

반도체 광원 적용을 위한 3차원 나노 구조 개발

김제원

남서울대학교 정보통신공학과 교수

3-dimensional Nano Structures for Semiconductor Light Source

Je Won Kim

Professor, Department of Information and Communication Engineering, Namseoul University

요약 반도체 조명과 아울러 디스플레이의 주요한 광원으로서 주목받고 있는 마이크로 크기의 발광다이오드에서 광학적 특성 및 효율의 향상을 위해 다양한 개발 방향과 연구 방법이 제시되어져 왔다. 하지만 이러한 개발 방향과 방법은 2차원 구조를 기반으로 하고 있으며, 이에 따라 연구와 개발이 진행되어왔다. 본 연구에서는 기존의 평면 구조와는 구별되는 나노 프레임 구조를 통한 입체적인 나노 구조의 설계와 아울러 미세 패터닝과 반응성 에칭 방법이 적용된 반도체 공정 적용을 제시하고자 한다. 또한, 나노 프레임 구조의 구현을 위해 적용된 공정 개발을 통해 수직성이 향상된 나노 캐비티와 이를 통한 나노 기둥의 제어를 통해 나노 구조의 반도체 광원으로서의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

주제어 : 나노 프레임, 나노 캐비티, 반도체 광원, 조명, 디스플레이

Abstract In micro-sized light emitting diodes, which are increasingly attentions as the light sources of displays and semiconductor lighting, increasing the amount of light and improving the luminous efficiency are very important and various development directions and methods have been proposed. In this study, the design of 3-dimensional nano structures through nano frame formation and the application of a nano pattern and a reactive etching method were proposed. And it will also be discussed that nano pillar arrays with nano cavities having improved verticality can be applied to semiconductor light sources through the development of nano frame structures.

Key Words : Nano Frame, Nano Cavity, Semiconductor Light Source, Lighting, Display

1. 서론

질화물을 기반으로 하는 광소자의 발광 효율 특성 향상은 평면 구조를 기초로 하여 연구 개발이 진행되어져 왔다. 본 연구에서는 이러한 평면 구조를 기본으로 하는 기존의 질화물 광원과는 차별화되는 입체적인 나노 구조를 가지는 반도체 광원의 구조 및 공정 개발과 이에 따른 특성을 제시하고자 한다. 기존의 구조와는 구별되는 입체적인 나노 구조의 적용으로 발광 면적의 증가를 기대할 수 있으며, 나노 사이즈의 균일한 기둥

(Pillar) 모양을 형성하고자 한다. 따라서 기존의 나노 구조 개발과는 구별되는 나노 프레임 (Frame)의 형성을 통해 나노 기둥 구조를 제작하고자 한다. 나노 기둥의 구현을 위하여 산화물층을 나노 프레임으로 적용하고자 하며, 이를 위해 나노 사이즈 리소와 식각 공정을 활용할 수 있다. 이러한 리소 및 식각 공정을 통해 형성된 나노 기둥을 통해 입체적인 나노 구조를 구현하고자 한다. 또한, 기존의 평면 구조에서는 c-면에서 질화물이 성장됨에 따라 분극 효과 (Polarization Effect)에

*Funding for this paper was provided by Namseoul university.

*Corresponding Author : Je Won Kim(jewon.kim@nsu.ac.kr)

의해 캐리어가 공간적으로 떨어짐에 따라 광학적 특성이 낮아지게 된다. 이에 비해 나노 기둥의 측면에 발광층을 성장시키게 되면, m-면에서 성장됨에 따라 무극성 질화물이 성장될 수 있다. 이러한 극성 특성을 가지지 않는 발광층의 도입에 따라 극성 질화물에서 발생하는 분극 효과를 억제할 수 있음에 따라 캐리어(Carrier)의 재결합이 향상되게 된다.

