

## p 형 반도체 층의 Mg 델타 도핑을 이용한 센서 광원 용 LED의 성능 향상

김유경<sup>1</sup> · 이승섭<sup>1</sup> · 전주호<sup>1</sup> · 김만경<sup>1</sup> · 장수환<sup>1,+</sup>

### Improvement of the LED Performance Using Mg Delta-doping in p Type Cladding Layer for Sensor Application

Yukyung Kim<sup>1</sup>, Seungseop Lee<sup>1</sup>, Juho Jeon<sup>1</sup>, Mankyung Kim<sup>1</sup>, and Soohwan Jang<sup>1,+</sup>

#### Abstract

The efficacy improvement of the light emitting diode (LED) was studied for the realization of small-size, low power consumption, and highly sensitive bio-sensor instrument. The performance of the LED with Mg delta-doping at the interface of AlGaIn/GaN superlattice in p type cladding layer was simulated. The device with Mg delta-doping showed improved current, radiative recombination rate, electroluminescence, and light output power compared to the conventional LED structure. Under the bias condition of 5 V, the improved device exhibited 20.8% increase in the light output power. This is attributed to the increment of hole concentration from stable ionization of Mg in p type cladding layer. This result is expected to be used for the miniaturization, power saving, and sensitivity improvement of the bio-sensor system.

**Keywords:** Light emitting diode, GaN, superlattice, doping, light source

#### 1. 서 론

최근 가정에서도 손쉽게 사용할 수 있는 간편한 건강관리 검사 기기에 대한 요구가 증가됨에 따라, 낮은 전력을 소모하고 휴대 가능한 바이오센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대다수의 바이오 센서는 특정 물질에 대해 인식기능을 갖는 생체 감지 물질을 지지체에 고정화 시킨 후, 생물학적 상호작용 및 반응을 전기적 또는 광학적 신호로 변화하여 분석하고자 하는 물질을 선택적으로 감지한다. 이때, 발광다이오드(light emitting diode, LED)는 생물학적 상호작용 및 반응을 발생시키기 위해 사용되는 광원으로 사용되거나 반응 후 발생된 전기적 에너지를 변환기에 결합시켜 측정 가능한 발광 신호로 전환시킬 때 사용된다 [1]. 과거에는 바이오 센서의 광원으로 수은 램프(mercury lamp)가 주로 사용되었지만 값이 비싸고, 전력 소모가 높으며, 수명이 짧은 단점을 가지고 있다. 하지만 최근 들어서는 GaN,

InGaIn, AlGaIn 등의 GaN 계열 직접 띠 간격 (direct bandgap) GaN 기반의 LED는 센서의 전력 소모를 줄이고 크기를 소형화 하며 광원의 제어를 용이하게 할 수 있으므로 바이오 센서 기기에 널리 상용되고 있다 [2,3]. 또한 최근 생물학적 반응에 의해 발생된 전기적 에너지를 발광 신호로 전환시킬 때, 고효율의 LED를 사용한 바이오 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [4,5].

낮은 소비전력과 높은 응답속도를 갖는 LED의 장점에 더하여, 바이오 센서의 성능 개선을 위한 고효율의 LED 개발이 요구되고 있다. 그러나, 일반적으로 GaN기반 LED는 Mg이 도핑된 p형 반도체 층 (p type cladding layer)을 소자 구조에 포함하는데, 효율적인 정공(hole) 주입이 어려워 주입된 전력 대비 발광 효율이 낮다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점이 발생하는 원인은 크게 4가지를 나눌 수 있다. 첫째로, p형 Mg 도펀트(dopant)는 상온에서 200 meV의 높은 이온 활성화 에너지로 인하여 p형 GaN 층에 주입된 정공의 농도가 낮다 [6]. 두 번째로, Mg이 도핑된 GaN 층 성장 시 Mg-N-H와 같은 화합물이 Mg의 효율적 GaN 도핑을 저해한다. 셋째로, GaN 내 존재하는 자연적 결함 (natural defect)에 의한 자기 보상 효과(self-compensation effect)에 의해 재생성 가능한 정공의 농도가 낮아진다 [7-9]. 마지막으로, p형 GaN 성장 시 주입된 Mg의 양자 우물(quantum well) 층으로 확산을 막고 양자 우물 구조의 열적 어닐링 영향(annealing effect)을 줄이기 위해 낮은 온도에서 성장이 진행되는데 이로 인해 물질적 열화가 발생하고 결과적으로

<sup>1</sup> 단국대학교 화학공학과(Department of Chemical Engineering, Dankook University)  
Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi 16890, Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: jangmountain@dankook.ac.kr  
(Received : Oct. 18, 2021, Revised : Nov. 30, 2021, Accepted : Dec. 1, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 누설 전류와 같은 소자 성능 저하가 발생한다 [10-12].

