

15-5-11

O₂ 분위기에서 p-GaN 층의 Mg 활성화가 GaN계 녹색 발광소자에 미치는 전류-전압특성

The Influence of the Mg-doped p-GaN Layer Activated in the O₂ Ambient on the Current-Voltage Characteristics of the GaN-Based Green LEDs

윤창주, 배성준

(Chang-Joo Youn and Seong-Jun Bae)

Abstract

The electrical properties of the GaN-based green light emitting diodes(LEDs) with the Mg-doped p-GaN layer activated in N₂ or O₂ ambient have been compared. For the N₂-ambient activation the current-voltage behavior of LEDs has been found to be improved when the Mg dopants activation was performed in the higher temperature. However, for the O₂-ambient activation the current-voltage characteristic has been observed to be enhanced when the Mg dopants activation was carried out in the lower temperature. The minimum forward voltage at 20 mA was obtained to be 4.8 V for LEDs with the p-GaN layer activated at 900°C in the N₂ ambient and 4.5 V for LEDs with the p-GaN layer treated at 700°C in the O₂ ambient, respectively. The forward voltage reduction of the LEDs treated in the O₂-ambient may be related to the oxygen co-doping of the p-GaN layer during the activation process. The O₂-ambient activation process is useful for the enhancement of the LED performance as well as the fabrication process since this process can activate the Mg dopants in the low temperature.

Key Words : Green LED, P-GaN activation, Co-doping, O₂ ambient, Post-annealing

1. 서 론

최근 들어 III-족 질화물 반도체를 이용한 광소자 및 고전력 전기소자의 개발이 활발히 진행되고 있다[1,2]. 이러한 소자제작에 있어 p-GaN 층의 전도성을 높이거나 금속과의 오믹 접합저항(specific contact resistivity)을 낮추는 것이 당면 과제이다. 높은 전도성의 p-GaN 층은 LD(laser diode)와 LED(light emitting diode), 또는 전기소자의 오믹 금속접합 면에서 발생하는 열을 감소시

켜 소자성능을 향상시킬 수 있다. 또한 소자가 신뢰성 있게 동작하기 위해서는 금속과 p-GaN층의 접합저항은 최소한 $10^{-4} \Omega\text{cm}^2$ 보다 낮은 값이 필요하다[3]. 이러한 낮은 접합저항을 얻기 위해서는 오믹 금속과 p-GaN 층 접합 면에 형성된 쇼트키(Schottky) 포텐셜을 터널링(tunneling)으로 캐리어가 통과할 수 있을 정도로 p-GaN 층의 농도가 높아야 한다. 그러나 상온에서 받게 도펀트(dopant)로 사용되는 Mg은 H와 결합하여 받게 도펀트를 보상하는 효과(compensating effect)로 나타나는 율이 크기 때문에 높은 홀 농도를 갖는 p-GaN 층을 얻기는 쉽지 않다[4,5]. 또한 홀 농도를 높이기 위해 Mg의 도핑량을 증가시키면 동시에 Mg과 관계된 자연적인 결함들(native defect level)이 증가하여 p-GaN 층의 전도성을 오히려

전북대학교 반도체물성연구센터

(전북 전주시 덕진동 664-14)

Tel : 063-270-3651 Fax : 063-270-3585

E-mail : sprcrie@moak.chonbuk.ac.kr)

