

In 코도핑 된 p-GaN의 광학적 특성

안명환[†] · 정호용* · 정상조**

전남대학교 공학대학 기계 · 자동차공학부

*전남대학교 공학대학 생명 · 화학공학부

**전북대학교 반도체물성연구소

In Co-Doping Effect on the Optical Properties of P-Type GaN Epilayers

Myung Hwan An, Ho-Yong Chung, Sang-Jo Chung*

Division of Mechanical & Auto Motive Engineering, Chonnam National University, Yosu 550-749, Korea

*Division of Biotechnology and Chemical Engineering, Chonnam National University, Yosu 550-749, Korea

**Semiconductor Physics Research Center, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

(2008년 6월 19일 접수 : 2008년 8월 11일 최종수정 : 2008년 8월 12일 채택)

Abstract Mg-doped and In-Mg co-doped p-type GaN epilayers were grown in a low-pressure metal organic chemical vapor deposition technique. The effect of In doping on the p-GaN layer was studied through photoluminescence (PL), persistent photoconductivity (PPC), and transmission electron microscopy (TEM) at room temperature. For the In-doped p-GaN layer, the PL intensity increases significantly and the peak position shifts to 3.2 eV from 2.95 eV of conventional p-GaN. Additionally, In doping greatly reduces the PPC, which was very strong in conventional p-GaN. A reduction in the dislocation density is also evidenced upon In doping in p-GaN according to TEM images. The improved optical properties of the In-doped p-GaN layer are attributed to the high crystalline quality and to the active participation of incorporated Mg atoms.

Key words persistent photoconductivity, Co-doping, dislocation density.

1. 서 론

질화물 반도체는 에너지 간격을 1.9 eV(InN)로부터 6.2 eV(AIN)까지 넓은 영역에 걸쳐 조절 할 수 있기 때문에 가시광선 및 자외선 영역의 광소자 재료로 집중적인 관심을 보여 왔다. 그동안 많은 연구와 지속적인 기술개발로 다양한 분야에 응용되고 있다.¹⁻³⁾ 하지만 이들에 대한 기초적인 물리적 특성등은 명확히 밝혀지지 않은 분야가 많이 있는 실정이다. 이중에서도 p-형 GaN은 LED 나 LD 구조 성장에 있어서 구동전압을 낮추고 광의 외부양자효율을 높이기 위해서는 홀농도가 높은 양질의 결정층을 얻는 것이 매우 중요한 부분이다. 그러나 이때 불순물로 사용되는 Mg는 다른 반계준위 불순물과 달리 비교적 작은 이온화 에너지를 가지고 있어 MOCVD를 이용하여 박막을 성장할 때 낮은 비저항과 높은 홀농도를 갖는 p-형 GaN 박막을 얻기가 힘들다.⁴⁻⁸⁾

이러한 점을 때문에 p-형 GaN에 대한 특성연구는 꾸준한 연구결과에도 불구하고 만족할만한 성과들이 명확

하지 않아 이에 대한 향상을 위한 연구들을 지금도 많이 수행하고 있다. 최근에 p-형 GaN 특성을 높이기 위한 방안으로 Mg과 In을 코도핑하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 p-형 GaN 박막에 대한 In 도핑한 효과를 밝히기 위한 연구는 극히 일부로서 그 분석도 구조적인 박막의 성질을 XRD 분석을 통해서 변형율을 밝히는 정도로 전기적인 특성이나 광학적 특성연구는 잘 이루어지지 않았다.⁹⁾ 최근 Chang들에 의해 In과 코도핑 한 광학적 특성연구가 일부 이루어졌다.¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 Mg 도핑된 p-형 GaN와 여기에 In을 코도핑한 GaN 시료에 대한 광학적 특성을 비교 분석하기 위해 MOCVD를 이용하여 성장하였다. 성장된 시료들의 특성분석을 위해 PL, PPC 및 TEM을 측정하였다. PL 측정결과 In과 코도핑 한 시료들의 발광 특성이 개선됨은 물론 피크의 위치도 단파장 쪽으로 이동하는 현상을 보였다. 그동안 질화물반도체들에 대한 PPC 현상의 연구는 많이 이루어져 왔으나 대부분의 해석을 캐리어들의 이동과 관련된 것들이 대부분이며, 시료 두께에 따른 PPC 현상에 대한 설명과 InGaN에 Si을 도핑시키면 PPC 현상이 감소하는 등 이러한 연구결과가 소수에 불과하다.^{11,12)} 더욱이 In과 Mg을 코도핑 한 GaN 시

