

질화물계 나노구조 LED 소자의 연구개발 동향

글 _ 이성남
한국산업기술대학교 나노-광공학과

1. 서론

현재 조명용으로 각광을 받고 있는 LED 소자는 1970년대 적색 발광소자를 기반으로 개발된 후 지속적인 효율 증가와 더불어 그 응용분야가 지속적으로 확대되고 있다. 1990년대에 들어서는 질화물계 반도체를 기반으로 한 가시광 영역의 청색 및 녹색 LED가 일본의 니치아사를 중심으로 개발되었고, 최근에는 고효율 질화물계 청

색 LED 소자를 기반으로 한 백색 LED 소자가 개발되고 있다. 특히, 2000년대에 들어 고유가에 따른 에너지 절감 및 친환경적 소자로서 질화물계 LED 소자에 대한 관심이 급격히 증가되고 있고 있는 추세이다. 현재, 질화물계 LED 소자의 응용 범위는 신호등, 핸드폰 키패드 등의 신호기기의 사용에서 LCD BLU, 자동차, 일반 가정이나 사무실에서의 조명 등으로 응용분야가 급속히 확대되고 있다. 이런 응용 분야의 확대와 시장의 팽창으로 산업체

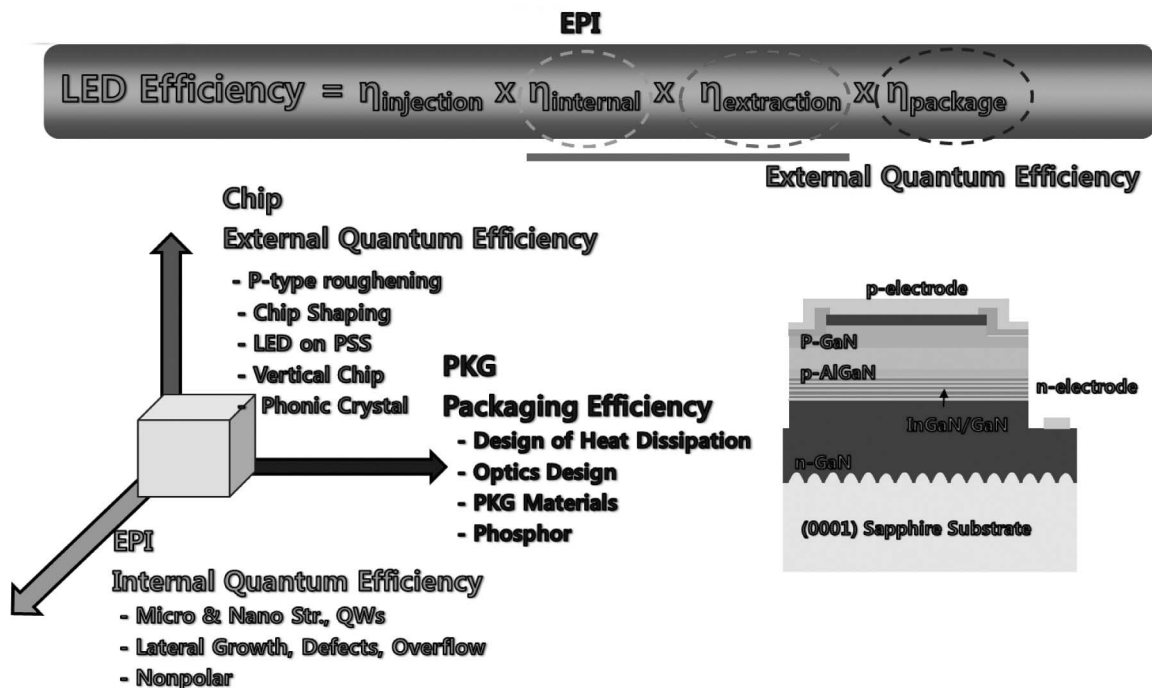


Fig. 1. LED 효율을 증대시키기 위한 에피 박막 성장, 칩 제조 및 패키지 공정의 이슈들¹⁾.

