

## 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층을 이용한 GaN계 청자색 레이저다이오드의 동작 전압 감소

### Reduction of Operating Voltage of GaN-based Blue-violet Laser Diode by using Highly Mg Doped GaN Layer

곽준섭<sup>1,a</sup>  
(Joon Seop Kwak<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

In order to reduce operating voltage of the GaN based blue-violet laser diodes, the effect of highly Mg doped GaN layer, which was grown below ohmic contact metals, on contact resistivity as well as operating voltage has been investigated. The addition of the highly Mg doped GaN layer greatly reduced contact resistivity of Pd/Pt/Au ohmic contacts from  $5.2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$  to  $7.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . In addition, it also decreased device voltage at 20 mA by more than 3 V. Temperature-dependent sheet resistivity of the highly Mg doped GaN layer suggested that the reduction of the contact resistivity could be attributed to predominant current flow at the interface between the Pd/Pt/Au contacts and p-GaN through a deep level defect band, rather than the valence band.

**Key Words** : GaN based laser diode, Specific contact resistance, Operating voltage

#### 1. 서 론

GaN 는 밴드갭이 약 3.36 eV(366 nm)로서 밴드갭이 1.9 eV인 InN 와 6.2 eV인 AlN와 함께 alloy를 형성하면서 자외선 대역으로부터 청색 혹은 녹색 대역까지 레이저로 개발될 수 있는 가능성을 가지고 있는 재료이다. 특히, 405 nm 대역의 파장을 지니는 청자색 레이저다이오드는 차세대 Digital Versatile Disk(DVD)의 광원으로 주목을 받으면서 이에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다 [1,2]. 차세대 DVD의 광원으로서의 GaN 계 청자색 레이저 다이오드는 낮은 aspect ratio와 RIN (Relative Intensity Noise) 값 등의 광학적 특성과

더불어, 10000 시간의 수명시간 (Lifetime)이 확보 되어야 한다. 10,000시간 이상의 수명시간을 갖는 GaN계 청자색 레이저 다이오드를 개발하기 위해서는 동작전압과 동작전류를 낮추어야하고 방열 효율을 증가시켜야 한다[2,3]. 이 중에서 동작전압은 레이저 다이오드의 수명에 영향을 미치는 중요한 요소로, 이를 낮추기 위해서는 리지 웨이브가이드 (Ridge Waveguide)의 상부에 형성되는 p형 GaN 층과 금속전극과의 접촉저항을 낮추는 것이 필수적이다[4]. 그러나 p형 GaN 의 hole 농도를  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  이상으로 높이기 어렵고 p형 GaN의 일함수보다 큰 일함수를 갖는 금속이 존재하지 않기 때문에 p형 GaN층에 대하여 낮은 접촉저항을 갖는 오믹접촉을 형성하기 위해서는 많은 연구가 필요하다[4].

낮은 접촉저항을 갖는 오믹접촉을 형성하기 위하여, 현재까지는 주로 접촉되는 금속 및 p형 GaN 의 표면처리를 통해 접촉저항을 낮추는 연구가 활

1. 삼성종합기술원 포토닉스랩

(경기도 용인시 기흥읍 농서리 산 14-1)

a. Corresponding Author : jskwak@sait.samsung.co.kr

접수일자 : 2004. 4. 12

1차 심사 : 2004. 4. 26

심사완료 : 2004. 5. 12

발히 진행되어 왔다[5,6]. 그러나 p형 GaN층의 전기적 특성에 따른 접촉저항의 변화에 대한 연구는 폭 넓게 진행되지 못하고 있다. 본 논문에서는 p형 GaN에 대한 접촉저항을 낮추고자, 고농도로 Mg가 도핑된 p형 GaN 접촉층을 오믹접촉 금속과 p형 GaN 사이에 형성하고, 이 층이 p형 GaN에 대한 접촉저항 및 GaN 레이저 다이오드의 동작전압에 미치는 영향을 연구하였다. Mg가 고농도로 도핑된 GaN 접촉층은 오믹접촉 금속과 p형 GaN층 사이에서 운반자들의 흐름을 증가시킴으로써 접촉저항을 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 실험결과 Mg가 고농도로 도핑된 층을 형성함으로써 p형 GaN에 대한 접촉저항이  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  대로 급격히 감소되었고 이에 따라 GaN 계 레이저 다이오드의 turn-on 전압 역시 3 V 이상 감소되었다.