2001년 12월 6일 접수, 2002년 1월 2일 1차 심사완료,

2002년 2월 21일 최종 심사완료

감소시키는 결과를 초래하기도 한다[6,7]. 따라서 소자제작 측면에서 p-GaN 층에 도핑된 Mg의 활성화를 촉진시켜 오믹 금속의 접합저항을 낮추는 것이 필요하다. 또한 소자구조 내에서 p-GaN 층의 기생저항을 낮추어 전류-전압특성을 개선하는 연구도 필요하다. 그러나 지금까지의 연구는 소자구조가 아닌 p-GaN 층에 대한 연구가 대부분이다. Ho 등[8]은 p-GaN 층에 Ni/Au 금속을 접합한 후 후열처리 공정을 O₂가 포함된 분위기에서 수행하여 4 x 10⁻⁶ Ωcm²의 접합저항 값을 얻었다. 이러한 접합저항의 감소는 O₂에 의해 p-NiO/p-GaN 이중접합이 형성됨으로써 기존의 Ni/p-GaN 접합의 포텐셜(0.3 eV)보다 낮은 포텐셜(0.15 eV)이 이루어져 접합저항이 감소하는 것으로 보고하였다[9]. 한편 Korotkov 등[10]은 MOVPE(metal organic vapour phase epitaxy)를 이용하여 Mg와 주게 도펀트인 O를 코도핑(co-doping) 시켜 p-GaN을 성장하였다. 성장 후 N₂ 분위기, 950℃에서 열처리하여 2 x 10¹⁸ cm⁻³의 홀 농도를 얻었다. 이는 Mg의 활성화 에너지가 170±5 meV에서 135±5 meV으로 감소되어 얻어진 결과이다. 코도핑 방법은 넓은 에너지띠 반도체에서 이론적으로 제시된 것으로 p형 도펀트(Mg, Be 등)와 n형 도펀트(Si, O 등)를 코도핑 함으로써 높은 전도성을 얻을 수 있다[11]. 그러나 위 연구에서 얻어진 결과는 두께 2 μm 정도의 p-GaN에 대한 결과이고 발광소자 구조에 사용되는 0.2 - 0.3 μm 두께의 얇은 p-GaN 층과 비교하여 보면 활성화에 필요한 가열온도 및 시간이 다를 수 있다. 본 연구에서는 소자구조에 포함된 p-GaN 층의 활성화 공정 중 가스 분위기(O₂ 또는 N₂)를 다르게 하여 각각 소자를 제작한 후 전기적인 특성을 비교하였다. 지금까지 발표된 p-GaN 층에 대한 연구 결과는 주로 오믹 접합에 관한 것이며 실제 소자의 경우는 오믹 접합저항 뿐만 아니라 p-GaN 층의 기생저항도 소자의 성능에 영향을 주므로 발광소자에서 p-GaN 층을 O₂ 분위기에서 활성화 처리하면 어떤 영향을 주는지 알아보려고 한다. 적용할 소자는 사파이어 기판 위에 n-GaN 층을 성장하고 활성층으로는 InGaN/GaN(30 Å/80 Å) 양자우물 층을 성장하였다. 그 위에 Mg이 도핑된 p-GaN 층을 2000 Å 두께로 성장하여 소자구조를 완성하였다. 소자구조를 성장한 후 p-GaN 층의 도펀트인 Mg의 활성화 공정을 N₂ 또는 O₂ 분위기에서 열처리한 후 오믹 금속접합을 하여 소자제작을 완료하였

다. 제작 후 N₂ 또는 O₂ 분위기에서 활성화를 수행한 소자의 전류-전압특성을 비교하여 활성화 분위기가 소자에 미치는 효과에 대하여 조사 하고자 한다.

2. 실험

p-GaN 에피층을 MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition: AIX200RF)를 이용하여 사파이어 기판(c-plane) 위에 성장하였다. 녹색 발광소자 구조는 먼저 도핑하지 않은 GaN 핵 성장 층을 560℃에서 25nm 성장하고 그 위에 Si이 도핑된 n-GaN(전자 농도 = 3 x 10¹⁸ cm⁻³)을 4μm 두께로 형성하였다. 다음 활성층으로 InGaN/GaN(30 Å /80 Å) 양자우물 층을 5층 쌓고 그 위에 Mg 도핑된 p-GaN 층을 2000 Å 성장하여 소자구조를

표 1. GaN계 녹색 발광소자의 제작 과정.

Table 1. The fabrication processes of the GaN-based green light emitting diodes.

공정 순서	내 용
1.SiO _x 증착 (PECVD)	압력: 0.1 Torr, 온도: 350 ℃, 가스유량:2 sccm SiH ₄ /40 sccm N ₂ O 증착율:350 Å/min
2.GaN식각 (ICP)	가스유량:20 sccm Cl ₂ /20 sccm Ar 동작압력:10 mTorr, ICP 소스 세기(상부): 700 W, RF 척(chuck)세기(하부): 100 W, 식각율: 4000 Å/min
3.p-GaN 활성화	RTA 열처리온도: 600℃ ~ 900℃
4.표면처리	BOE, DI 처리, 각각 5분
5.p-GaN 오믹접촉	동작압력:3×10 ⁻⁶ Torr, Ni/Au(5/5 nm)
6.n-GaN 오믹접촉	Ti/Al (30 nm / 70 nm)
7.n, p-pad 증착	Ni/Au (30 nm /100 nm)
8.후속 열처리	RTA 처리 : 600℃, 30초

