} cm^{-2}$ 에서 $5 \times 10^{14} cm^{-2}$ 로 증가하면 558 nm의 피크의 강도는 조금 증가하고, 537 nm의 피크의 강도는 거의 변하지 않는다. 그러나 1×10^{15} 의 도즈량에서 두 피크의 강도는 급격히 감소한다. $5 \times 10^{14} cm^{-2}$ 의 도즈량에서 강한 피크를 나타내며, 상대적으로 더 높은 도즈량($1 \times 10^{15} cm^{-2}$)에서는 주입으로 인해 생성된 더 많은 결함으로 인해 피크의 강도가 급격히 감소하게 된다. 또한 부분적으로는 농도 억제(concentration

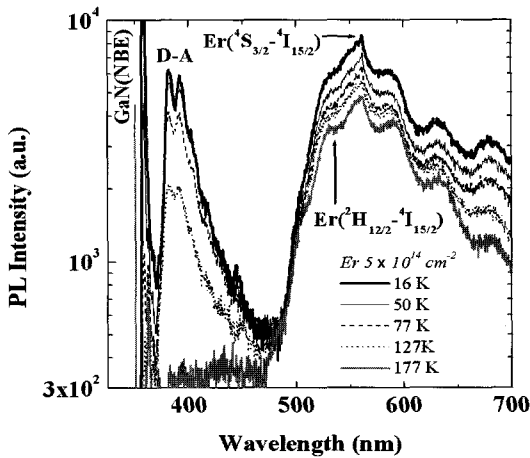


그림 5. Er도핑된 GaN의 발광특성의 온도의존성.
 Fig. 5. Temperature dependence of PL intensity of Er-doped GaN.

quenching)에 의한 효과에 의해 감소한다[10,12].

그림 5는 Er 도핑된 GaN의 발광특성의 온도의존성을 나타낸다. PL 측정온도가 증가할수록 GaN의 밴드-밴드 천이에 의한 발광의 PL 강도는 급격히 감소한다. 그러나 이에 비해 Er^{3+} 와 관련된 발광의 경우, 측정온도의 증가에도 불구하고 강도의 감소 비율이 적다. 이것은 광여기에 의해 생성된 운반자의 Er^{3+} 이온에 의한 포획율이 온도의 영향을 적게 받는다는 것을 의미한다. 또한 온도가 증가해도 Er^{3+} 이온에 대한 $4f-4f$ 천이에 기인하는 발광 피크의 위치는 변하지 않는다. 이러한 결과는 Er^{3+} 와 관련된 발광이 주위 온도에 거의 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

4. 결론

Er 도핑된 GaN 박막의 PL 스펙트럼으로부터 537 및 558 nm에서 가시광 영역의 반칙폭이 좁은 녹색 발광을 관찰할 수 있었다. 이들 발광 피크는 ${}^5H_{11/2}$ 및 ${}^4S_{3/2}$ 준위로부터 ${}^4I_{15/2}$ 기저상태로의 Er^{3+} 이온의 $4f-4f$ 내부 준위간 천이에 기인한 것이다. $1 \times 10^{15} cm^{-2}$ 의 높은 도즈 밀도를 가지는 시편 내에는 많은 결함이 존재하는 것으로 관찰되었다. $4f-4f$ 천이에 기인한 발광 피크의 위치는 PL 측정시 온도에 영향을 받지 않았다. 이것은 Er^{3+} 와 관련된 발광이 주위 온도에 거의 좌우되지 않는다는 것을 의미한다.

참고 문헌

- [1] D. S. Lee and A. J. Steckl, "Selective enhancement of blue electroluminescence from GaN:Tm", Appl. Phys. Lett., Vol. 82, No. 1, p. 55, 1999.
- [2] A. J. Steckl, M. Garter, D. S. Lee, J. Heikenfeld, and R. Birkhahn, "Blue emission from Tm-doped GaN electroluminescent devices", Appl. Phys. Lett., Vol. 75, No. 15, p. 2184, 1999.
- [3] J. B. Gruber, B. Zandi, H. J. Lozykowski, and W. M. Jadwisienczak, "Spectroscopic properties of $Sm^{3+} (4f^6)$ in GaN", J. Appl. Phys., Vol. 91, No. 5, p. 2929, 2002.
- [4] Z. Li, H. Bang, G. Piao, J. Sawahata, and K. Akimoto, "Growth of Eu-doped GaN by gas source molecular beam epitaxy and its optical properties", J. Crystal Growth, Vol. 240, p. 382, 2002.
- [5] J. Heikenfeld, M. Garter, D. S. Lee, R. Birkhahn, and A. J. Steckl, "Red light emission by photoluminescence and electroluminescence from Eu-doped GaN", Appl. Phys. Lett., Vol. 75, No. 9, p. 1189, 1999.
- [6] J. T. Torvik, R. J. Feuerstein, C. H. Qiu, J. I. Pankove, and F. Namavar, "Photoluminescence excitation measurements on erbium implanted GaN", J. Appl. Phys., Vol. 82, No. 4, p. 1824, 1997.
- [7] 배성준, 윤창주, "O₂ 분위기에서 p-GaN 층의 Mg 활성화가 GaN계 녹색 발광소자에 미치는 전류-전압특성", 전기전자재료학회논문지, 15권, 5호, p. 441, 2002.
- [8] 박준섭, "고농도의 Mg가 도핑된 GaN층을 이용한 GaN계 청자색 레이저다이오드의 동작 전압 감소", 전기전자재료학회논문지, 17권, 7호, p. 764, 2004.
- [9] 문도성, "AlGaIn/GaN 이종접합 디바이스를 위한 GaN 에피층의 전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 15권, 7호, p. 591, 2002.
- [10] J. M. Zavada, C. J. Ellis, J. Y. Lin, H. Z. Jiang, J. T. Seo, U. Himmerich, M. Thaik, R. G. Wilson, P. A. Grudowski, and R. D. Dupuis, "Annealing behavior of luminescence from erbium-implanted GaN", Mat. Sci. Eng. B, Vol. 81, p. 127, 2001.

- [11] J. Heikenfeld and A. J. Steckl, "Alternating current thin-film electroluminescence of GaA:Er", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, No. 22, p. 3520, 2000.
- [12] M. Overberg, K. N. Lee, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, W. S. Hobson, R. G. Wilson, and J. M. Zavada, "Characterization and annealing of Eu-doped GaN", *Mat. Sci. Eng. B*, Vol. 81, p. 150, 2001.
- [13] S. Kim, S. J. Rhee, D. A. Turnbull, E. E. Reuter, X. Li, J. J. Coleman, and S. G. Bishop, "Observation of multiple Er³⁺ sites in Er-implanted GaN by site-selective photoluminescence excitation spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, No. 2, p. 231, 1997.
- [14] H. J. Lozykowski, "Kinetics of luminescence of isoelectronic rare-earth ions in III-V semiconductors", *Phys. Rev. B*, Vol. 48, No. 24, p. 17758, 1993.