## 2. 실험

본 실험에서는 먼저 고농도로 Mg가 도핑된 GaN 층이 접촉저항에 미치는 영향을 연구하고자, 금속유기 화학기상증착 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)법을 이용하여 사파이어기판 상에 GaN 버퍼층과 1  $\mu\text{m}$  두께의 도핑하지 않은 GaN 층 및 1  $\mu\text{m}$  두께의 Mg를 도핑한 p형 GaN 층을 성장한 후, 300 - 500 Å 두께의 고농도로 Mg가 도핑된 GaN 층을 성장하였고 비교를 위하여 이 층을 성장하지 않은 시편도 준비하였다. 이와 더불어 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층을 1  $\mu\text{m}$  두께로 성장한 후 Hall효과 측정 장비를 이용하여 정공농도 및 저항을 측정하였다. 또한, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층 내의 Mg의 양은 이차이온질량분석기(Secondary Ion Mass Spectroscopy)로 측정하였다. 접촉저항 측정을 위하여 성장된 시편들에 유도결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma) 식각장비로 mesa 형태의 패턴을 하였고 mesa 위에 포토레지스트로 TLM (Transfer Length Method) 패턴을 형성한 후, 전자선 증착장비로 Pd (200 Å)/Pt (300 Å)/Au (800 Å)의 오믹접촉 금속을 증착하였다. TLM 패턴에서 오믹접촉 전극 패드의 크기는  $100 \times 200 \mu\text{m}^2$  이었고 전극패드간의 간격은 3, 8, 13, 18, 23, 28  $\mu\text{m}$  이었다.

이와 더불어, 고농도로 Mg가 도핑된 GaN 층이 GaN계 레이저 다이오드의 동작전압에 미치는 영향을 연구하고자, 금속유기 화학기상증착법으로

InGaN/InGaN 다중양자우물 (Multi Quantum Well)로 된 활성층 (Active Layers), 도핑되지 않은 GaN 웨이브가이드 층, AlGaIn/GaN 초격자로 된 클래드 층 (Cladding Layer) 및 Mg가 도핑된 AlGaIn 전자차단층 (Electron Blocking Layer)이 포함된 레이저 다이오드 구조를 성장하였고, 이 구조의 최상층에 고농도로 Mg가 도핑된 GaN 층을 성장하였으며, 비교를 위하여 이 층이 없는 레이저 다이오드 구조도 성장하였다. GaN계 레이저 다이오드 소자를 제조하고자 화학보조 이온선 식각 (Chemically Assisted Ion Beam Etching) 장비로 리지 웨이브가이드 구조 및 mesa구조를 형성하였고 n형 GaN층의 오믹접촉으로 Ti/Al/Cr/Au를 증착하였으며 리지 웨이브가이드 최상층에 p형 GaN 또는 Mg가 고농도로 도핑된 GaN층의 오믹접촉으로 Pd/Pt/Au를 증착하였다. 거울면 (Mirror Facet)은 클리빙 (Cleaving) 법으로 형성하였고 고반사 거울면은 세 쌍의  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 를 증착하여 형성하였으며, 공진기 (Cavity) 길이는 600  $\mu\text{m}$  이었다.

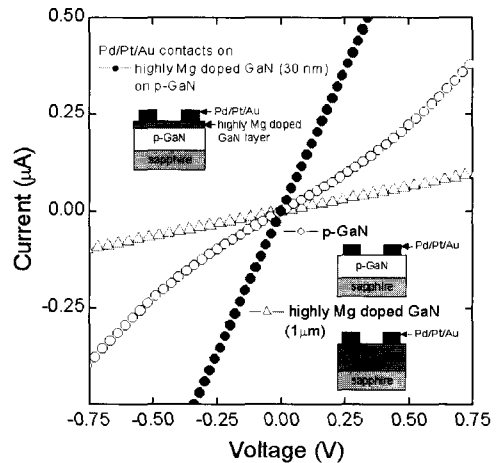


그림 1. p형 GaN층위에 30 nm 두께의 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층이 있는 시편과 이 층이 없는 시편 및 1  $\mu\text{m}$  두께의 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층에 형성된 Pd/Pt/Au 오믹접촉 전극의 전류-전압 특성.