완성하였다. p-GaN 층의 활성화 공정은 N₂ 또는 O₂ 분위기 속에서 600°C에서 900°C까지 100°C 간격으로 각각 열처리하였다. 가열시간은 120초 또는 30초 동안 N₂ 또는 O₂ 분위기에서 수행하였다. 소자의 오믹 접합은 n-GaN 에피층에는 Ti/Al/Ni/Au, p-GaN 층에는 Ni/Au 을 사용하였고 금속과의 오믹 접착을 향상시키기 위해서 N₂ 또는 O₂ 분위기에서 30초 동안 후속 열처리를 수행하였다. 소자제작에 사용한 공정 과정은 정리하여 표 1에 나타내었다. 소자의 전기특성은 전류-전압계(HP 4155 A)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Mg이 도핑된 p-GaN 층의 특성

p-GaN 층을 성장하기 위해서 biscyclopentadienylmagnesium(Cp₂Mg)을 도펀트 소스로 이용하여 Mg을 도핑하면서 두께 1.7μm의 GaN 에피박막을 성장하였다. Cp₂Mg 유량은 0.34 ~ 4.02 μmol/min까지 변화시키면서 성장하였고, Cp₂Mg 유량과 성장온도 변화에 따라 성장한 각 시료를 표 2에 정리하였다.

표 2에 보인 MA 그룹과 MB 그룹의 박막 성장 온도는 각각 1130°C와 1090°C 이다. 그림 1은 시료 MA2에 대하여 금속 열처리 장치로 30초 동안 N₂ 분위기 속에서 온도를 변화시키면서 Mg의 활성화 공정을 수행한 후 측정된 홀 이동도와 홀 농도를 보였다. 그림 1에 보인 바와 같이 Mg이 활성화되는 최적 열처리 온도는 900°C ~ 1000°C 이었고, 성장온도가 다른 시료들도 이 온도 영역 내

표 2. Cp₂Mg 유량을 변화시키면서 성장한 p-GaN 에피박막.

Table 2. The p-GaN epilayers grown by varying the flow rate of Cp₂Mg.

Sample	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	MA6
f _{Cp2Mg} (μmol/min)	0.72	0.85	2.0	2.31	3.2	4.02
Sample	MB1	MB2	MB3	MB4	MB5	MB6
f _{Cp2Mg} (μmol/min)	0.34	0.43	0.47	0.60	0.72	0.85

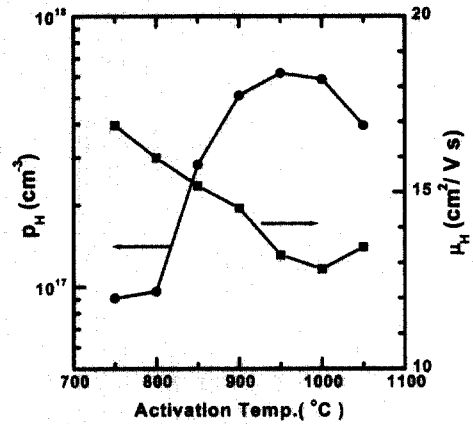


그림 1. p-GaN 에피박막의 활성화 온도 변화에 따른 홀 농도 및 홀 이동도.
Fig. 1. The Hall concentration(P_H) and Hole mobility(μ_H) of the p-GaN epilayer annealed in the various activation temperature.

에서 최적 값을 나타내었다. 열처리하지 않은 시료에서도 홀 이동도와 홀 농도가 각각 18 cm²/V·s와 4 x 10¹⁶ cm⁻³으로 측정되었는데, 이것은 p-GaN 층을 고온에서 성장 후 N₂ 분위기 속에서 냉각하는 동안 Mg-H 복합체로부터 어느 정도 H가 해리 되어 활성화되기 때문으로 생각된다. 그림에서 보듯이 700°C 이하의 열처리는 효과가 없는 것으로 볼 수 있고, 온도가 950°C까지는 홀 농도가 증가하지만 그 이상의 온도에서는 약간 감소하는 경향을 보인다.

그림 2는 MA2 시료의 이차이온질량분석(secondary-ion mass spectrometry:SIMS) 결과이다. 이에 따르면 GaN에 포함된 Mg의 도핑량은 2 ~ 5 x 10¹⁹ cm⁻³ 이었으며, 홀 농도는 그림 1에 보인 것처럼 Mg의 도핑량 보다 훨씬 적은 1 ~ 7 x 10¹⁷ cm⁻³ 정도였다. 즉 Mg의 도핑량에 비하여 활성화된 Mg의 양은 수 퍼센트 미만으로 매우 작음을 알 수 있다. 일반적으로 Mg의 도핑량을 증가시키면 SIMS 측정에서 보인 것처럼 GaN 층에 포함된 Mg의 양은 증가하지만, 홀 농도는 에피박막에 포함된 Mg 양에 비례하지 않는다. 최근 연구결과에 따르면 홀 농도를 증가시키기 위해 여러 가지 방법이 이용되었으며, Mg과 다른 도펀트 소스를 같이 도핑하기도 하였다[10,12]. 본 연구에서 성장한

