

논문 2012-49SD-5-2

# 비대칭 MQW 구조를 이용한 Deep-UV LED의 전기적/광학적 특성

( Analysis of Electrical/optical Characteristics Using Asymmetric MQW Structures for Deep-UV LEDs )

손성훈\*, 김수진\*, 김태근\*\*

( Sung Hun Son, Su Jin Kim, and Tae Geun Kim )

## 요 약

본 논문에서는 고효율·고출력 DUV(Deep Ultra Violet)-LED(Light Emitting Diodes)의 구현을 위하여 n-side에서 p-side로 well 두께를 다르게 형성하는 비대칭 MQW 에피구조를 제안하였다. 제안된 구조의 물리적 해석을 위해 상용화된 3차원 시뮬레이터 SimuLEDTM을 이용하여 소자의 전기적/광학적 특성을 비교·분석 하였다. 시뮬레이션 결과, 본 연구에서 제안한 B구조(n-side에서 p-side 방향으로 well 두께를 2 nm, 3 nm, 4 nm 로 제작)의 에피층을 가지는 UV-LED는 기본 MQW 에피구조를 가지는 UV-LED와 동작전압은 8.9 V로 동일한 값을 가졌지만 광출력은 기본구조의 10.6 mW 에 비해 약 1.17배 향상된 12.4 mW의 값을 가지는 것을 확인하였다.

## Abstract

In this work, we proposed the asymmetric MQW structure with gradually increased or decreased well thickness from n-layers to p-layers in order to improve the performance of DUV-LEDs. We report the simulation results of electrical/optical characteristics by using the SimuLED program. From the simulation results, we found that B structure with thickness of the wells gradually increased from the n-side to the p-side has the same forward voltage(Vf) as standard structure, but the light output power (Pout) was improved by a factor of 1.17 at 20mA compared with those of the standard structure.

**Keywords** : Aluminum Gallium-nitride(AlGaIn), DUV-LEDs, asymmetric MQW

## I. 서 론

LED는 높은 에너지 변환효율, 장 수명, 빠른 응답속도, 낮은 발열, 유해물질이 없는 특징을 가지는 반도체 소자로서 최근 가시 광 영역뿐만 아니라 자외선 영역에

대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 AlGaIn 기반의 Deep-UV(DUV) LED는 응용 파장에 따라 sterilization, optical data storage, water-purification, white light illumination 과 같은 다양한 미래형 산업을 위한 광원으로 주목을 받고 있다<sup>[1~3]</sup>. 하지만 이러한 UV LED는 300nm 이하의 파장에서 외부양자효율이 2% 정도로 매우 낮은 값을 가지는데 이는 p-type AlGaIn 으로부터 Quantum Wells(QW)내로 주입되는 캐리어 주입 효율이 낮기 때문이다<sup>[4]</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 p-AlGaIn 단일층 대신 Al조성비를 p-side 방향으로 점진적으로 증가시키며 다층으로 형성하여 홀 주입 효율을 향상시킨 구조<sup>[4]</sup>, 또는

\* 학생회원, \*\* 정회원-교신저자, 고려대학교 전자전기공학과

(School of Electrical Engineering, Korea University)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0028769).

접수일자: 2011년11월3일, 수정완료일: 2012년5월17일

Electron Blocking Layer(EBL)를 다층으로 형성하여 electron overflow를 감소시키는 구조<sup>[5]</sup> 등의 다양한 연구가 진행되고 있는데 본 논문에서는 3차원 반도체 소자 시뮬레이터인 SimuLED 프로그램을 이용하여 hole injection efficiency와 electron-hole confinement를 향상시키기 위한 비대칭 MQW 구조를 제안하였고 그에 따른 전기적/광학적 특성을 분석하였다.

## II. 본 론

### 1. 제안된 UV-LED의 에피구조

아래 그림 1(a), 1(b), 1(c)는 본 연구를 위해 제작한 일반적인 MQW를 가지는 에피구조와 비대칭 MQW를 가지는 에피구조를 나타낸다. 에피구조는 280 nm 대역의 발광파장을 가지도록 설계되었으며 먼저 850 nm 두께의 n-Al<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.45</sub>N 버퍼층 형성 후 Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>N well 3층과 5 nm 두께의 Al<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.45</sub>N barrier 3층이 반복 적층된 MQW 층을 제작했으며 본 연구를 수행하기 위해 well 두께를 3 nm로 동일하게 제작한 기본구조, well 두께를 p영역 방향으로 4 nm, 3 nm, 2 nm로 점점 얇게 제작한 A구조, p영역 방향으로 2 nm, 3 nm, 4 nm 로 점점 두껍게 제작한 B구조 등 3가지 MQW구조를 제작하였다. 그다음 MQW층 상부에 15 nm의 p-Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>N Electron Blocking Layer(EBL) 층을 형성하고 마지막으로 40 nm의 p-GaN 컨택 층을 형성하였다.

