

## In situ Er 도핑된 GaN와 Er이 이온 주입된 GaN의 PL과 PLE 비교에 대한 연구

### Comparison of In-situ Er-doped GaN with Er-implanted GaN Using Photoluminescence and Photoluminescence Excitation Spectroscopy

김현석, 성만영, 김상식

(Hyun Suk Kim, Man Young Sung, and Sang Sig Kim)

#### Abstract

Photoluminescence (PL) and photoluminescence excitation (PLE) spectroscopy have been performed at 6 K on the 1540 nm  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  emission of  $Er^{3+}$  in *in situ* Er-doped GaN. The PL and PLE spectra of *in situ* Er-doped GaN are compared with those of Er-implanted GaN in this study. The lineshapes of the broad PLE absorption bands and the broad PL bands in the spectra of the *in situ* Er-doped GaN are similar to those in Er-doped glass rather than in the Er-implanted GaN. The PL spectra of this *in situ* Er-doped GaN are independent of excitation wavelength and their features are significantly different from the site-selective PL spectra of the Er-implanted GaN. These PL and PLE studies reveal that a single type of  $Er^{3+}$  sites is present in the *in situ* Er-doped GaN and these Er sites are different from those observed in the Er-implanted GaN. In addition, the comparison of the PL signal strength illustrates that the excitation of  $Er^{3+}$  sites in the *in situ* Er-doped GaN is less efficient than the trap-mediated excitation of  $Er^{3+}$  sites through the energy absorption of defects in Er-implanted GaN.

**Key Words** : Erbium, GaN, Photoluminescence, Photoluminescence excitation

#### 1. 서 론

반도체에 첨가된 Er 이온은 실리카 광섬유에서 가장 에너지 손실이 작은 영역대와 일치하는 1540nm 파장의  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  발광을 하기 때문에 Er 도핑된 반도체는 광통신 시스템을 위한 이상적인 물질로 여겨지고 있다. 그러나 이 반도체들은 저온(50K이하)에서 강한 발광을 하지만 상온에서는 발광하지 못하는 심각한 현상(thermal quenching) 때문

에 상온에서 작동하는 광통신용 소자 제작에 어려움을 겪고 있다. 이는 대부분의 host 반도체 물질 내에서  $Er^{3+}$  이온의 1540nm 파장대 발광의 실질적인 응용을 가로막는 한계가 되고 있다. 참고문헌 [1]에서는 host 반도체의 에너지 갭이 증가할수록  $Er^{3+}$  이온의 intra 4f shell 발광의 thermal quenching 현상이 줄어든다고 보고하고 있다. 따라서 큰 에너지 갭을 갖고 있는 GaN에 Er을 도핑하는 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다 [2-6].

Photoluminescence (PL) 과 Photoluminescence excitation(PLE) 실험을 통하여 Er 도핑된 GaN에서  $Er^{3+}$  이온의 여러 구조적인 site(Er 이온을 포함한 주위 환경)에 따른 발광 특성과 그들의 발광 과정에 대해 많은 연구가 수행되어왔다[2-12]. 또한, MOCVD로 성장된 GaN에 Er을 이온 주입시킨 시

고려대학교 전기공학과  
(서울시 성북구 안암동 5가)  
Fax : 02-3290-3894

Corresponding Author : sangsig@korea.ac.kr  
2002년 8월 26일 접수, 2002년 9월 13일 1차 심사완료,  
2002년 11월 25일 최종 심사완료

료를 PL과 PLE를 통하여 7개의 다른  $Er^{3+}$  이온의 site가 존재한다고 알려져 있다[6]. 이중 6개의  $Er^{3+}$  이온의 PL site들은 결합이나 불순물과 결합된 Er 원자들의 complex로 인한 것이었고, 7개중 오직 1개의 site만이 직접적인 4f 흡수에 의해 펌핑되었다. 이는 다른 site들의 농도가 너무 낮아서 직접적인 4f 흡수에 의한 여기가 가능하지 않기 때문이다. 최근의 PL과 PLE 연구에서는 hydride vapor phase epitaxy(HVPE)와 molecular beam epitaxy(MBE)로 성장된 GaN에 Er을 이온 주입시킨 시료에서도 이러한 7개의  $Er^{3+}$  이온 site들이 존재한다고 나타났다.