기존의 광원인 백열등 및 형광등과 비교하여 LED(Light Emitting Diode)는 반도체 물질을 통해 전자와 정공의 결합에 의해 전기 에너지를 빛 에너지로 바꾸어 주는 발광 반도체임에 따라 반도체 광원(Semiconductor Light Source)이라 정의될 수 있다. 이러한 LED 광원에서는 단일 소자에서 하나의 파장대를 형성하고 있으며, 청색과 형광체의 혼합을 통해 흰색을 구현하고 있다. 따라서 형광체에 의한 빛의 흡수와 이에 따른 효율 저하가 발생하게 된다. 따라서 기존에는 형광체의 여기 효율을 증가시키는 연구와 아울러 광원의 세기와 효율을 강화하는 방향으로 연구를 진행하여 왔다. 하지만, 형광체에 의한 흰색 발광 구조의 한계로 특성 향상이 매우 더디다 [1-6]. 이에 따라 형광체 여기 방식을 적용하지 않고 빛의 혼합을 통한 흰색 구현이 가능한 3차원 나노 구조를 제시하고자 한다. 기존의 청색, 녹색과 적색의 개별 소자를 통한 흰색의 구현은 소자의 복잡성과 원가 상승에 따라 제품 경쟁력에 영향을 줄 수 있다 [7]. 본 연구에서는 기존과는 차별화된 나노 프레임 구조를 통한 나노 기둥 구조의 설계와 실현 방법을 제시하고자 한다. 나노 구조의 사이즈와 아울러 나노 기둥의 간격에 따라 파장 특성을 변경시킬 수 있으며 이를 통해 각각의 소자에서 영역별로 서로 다른 파장을 가지도록 배치할 수 있다. 3차원 나노 구조를 통해 기존과는 구별되는 나노 크기의 LED 소자를 제시할 수 있다. 또한, 나노 프레임의 구현을 통해 반복성과 균일성을 갖춘 나노 구조를 만들 수 있으며, 이를 통해 조명과 아울러 디스플레이 분야에서 나노 크기의 반도체 광원을 제시할 수 있으리라 예상된다.

2. 실험

반도체 광원을 구성하는 대표적인 물질인 질화물은 금속유기화학기상증착법 또는 분자선적층법에 따라 성장되어진다 [8,9]. 이에 따라 GaN 기반의 질화물층을 사파이어 기판을 적용하여 금속유기화학기상증착법을

통해 성장하였다. 트리메틸갈륨, 트리메틸인듐 및 암모니아가 GaN 및 InGaN 성장을 위해 적용되었다 [10-14]. 나노 프레임 구조를 형성하기 위하여 3 μm 두께의 SiO_2 물질을 플라즈마화학기상증착법을 통해 질화물층 위에 실란, 질소 산화물 및 암모니아의 혼합물을 적용하여 성장하였다. 나노 프레임의 형성을 위해 표준 리소 공정을 적용하였으며, 나노 크기의 원형 캐비티(Cavity) 구조를 패터닝 하였다. 실리콘 산화물인 SiO_2 물질의 에칭은 C_4F_8 기반의 반응성이온에칭(Reactive Ion Etching)법이 적용되었으며, TEL(Tokyo Electron) SCCM 에처 설비가 사용되었다. 산화물층의 높은 수직 특성을 구현하기 위해 산소 및 아르곤 가스를 사용하였다. 나노 기둥은 반응성 에칭 공정을 통해 만들어진 나노 크기의 홀에 n형 질화물의 성장을 통해 형성된다. 나노 홀에 n형 질화물을 성장한 후, 실리콘 산화물층을 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 으로 구성된 산화물 및 질화물층으로부터 선택적으로 에칭하였다. 실리콘 질화물인 SiN 박막층은 SiO_2 와 비교하면 산성 에천트에서 낮은 에칭 특성을 가짐에 따라 식각 깊이에 대한 에칭 조절층으로 사용되었다.