최근까지 p형 GaN의 정공 농도를 높이기 위해 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 기본적으로 p-GaN 에피층(epitaxial layer) 성장 시 고농도로 Mg 도핑 시도 되었으나 오히려 불순물의 산란(impurity scattering)이 심각하게 발생하여 정공의 이동성이 저하되었고 동시에 결정성의 저하가 발생한 결과를 초래 하였다 [13]. 이후, AlGaIn/GaN 초격자(superlattice) 구조를 통해 계면에 Mg의 이온화를 촉진시키려 하였으나 불연속적인 도핑에 의해 고저항 영역이 발생하였다 [14]. 또한, Al의 조성 구배를 가진 AlGaIn을 성장시켜 분극 유도에 의한 정공 도핑 방법 이 시도되었으나 Mg 도펀트를 이온화시킬 수 있을 만큼의 충분한 분극 전기장이 형성되지 않았다 [6]. 이에 대한 해결 방안으로 AlGaIn/GaN 초격자 구조 계면에 Mg 델타 도핑(delta doping)을 통하여 고저항 영역의 발생을 줄이고, 분극에 의해 발생된 전기장을 사용해 상대적으로 많은 Mg 도펀트를 이온화하는 방법이 사용될 수 있다.

본 연구에서는 GaN 기반 LED 효율을 높이기 위해 p형 GaN 중간층에 Mg이 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조(Mg delta doped AlGaIn/GaN superlattice)를 삽입하여 높은 농도의 정공을 주입시킨 구조를 제시하였다. Mg 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조 포함 여부에 따른 LED 소자의 전류-전압, 전압-광 출력, 전기장 발광 (electro-luminescence), 광효율, 방사성 재결합률 (radiative- recombination rate) 등의 특성이 소자 시뮬레이션을 통하여 연구되었다.

## 2. 연구 방법

Fig. 1은 Mg 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조 포함 여부에 따른 시뮬레이션에서 사용된 발광다이오드의 구조를 나타낸다. 300 nm의  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  농도를 갖는 n형 GaN 위에 9층의 다양자우물구조(multi-quantum well)가 적용되었다. 다양자우물층은 45%의 인듐이 포함된 2 nm 두께의  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$  발광층과 15 nm의 GaN 장벽층으로 이루어진다. 다양자우물구조 상부에 20 nm 두께의  $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  농도를 갖는  $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  전자 차단층(electron blocking layer)이 위치한다. 전자 차단층 상부에 150 nm의  $4.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  농도를 갖는 p형 GaN층이 있는 구조를 LED A라 하고, LED A의 중간 부분에 10층의 Mg 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자가 삽입된 구조를 LED B라 한다. Mg 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조 1개 층은 상단으로부터 0.5 nm의  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  농도를 갖는 p형 GaN층, 2 nm의  $4.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  농도를 갖는 p형 GaN층, 0.5 nm의  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  농도를 갖는 p형 GaN층, 4 nm의  $4.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  농도를 갖는 p형  $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 층으로 이루어진다. LED A와 B는 p형 GaN층의 중간 삽입 부분을 제외한 모든 부분에 동일 두께, 도핑 농도, 물질을 갖으며, 소자 모사를 위하여 Silvaco사의 AtlasTM 프로그램이 사용되었다. 푸아송 방