다음으로 각각 다른 에피 구조에 따른 UV-LED의 전기적/광학적 특성의 분석을 위해 그림 2에서와 같이 소면적 lateral 형 LED를 제작했다. 칩의 size는 350 μm×350 μm이며, 190 nm의 Ti/Al/Ni/Au n형 전극 및

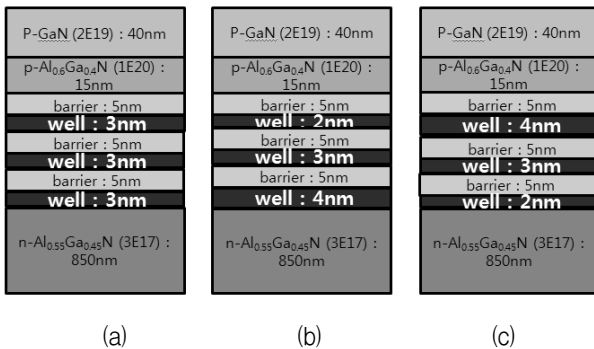


그림 1. 본 연구를 위해 제작한 UV-LED의 (a) 기본 에피구조 (b) A 에피구조 (c) B 에피구조  
Fig. 1. Schematic of the (a) standard Epi-structure, (b) A Epi-structure, (c) B Epi-structure of UV-LED.

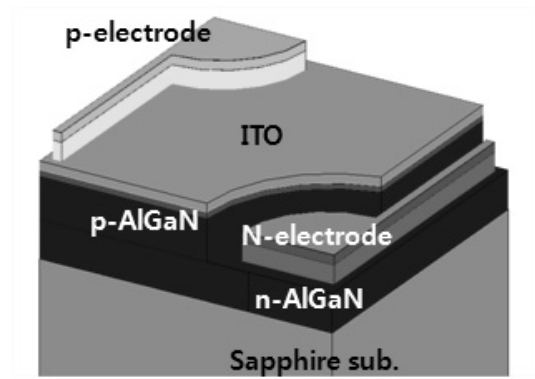


그림 2. 소면적 lateral형 UV-LED의 칩 구조  
Fig. 2. Schematic of lateral-type UV-LED chip structure.

p-GaN층 상부에 100 nm 두께의 ITO 전류 확산 층을 형성하고 그 위에 120 nm의 Ni/Au p형 전극으로 구성하였다.

### 2. 시뮬레이션 모델

본 연구를 수행하기 위해 STR사의 SimuLED 프로그램중 소자의 에피구조 설계 및 그에 대한 2차원 분석을 위해 SiLENSe를 이용했으며 또한 SiLENSe에서 설계한 에피구조를 토대로 소자를 제작하여 소자의 발광 특성과 전류주입 특성을 3차원 분석하기 위해 SpeCLED 프로그램을 사용하였다.

본 시뮬레이션을 위해 적용한 주요 물리 모델로는 주입된 캐리어들의 재결합효율 유도를 위한 발광 재결합 모델, 온도와 전류밀도의 변수를 통해 Bias와의 관계를 유도하는 Schokley's diode 모델, 발광파장과 굴절율의 관계를 정리한 1차 Sellmeier 방정식 및 발광 파장과 캐리어 도핑농도에 따라서 결정되는 흡수율의 관계식 등을 적용하였다.

$$R^{rad} = B \times np \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{F_n - F_p}{kT}\right) \right] \quad (1)$$

where,  $B \propto T^{-3/2}$

$$U = \frac{mkT}{q} \ln \frac{j + j_0 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)}{j_0 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)} + j\rho_A \quad (2)$$

$$n^2(\lambda) = 1 + a \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - b^2}, \quad \alpha(\lambda) = \alpha_0 + A\lambda^2n \quad (3)$$