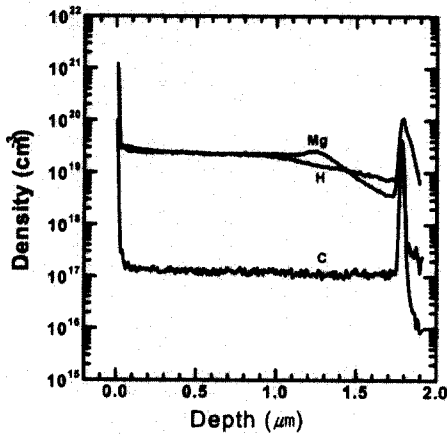


그림 2. p-GaN 에피박막의 깊이에 따른 이차이온 질량분석, Mg농도는 2×10^{19} atoms/cm³ 정도 측정되었다.

Fig. 2. SIMS depth profile showing the Mg concentration (2×10^{19} atoms/cm³) in p-GaN epilayer.

p-GaN:Mg 시료의 홀 농도는 최적의 성장과 열처리 조건에서 $6 \sim 7 \times 10^{17}$ cm⁻³을 얻었다.

그림 3은 Cp₂Mg 유량을 변화시키면서 성장한 각 시료들을 N₂ 분위기, 950°C에서 열처리한 후 측정된 홀 이동도와 홀 농도이다. 최적의 홀 농도는 Cp₂Mg 유량 약 0.6 ~ 0.9 μmol/min 에서 얻어진 $5 \sim 6.5 \times 10^{17}$ cm⁻³ 이었다. 반면 Cp₂Mg 유량이 2.0 μmol/min 이상 증가하면 홀 농도는 각각 2.88×10^{17} cm⁻³, 2.33×10^{17} cm⁻³, 1.57×10^{17} cm⁻³ 이었고 이에 따른 홀 이동도는 12.53 cm²/V·s, 12.84 cm²/V·s, 14 cm²/V·s 으로 약간 증가하는 경향을 보인다. 이것은 Cp₂Mg 유량(Mg 주입량)과 홀 농도에 관하여 이미 발표된 연구결과와 같은 경향을 보인다[13,14].

3.2 p-GaN 층의 활성화 열처리 분위기가 발광 소자에 미치는 영향

p-GaN 층에 주입된 Mg의 활성화 처리가 녹색 발광소자에 미치는 효과를 보기 위해서 2000 Å 두께의 p-GaN 층을 가진 녹색 발광소자를 성장하였다. 성장 후 N₂ 또는 O₂ 가스분위기에서 Mg의 활성화 공정을 가열온도 600°C에서 900°C까지 100°C

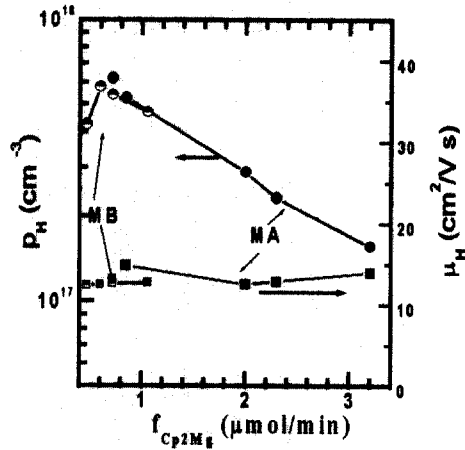


그림 3. Cp₂Mg 유량을 변화시키면서 성장한 p-GaN 층을 N₂ 분위기, 950°C에서 30초 동안 열처리한 후 측정된 홀 농도 및 홀 이동도.

Fig. 3. The hall concentration (P_H) and Hole mobility (μ_H) of the p-GaN epilayer after annealing at 950°C for 30 sec in the N₂ ambient. These epilayers were grown by varying the flow rate of Cp₂Mg.

간격으로 변화시키고 열처리 시간은 120초 또는 30초 동안 수행하였다. 활성화 공정 후 n-GaN 층에 Ti/Al/Ni/Au, p-GaN 층에는 Ni/Au 오믹 접합을 형성한 후 600°C에서 N₂ 또는 O₂ 분위기에서 30초 동안 후열처리하여 소자를 제작하였다.