[†]Corresponding author

E-Mail : mhwann@chonnam.ac.kr (M. H. An)

료에 대한 PPC 현상은 지금까지 보고 된 바 없다.

본 연구에서 PPC 측정결과 In과 Mg을 같이 첨가했을 때 PPC 현상이 감소되고 광전류가 증가되는 현상이 나타났다.

또한 TEM 사진을 통해 In을 코도핑 한 시료들이 전위밀도가 감소함을 확인하였는데 이러한 현상들이 In 불순물과 어떤 관련이 있는지에 대하여 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 GaN와 InGaN 박막은 MOCVD를 이용하여 c-plane Al_2O_3 기판위에 성장하였다. GaN 성장은 박막성장전에 1,150°C 수소분위기 속에서 열적으로 표면 클리닝을 실시하고, 530°C 온도로 25 nm 핵층과 1,100°C 온도에서 300 nm의 undoped GaN을 성장하고 그 위에 1050°C에서 Mg과 In을 불순물로 사용하여 성장하였다. 성장된 시료들은 열처리한 후 홀농도가 $2\sim 3 \times 10^{17} cm^{-3}$ 이었다.

성장된 시료들에 대하여 실온특성을 조사하기 위해 PL, PPC, TEM을 측정하였다. PL측정은 여기광으로 20 mW cm^{-2} power density를 갖는 325 nm 파장의 He-Cd 레이저를 사용하였다. PPC 측정은 1,000 W 텅스텐 할로겐 램프와 Shimadzu AQV50 spectrometer를 사용하였으며, PPC 측정시에는 GaN 시료의 에너지 띠간격에 해당하는 광에너지를 시료에 조사시켰다. 측정시간은 광조사에 의한 rising curve나 광 차단에 의한 curve가 안정한 값에 이르도록 충분한 시간간격을 두고 측정하였다. 측정전에 실질적인 암전류를 찾기 위해 바이어스전압을 인가한 상태에서 6시간 이상 dark 상태를 유지하여 안정시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 Mg가 도핑된 GaN, In과 Mg을 코도핑한 GaN의 PL 스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 의도적으로 불순물을 도핑하지 않은 GaN의 경우, 실온에서 3.4 eV 근처에서 주피크가 나타난다. 그림에서 보듯이 불순물을 도우핑 한 시료의 경우 장파장 쪽으로 피크가 이동함을 볼 수 있다. Mg가 도핑 된 GaN의 경우 2.95 eV 을 정점으로 넓은 PL 피크가 나타난 반면, In과 Mg을 코도핑 한 시료에서는 3.2 eV 쪽으로 피크가 이동함을 볼 수 있고, PL 강도도 25% 정도 증가하였다. 코도핑 함으로써 PL 피크가 단파장 쪽으로 이동하는 현상은 Chang¹⁰⁾등이 발표한 내용과 일치한다. Chang등은 Mg 만 도핑한 시료에서 2.8 eV 피크는 얇은 주개에서 Mg와 관련된 깊은 준위로 전이하던지, 또는 깊은 주개준위에서 Mg 반개준위로 전이하는 피크라고 설명하고 있다. 여기에 같은 조건으로 In을 소량 코도핑하여 성장한 시료들의 PL

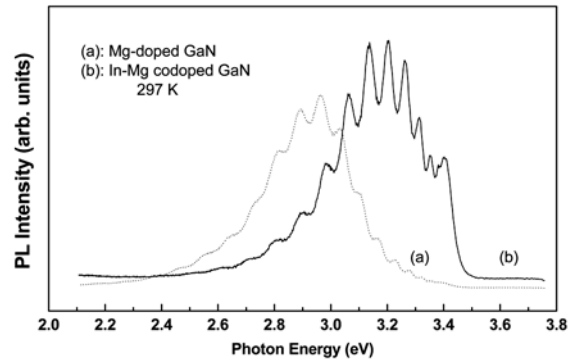


Fig. 1. Room temperature PL spectrum of (a) Mg-doped and (b) In-Mg co-doped GaN.