$$Z = \frac{A \times a + B \times b}{a + b} \quad (4)$$

활성층 내부로 주입된 캐리어들 간의 재결합에 의한 발광특성의 유도를 위한 수식(1)에서의 B는 온도에 비례하는 재결합 상수, n과 p는 n-AlGaN층과 p-AlGaN층 각각의 도핑농도,  $F_n$ 과  $F_p$ 는 n-GaN층과 p-GaN층 각각의 Fermi 준위를 나타낸다. 식(2)는 Shockley 다이오드 모델을 나타내는데  $j_0$ 는 포화전류 밀도,  $\rho_A$ 는 활성층에서의 저항을 나타내며 m은 non-ideal factor로 본 연구에서는 1로 가정하였다. 또한 발광 파장에 따른 굴절율과 흡수율의 관계식에 대한 수식(3)에서 a와 b는 Sellmeier 상수를 나타내며 a0는 absorption coefficient, n은 major carrier concentration을 나타낸다.

위와 같이 적용한 물리모델들은 전류주입에 따라 AlGaN LED의 활성층 내에서 발생하는 전자와 홀간의 재결합으로 인한 전류의 흐름과 밀도 및 전압 특성에 대해 물리적인 분석을 가능케 해주며, 칩을 이루는 물질에 따라 빛의 발광특성과 그 결과에 대해 유연한 수치적인 분석을 가능케 해준다.

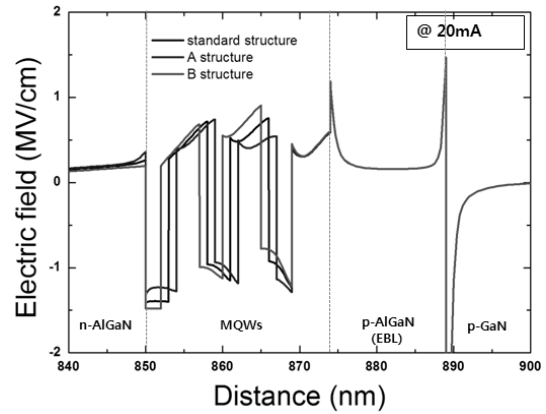
이와 더불어 Lateral 한 UV-LED의 전기적 특성에 대한 물리적인 분석을 위해 각각의 n-AlGaN층과 p-AlGaN층 모두 전극과의 접촉을 옴직접촉으로 가정하였다. 시뮬레이션에 적용된 전극 물질로는 일반적으로 논문에서 보고되고 있는 Ni/Au(10/100 nm) p형 전극과 Ti/Al/Ni/Au(20/50/20/100 nm) n형 전극을 사용하였으며 각 전극의 열전도도와 전기전도도는 위 수식(4)를 이용하여 계산하였다. A, B는 각 물질이 갖는 고유 전도성이며 a, b는 각각의 증착두께이며 계산된 결과값을 표 1에 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션에 적용된 전극의 전도도  
Table 1. Conductivity of electrode used in simulation.

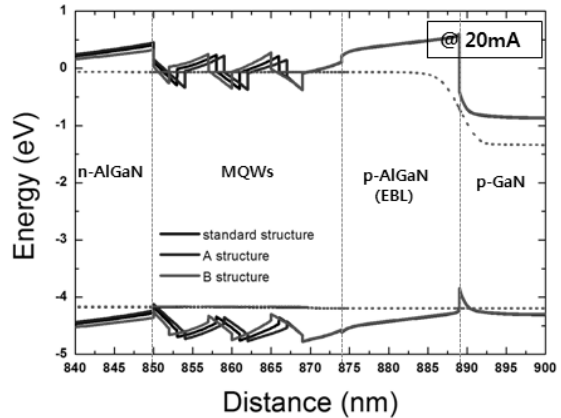
Parameter	p형 전극	n형 전극
열 전도도	297.4 W/m·K	221.5 W/m·K
전기 이동도	419109 S/cm	342731 S/cm

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 2는 전류 주입에 따른 각 구조의 전기장 분포와 에너지 밴드 구조를 나타낸다. 일반적으로 AlGaN-LED와 같은 3-5족 화합물 반도체에서 polarization-effect는 에너지 밴드를 변화시켜 발광파장을 red-shift 시키거나