InGaN 및 GaN으로 구성된 발광층의 3족 대비 5족 비율은 10,000 이며, Al 농도를 갖는 질화물로 구성된 전자차단 및 정공 주입 향상층의 V/III 비율은 4,000 이다. 또한, p형 GaN의 3족 대비 5족 비율은 4,500 이며, 이에 따른 발광층이 n형 질화물의 나노 기둥 구조의 측면에 성장될 수 있다. 성장된 나노 구조물에 대해 암모니아, 과산화수소 그리고 물을 혼합한 유기 용제로 유기물을 제거할 수 있다. 전류 주입을 위해 투명 전극인 인듐 주석 산화물 및 n형 접촉을 위해 Al/Ti 물질이 구성될 수 있다. 3차원 나노 구조의 모양과 공정 결과를 확인하기 위하여 표면 형상이 측정되었으며 나노 프레임의 수직 특성을 확인하기 위하여 프레임 단면의 수직성(Verticality)를 측정하였다.

3. 결과

3.1 산화물을 통한 나노 프레임 형성

나노 프레임 제작을 통한 나노 기둥 구현을 위해 적층 및 에칭과 증진 공정을 단계적으로 진행하였다. 이러한 나노 프레임 제작을 위해 질화물 및 산화물 증착 및 에칭 장치를 사용하여 나노 구조의 공정 조건을 확

보하였다. 첫 번째로는 실리콘 산화물을 적용한 나노 프레임 형성 단계이다. 나노 프레임 제작을 위해 사파이어 물질로 제작된 기판에 GaN 물질을 성장하였으며, 질화물층의 결정 품질을 향상하기 위해 도핑되지 않은 GaN 층과 n형 GaN 층을 성장 순서에 맞추어 증착하였다. 이와 같이 증착된 GaN 위에 SiO₂을 성장시켰으며, 나노 기둥에 발광층 성장시 나노 기둥 사이의 표면에 질화물 성장을 억제하기 위한 SiN_x 기반의 질화물 억제층을 n-GaN 와 SiO₂ 사이에 도입하였다. 또한, 반응성 에칭 공정을 통해 나노 크기의 캐비티를 형성하였다. 질화물과 산화물의 증착 및 에칭 단계가 Fig. 1에 제시되어져 있다. 실리콘 산화물 두께 3 μm에 대한 반응성 이온 에칭 시간은 580 sec이며, 실리콘 질화물인 SiN 물질의 100 nm 두께에 대한 플루오린화 수소의 에칭 시간은 30 sec이었다. 나노 프레임의 형성을 위한 나노 캐비티의 수직 특성을 측정하였으며, 나노 캐비티의 수직 특성을 위한 측정 방법이 Fig. 2에 나타나 있다. 이와 같은 방법으로 수직 특성을 조사하였으며, 나노 캐비티의 깊이 (depth)가 3 μm에서 80° 이하의 특성치가 확인되었다. 이러한 결과는 나노 캐비티의 수직 특성이 높지 않다는 것이며, 이러한 나노 캐비티를 적용한 나노 프레임을 적용할 시 나노 기둥의 수직 특성이 저하될 수 있다. 따라서, 나노 기둥의 높은 수직 특성을 위해서는 나노 프레임을 형성하는 나노 캐비티의 수직 특성이 보다 향상되어야 한다.

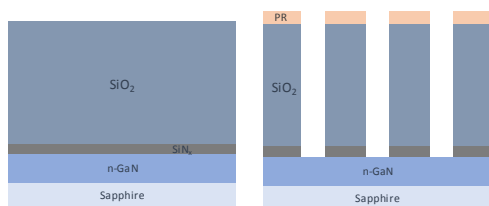


Fig. 1. Nano frame using an oxide layer on nitrides (a) and an etching process (b).

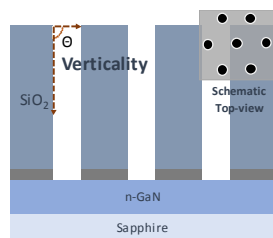


Fig. 2. Etching profile angle, and schematic image of top-view of nano cavities.