그림 4(a)는 N₂ 또는 O₂ 가스분위기 속에서 120초 동안 p-GaN 층을 활성화 처리하여 제작한 녹색 발광소자의 전류-전압곡선이다. 각 온도에 따라 활성화 처리한 후 제작한 발광소자를 전류 20 mA에서 측정된 소자의 동작전압은 그림 4(b)에 보였다.

N₂ 분위기에서 열처리한 소자의 동작전압은 온도에 따라 각각 5.8 V(900°C)와 6.2 V(800°C), 7.9 V(700°C), 9.7 V(600°C)를 보였다. 열처리 온도가 높은 소자의 전류-전압특성이 개선되어졌다. 이 같은 동작전압의 변화는 열처리 온도의 증가에 따라 p-GaN 층에 포함된 Mg의 활성화 효율의 증가에 주로 기인하는 것으로 판단된다. 이것은 소자구조가 아니고 p-GaN 층만 성장하고 질소 분위기에서

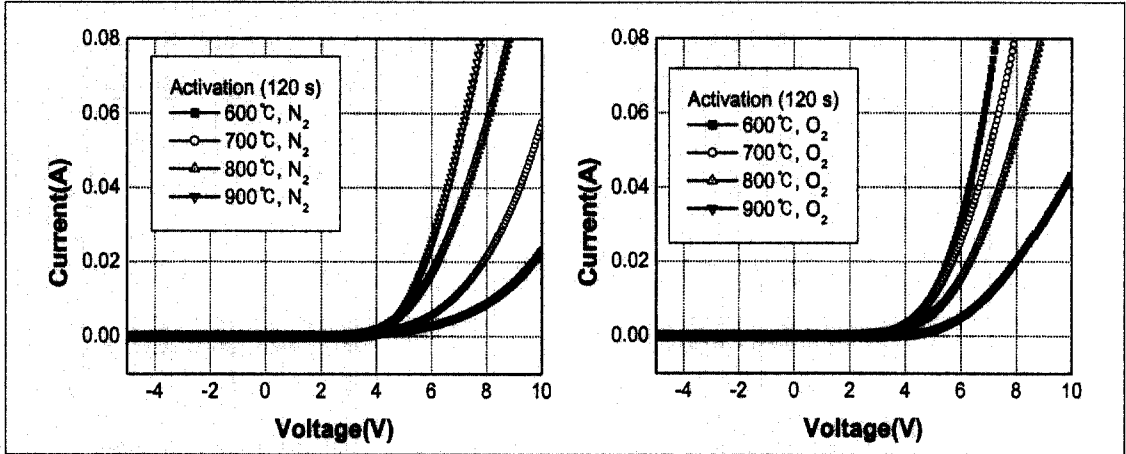


그림 4(a). N₂ 또는 O₂분위기에서 p-GaN 층의 활성화공정을 온도 600°C부터 900°C까지 100°C 간격으로 120초 동안 수행하고 제작한 녹색 발광소자의 전류-전압특성.

Fig. 4(a). The current-voltage characteristics of the green LEDs with the p-GaN layer activated in the temperature range from 600°C to 900°C by the step of 100°C in N₂ or O₂ ambient for 120 sec.

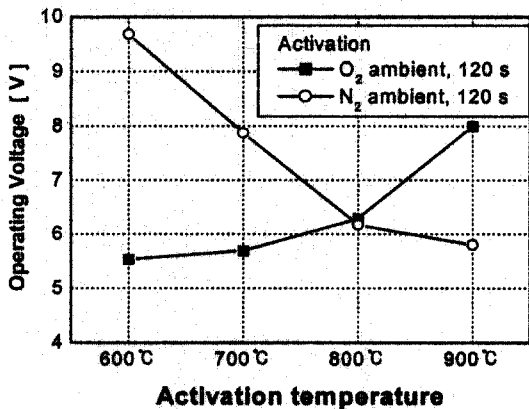


그림 4(b). 다양한 온도에서 p-GaN 층의 활성화 처리 한 후 제작한 녹색 발광소자의 전류 20mA 에서 측정된 동작전압.

Fig. 4(b). The operation voltages of the green LED with the p-GaN layer activated at the various temperature measured at the current of 20 mA.