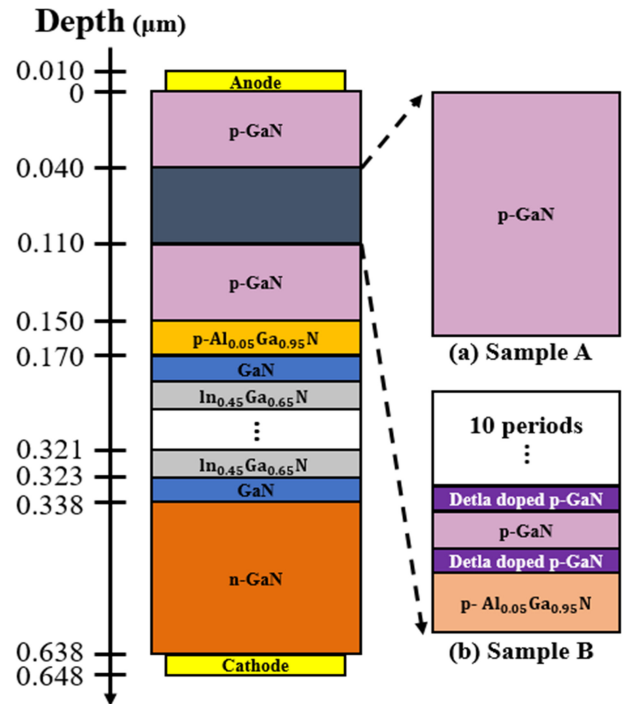


Fig. 1. Schematic diagram of the simulated LED structures with (a) uniform Mg doped GaN and (b) Mg delta doped AlGaIn/GaN superlattice.

정식(Poisson's equation), 연속방정식 (continuity equation), 페르미-디랙 통계(Fermi-Dirac statistics)를 이용한 표류-확산 이동(drift-diffusion transport), 쇼클리리드-홀 재결합 (Shockely-Read-Hall recombination), 오제 재결합 (Auger recombination), 자발적(spontaneous) 및 압전 분극 (piezoelectric polarization), 광발광(optical generation) 관련 모델이 적용되었으며, 소자 모사를 위한 물질 변수는 AtlasTM 프로그램 및 문헌값을 적용하였다 [15].

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2 (a)는 LED A, B에 대해 5 V의 인가 전압 하에서 p형 GaN 층의 정공 농도를 보여준다. LED B는 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조를 포함한 구조로 상대적으로 높은 정공 농도를 가진다. p형 GaN 층에서 LED A는  $1.16 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 정공 농도를 갖는 반면, LED B는 최대  $7.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 정공 농도를 나타내었다. Fig. 2 (b)는 5 V인가 전압 하에서 다중 양자우물(multi quantum well)층에서의 정공 농도를 보여준다. 마찬가지로 LED B의 정공 농도가 LED A대비 높은데, 이는 구조 LED B에서 p형 GaN 층의 상대적으로 높은 농도를 갖는 정공이 구동 전압 인가 시 주입되었기 때문이다. 이와 같이 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조에 의해 정공 농도가 증가하는 현상은 AlGaIn/GaN 접합부의 에너지 밴드 구조를 통해 이해할 수 있다. 델타 도핑 기술과 같이 단순히 고농도의 Mg 도펀트 주입

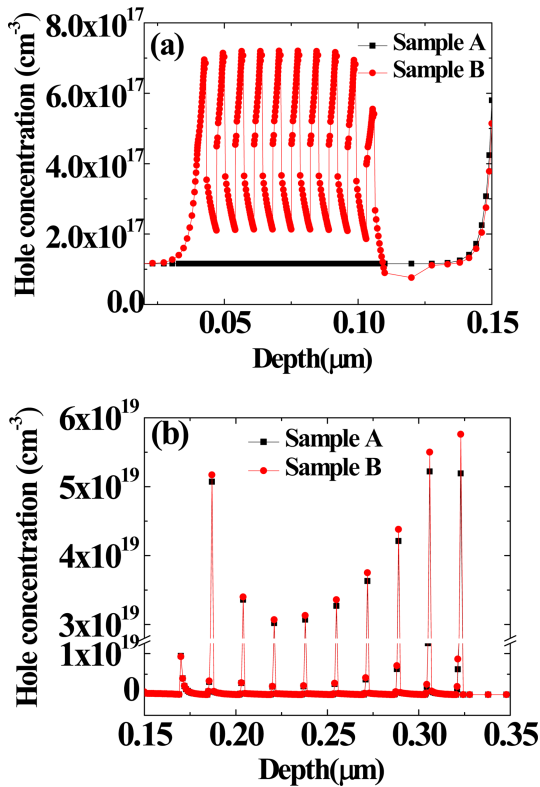


Fig. 2. Hole concentrations of the LED A and B at 5V as a function of the depth for (a) p type region and (b) multi quantum well region.