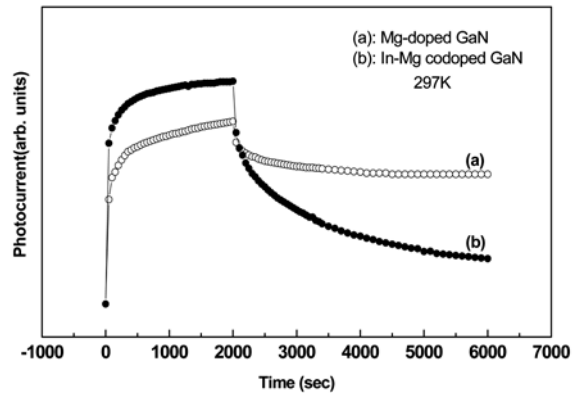


Fig. 2. Room temperature PPC spectrum of (a) Mg-doped and (b) In-Mg co-doped GaN.

피크들은 2.8 eV 피크에 3.2 eV 근처 shoulder 피크가 나타나는데 이는 전자들이 전도대에서 isolated 된 Mg_{Ga} 준위로 전이한다고 해석하고 있다.^{13,14)} In을 코도핑 했을 때 3.1 eV 피크가 나타나는 현상은, 일반적으로 Mg을 도우핑한 시료의 경우 V_N (nitrogen vacancy)가 거의 Mg 농도와 비슷하여 $Mg_{Ga}-V_N$ complex을 형성하는 방식의 전하 보상으로 설명된다. 그러나 Mg와 In을 조금 도우핑 하면 성장과정에서 Ga incorporation이 급격히 감소한다. 이 같은 이유는 표면에 있는 In 원자들 때문에 V/III 비가 높게 되어, 이것이 V_N 을 감소시키게 되고 상대적으로 Mg_{Ga} 가 증가함으로써 3.2 eV 피크가 나타난다고 설명하고 있다. 하지만 In 도핑양이 많게 되면 거친 표면상태와 결정성의 저하로 InGa 이 많이 발생하여 이들이 발광 효율을 저하시키는 결과로 나타났다. 따라서 In을 코도핑 하면 PL 피크가 단파장쪽으로 이동하는것은 In incorporation에 의해 V_N 가 감소하고 Ga 빈자리는 Mg_{Ga} 로 채워지는 결과로 분석되어졌다.

코도핑 한 시료들을 이같은 논리의 해석이 가능한지를

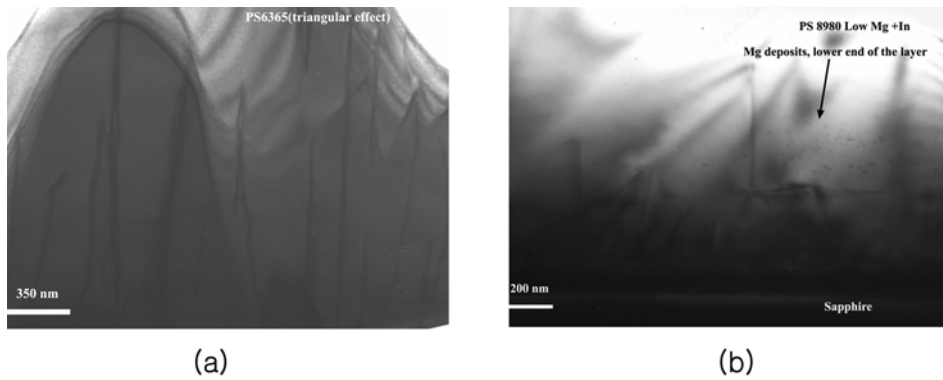


Fig. 3. Cross-sectional TEM image of (a) Mg-doped and (b) In-Mg co-doped GaN.