(a) electric field

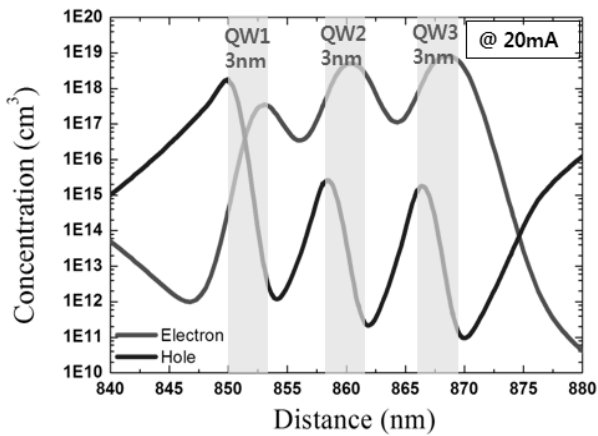


(b) Energy-band diagrams

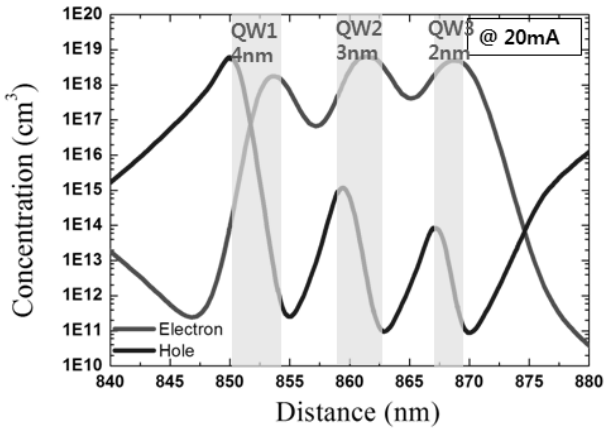
그림 3. 전류 주입에 따른 3구조의 (a) 전기장 분포 및 (b) 에너지 밴드 다이어그램

Fig. 3. Electric field and energy-band diagrams of three types of MQW structure by current injection.

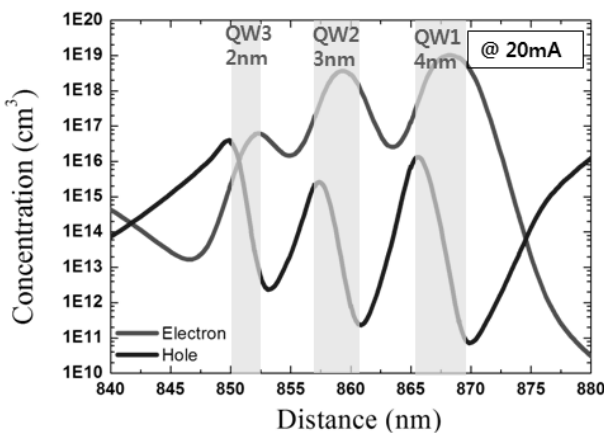
낮은 홀농도 및 QW내에 불균일한 캐리어 분포를 유발해 소자의 전기적/광학적 특성에 큰 악영향을 미치게 된다. 따라서 QW내의 polarization 효과를 감소시켜 electric field를 감소시킴으로써 에너지 밴드가 덜 휘어지도록 만들어 QW내에 홀 농도를 증가시키는 노력이 필요하다.<sup>[6-8]</sup> 먼저 그림 1(b)에서 기본구조에 대한 에너지 밴드 다이어그램을 보면 알 수 있듯이 p-side방향 마지막 QW 내에서 가전도대가 역셉터 페르미 준위와 멀리 떨어져 있고 또한 마지막 p-Al<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.45</sub>N barrier층과 p-Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>N(EBL)층 계면에서의 큰 가전도대 band offset으로 인해 홀 농도가 낮은 것을 예상할 수 있었다. 따라서 이를 해결하기 위해 설계한 비대칭 MQW 에피구조를 가지는 A, B 구조의 QW내의 e-field를 그림 3(a)에 나타내었는데 전체적으로 QW 내에서의 e-field가 감소되어 에너지 밴드 또한 기본구조



(a) standard 구조



(b) A 구조



(c) B 구조

그림 4. 20mA 에서의 전자농도와 홀농도 분포  
(a) standard 구조, (b) A구조, (c) B구조

Fig. 4. Electron and hole concentration of (a) standard structure, (b) A structure, (c) B structure at 20mA.

에 비해 좀 더 smooth 해지고 억셉터 페르미 준위에 가까워지는 것을 확인 할 수 있었다.