활성화 처리한 시료에서 관측된 것과 같이 열처리 온도의 증가에 따라 홀 농도가 증가하는 특성과 같은 것으로 생각된다. 다만 소자의 경우는 p-GaN 층의 두께가 기존의 연구된 p-GaN 층에 비해 얇

으므로 더 낮은 활성화 온도 900°C 정도에서 p-GaN 층의 활성화가 이루어 졌다고 볼 수 있다. 반면 O₂ 분위기에서 열처리한 소자의 동작전압은 8 V(900°C)와 6.3 V(800°C), 5.7 V(700°C), 5.5 V(600°C)로 추정되었다. O₂ 분위기 활성화에서는 N₂ 분위기와 다르게 낮은 온도 활성화 과정을 거친 소자의 전류-전압특성이 개선되어졌다. 이처럼 낮은 활성화 열처리를 거친 소자의 전류-전압특성의 개선은 p-GaN 층에 포함된 Mg의 활성화가 O₂ 영향으로 더 낮은 온도에서 가능하기 때문으로 생각된다. 정확한 반응기구에 대해서는 앞으로 더 연구가 필요하지만 p-GaN 층에 대한 O₂ 분위기 활성화 공정 후 얻어진 연구결과에 따르면 다음과 같다. p-GaN 층의 SIMS 분석에 의하면 p-GaN 층에 포함된 H량이 감소하는 결과로부터 Mg-H의 결합체로부터 H 방출되어 Mg의 활성화 효율이 증가되는 것으로 보고하였다[15]. 또한 p-GaN 층 반계 도펀트 Mg과 주계 도펀트인 O를 코도핑 시켜 성장한 후 N₂ 분위기 속에서 열처리하면 O의 코도핑으로 인하여 Mg의 활성화 에너지가 170±5 meV에서 135±5 meV로 감소하여 Mg 활성화효율이 증가하기 때문이라고 하였다[10]. 위의 두 경우는 O₂ 분위기의 활성화 공정이 p-GaN 층에 미치는 영향에 대해 서로 다른 관점에서 설명하고 있다. 본 연구에서 O₂ 분위기 활성화는 O가 p-GaN

층에 코도핑되어 홀 농도를 높이므로 Ni/Au 금속 접합의 접합저항을 낮추고 동시에 p-GaN 층의 전도도를 높이기 때문으로 생각되어진다. 하지만 O₂ 분위기에서 Mg의 활성화는 왜 낮은 온도에서 더 효과적으로 작용하는지 명확히 설명할 수 있는 연구 결과는 아직까지 없다. 그러나 코도핑에 의한 보상비(C, compensation ratio)와 홀 캐리어의 농도(p)를 나타내는 식 $P = (1-C) \cdot N_V / C \cdot g \cdot \exp(-E_A/kT)$ 을 살펴보면,[10] 여기서 E_A는 받개의 이온화 에너지이고, $C = N_D/N_A$ 는 보상비, N_V는 상태밀도를 나타내고 g는 축퇴도(degeneracy factor)이다. 홀 캐리어 농도를 나타내는 식에서 보상비 C와 E_A는 서로 독립적으로 정해지는 값이 아니고, C에 따라 E_A 값도 정해지며, C = 0.5 일 때 최대 홀 농도를 갖는다는 연구결과가 발표되었다[11]. O₂ 분위기에서 p-GaN 층의 Mg 활성화는 500℃ 정도에서 O₂ 가 확산되어 도핑 될 때 최대 효과를 나타내는 것으로 보인다. 활성화 온도를 증

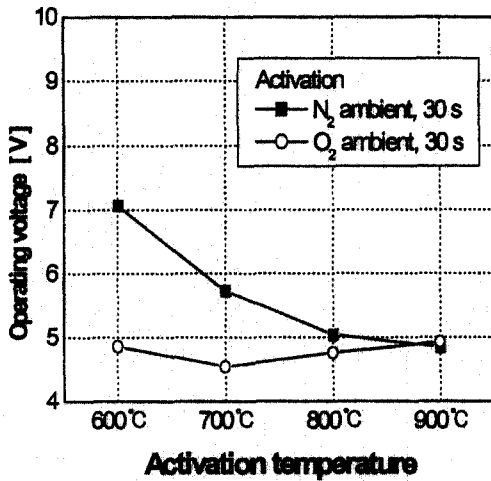


그림 5. N₂ 또는 O₂ 분위기에서 p-GaN 층의 활성화 공정을 온도 600℃에서 900℃까지 100℃ 간격으로 30초 동안 수행하고 제작한 녹색 발광소자의 전류 20 mA에서 측정된 동작전압.

Fig. 5. The operation voltages of the green LED measured at the current of 20 mA, which was fabricated after the p-GaN layer was activated with increasing the temperature from 600℃ to 900℃ by the step of 100℃ in N₂ or O₂ ambient for 30 sec, respectively.