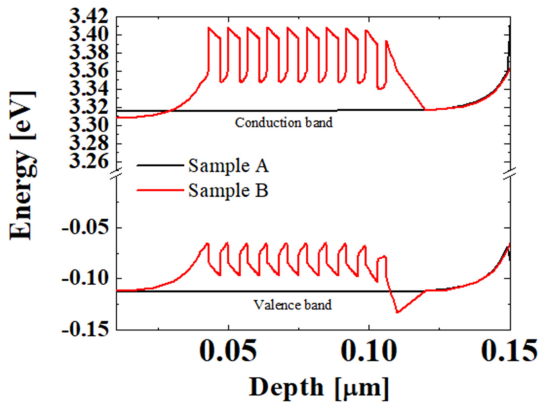


Fig. 3. Simulated energy-band diagram of the LED A and B.

시 Mg의 이온화 에너지가 높아 소자 내 유효 정공의 농도 증가에 기여하지 못하고, 오히려 불순물의 산란(impurity scattering) 문제가 발생하여 전공의 이동도와 격자의 결정성 저하가 발생한다. 그러나, AlGaIn/GaN 초격자 구조의 계면에 델타 도핑 시, AlGaIn과 GaN의 접합부에서 발생한 격자 불일치(lattice mismatch)로 자발 분극(spontaneous polarization)과 압전 분극(piezoelectric polarization)이 유도되어 강한 전기장이 형성된다. Fig. 3는 LED A, B의 p형 GaN 층에서의 에너지 밴드 그림(energy band diagram)

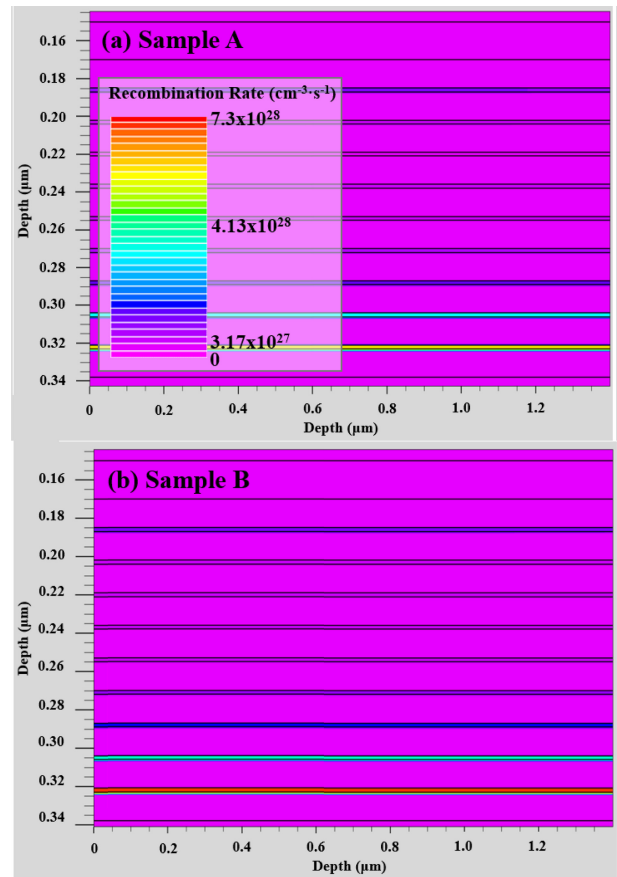


Fig. 4. Cross-sectional views of recombination rates for quantum-well regions of the (a) LED A and (b) LED B at 5 V.

를 나타낸다. 앞서 언급한 전기장에 의해 AlGaIn/GaN 계면에서 가전자대(valence band)의 휨(bending) 현상이 발생하여, Mg 어셉터의 이온화 및 정공의 농도가 증가한다. 따라서, AlGaIn/GaN 계면에 Mg 도펀트를  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 의 고농도로 주입하여도 분극 유도에 의해 형성된 전기장에 의해 기존의 GaN 대비 이온화가 증가하여 주입되는 정공의 농도를 효율적으로 높일 수 있다.