이온 주입된 GaN 시료는 900°C에서의 열처리 후에도 이온 주입시 발생하는 시료의 손상을 가지고 있다고 보고되고 있다[5]. 이러한 손상이 Er으로부터 나오는 1540nm 파장의 발광 효율을 저하시킬 수도 있다. 만약 그렇다면 이온 주입 방법이 아닌 다른 방법으로 GaN에 Er 도핑을 한다면 1540nm 파장에서 더 강한 빛을 발광할 수 있을 것이다. 이온 주입으로 유도된 손상을 피할 수 있는 Er 도핑 방법 중에 하나는 GaN 성장 중에 *in situ* 로 Er을 도핑하는 것이다. 이러한 이유로 인해 본 실험에서는 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PL과 PLE에 대한 연구를 수행하였다.

*In situ* Er 도핑된 GaN에서 host 물질은 이온주입 방법으로 Er 도핑한 GaN과는 다른 환경을 Er 이온 주위에 줄 것이다. 손상으로 인한 결합을 가진 Er 이온 complex에 기여할 수 있는  $Er^{3+}$  site의 일부가 *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 없을 것으로 기대된다. 또한 이와는 다른  $Er^{3+}$  site가 이 물질에서 형성되었을 수도 있다. 이온 주입 방법으로 Er 도핑한 GaN에서는 나타나지 않은 다른 Er 위치가 존재할 수도 있다. *in situ* Er 도핑된 GaN[9]에 형성된 Er site를 확인하고 발광 과정을 조사하기 위하여 지금까지의 연구에 사용되었던 PL, PLE 실험을 *in situ* Er 도핑된 GaN 시료에 대해서 수행하였다. 이 논문에서는 두 종류의 다른 방법으로 Er 도핑된 GaN 시료의 PL, PLE 결과의 유사점과 차이점에 대하여 자세히 논하게 될 것이다.

## 2. 실험

수평 HVPE 반응로에서 GaN 필름을 성장시키면서 *in situ* 로 Er을 도핑시켰다. N의 전구체로써 NH<sub>3</sub>를 사용하였으며, Er 도핑된 Ga를 Ga과 Er의

source로 사용하였다. Er이 도핑된 Ga를 석영보트에 담고 880°C로 가열하였으며, 기판의 온도는 1030°C였다. 이를 통하여 Er의 농도가 인 1000nm 두께의 *in situ* Er 도핑된 GaN을 얻었다.[9] 이 시료와의 비교를 위하여 MOCVD 방법으로 사파이어 기판 위에 성장된 GaN 필름에 280keV에서 조사량으로 Er을 이온 주입시켰다.[3-6] 이 때 Er의 농도는 이 되었다. 이온 주입 후 일반적인 튜브 전기로를 이용하여 900°C에서 30분동안 질소 가스를 흘려주면서 열처리하였다.

두 종류의 다른 방법으로 Er 도핑시킨 GaN 시료에 대해서 저온(6K) PL 실험을 수행하였다. 시료는 tunable Ti 도핑된 사파이어 레이저, HeNe 레이저, Ar 이온 레이저, double grating monochromator에 의해 분산된 Xe 램프, HeCd 레이저의 다양한 광원에 의해 여기되었다. PLE 스펙트럼은 double grating monochromator에 의해 분산된 Xe 램프 또는 tunable Ti 도핑된 사파이어 레이저를 이용하여 얻었다. 발광은 1m single grating monochromator를 통해 분석되었고, 냉각된 Ge PIN 검출기에 의해 검출되었다. 시료는 Janis Supervaritemp Cryostat에서 액체 헬륨 온도로 냉각되었다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1(a), (b)는 515nm 파장으로 여기시킨("green pumped") *in situ* Er 도핑된 GaN과 Er을 이온 주입시킨 GaN의 PL 스펙트럼을 보여주고 있다. 두 PL 스펙트럼 모두  $Er^{3+}$  이온의  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  전이에 의한 1540nm 피크를 보여주고 있다. Er을 이온 주입시킨 GaN의 "green pumped" PL 스펙트럼 (b)는 매우 폭이 좁은 PL 피크들을 보여주고 있는 반면에 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PL 스펙트럼 (a)에서는 두 개의 넓은 PL 밴드가 주를 이루었다.