확인하기 위해 PPC 실험을 실시하였다. 질화물 반도체에 대한 PPC 현상은 그동안 많이 연구되어왔다.^{11,12)} 반도체에서 PPC 현상은 시료의 에너지 띠간격에 해당하는 빛을 시료에 일정시간 조사시킨 후 빛을 제거하면 암전류로 바로 돌아오지 않고 제거 한 후에도 전도성이 일정시간 지속적으로 유지되는 현상을 말한다. 의도적으로 불순물을 도핑하지 않은 GaN에서 나타나는 현상은 Ga 빈자리가 그 주요인으로 설명하였다.¹¹⁾ 따라서 Mg을 도핑한 시료에서는 PPC 현상이 많이 감소하는 결과를 보이기도 하였다.

Fig. 2는 Mg을 도핑한 GaN와 In과 코도핑한 GaN 시료에 대한 PPC 스펙트럼을 나타낸 것이다. Mg가 도핑된 시료에서도 강한 PPC 현상은 나타났다. 하지만 In 과 코도핑 한 시료의 경우 의도적으로 도핑하지 않은 GaN와 Mg만 도핑 한 시료와는 현저하게 PPC 현상이 줄어들 수 있다.

또한 암전류 상태에서 시료에 광을 조사했을 때 광전류의 세기도 Mg만을 도핑 한 시료에 비하여 상대적으로 증가하였다.

Mg이 도핑된 GaN 시료에서 나타나는 PPC 현상은 수소 패시베이션 (H passivation) 이 주 요인으로 설명하고 있다.^{15,16)} 그림에서 보여주듯이 In과 코도핑 한 시료에서 PPC 현상이 현저하게 감소하는 것은 In을 코도핑 함으로써 isolated 수소원자 나 Mg-H complex와 같은 불순물 결합들을 감소시키기 때문으로 해석된다. Chang 등도 SIMS을 통해 In을 코도핑한 시료에서 수소 농도가 감소함을 보고하였는데 이들과도 잘 일치한다.¹⁰⁾ 따라서 In과 코도핑 한 시료에서 PPC 현상이 급격히 감소하는 이유는 In원자들이 수소 passivation 효과를 감소시켜는 결과로 인해 나타남을 알 수 있다.

또한 In을 코도핑 한 시료에서 PL과 PC의 세기가 증가하는 이유가 결정성과 어떤 관련이 있는지를 위해 TEM을 통해 확인해 보았다.

Fig. 3은 Mg만 도핑한 GaN와 In과 코도핑한 GaN에

대한 TEM 사진을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 In과 코도핑 한 GaN가 전위밀도가 현저하게 감소함을 볼 수 있다. GaN에 In을 도핑하면 In 원자들에 의해 전위 밀도 낮아져 결정성이 좋아지고, 또한 p-형 GaN에 In을 도핑하면 표면이 매우 양호하여 전기적 특성도 개선되며, pinning에 의해 native 결함이나 전위밀도를 감소시킨다는 보고가 있다.¹⁷⁻²¹⁾ 따라서 그림에서 보여주듯이 In을 Mg와 코도핑 함으로서 전위밀도가 감소함을 알 수 있으며, 이런 결과가 스트레스를 감소시키는등 결정성이 좋아지는 결과를 가져와 PL과 PC의 세기가 증가하는 것으로 분석되어졌다.