Fig. 4 (a), (b)는 LED A, B에 대하여 5 V인가 전압이 가해졌을 때, 소자 위치에 따른 양자우물구조에서의 발광 재결합율(radiative recombination rate)를 나타낸다. 두 구조 모두 양자우물 내 InGaIn 층에서 뚜렷이 높은 전자와 전공의 재결합율을 관찰할 수 있다. 또한 LED A 대비 LED B의 양자우물에서 더 높은 발광 재결합율을 확인할 수 있다. Fig. 5는 양자우물구조에서 소자 별 수직 깊이에 따른 발광 재결합율을 보여준다. 두 구조 모두 n형 GaN층에 가까운 양자우물 층에 대하여 더 높은 전자 농도와 정공 농도로 인한 증가된 발광 재결합율을 보인다. 또한 LED B가 LED A 대비 향상된 발광 재결합율을 나타낼 수 있다. Mg 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 층이 도입된 LED B가 더 높은 발광 재결합율을 가지는 현상은 Fig. 2에서와 같이, p형 GaN 층으로부터 양자우물 층에서 더 높은 농도의 정공이 주입된 결과이다.

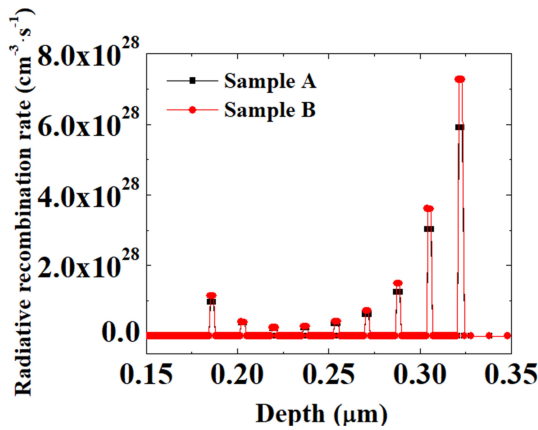


Fig. 5. Radiative recombination rates for quantum-well regions of the LED A and B at 5 V as a function of the depth.

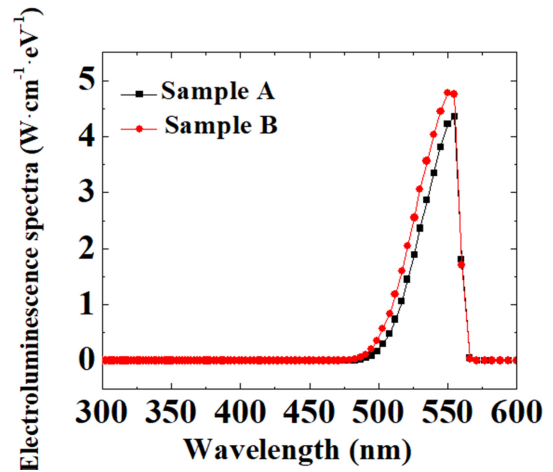


Fig. 7. Electroluminescence spectra of the LED A and B at 5 V.

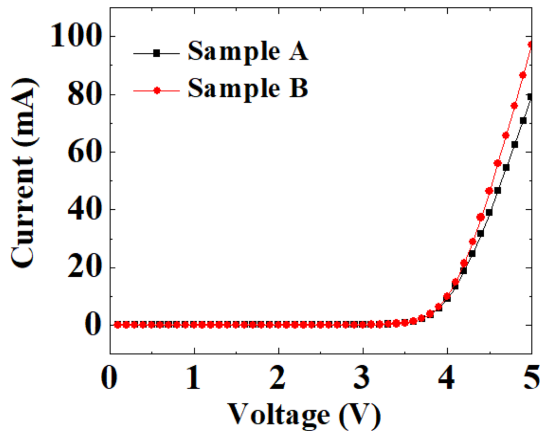


Fig. 6. Current-voltage characteristic of the LED A and B.

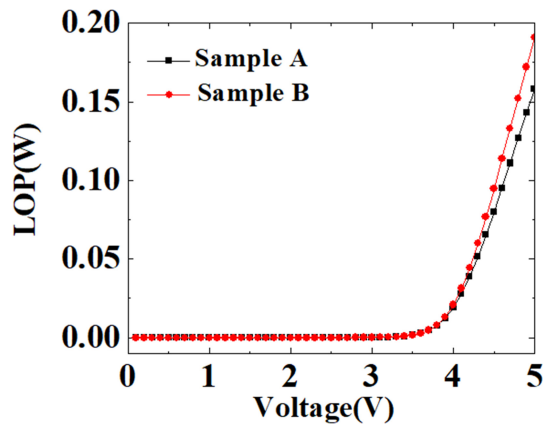


Fig. 8. Light output power-voltage characteristic of the LED A and B.