그림 2에서 보여준 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PLE 스펙트럼은 "green pumped"  $Er^{3+}$ 의 PL 스펙트럼(그림 1(a))에서 나타나는 1538nm 피크의 위치에서 PL을 조사하였다. 이 PLE 스펙트럼은  $Er^{3+}$  이온의 intra 4f-shell 전이의 직접적인 광학적 여기에 기여할 수 있는 비교적 좁은 흡수대역과 3.5eV 에너지 갭 바로 아래에서 증가하는 흡수 꼬리(absorption tail)를 보여주고 있다. 이러한 형태의 흡수 꼬리는 무질서한 물질의 bandedge를 설명

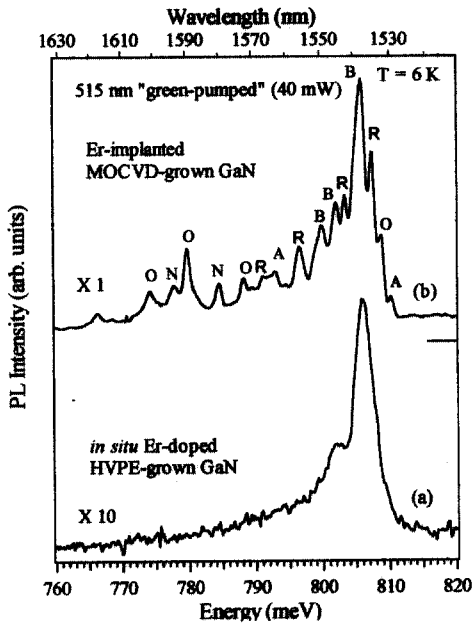


그림 1. 515nm로 펌핑시킨  $Er^{3+}$ 의  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  발광에 대한 PL 스펙트럼  
 (a) *In situ* Er 도핑된 GaN  
 (b) Er이 이온주입된 GaN.  
 Fig. 1.  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  emissions of  $Er^{3+}$  in the PL spectra pumped by 515nm wavelength light  
 (a) *In situ* Er doped GaN  
 (b) Er-implanted GaN.

하는 Urbach absorption edge[13] 또는 고농도로 도핑된 결정성의 반도체[14] 등으로 설명되어질 수 있다. 그림 2의 PLE 스펙트럼에서 378, 400, 487, 521, 543, 651, 796, 970nm에 위치한 흡수 피크들은 각각  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4H_{9/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{3/2,5/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4H_{11/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4S_{5/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ , 그리고,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 의  $Er^{3+}$  intra 4f-shell의 전이에 의한 것이다[7,8,15]

그림 3 (a)는 Xe 램프의 파장을 변화시키면서 PL 넓이 변화의 관찰을 통해 얻은 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PLE 스펙트럼을 나타내고 있다. 이 PLE 스펙트럼은 대부분의 PL 피크에서 얻어진 PLE 스펙트럼(그림 2)과 거의 동일한 형태를 보이고 있으나, Er을 이온 주입시킨 GaN의 PLE 스펙트럼(그림 3(b))과는 다른 형태를 보이고 있다.

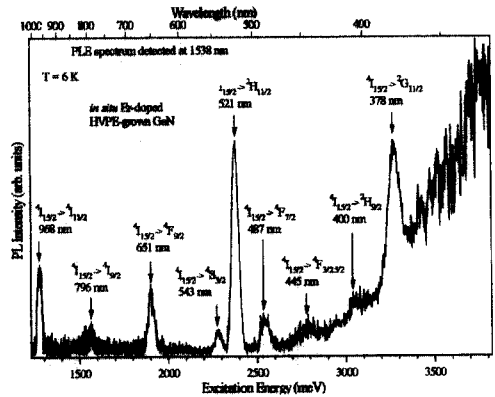


그림 2. 1538nm 피크(그림 1(a))에서의 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PLE 스펙트럼.  
 Fig. 2. The PLE spectrum taken from the *in situ* Er-doped GaN detected at the 1538 nm peak(Fig. 1.(a)).