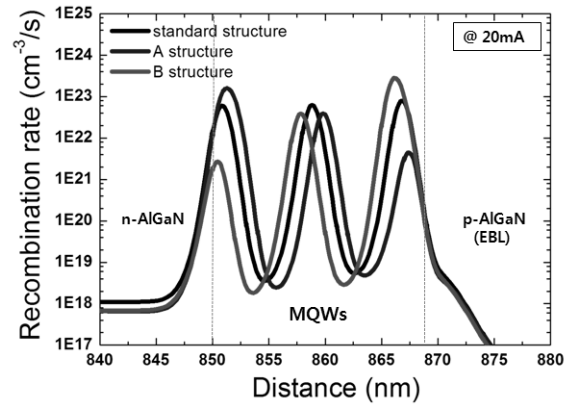


그림 5. 20mA 에서의 각 구조에 따른 발광 재결합율  
Fig. 5. Radiative recombination rates of three structures at 20mA.

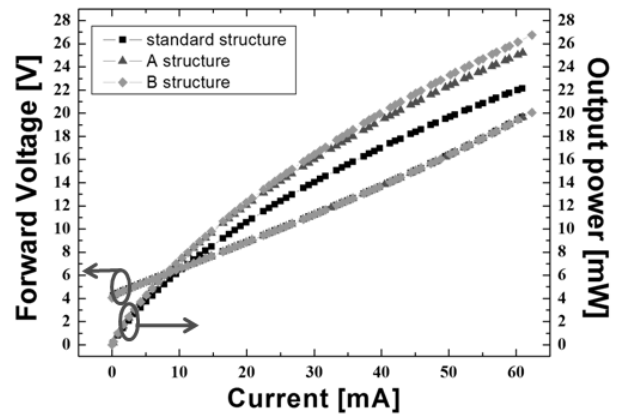


그림 6. 각 구조에 따른 L-I-V 특성  
Fig. 6. L-I-V characteristics of three structures.

그림 4는 20 mA 에서의 각구조에 따른 MQW 내의 캐리어 분포를 나타낸다. 먼저 기본구조의 캐리어 분포를 보면 전자 농도에 비해 홀 농도가 매우 낮아 많은 양의 전자가 재결합을 하지 못하기 때문에 electron leakage, self heating 등의 문제들이 발생하여 결국에는 낮은 광출력을 가지게 된다.

하지만 본 연구에서 제안한 비대칭 MQW 에피구조를 가지는 A 구조와 B구조의 경우는 먼저 그림 4(b) A 구조에 대해 살펴보면 기본구조에 비해 활성층 내의 전자농도는 비슷하지만 홀 주입 효율이 향상되어 더 많은 홀이 주입된다. 그러나 홀이 n-side쪽 마지막 well에 특히 많이 주입되어 활성층내의 홀 분포가 균일하지 못하다. 반면에 그림 2(c)에 나타난 B구조는 홀 주입효율이 향상되면서 활성층 내에서 가장 균일한 캐리어 분포를 가지는 것을 확인할 수 있었다.다음으로 그림 5와 같이 물리적 모델을 적용하여 MQW 내에서 발생하는 발광성

재결합효율에 대한 분석을 수행하였다. 그 결과 기본 구조의 경우 n-AlGaIn층과 맞닿아 있는 1차 QW에서 산출되는 재결합효율은 ( $\sim 6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ), 2차 QW( $\sim 6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ), 3차 QW( $\sim 8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ) 이었다. 그러나 본 연구에서 제안한 MQW구조의 경우 A구조에서 1차 QW( $\sim 1.6 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ), 2차 QW( $\sim 3.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ), 3차( $\sim 4.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ )이며 B 구조에서는 1차 QW( $\sim 2.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ), 2차 QW( $\sim 3.88 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ), 3차 QW( $\sim 3 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ) 로 산출되었다. 결론적으로 총 발광 재결합율은 A구조가 기본구조에 비해 약 1.01배 상승했으며 B구조는 기본구조에 비해 약 1.7배 상승한 것으로 확인할 수 있었다.