Fig. 6은 인가 전압 증가에 따른 LED A, B의 전류-전압 특성을 보여준다. p형 GaN층 내 델타 도핑 AlGaIn/GaN 초격자 구조의 포함 여부와 관계 없이 두 구조 모두 유사한 문턱전압을 나타내지만 동일 전압 조건에서 LED B가 LED A 대비 높은 전류 값을 나타낸다. 5 V 인가전압에서 LED A는 79.2 mA, LED B는 97.1 mA의 전류량을 보여주었다. Fig. 7은 두 구조 LED의 5V인가 전압 하 전기장 발광 스펙트럼을 나타낸다. 두 구조 모두 녹색 파장인 555 nm에서 피크 방출(peak emission)을 보이지만, 발광 세기는 LED B가 LED A 대비 강한 발광 재결합 특성을 나타냄을 확인할 수 있다. 이와 같은 LED B의 발광 특성 향상은 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조로 p형 GaN 층 내 정공 농도 증가와 저항 감소에 따른 p형 전공의 전도성에 기인한다.

Fig. 8은 인가 전압이 증가에 따른 LED A, B의 광출(light output, LOP)을 나타낸다. 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조와 그렇지 않은 구조 모두 3.5 V 이상에서 인가 전압이 증가함에 따라 LOP가 증가함을 보였다. 5V의 인가 전압 하에서 LED A는 0.158 W의 LOP를 가졌고, 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조를 LED B는 0.191 W의 LOP를 가져 20.9%의 증

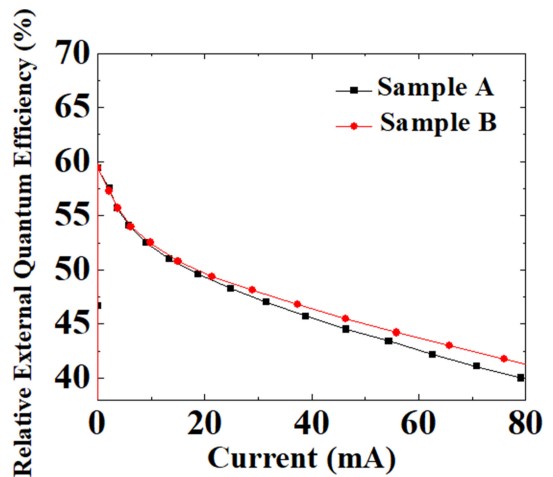


Fig. 9. Relative external quantum efficiency of the LED A and B as a function of the injection current.

가율을 보였다. Fig. 9는 주입 전류 증가에 따른 LED A, B의 상대적 외부 양자 효율(external quantum efficiency, EQE)을 나타낸다. 전류가 0 mA에서 80 mA로 증가함에 따라 LED A, B

모두 EQE가 감소하지만 Mg이 델타 도핑된 AlGaIn/GaN 초격자 구조를 가진 LED B는 LED A 대비 낮은 감소율을 가진다. 이는 같은 전류 조건에서 LED B에 주입된 전류 대비 방출된 광자의 수가 LED A의 경우보다 우세함을 나타내며, 같은 전류 조건에서 더 효율적인 발광 특성을 나타낸다.

#### 4. 결 론

센서 기기의 광원부로 활용이 가능한 GaN 기반 LED의 p형 GaN 내 Mg 델타 도핑 AlGaIn/GaN 초격자층 삽입을 통한 성능 향상이 소자 모사를 통하여 분석되었다. Mg 델타 도핑 AlGaIn/GaN 초격자층이 삽입된 LED B는 같은 인가 전압 환경에서 LED A 대비 향상된 전류 특성, 발광 재결합율, 전기장 발광, 광 출력 등의 향상된 LED 특성을 나타내었다. 이는 p형 GaN층 내 AlGaIn/GaN 계면에 생성된 전기장에 의한 효율적 Mg 이온의 활성화에 따른 정공 농도 증가에 따른 다중 양자 우물층 내 발광 재결합율 증가에 기인한다. 본 연구에서 제시된 p형 GaN층 내 Mg 델타 도핑 AlGaIn/GaN 초격자층이 삽입된 LED 구조는 바이오 센서 기기의 저전력, 소형화, 및 센서 감도 향상을 위한 기반 기술로 활용될 가능성이 매우 클 것으로 예상된다.