나노 프레임을 위한 나노 캐비티의 형성을 위한 산화물의 에칭 공정에서 수직 특성의 향상을 위하여 반응성 이온 에칭 중에 에칭 가스의 조건을 변경하는 단계별 공정 (Stepwise Process)을 통한 에칭 방식을 적용하였다. 첫 번째 단계에서는 C₄F₈/O₂/Ar 에칭 가스에 대해 C₄F₈/O₂ 가스의 비율을 23.1%, 그리고 압력 30 mT 조건을 적용하여 상부 지름을 확보하였으며, 두 번째 에칭 단계에서는 하부 지름의 확보를 위해 C₄F₈/O₂ 에칭 가스 비율 13.1%, 10 mT 압력에서 진행하였다. 이에 따라 나노 캐비티의 깊이를 달리하여 개선된 에칭 조건을 적용하였으며, 2와 3 μm 깊이의 나노 캐비티에서 높은 수직 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 2 μm 깊이의 조건에서 상부 캐비티 지름 360 nm, 하부 캐비티 210 nm 및 수직 특성 88.5°을 확보할 수 있었으며, 3 μm 깊이의 조건에서는 상부 360 nm와 하부 230 nm를 확인하였으며, 수직 특성 88.7°을 확보할 수 있었다.

3.2 나노 프레임의 질화물 충전

3차원 나노 구조를 위해 실리콘 산화물의 에칭을 통해 구현된 나노 캐비티를 가지는 나노 프레임에 질화물을 채우는 공정을 진행하였으며, Fig. 3에 공정에 대한 개략도가 제시되어져 있다. 나노 프레임의 충진을 위해 금속유기화학기상증착 설비의 반응기 압력 100mbar에서 2L의 암모니아가 과압된 상태에서 트리메틸갈륨이 GaN 성장을 위해 주입된다. 나노 캐비티의 충진이 진행 중일 때는 트리메틸갈륨 20 sccm (Standard Cubic Centimeter per Minute) 조건으로 주입되며, 충진의 마무리 단계에서는 5 sccm으로 줄인 뒤 트리메틸갈륨을 주입하지 않으면서 완료하게 된다.

나노 캐비티에 대한 질화물의 충진이 완료되면 GaN이 나노 캐비티 밖으로 성장하게 되며, 측정된 바와 같이 c-면의 성장 속도는 우르자이트 (Wurtzite) GaN에서 m 또는 r-면보다 빠르다. 따라서, 충전된 GaN은 c-면 상단을 갖는 육각형 피라미드 구조를 갖는다. 또한, 육각형 피라미드의 측면은 r-면으로 형성되게 된다. 이러한 성장 메커니즘은 사다리꼴 모양으로 나타나게 된다. 따라서 나노 캐비티의 충진을 위한 마지막 시기에 사다리꼴 모양을 갖게 되며 c-면 (0001)과 r-면 (10-12)이 나타나게 된다. 또한, 각각의 결정면에 대해 InGaN 박막의 두께를 비교하였으며, 이를 통해 r-면은 m-면 (10-10)과 비교하여 성장 속도가 30% 이하로

저하됨을 확인하였다. 나노 프레임을 통해 증진된 질화물의 결정 성장면에 대해 Fig. 4에 제시되어져 있다. 나노 기둥의 측면에서는 평면 구조에서 유발되는 c-면에 따른 분극 현상의 발생이 없는 m-면이 주요한 결정 성장면이 될 것으로 예상되며, 나노 캐비티를 채우는 마무리 단계에서 발생하는 r-면은 나노 구조의 전체적인 발광 면적과 비교하여 비중이 작을 것으로 판단된다. 하지만 추후 추가적인 연구를 통해 r-면을 통한 발광다이오드 구조의 특성에 대해서도 고찰하고자 한다.

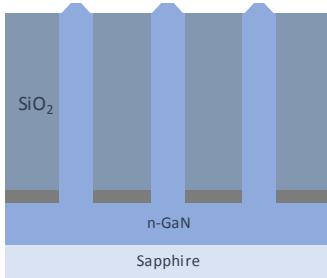


Fig. 3. Schematic diagram of the nano cavities filling of nitrides.