마지막으로 3가지 구조에 따른 UV-LED의 전기적/광학적 특성의 비교·분석을 위해 수행한 3차원 SpeCLED/RATRO 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 서로 다른 에피구조를 갖는 UV-LED에 0 mA에서부터 60 mA 까지 전류주입을 하면서 L-I-V 특성을 확인한 결과, 동일한 20 mA의 전류주입 시 동작전압(forward voltage,  $V_f$ )은 세가지 구조 모두 8.9 V로 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 더불어 20 mA 전류 주입시 광출력 특성에 대해 분석한 결과, 기본구조의 경우 10.6 mW의  $P_{\text{out}}$ 이 산출된 반면 본 연구에서 제안한 A, B 구조는 각각 12 mW, 12.4 mW의  $P_{\text{out}}$  값을 갖는 것을 확인하였으며 결론적으로 B구조가 기본구조에 비해 약 1.17배 향상된 제일 우수한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 DUV-LED의 전기적/광학적 특성 향상을 위해 MQW내의 well 두께를 n-side에서 p-side로 다르게 형성하는 비대칭 MQW 구조를 제안하였으며, 3차원 소자 시뮬레이션을 통해 그 가능성에 대한 분석을 수행하였다. 그 실험 결과 일반적인 MQW구조를 가지는 UV-LED에 비해, 본 연구에서 제안한 B구조(n-side에서 p-side 방향을 well 두께를 2 nm, 3 nm, 4 nm 로 두껍게 제작)는 MQW내로의 홀 주입효율이 향상되어 발광 재결합율이 20 mA에서 약 1.7배 향상되었으며 더불어 소자의 전기적/광학적 특성 확인 결과 동작전압은 8.9 V로 동일한 값을 가지지만 광출력의 경우 기본구조의 10.6 mW에 비해 약 1.17배 향상된 12.4 mW 값을 갖는 것을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Hirayama, Y. Tsukada, T. Maeda, and N. Kamata, "Marked Enhancement in the Efficiency of Deep-Ultraviolet AlGaIn Light-Emitting Diodes by Using a Multiquantum-Barrier Electron Blocking Layer," *Applied Physics Express* Vol. 3, No. 3, pp. 031002-1, 2010.
- [2] K. Mayes, A. Yasan, R. McClintock, D. Shiell, S. R. Darvish, P. Kung, and M. Razeghi, "High-power 280 nm AlGaIn light-emitting diodes based on an asymmetric single-quantum well," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 84, No. 7, pp. 1046-1048, 2004.
- [3] Miao-Chan Tsai, Sheng-Horng Yen, and Yen-Kuang Kuo, "Deep-ultraviolet light-emitting diodes with gradually increased barrier thicknesses from n-layers to p-layers," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 98, No. 11, p. 111114-1, 2011.
- [4] Jianchang Yan, Junxi Wang, Peipei Cong, Lili Sun, Naixin Liu, Zhe Liu, Chao Zhao, and Jinmin Li, "Improved performance of UV-LED by p-AlGaIn with graded composition," *Phys. Status Solidi C* Vol. 8, No. 2, pp. 461-463, (2011).
- [5] C. H. Wang, S. P. Chang, W. T. Chang, J. C. Li, Y. S. Lu, Z. Y. Li, H. C. Yang, H. C. Kuo, T. C. Lu, and S. C. Wang, "Efficiency droop alleviation in InGaIn/GaIn light-emitting diodes by graded-thickness multiple quantum wells," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 97, No. 18, p. 181101-1, 2010.
- [6] Man-Fang Huang, and Tsung-Hung Lu, "Optimization of the Active-Layer Structure for the Deep-UV AlGaIn Light-Emitting Diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 42, No. 8, pp. 820-826, 2006.
- [7] Yen-Kuang Kuo, Sheng-Horng Yen, and Yu-Wen Wang, "Simulation of deep ultraviolet light-emitting diodes," *SPIE*, Vol. 6669, p. 66691J-1, 2007.
- [8] Man-Fang Huang, and Tsung-Hung Lu, "Improvement of ultra-deep ultraviolet light emitting diodes with asymmetric active region," *SPIE*, Vol. 6134, p. 613400-1, 2006.

---

 저 자 소 개
 

---

손 성 훈(학생회원)

2012년 고려대학교 전자전기공학과 석사 졸업.  
 <주관심분야 : 반도체>

김 수 진(학생회원)

2007년 건국대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 2012년 고려대학교 전자전기공학과 박사 과정.  
 <주관심분야 : 반도체>



김 태 근(정회원)

1997년 고려대학교 전자공학과  
 박사졸업

1997년 3월~1998년 5월 ECE  
 Dept., University of  
 California, San Diego,  
 USA, Research Fellow

1998년 6월~2001년 2월 Electrotechnical  
 Laboratory(ETL), Japan, NEDO Fellow

2001년 3월~2002년 2월 삼성종합기술원  
 포토닉스 랩 전문연구원

2002년 3월~2004년 5월 광운대학교반도체 및  
 신소재공학과, 조교수

2004.년 6월~현재 고려대학교 전기전자전파  
 공학부 교수

<주관심분야 : 반도체>