Fig. 1. Current-voltage characteristics of Pd/Pt/Au ohmic contacts on p-GaN with/without highly Mg doped GaN layer (30 nm) and on highly Mg doped GaN layer (1  $\mu\text{m}$ ).

### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 두께가 300 Å인 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층이 p형 GaN층위에 성장된 시편과 이 층이 없는 시편에 형성된 Pd/Pt/Au 접촉의 전류-전압 특성을 나타낸다. 전류-전압 특성은 전극패드간 거리가 10 μm 인 접촉 전극에서 측정하였다. 또한, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층을 1 μm 두께로 성장한 시편에 형성된 Pd/Pt/Au 접촉의 전류-전압 특성을 함께 나타내었다. 그림 1로부터 p형 GaN층위에 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층이 성장된 시편에 형성된 Pd/Pt/Au 접촉이 p형 GaN층만 성장된 시편에 형성된 접촉에 비하여 전류-전압 특성이 직선적이었고 그 기울기가 더 커서 낮은 저항을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층이 p형 GaN층과 Pd/Pt/Au 접촉 전극 계면에서의 전류 흐름을 급격히 증가 시켰고 더 좋은 오믹접촉을 형성시켰음을 의미한다. 한편, 고농도의 Mg가 도핑된 층이 1 μm 두께로 성장한 시편에 형성된 Pd/Pt/Au 접촉의 경우, 전류-전압 특성은 직선적이었으나 기울기는 낮았다. 이는, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층의 비저항이 34.7 Ω·cm로 매우 커서 저항이 증가되었기 때문이라고 사료된다.

그림 2는 Pd/Pt/Au 오믹접촉 전극패드 간격의 변화에 따른 저항의 변화를 나타낸다. 그림 2에 형성된 Pd/Pt/Au 오믹접촉의 경우, 전극패드 타난 바와 같이 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층 위간격이 3 μm에서 28 μm 로 증가함에 따라 전극패드 사이의 저항은 450 Ω에서 1,650 Ω으로 증가하였으나 p형 GaN층 위에 형성된 Pd/Pt/Au 오믹접촉의 경우는 2,400 Ω에서 3,700 Ω으로 증가하였다. 이는 Mg가 고농도로 도핑된 GaN층에 의하여 전극패드 사이의 저항이 급격히 감소하였음을 보여 준다.

그림 2로부터 구한, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층의 유무에 따른 접촉저항 및 p-GaN의 면저항 차이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층이 없이 p형 GaN층에 형성된 Pd/Pt/Au 오믹접촉은  $5.2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 높은 접촉저항을 나타내었으나, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층위에 형성된 Pd/Pt/Au 오믹접촉의 접촉저항은  $7.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 낮은 저항을 나타내었다. 면저항의 경우, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층의 유무에 따라 각각 9755 Ω/sq. 및 10100 Ω/sq.을 나타내었다. 이는, 300 Å의 두께로 성장된

고농도의 Mg가 도핑된 GaN층은, 1 μm 두께로 성장된 p형 GaN에 비하여 매우 얇은 두께이므로 면저항에는 영향을 미치지 않은 반면, 오믹접촉저항에는 지대한 영향을 끼쳤음을 의미한다.