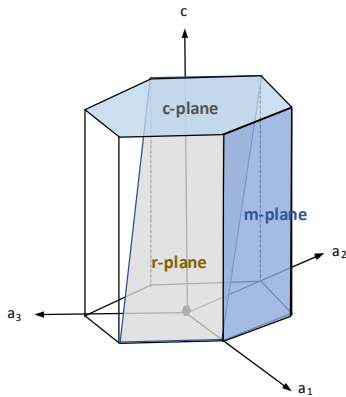


Fig. 4. Crystallographic planes of the wurtzite structure of nitrides, colored areas indicate the polar c-plane {0001}, non-polar m-plane {1-100} and semi-polar r-plane {1-102}.

3.3 나노 프레임을 통한 3차원 나노 구조

나노 기둥 구조를 형성하기 위하여 나노 프레임을 형성하는 산화물을 제거하는 공정을 진행하였다. 나노 프레임의 제작을 위해 나노 캐비티 내부에 질화물이 성장 되었으며, 산화물의 제거를 통해 나노 기둥 구조를 구현하였다. 이러한 나노 프레임을 구성하는 산화물의 제거를 위해 습식 식각이 진행되었으며, 본 연구에서는

Buffered Oxide Etchant와 Dilute HF (10:1) 용액이 적용되었다. 산화물의 식각을 통해 형성된 나노 기둥 형상이 Fig. 5에 제시되어져 있다.

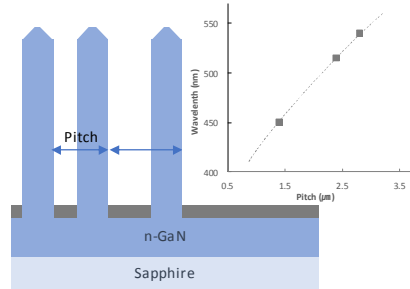


Fig. 5. Schematic diagram of nano pillar fabrication using the nano frame, and wavelength changes with nano pillar pitch sizes.

또한, 나노 기둥 형성을 위한 산화물의 식각을 통한 패턴 이미지가 Fig. 6에 제시되어져 있다. 나노 기둥의 어레이 구조를 위한 패턴 이미지를 통해 나노 프레임을 통해 구현된 나노 기둥 구조가 균일한 모양으로 제작될 수 있음을 예상 할 수 있다. 이러한 균일성의 확보는 나노 기둥 구조를 적용하여 조명 및 디스플레이의 광원으로 활용하기 위해 매우 중요한 확보 요건이다. 또한, 나노 프레임 구조 및 공정 적용에 따른 나노 기둥의 구현을 통해 나노 구조의 균일한 재현도 가능할 수 있음을 제시하고 있다.



Fig. 6. Nano pattern image for nano frame by optical microscope and scanning electron microscopy.

나노 프레임 구조를 통해 형성된 나노 기둥 측면에 발광층을 구성할 수 있으며, 이러한 발광층의 성장을 통해 나노 기둥 측면에 다이오드 구조를 가지는 나노 발광층을 형성할 수 있다 [15]. 나노 기둥에 성장된 발광층과 전극 물질을 통해 발광다이오드를 구현할 수 있으며, 전산모사에 의하면 나노 기둥의 피치를 변경함에