Er을 이온 주입시킨 PLE 스펙트럼은  $Er^{3+}$ 에 기여하지 않는 폭이 넓고, 결합이나 불순물과 관련된 흡수 밴드만을 보여주고 있고, 이러한 흡수 밴드는 이온 주입된 필름의 특징이다[6]. 이 흡수 밴드들은 이온 주입과 열처리 과정 중에서 생긴 결점이나 결합-불순물 complex와 관련되어 있다. *in situ* Er 도핑된 GaN의 PLE 스펙트럼에서는 이처럼 폭이 넓고 에너지 갭 사이에 존재하는 결점이나 불순물과 관련된 흡수 밴드를 보이지 않고 있다. 이러한 점을 통해 Er을 이온 주입시킨 GaN에서는 몇 가지 종류의 결합과 관련된 흡수가 있지만, *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 한 종류의 intra 4f-shell 흡수 밴드가 존재한다는 점을 알 수 있다. 다른 표현으로 한다면 *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 한 종류의  $Er^{3+}$  site만이 존재한다는 것이다.

그림 4에서는 tunable Ti 도핑된 사파이어 레이저를 이용하여 915-995nm의 파장 범위에서 고해상도 PLE 스펙트럼을 보여주고 있다. 이 PLE 스펙트럼에서는  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 의 4f shell의 직접적인 흡수 피크들을 나타나고 있다. Er을 이온 주입시킨 GaN의 PLE 스펙트럼(그림 4(b))과 비교해 볼 때, *in situ* Er 도핑된 GaN의 PLE 스펙트럼(그림 4(a))에서는 흡수 밴드들이 더 폭이 넓고 그들의 피크 위치가 짧은 파장 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. *in situ* Er 도핑된 GaN의 PLE 스펙트럼은 Er을 이온 주입시킨 GaN의 PLE 스펙트럼에서





밴드는 분명히 F라고 명명된 피크와는 다르다. 네 개의 다른 파장으로 펌핑시킨 PL 스펙트럼의 비교를 통하여 Er이 이온 주입된 GaN에서 보여지는 Er<sup>3+</sup> site 또는 center들이 *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 존재하지 않는다는 사실을 알게 되었다.

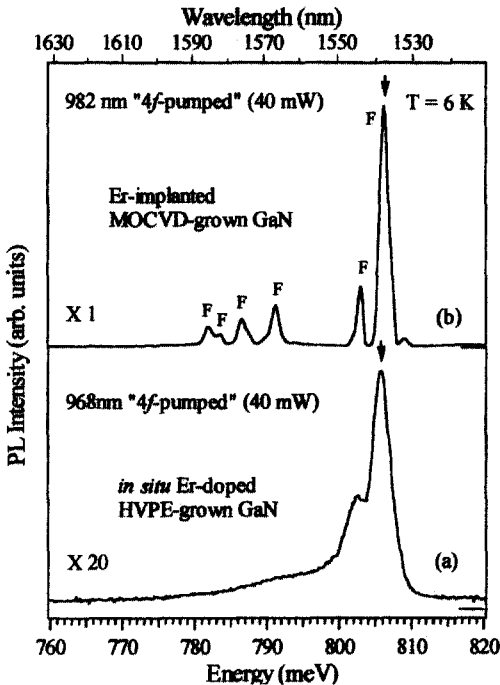


그림 7. 4f-band로 직접 여기시킨 PL 스펙트럼  
 (a) 968nm의 파장으로 여기시킨 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PL 스펙트럼  
 (b) 982nm의 파장으로 여기시킨 Er이 이온주입된 GaN의 PL 스펙트럼.

Fig. 7. The 4f-pumped PL spectra  
 (a) PL spectra of *in situ* Er doped GaN excited by 968nm wavelength  
 (b) PL spectra of Er-implanted GaN excited by 982nm wavelength.