가시키면 O₂ 가 더욱 더 도핑 되어 주게 역할을 하는 O 도핑 량이 증가하게 되면 코도핑 효과에 의한 개선보다 더 많이 홀 캐리어를 보상하게 됨으로 p-GaN 층의 전도도는 떨어지고 소자의 전류-전압특성이 나빠지는 것으로 생각된다.

p-GaN 층의 활성화 공정에서 열처리 시간이 소자에 미치는 영향을 조사하기 위해서 30초 만 활성화 열처리 공정을 수행한 후 제작한 소자의 동작전압을 그림 5에 보였다. N₂ 분위기 속에서 활성화 공정을 수행한 소자의 동작전압은 4.8 V(900℃)와 5 V(800℃), 5.7 V(700℃), 7.1 V(600℃) 이었다. 즉 높은 온도에서 활성화 공정을 수행할수록 소자의 동작전압이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 그림 4(a)에 보인 경향과 같으며, 다만 열처리 시간이 30초 인 경우 120초 일 때 보다 동작전압이 더 낮았다. 반면 O₂ 분위기 속에서 활성화 공정을 수행한 소자에서 측정된 동작전압은 4.9 V(900℃)와 4.7 V(800℃), 4.5 V(700℃), 4.8 V(600℃) 이었다. O₂ 분위기에서 30초 동안 열처리한 발광소자의 동작전압은 모든 온도범위 내에서 N₂ 분위기에서 열처리한 것 보다 낮았으며 각 활성화 온도에 대해 동작전압 값의 변화는 큰 편차를 보이지 않았다. 최저 동작전압은 O₂ 분위기에서 600℃, 120초 처리한 경우와 700℃, 30초 처

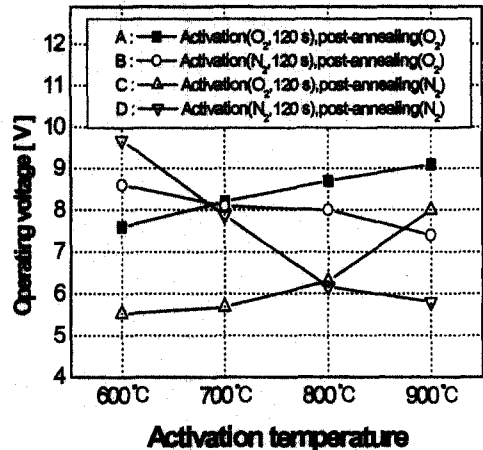


그림 6. 활성화 조건 및 후속 열처리 분위기에 따른 GaN 녹색 발광소자의 동작전압.

Fig. 6. The operation voltages of the GaN-based green LED with the p-layer annealed in the different activation condition and the post-annealing ambient.

리한 경우였다. 이것은 p-GaN층을 O₂ 분위기에서 활성화 처리할 때 Mg의 활성화에 필요한 적절한 시간과 온도가 존재한다는 것을 의미한다. 또한 O₂ 분위기에서 p-GaN층의 활성화 공정을 수행하는 경우 p-GaN층에 포함된 결함(dislocations)밀도에 따라 O₂의 확산 정도가 달라질 수 있으며 성장 조건과 에피층의 두께에 따라 최적 열처리 조건이 변할 것으로 예상된다.

그림 6은 p-GaN 층의 활성화 공정을 N₂ 또는 O₂ 분위기에서 수행하고 오믹 금속을 증착한 후 금속접합을 향상시키기 위해서 후열처리 공정을 N₂ 또는 O₂ 분위기 600°C에서 30초 동안 각각 수행하고 제작한 4종류의 발광소자에서 측정한 동작 전압을 보였다. 그림에서 보면 O₂ 분위기 600°C에서 활성화 공정을 수행하고 후열처리 공정은 N₂ 분위기에서 수행한 발광소자(C)의 특성이 가장 좋았다. 또한 O₂ 분위기에서 Mg의 활성화 공정을 수행하고 후열처리 공정도 O₂ 분위기에서 수행한 발광소자(A)는 금속접합 후 후열처리 공정만 N₂ 분위기에서 수행한 소자(C)보다는 성능이 감소함을 보인다. 소자성능의 감소는 후열처리 공정 중 O₂가 Ni/Au 금속층을 통해 더욱 더 코도핑 되어 홀 캐리어를 보상하기 때문인 것으로 생각되어진다.