따라 발광 파장의 변화가 유도될 수 있다. 이에 따라 Fig. 5에서 나노 기둥의 피치 간격이 1.4, 2.4 및 2.8 μm 변화됨에 따라 파장 특성이 각각 450, 515 및 540 nm까지 변경시킬 수 있음이 제시되었다. 나노 기둥의 피치에 따른 파장의 변화는 다중양자우물층의 인듐 조성 변화와 밀접한 관련이 있으며, 피치가 증가함에 따라 인듐 주입도 증가된다고 추정할 수 있다. 인듐 주입의 변화는 나노 기둥의 피치 간격에 따라 인듐이 증착되는 전체 표면 넓이의 변동 때문에 발생할 수 있으며, 나노 기둥의 간격이 벌어짐에 따라 인듐의 주입 넓이가 작아지게 되며, 이로 인해 양자우물층에서의 인듐의 주입은 많아지게 된다. 따라서 나노 기둥의 피치가 벌어짐에 따라 장파장 특성이 나타나게 된다. 나노 기둥의 피치 간격에 따른 파장의 변경은 단일 소자에서 복수의 파장을 만들 수 있음을 제시하고 있다. 기존의 형광체에 의한 발광 효율 저하를 극복할 수 있는 방법으로 나노 캐비티 구조를 통한 나노 기둥 구조가 제시될 수 있다. 또한, 나노 기둥 구조가 적용된 소자에서 복수의 피치 간격 설계를 통해 색온도를 포함하는 광학적 특성이 변경될 수 있음을 예상할 수 있다. 이러한 3차원 나노 구조를 통해 비극성 성장면에서 빛을 방출하는 광원 구조를 구현할 수 있으며, 광원을 마이크로 크기 이하로 제작할 수 있음에 따라 나노 구조와 발광 기술이 융합될 수 있다. 또한, 3차원 나노 기술은 플렉서블 디스플레이에서 요구되는 유연 기판 기술과 아울러 초소형 광원의 구현을 통해 디스플레이 기술과도 융합되어 차세대 디스플레이를 위한 주요한 광원 기술로서 기대될 수 있다 [16].

4. 결론

반도체 광원의 적용을 위하여 산화물과 식각 공정이 적용된 나노 프레임 구조를 제작하여 나노 기둥 구조를 구현하였다. 이러한 공정을 통하여 나노 캐비티가 형성되었으며, 질화물을 나노 패턴으로 에칭된 캐비티에 성장하여 증진하였다. 나노 캐비티 구조를 통해 나노 기둥이 균일성과 재현성이 확보되었으며, 나노 기둥의 측면을 통해 m-면 질화물 성장이 가능하게 된다. 이에 따라 다중양자우물층 구조를 가지는 발광층을 비극성 면에 성장할 수 있게 된다. 이러한 나노 구조의 기둥을 피치 크기별로 배치할 수 있으며, 피치에 따른 파장 특성의 변화를 확인하였다. 이러한 변화는 나노 기둥의 간

격에 따른 인듐의 주입 특성의 차이로 설명될 수 있다. 나노 크기의 광원 제작과 아울러 나노 기둥의 배치에 따른 파장의 변화는 나노 구조 설계를 통해 흰색의 발광 특성을 구현할 수 있음을 보여주고 있다. 또한, 본 연구를 통한 나노 프레임을 통한 나노 기둥 기술이 디스플레이 또는 조명 분야에서 기존과 구별된 반도체 광원 기술로서 다양하게 활용될 수 있으리라 기대된다.

REFERENCES

- [1] B. Shin, S. Chiou, Y. Hsieh, C. Sun, T. Yang, S. Chen & T. Chung. (2015). Study of Temperature Distributions in pc-WLEDs with Different Phosphor Packages. *Opt. Express*, 23(26), 33861-33869. DOI : 10.1364/OE.23.033861
- [2] B. Fan, H. Wu, Y. Xian & G. Wang. (2007). Study of Phosphor Thermal-Isolated Packaging Technologies for High-Power White Light-Emitting Diodes. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 19, 1121-1123. DOI : 10.1109/LPT.2007.901098
- [3] W. Chien, C. Sun & I. Moreno. (2007). Precise Optical Model of Multi-Chip White LEDs. *Opt. Express*, 15(12), 7572-7577. DOI : 10.1364/OE.15.007572
- [4] Y. Tian. (2014). Development of Phosphors with High Thermal Stability and Efficiency for Phosphor-Converted LEDs. *J. Solid State Light*, 1, 11. DOI : 10.1186/s40539-014-0011-8
- [5] T. Yang, C. Chen, C. Chen, Y. Chang & C. Sun. (2014). Essential Factor for Determining Optical Output of Phosphor-Converted LEDs. *IEEE Photonics J*, 6(2), 8200209. DOI : 10.1109/JPHOT.2014.2308630
- [6] C. Sun, C. Chen, C. Chen, C. Chiu, Y. Peng, Y. Wang, T. Yang, T. Chung & C. Chung. (2012). High Uniformity in Angular Correlated-Color-Temperature Distribution of White LEDs from 2800K to 6500K. *Opt. Express*, 20(6), 6622-6630. DOI : 10.1364/OE.20.006622
- [7] L. Yin, L. Yang, W. Yang, Y. Cuo, K. Ma, S. Li & J. Zhang. (2010). Thermal Design and Analysis of Multi-Chip LED Module with Ceramic Substrate. *Solid-State Electronics*, 54, 1520-1524. DOI : 10.1016/j.sse.2010.06.028