#### REFERENCES

- [1] P. Rachim, J. An, Q. N. Pham, and W.-Y. Chung, "RGB-LED-based Optical Camera Communication using Multi-level Variable Pulse Position Modulation for Healthcare Applications", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 27, No. 1, pp. 6-12, 2018.
- [2] H. Kudo, M. Sawai, X. Wang, T. Gesei, T. Koshida, K. Miyajima, H. Saito, and K. Mitsubayashi, "A NADH-dependent fiber-optic biosensor for ethanol determination with a UV-LED excitation system", *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 141, No. 1, pp. 20-25, 2009.
- [3] L. Umar, F. Aswandi, T. M. Linda, A. Wati, and R. N. Setiadi "Sensitivity and Photoperiodism Response of Algae-Based Biosensor Using Red and Blue LED Spectrums", *AIP Conf Proc.*, Vol. 2320, pp. 050016(1)-050016(8), Jakarta, Indonesia, 2021.
- [4] C. Vaghela, M. Kulkarni, R. Aiyer, and M. Karve, "LED-Based Portable Optical Biosensor for Measurement of Serum Urea Levels Using Urease Immobilized Agarose-Guar Gum Composite Film", *IEEE Sens J.*, Vol. 18, No. 17, pp. 7273-7279, 2018.
- [5] H. Wu, R. Shinoda, M. Murata, H. Matsumoto, H. Ohnukia, and H. Endo, "Development of a novel LED color-switching type biosensor system for the visualization of fish stress responses", *Anal. Methods*, Vol. 11, No. 43, pp. 5623-5628, 2019.
- [6] J. Simon, V. Protasenko, C. X. Lian, H. L. Xing, and D. Jena, "Polarization-Induced Hole Doping in Wide-Band-Gap Uniaxial Semiconductor Heterostructures", *Science*, Vol. 327, No. 5961, pp. 60-64, 2010.
- [7] H. Obloh, K. H. Bachem, U. Kaufmann, M. Kunzer, M. Maier, A. Ramakrishnan, and P. Schlotter, "Self-compensation in Mg doped p-type GaN grown by MOCVD", *J. Cryst. Growth*, Vol. 195, No. 1-4, pp. 270-273, 1998.
- [8] P. Kozodoy, S. Keller, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, "MOVPE growth and characterization of Mg-doped GaN", *J. Cryst. Growth*, Vol. 195, No. 1-4, pp. 265-269, 1998.
- [9] B. Schineller, A. Guttzeit, P. H. Lim, M. Schwambersa, K. Heime, O. Schön, and M. euken, "The influence of Mg-concentration and carrier gas on the electrical and optical properties of GaN : Mg grown by MOVPE", *J. Cryst. Growth*, Vol. 195, No. 1-4, pp. 274-279, 1998.
- [10] T. Stephan, K. Köhler, M. Maier, M. Kunzer, P. Schlotter, and J. Wagner, "Influence of Mg doping profile on the electroluminescence properties of GaInN multiple-quantum-well light-emitting diodes", *Proc. SPIE*, Vol. 5366, pp. 118-345, 2004.
- [11] W. Lee, J. Limb, J. H. Ryou, D. Yoo, T. Chung, and R. D. Dupuis, "Effect of thermal annealing induced by p-type layer growth on blue and green LED performance", *J. Cryst. Growth*, Vol. 287, No. 2, pp. 577-581, 2006.
- [12] Y. K. Su, S. J. Chang, S. C. Wei, S.-M. Chen, and W. L. Li, "ESD engineering of nitride-based LEDs", *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, Vol. 5, No. 2, pp. 277-281, 2005.
- [13] S. Nakamura, T. Mukai, M. S. M.S. Senoh, and N. Iwasa, "Thermal Annealing Effects on P-type Mg-Doped GaN Films", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, No. 2B, pp. 139-142, 1992.
- [14] P. Kozodoy, Y. P. Smorchkova, M. Hansen, H. L. Xing, S. P. DenBaars, U. K. Mishra, A. W. Saxler, R. Perrin, and W.C. Mitchel, "Polarization-enhanced Mg doping of AlGaIn/GaN superlattices", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, No. 16, pp. 2444-2446, 1999.
- [15] Y. Zhao, S. Xu, H. Tao, Y. Zhang, C. Zhang, L. Feng, R. Peng, X. Fan, J. Du, J. Zhang, and Y. Hao, "Enhanced P-Type GaN Conductivity by Mg Delta Doped AlGaIn/GaN Superlattice Structure", *Materials*, Vol. 14, No. 1, pp. 144-150, 2021.