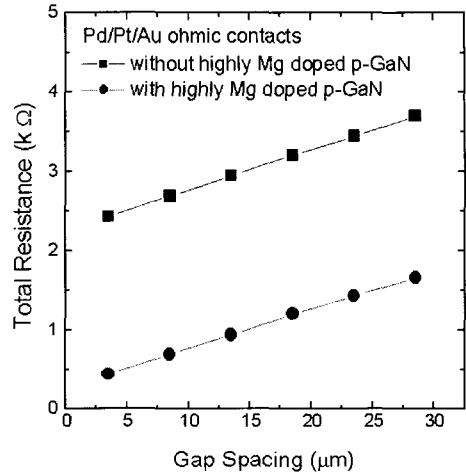


그림 2. Pd/Pt/Au 오믹접촉 전극패드 간격의 변화에 따른 저항의 변화.  
Fig. 2. Variation of total resistance of Pd/Pt/Au ohmic contacts as a function of pad spacing.

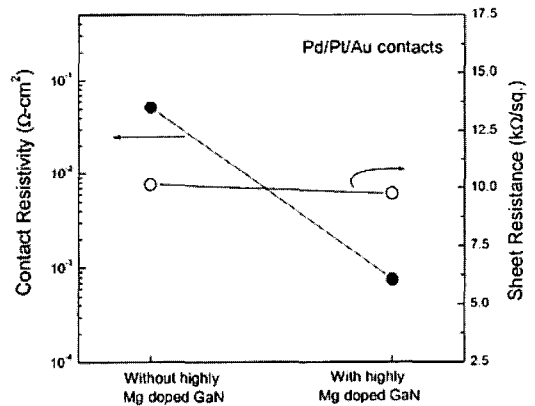


그림 3. 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층의 유무에 따른 Pd/Pt/Au 오믹접촉저항 및 p형 GaN의 면저항 변화.  
Fig. 3. Effects of addition of highly Mg doped GaN layer on specific contact resistance of Pd/Pt/Au ohmic contacts and sheet resistivity of p-GaN channel layer.

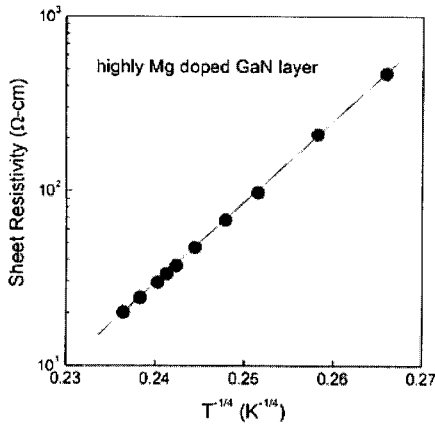


그림 4. 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층의 측정온도에 따른 면저항의 변화.

Fig. 4. The dependence of the sheet resistivity of highly Mg doped GaN layer on measurement temperature.

이상의 결과로부터, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층이 p형 GaN 층과 Pd/Pt/Au 오믹접촉 사이에 삽입되면 전류-전압특성을 향상시키고 오믹패드 사이의 저항을 낮추어 접촉저항을  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  대로 낮추었음을 알 수 있다. 본 연구에서는 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층이 Pd/Pt/Au 오믹접촉과 p형 GaN 층 사이의 저항을 낮춘 원인을 밝히 고자, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층을  $1 \mu\text{m}$  두께로 성장시킨 시편에 대하여 측정온도 (T)의 변화에 따른 면저항의 변화를 조사하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 고농도의 Mg가 도핑된 GaN의 면저항은 측정온도가 감소할수록 증가하였고, 면저항의 로그값과 측정온도의 1/4 승이 직선적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있었다. 이러한 관계는 고농도의 Mg가 도핑된 GaN에서 운반자들의 흐름은 깊은 에너지 준위를 갖는 결합밴드를 통한 variable-range hopping (VRH) 전도 (Conduction)에 의하여 이루어질 수 있음을 의미한다[7,8]. 깊은 에너지 준위를 갖는 결합밴드는 금속과 반도체 사이의 운반자 흐름을 변화시킨다고 보고되어 왔다[9-11]. Shiojima 등[9]은 Ni/p-GaN 계면에서 깊은 에너지 준위를 갖는 결합밴드에 의하여 운반자들이 포획되고 방출됨에 따라 공핍층의 두께가 크게 변화되는 현상을 보고하였고, Yu 등[10]은 Ni/p-GaN 계면에서 반도체 표면지역에 존재하는 결합에 의한 터널링이 관찰되었음을 보고