4. 결 론

Mg이 도핑된 p-GaN 층의 활성화 열처리 공정을 O₂ 또는 N₂ 분위기에서 수행하고 제작한 녹색 발광소자의 전류-전압특성을 비교 분석하였다. 전류 20mA에서 측정한 동작전압은 N₂ 분위기에서는 열처리 온도가 고온으로 갈수록 개선되어 900°C에서 처리한 경우 4.8 V를 얻었고, O₂ 분위기에서는 이 보다 낮은 온도인 700°C에서 처리한 경우 4.5 V를 얻었다. O₂ 분위기 활성화는 열처리 공정 중 p-GaN 층에 O₂가 코도핑되는 효과에 의하여 홀 캐리어농도를 높여 Ni/Au 금속접합의 접합저항을 낮추고 p-GaN 층의 전도도를 높여 기생저항을 줄이기 때문으로 생각한다. 오믹 금속 증착 후 후열처리 공정을 600°C, N₂ 또는 O₂ 분위기에서 30초 동안 수행한 후 측정한 소자의 전류-전압특성은 p-GaN층의 활성화 과정만 O₂ 분위기에서 수행한 소자가 성능이 가장 좋았다. p-GaN 층의 활성화 방법을 고려해 볼 때 낮은 온도에서도 p-GaN 층의 활성화를 가능케 하는 O₂ 분위기에서 활성화

열처리가 소자의 제작 측면에서 유리한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-2001-005-D00007)에 의해 수행 되었습니다.

참고 문헌

- [1] 정두찬, 이재승, 이정희, 김창석, 오재용, 김종욱, 신진호, 신무환, "n+-GaN/AlGaIn/GaN HFET 제작을 위한 오믹접촉에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 2호, p. 123, 2001.
- [2] 윤진섭, "GaN 소자의 쇼트키 특성 향상에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 9호, p. 700, 2001.
- [3] M. A. Khan, M. S. Shur, and Q. Chen, "Hall measurements and contact resistance in doped GaN/AlGaIn heterostructures", Appl. Phys. Lett., Vol. 68, No. 21, p. 3022, 1996.
- [4] C. G. Van de Walle, C. Stampfle, and J. Neugebauer, "Theory of doping and defects in III-V Nitrides", J. Cryst. Growth, 189/190, p. 505, 1998.
- [5] K. J. Kim and S. J. Chung, "The Mg solid solution for the P-type activation of GaN thin films grown by metal-organic chemical vapor deposition", Trans. on EEM, Vol. 2, No. 4, p. 15, 2001.
- [6] P. Hacke, H. Nakayama, T. Detchprohm, K. Hiramatsu, and N. Sawaki, "Deep levels in the upper band-gap region of lightly Mg-doped GaN", Appl. Phys. Lett., Vol. 68, No. 10, p. 1362, 1996.
- [7] U. Kaufmann, M. Kunzer, M. Maier, H. Obloh, A. Ramakrishnan, B. Santic, and P. Schlotter, "Nature of the 2.8 eV photoluminescence band in Mg doped GaN", Appl. Phys. Lett., Vol. 72, No. 11, p. 1326, 1998.
- [8] L. C. Chen, J. K. Ho, C. S. Jong, C. C. Chiu, K. K. Shih, F. R. Chen, J. J. Kai, and L. Chang, "Oxidized Ni/Pt and Ni/Au ohmic

- contacts to p-type GaN", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 25, p. 3703, 2000.
- [9] J. K. Ho, C. S. Jong, C. C. Chiu, C. N. Huang, K. K. Shih, L. C. Chen, F. R. Chen, and J. J. Kai, "Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN achieved by the oxidation of Ni/Au films", *J. Appl. Phys.*, Vol. 86, No. 8, p. 4491, 1999.
- [10] R. Y. Korotkov, J. M. Gregie, and B. W. Wessels, "Electrical properties of p-type Mg codoped with oxygen", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, No. 2, p. 222, 2001.
- [11] T. Yamamoto and H. K. Yoshida, "Material design for the fabrication of low-resistivity p-GaN using a codoping method", *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, Vol. 36, p. 180, 1997.
- [12] O. Brandt, H. Yang, H. Kostial, and K. H. Ploog, "High p-type conductivity in cubic GaN/GaAs(113)A by using Be as the acceptor and O as the codopant" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 69, No. 18, p. 2707, 2000.
- [13] S. Nakamura, and G. Fasol, "The Blue Laser Diode-GaN Based Light Emitter and Lasers", Springer, p. 82, 1997.
- [14] S. G. Lee and K. J. Chang, "Atomic model for blue luminescence in Mg-doped GaN", *Semicond. Sci. Technol.*, 14, p. 138, 1999.
- [15] B. A. Hull, S. E. Mohny, H. S. Venugopalan, and J. C. Ramer, "Influence of oxygen on the activation of p-type GaN", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 16, p. 2271, 2000.