- [8] S. Kim, J. Oh, J. Kang, D. Kim, J. Won, J. W. Kim & H. Cho. (2014). Two-Step Growth of High Quality GaN using V/III Ratio Variation in the Initial Growth Stage. *J. Cryst. Growth*, 262, 7-13. DOI : 10.1016/j.jcrysgro.2003.10.009
- [9] J. W. Kim, C. S. Son, I. H. Choi, Y. K. Park, Y. T. Kim, O. Ambacher & M. Stutzmann. (2000). Structural Properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Grown on Sapphire by Molecular Beam Epitaxy. *J. Cryst. Growth*, 208, 37-41. DOI : 10.1016/S0022-0248(99)00483-2
- [10] B. H. Kong, D. C. Kim, H. K. Cho, K. H. Lee, J. W. Kim & B. J. Kim. (2007). Blue and Green Emission using In(Ga)N/GaN Quantum Wells with InN Well Layers Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition. *J. Cryst. Growth*, 299, 282-287. DOI : 10.1016/j.jcrysgro.2006.11.211
- [11] J. W. Kim & K. H. Lee. (2005). Green and Blue Light Emitting InN/GaN Quantum Wells with Nanosize Structures Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition. *J. Semi. Tech. Sci.*, 5(2), 127-130.
- [12] Z. G. Ju, W. Liu, Z. Zhang, S. W. Tan, Y. Ji, Z. Kyaw, X. L. Zhang, S. P. Lu, Y. P. Zhang, B. B. Zhu, N. Hasanov, X. W. Sun & H. V. Demir. (2014). Advantages of the Blue InGaN/GaN Light-Emitting Diodes with an AlGaIn/GaN/AlGaIn Quantum Well Structured Electron Blocking Layer. *ACS Photonics*, 1, 377-381. DOI : 10.1021/ph500001e
- [13] J. W. Kim, K. H. Lee & S. Hong. (2007). Structural and Optical Characteristics of InN/GaN Multiple Quantum Wells Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition. *Thin Solid Films*, 515, 4405-4407. DOI : 10.1016/j.tsf.2006.07.180
- [14] T. Matsuoka, N. Yoshimoto, T. Sasaki & A. Katsui. (1992). Wide-Gap Semiconductor InGaIn and InGaAlN Grown by MOVPE. *J. Electron. Mater.*, 21(2), 157-163. DOI : 10.1007/BF02655831
- [15] M. Tchernycheva, V. Neplokh, H. Zhang, P. Lavenus, L. Rigutti, F. Bayle, F. H. Julien, A. Babichev, G. Jacopin, L. Largeau, R. Ciecchonski, G. Vescovi & O. Kryliouk. (2015). Core-shell InGaIn/GaN nanowire light emitting diodes analyzed by electron beam induced current microscopy and cathodoluminescence mapping. *Nanoscale*, 7, 11692-11701. DOI : 10.1039/c5nr00623f
- [16] K. Kim, J. Lee, M. Kim & Y. Min. (2019).

Characteristics of Excimer Laser-Annealed Polycrystalline Silicon on Polymer layers. *J. of Convergence for Information Technology*, 9, 75-81.

DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.3.075

김 제 원(Je Won Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 고려대학교 재료공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 재료공학과 (공학석사)
- 2000년 8월 : 고려대학교 재료공학과 (공학박사)

· 2000년 ~ 2017년 : 삼성전자 수석연구원

· 2017년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 교수

· 관심분야 : 나노 포토닉스, 디스플레이, 반도체 광원

· E-Mail : jewon.kim@nsu.ac.kr