그림 8에서는 *in situ* Er 도핑된 GaN을 325, 458, 515, 790, 968nm의 파장의 광원으로 여기시킨 다섯 개의 PL 스펙트럼을 비교하고 있다. 이 비교는 4I<sub>15/2</sub>→4I<sub>11/2</sub> 4f shell의 직접적인 흡수피크(968nm)에 의해 여기된 PL 스펙트럼 (a)에서 폭이 넓은 1540nm PL 밴드들이 나머지 세 개의 PL 스펙트럼(b-e)과 매우 일치하는 것을 보여준다. 이것은 다른 세 개의 PL에서의 Er<sup>3+</sup> site들이 968nm의 광원으로 여기된 PL의 여기 과정과 같다는 것으로 의미한다. 따라서 458, 515, 790nm의 광원에 의해 여기된 PL 스펙트럼은 각각 4I<sub>15/2</sub>→4F<sub>3/2,5/2</sub>, 4I<sub>15/2</sub>→4H<sub>11/2</sub>, 4I<sub>15/2</sub>→4I<sub>9/2</sub>의 직접적인 4f shell 흡수 피크에 의해 여기된 것에 해당된다. 반면 어떠한 4f shell 흡수 피크도 633 또는 404nm 파장에 해당되지 않기 때문에 이 파장에 의해 여기된 *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 1540nm PL 발광이 나타나지 않았다. 또한, "above-gap -pumped"(에너지 갭보다 큰 에너지의 파장으로 펌핑) PL 스펙트럼(그림 8(e))는 모든 "below-gap -pumped"(에너지 갭보다 작은 에너지의 파장으로 펌핑) PL 스펙트럼(그림 (a-d))과 같은 피크의 위치와 모양을 나타내었다. 이것은 에너지 갭보다 작은 에너지와 큰 에너지의

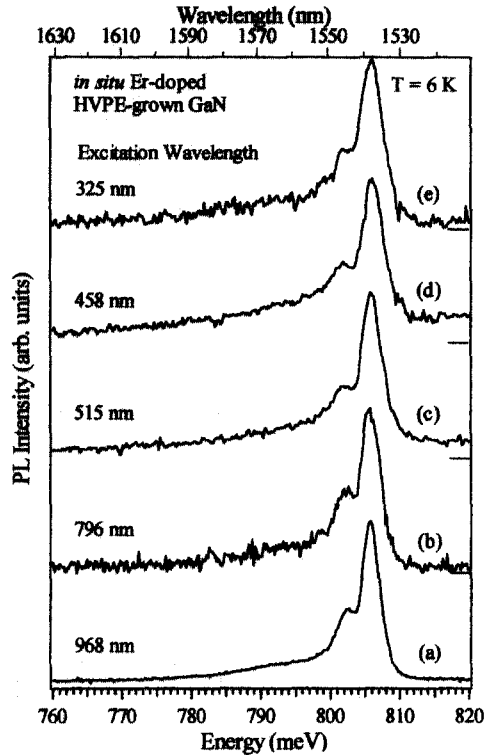


그림 8. 여러 파장으로 여기시킨 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PL 스펙트럼의 비교.

Fig. 8. The comparison of PL spectra of *in situ* Er doped GaN excited by various wavelength.

펙트럼(b-e)과 매우 일치하는 것을 보여준다. 이것은 다른 세 개의 PL에서의 Er<sup>3+</sup> site들이 968nm의 광원으로 여기된 PL의 여기 과정과 같다는 것으로 의미한다. 따라서 458, 515, 790nm의 광원에 의해 여기된 PL 스펙트럼은 각각 4I<sub>15/2</sub>→4F<sub>3/2,5/2</sub>, 4I<sub>15/2</sub>→4H<sub>11/2</sub>, 4I<sub>15/2</sub>→4I<sub>9/2</sub>의 직접적인 4f shell 흡수 피크에 의해 여기된 것에 해당된다. 반면 어떠한 4f shell 흡수 피크도 633 또는 404nm 파장에 해당되지 않기 때문에 이 파장에 의해 여기된 *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 1540nm PL 발광이 나타나지 않았다. 또한, "above-gap -pumped"(에너지 갭보다 큰 에너지의 파장으로 펌핑) PL 스펙트럼(그림 8(e))는 모든 "below-gap -pumped"(에너지 갭보다 작은 에너지의 파장으로 펌핑) PL 스펙트럼(그림 (a-d))과 같은 피크의 위치와 모양을 나타내었다. 이것은 에너지 갭보다 작은 에너지와 큰 에너지의

광원 모두 같은 Er site를 여기시켰음을 의미한다. "above-gap-pumped" PL과 "below-gap-pumped" PL의 연구를 통해 *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 오직 한 종류의 Er<sup>3+</sup> site만이 존재한다고 생각되어진다.