4. 결 론

MOCVD에 의해 성장된 Mg 을 도핑한 p-형 GaN와 In을 코도핑 한 GaN에 대하여 PL, PPC, TEM을 측정하였다. PL 측정결과 Mg 만 도핑한 시료의 경우 2.95 eV을 정점으로 한 PL 피크만 나타난 반면, In을 코도핑한 시료의 경우 3.2 eV 근방으로 피크가 이동하였다. 이러한 현상은 Mg와 In을 코도핑 하면 성장과정에서 Ga incorporation이 급격히 감소하여 표면에 있는 In 원자들 때문에 V/III 비가 높게 되고, 이것이 상대적으로 V_N 을 감소시켜 Mg_{Ga} 들이 증가하기 때문으로 분석되었다. 또한 PPC 현상이 코도핑 한 시료에서 현저하게 줄어드는 현상은 In을 코도핑 함으로써 isolated 수소원자 나 Mg-H complex와 같은 불순물 결합들을 감소시키기 때문으로 해석되었다. In을 코도핑 한 시료에서 TEM 사진으로 확인된 전위밀도 감소는 PL이나 PC 세기를 증가시키는 요인으로 분석되었다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 전남대학교 교수 연구역량강화사업 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. Nagahama, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, L797 (1995).
2. S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and H. Sugimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, L74 (1996).
3. B. W. Lim, Q. C. Chen, J. Y. Yang and M. A. Khan, *Appl. Phys., Lett.*, **68**, 3761 (1996).
4. E. R. Glaser, T. A. Kennedy, K. Doverspike, L. B. Rowland, D. K. Gaskill, J. A. Freitas, Jr. M. Asif Khan, D. T. Olson, J. N. Kuznia and D. K. Wickenden, *Phys. Rev.*, **B51**, 13326 (1995).
5. W. Gotz, N. M. Johnson and D. P. Bour, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 3470 (1996).
6. M. T. Hirsch, J. A. Wolk, W. Walukiewicz and E. E. Haller, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1098 (1997).
7. C. H. Qiu and J. I. Pankove, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 1983 (1997).
8. D. J. Chadi, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2970 (1997).
9. S. Yamaguchi, M. Kariya, T. Kashima, S. Nitta, M. Kosaki, Y. Yukawa, H. Amano and I. Akasaki, *Phys. Rev.*, **B64**, 035318 (2000).
10. F. -C. Chang, W. -C. Chou, W. -H. Chen, M. -C. Lee, W. -K. Chen and H. -Y. Huang, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 7504 (2005).
11. S. J. Chung, M. Senthil Kumar, Y. K. Kim, C.-H. Hong, H. J. Lee, E. -K. Suh and Y.- K.Jun, *J. Cryst. Growth*, **277**, 133 (2005).
12. S. J. Chung, M. S. Jeong, O. H. Cha, C.-H. Hong, E. -K. Suh and H. J. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 1021 (2000).
13. U. Kaufmann, M. Kunzer, M. Maier, H. Obloh, A. Ramakrishnan, B. Santic and P. Schlotter, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1326 (1998).
14. J. K. Sheu, Y. K. Su, G. C. Chi, B. J. Pong, C. Y. Chen, C. N. Huang and W. C. Chen, *J. Appl. Phys.*, **84**, 4590 (1998).
15. C. Johnson, J. Y. Lin, H. X. Jiang, M. Asif Khan and C. J. Sun, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1808 (1996).
16. J. Z. Li, J. Y. Lin, H. X. Jiang, A. Salvador, A. Botchkarev and H. Morkoc, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1474 (1996).
17. S. Yamaguchi, M. Kariya, S. Nitta, T. Kashima, M. Kosaki, Y. Yukawa, H. Amano and I. Akasaki, *J. Cryst. Growth*, **221**, 327 (2000).
18. S. Yamaguchi, M. Kariya, S. Nitta, H. Amano and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 2385 (2000).
19. H. K. Cho, C. S. Kim, Y. K. Hong, Y. -W Kim, C. -H. Hong, E. -K. Suh and H. J. Lee, *Phys. Status Solidi B*, **228**, 231 (2001).
20. F. C. Chang, K. C. Shen, H. M. Chung, M. C. Lee, W. H. Chen and W. K. Chen, *J. Phys. (China)*, **40**, 637 (2002).
21. H. M. Chung, W. C. Chuang, Y. C. Pan, C. C. Tsai, M. C. Lee, W. H. Chen, W. K. Chen, C. I. Chiang, C. H. Lin and H. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 897 (2000).