하였다. 또한, Yamamoto 등[11]은  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 의 매우 낮은 운반자 농도를 갖는 저온성장된 GaAs에 형성된 오믹접촉이  $1.5 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 낮은 저항을 나타내었다고 보고하였고, 이는 EL2와 유사한 깊은 준위의 결합이 운반자의 흐름을 증가시킨 것에 기인한다고 보고하였다. 본 연구에서도, 낮은 정공농도( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )를 갖는 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층을 p형 GaN층 위에 성장함으로써, Pd/Pt/Au 접촉의 접촉저항이  $7.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 급격히 낮아지는 결과를 얻었다. 이는 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층에 존재하는 깊은 준위를 갖는 결합밴드가 Pd/Pt/Au 오믹접촉으로부터 p형 GaN층으로 흐르는 운반자들의 흐름을 증가시켰기 때문이라고 사료된다.

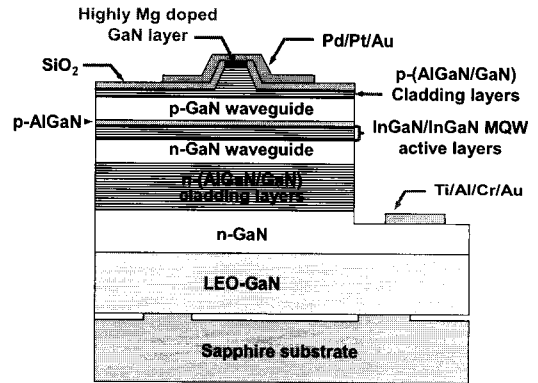


그림 5. 고농도로 Mg가 도핑된 GaN층을 갖는 GaN 계 청자색 레이저 다이오드의 단면도.

Fig. 5. Schematic cross-sectional diagram of GaN based blue-violet laser diode with highly Mg doped GaN layer.

이상의 결과를 바탕으로 GaN계 청자색 레이저 다이오드의 동작전압을 낮추기 위하여 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층을 레이저 다이오드 구조에 성장하였고, 이 층의 유무에 따른 동작전압을 비교하였다. 그림 5는 본 연구에서 사용된 청자색 레이저 다이오드의 단면구조를 보여주는 도식도이다. InGaIn/InGaIn 다중양자우물로 된 활성층의 위아래로 웨이브가이드 층과 클래드 층이 성장되었고, 활성층 상부의 클래드 층에 리지 형태로 식각된 리지 웨이브가이드가 존재하여 활성층으로 주입되는 전류를 제한시키고 광 모드 (optical mode)를 형성한다. 본 연구에서는 리지 웨이브가이드 상부와

Pd/Pt/Au p형 전극 사이에 고농도로 도핑된 GaN 층을 성장하였고, 이에 따른 동작전류의 변화를 조사하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 리지 웨이브가이드 상부와 Pd/Pt/Au p형 전극 사이에 고농도로 도핑된 GaN층이 없는 경우 7.4 V의 매우 높은 turn-on 전압을 나타내었으나, 이 층이 있는 경우 turn-on 전압이 3.9 V로 급격히 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 고농도로 도핑된 GaN층이 존재함에 따라, 20 mA에서의 동작전압도 8.8 V에서 4.9 V로 낮아졌다. 이는 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층이 Pd/Pt/Au p형 전극으로부터 클래드 층으로의 운반자 흐름을 증가시켰기 때문이라고 사료되며, 낮은 동작전압을 갖는 청자색 레이저 다이오드를 구현하기 위해서는 고농도의 Mg가 도핑된 GaN층이 p형 전극층과 클래드층 사이에 성장되는 것이 필수적이라는 것을 보여준다.