두 가지 시료 모두 4f shell의 직접적인 흡수 피크에 의해 여기가 가능하기 때문에 *in situ* Er 도핑된 GaN에서 한 종류의 Er site의 여기 과정은 Er이 이온 주입된 GaN에서 보여지는 4f Er site들의 여기 과정과 비슷하다. 그러나 이 두 종류의 Er site 사이에는 명백한 차이가 있다. 이온 주입된 시료에서는 에너지 갭보다 에너지가 큰 광원에 의해서는 4f Er site들이 여기되지 않았으나, *in situ* Er 도핑된 시료에서는 여기되었다. 이러한 여기가 가능한 이유로는 그림 3(b)에서 이온 주입된 시료의 비교적 폭이 좁은 bandedge와 비교하여 그림 2와 3(a)에서 보여지는 폭이 넓은 Urbach 흡수 edge를 토대로 설명이 가능하다. 폭이 넓은 Urbach 흡수 edge는 <sup>4</sup>F<sub>3/2, 5/2</sub>, <sup>4</sup>H<sub>9/2</sub>, <sup>4</sup>G<sub>11/2</sub>의 4f shell 에너지 level들을 모두 포함하지만, 이온 주입된 GaN의 폭이 좁은 밴드 edge는 4f shell의 어떠한 에너지 level과도 일치하지 않는다. 따라서 *in situ* Er 도핑된 GaN의 경우 bandedge를 통하여 GaN host 물질에서 Er site로의 에너지 전달이 4f site에 대해서 보다 Er site에 대해서 더 가능하다.

Er 도핑된 GaN 시료로부터의 PL 발광의 크기는 소자의 응용에 있어서 실질적으로 매우 중요하다. 에너지 갭보다 큰 에너지의 파장으로 펌핑한 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PL의 세기는 Er이 이온 주입된 GaN 시료보다 1/7정도 더 약했다. 에너지 갭보다 작은 에너지의 파장으로 펌핑하였을 경우 또한 *in situ* Er 도핑된 GaN의 PL 세기가 훨씬 더 약했다. 이러한 점은 *in situ* Er 도핑된 GaN은 이온 주입시 발생되는 손상이 없기 때문에 Er site의 1.54μm 발광의 효율성을 증가시키는 더욱 좋은 host 물질이라는 기대와 상반된다. 이는 결합이 적은 *in situ* Er 도핑된 GaN에서의 Er<sup>3+</sup> site들의 여기가 Er이 이온 주입된 GaN에서의 결합과 관련된 에너지 흡수에 의한 Er 이온의 여기보다 효율적이지 못하기 때문이라 여겨진다. 이는 *in situ* Er 도핑된 GaN에서 Er 이온의 cross section이 Er이 이온 주입된 GaN에서 Er site들과 연결된 결합의 cross section보다 매우 작은 것이 하나의 원인으로 생각할 수 있다.

#### 4. 결론

*In situ* Er 도핑된 GaN에서 Er<sup>3+</sup>의 1540nm 파장의 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 발광에 대한 PL과 PLE 실험을 6K의 온도에서 수행하였다. Er이 이온 주입된 GaN에서 관찰되는 선택적으로 여기되는 불연속의 Er<sup>3+</sup> site들이 *in situ* Er 도핑된 GaN에서도 존재하는지 알아보기 위하여 두 시료의 PLE와 PL 스펙트럼을 비교하였다.

*In situ* Er 도핑된 GaN에서는 여기 파장과 관련된 없는 하나의 폭이 넓은 ~1540nm Er<sup>3+</sup> PL 스펙트럼을 나타내었다. 이 하나의 폭이 넓은 1540nm 근처의 Er<sup>3+</sup> PL 밴드는 Er이 이온 주입된 GaN에서 존재하는 일곱 개의 다른 Er<sup>3+</sup> site들과 관련된 PL 밴드의 어떤 것과도 일치하지 않았다. 이는 *in situ* Er 도핑된 GaN에서는 이 일곱 개의 Er<sup>3+</sup> site들중 어떤 것도 존재하지 않고 다만 하나의 다른 종류의 Er<sup>3+</sup> site가 존재한다는 것을 의미한다. 그러나 이 한 종류의 Er site의 여기 과정은 이온 주입된 GaN에서 4f Er site들의 여기 과정과 비슷하였다. 또한, *in situ* 도핑된 시료의 폭 넓은 Er<sup>3+</sup> PL 스펙트럼을 통해 도핑 물질인 Er이 결정내에서 전기장이 위치에 따라 변하는 무질서한 영역의 자리에 존재한다고 추측할 수 있었다.

*In situ* Er 도핑된 GaN과 Er이 이온 주입된 GaN 시료에 대한 PL 세기의 비교에서 *in situ* Er 도핑된 GaN에서 Er<sup>3+</sup> site들의 여기 과정이 이온 주입된 시료에 존재하는 결합의 에너지 흡수를 통한 trap이 매개되어진 Er 이온의 여기보다 비효율적이라는 사실을 알게 되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업(KRF-2000-041-00169)의 지원에 의해 수행된 것입니다.

#### 참고 문헌

- [1] P. N. Favennec, H. L'Haridon, M. Salvi, D. Moutonnet, and Y. Le Guillou, "Luminescence of erbium implanted in various semiconductors : IV, III-V and II-VI

- materials", *Electron. Lett.*, Vol. 25, p. 718, 1989.
- [2] H. Przybylinska, A. Kozanecki, V. Glukhanyuk, W. Jantsch, D. J. As, and K. Lischka, "Photoluminescence of properties of Er doped GaN", *Physica B*, Vol. 308-310, p. 34, 2001.
- [3] S. Kim, S. J. Rhee, D. A. Turnbull, E. E. Reuter, X. Li, J. J. Coleman, and S. G. Bishop, "Observation of multiple  $Er^{+3}$  sites in Er-implanted GaN by site-selective photoluminescence excitation spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, p. 231, 1997.
- [4] S. Kim, S. J. Rhee, X. Li, J. J. Coleman, and S. G. Bishop, "Trap-mediated excitation of  $Er^{+3}$  photoluminescence in Er-implanted GaN", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, p. 2662, 1997.
- [5] S. Kim, S. J. Rhee, X. Li, J. J. Coleman, and S. G. Bishop, "Site-selective photoluminescence spectroscopy of Er-implanted wurtzite GaN under various annealing conditions", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 512, p. 381, 1998.
- [6] S. Kim, S. J. Rhee, X. Li, J. J. Coleman, and S. G. Bishop, "Excitation mechanisms of multiple  $Er^{+3}$  sites in Er-implanted GaN", *J. Electron. Mater.*, Vol. 27, p. 246, 1998.
- [7] M. Thaik, U. Hommerich, R. N. Schwartz, R. G. Wilson, and J. M. Zavada, "Photoluminescence spectroscopy of erbium implanted gallium nitride", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, p. 2641, 1997.
- [8] X. Wu, U. Hommerich, J. D. MacKenzie, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, R. N. Schwartz, R. G. Wilson, and J. M. Zavada, "Direct and indirect excitation of  $Er^{+3}$  ions in Er: AlN", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, p. 2126, 1997.
- [9] D. M. Hansen, R. Zhang, N. R. Perkins, S. Safvi, L. Zhang, K. L. Bray, and T. F. Kuech, "Photoluminescence of erbium-implanted GaN and in situ-doped GaN:Er", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, p. 1244, 1998.
- [10] 김상식, "GaN 박막 및 소자의 연구동향 : GaN:Er 의 적외선 발광", *전기전자재료*, 13권, 1호, p. 43, 2000.
- [11] Sangsig Kim, Man Young Sung, Jinki Hong, and Moon-Sook Lee, "Site-selective photoluminescence spectroscopy of er-implanted wurtzite GaN under various annealing condition", *Trans. on EEM*, Vol. 1, No. 1, p. 26, 2000.
- [12] Sangsig Kim, Man Young Sung, and Jinki Hong, "Temperature - dependent photoluminescence from Er-implanted undoped and Mg-doped GaN", *Trans. on EEM*, Vol. 1, No. 3, p. 6, 2000.
- [13] D. A. Turnbull and S. G. Bishop, "Rare earth dopants as probes of localized states in chalcogenide glasses", *J. Non-Cryst. Solids.*, Vol. 223, p. 105, 1998.
- [14] N. F. Mott and E. A. Davis, "Electronic Processes in Non-Crystalline Materials", Clarendon Press, Oxford, p. 273, 1979.
- [15] F. Gan, "Laser Materials", World Scientific, New Jersey, p. 220, 1995.
- [16] J. T. Torvik, C. H. Qui, R. J. Feuerstein, J. I. Pankove, F. Namavar, "Photo-, cathodo-, and electroluminescence from erbium and oxygen co-implanted GaN", *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, p. 6343, 1997.