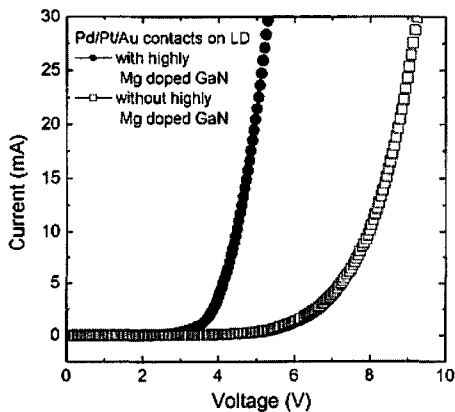


그림 6. Pd/Pt/Au p형 전극 아래에 성장된 고농도로 도핑된 GaN층의 유무에 따른 청자색 레이저 다이오드의 전류-전압 특성.

Fig. 6. Current-voltage characteristics of blue-violet laser diode with/without highly Mg doped GaN layer, which was grown below Pd/Pt/Au p-electrode.

#### 4. 결론

본 논문에서는 청자색 레이저 다이오드의 동작 전압을 낮추기 위하여 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층을 성장하고 이 층이 접촉저항과 레이저 다이오드의 turn-on 전압에 미치는 영향을 연구하였다. p형 GaN 층과 Pd/Pt/Au 오믹접촉 사이에

성장된 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층은 오믹접촉의 전류-전압특성을 향상시켰고 오믹패드 사이의 저항을 낮추어 접촉저항을  $5.2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$  에서  $7.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  로 급격히 낮추었다. 이는, 측정온도에 따른 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층의 면저항 변화 측정으로부터, Mg가 고농도로 도핑된 GaN 층에 존재하는 깊은 준위의 결함밴드가 오믹접촉 금속과 p형 GaN층사이의 운반자들의 흐름을 증가시켰기 때문이라고 사료된다. 이에 따라, 고농도의 Mg가 도핑된 GaN 층을 리지 웨이브가이드 상단에 성장함으로써 GaN 계 청자색 레이저 다이오드의 20 mA에서의 동작전압을 3 V 이상 감소시킬 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] S. Nakamura and G. Fasol, "The Blue Laser Diode", Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- [2] 남옥현, "차세대 HD-DVD 광원용 GaN based laser diode의 개발동향", 전기전자재료학논문지, 15권, 6호, p. 31, 2002.
- [3] T. Tojyo, T. Asano, M. Takeya, T. Hino, S. Goto, S. Uchida, and M. Ikeda, "GaN-based high power blue-violet laser diodes", Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, Vol. 40, p. 3206, 2001.
- [4] H. Morkoc, "Nitride Semiconductors and Devices", Heidelberg: Springer-Verlag, p. 191, 1999.
- [5] J. K. Kim, K. J. Kim, B. Kim, J. N. Kim, J. S. Kwak, Y. Park, and J. L. Lee, "Effects of surface treatment using aqua regia solution on the change of surface band bending of p-type GaN", J. Electron. Mater. Vol. 30, p. 129, 2001.
- [6] J. S. Jang and T. Y. Seong, "Mechanisms for the reduction of the Schottky barrier heights of high-quality nonalloyed Pt contacts on surface-treated p-GaN", J. Appl. Phys., Vol. 88, p. 3064, 2000.
- [7] J. Singh, "Physics of Semiconductors and their heterostructures", New York, MacGraw-Hill, p. 749, 1993.
- [8] D. C. Look, D. C. Walters, M. O. Manasreh,

- J. R. Sizelove, C. E. Stutz, and K. R. Evans, "Anomalous Hall-effect results in low-temperature molecular-beam-epitaxial GaAs: Hopping in a dense EL2-like band", *Phys. Rev. B*, Vol. 42, p. 3578, 1990.
- [9] K. Shiojima, T. Sugahara, and S. Sakai, "Current transport mechanism of p-GaN Schottky contacts", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, p. 4353, 2000.
- [10] S. Yu, D. Qiao, L. Jia, S. S. Lau, Y. Qi, and K. M. Lau, "Study of Schottky barrier of Ni on p-GaN", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, p. 4536, 2001.
- [11] H. Yamamoto, Z-Q. Fang, and D. C. Look, "Nonalloyed ohmic contacts on low-temperature molecular beam epitaxial GaAs: Influence of deep donor band", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57, p. 1537, 1990.