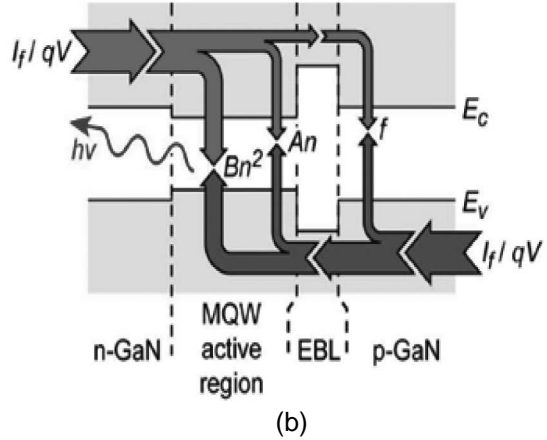
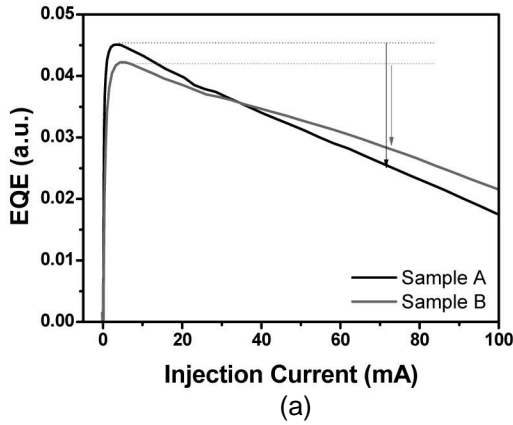


Fig. 2. (a) 고전류인가시 발광효율의 감소를 나타내는 전류-외부양자효율과의 관계, (b) LED 소자 내에서 발광 및 비발광 결합 경로²⁾.

에서 LED 산업의 경쟁력 증대를 위한 제조설비 투자 및 확대를 지속적으로 추진하고 있으며, 가장 중요한 LED 소자의 광효율 증가를 위한 많은 연구 개발이 진행되고 있다. 현재 질화물계 LED 소자의 응용분야의 확대를 위한 필요충분 조건인 광효율 증가를 위하여 우선적으로 우수한 LED 구조의 박막을 확보하기 위한 에피성장 기술을 기본으로 하여 다양한 LED 소자의 구조 설계 및 소자 공정 최적화에 의한 외부양자효율의 향상에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 특히, LED 산업에서 고효율/고출력의 LED 소자 개발을 위한 차세대 나노기술의 접목이 핵심적인 이슈로 떠오르고 있으며, 향후 LED 산업의 기술적 리더십을 확보하기 위해 많은 연구

그룹을 중심으로 나노구조 LED에 대한 연구가 이루어지고 있다. 따라서, 본 보고서에서 기존의 질화물계 LED 소자의 효율향상기술을 기반으로 차세대 나노기술이 융합된 고효율/고출력 LED 소자에 대한 연구 개발 동향을 소개하고자 한다.

2. 기술 동향

2.1. 질화물계 양자우물구조의 LED 연구 개발 동향

일반적인, LED 소자는 그 응용 분야의 확대를 위해 광효율 증대가 가장 우선적으로 진행되고 있다. 이러한 LED 소자의 효율은 Fig. 1에 나와 있듯이 내부양자효율, 외부추출효율, 패키지 효율 등의 곱으로 표현될 수 있다¹⁾. LED 효율의 식에서 나타나듯이 전체 LED 효율 증가를 위해서는 각 효율의 증대가 필수적이다. 우선적으로, 내부양자효율은 LED 에피 박막성장 및 구조에 관련되고, 추출 효율은 LED 박막의 물질특성과 소자제조공정에서 기술적 이슈들에 의해 결정된다. 마지막으로 패키지 효율을 소자화된 LED칩의 발광 효율을 극대화 시키기 위해 열 방출 및 광학 설계 등을 통하여 증가시킬 수 있을 것이다. 내부 양자 효율, 외부 양자 효율 및 패키지 효율을 증가시키기 위한 각 파트별 기술적 이슈들을 Table 1에 나타내었다.

우선적으로, LED 소자의 기본이 되는 에피박막 성장분

Table 1. LED 효율향상을 위한 주요 기술적 이슈

기술분야	기술 이슈
에피	- 질화물계 반도체 박막의 결정성 향상 기술
	- InGaNGaN 다중양자우물 구조의 최적화에 따른 광특성 증가
	- 저저항 n형 및 p형 GaN 성장 기술 개발
	- 광효율 극대화를 위한 LED 에피 기술
칩	- 비극성 및 반극성 GaN계 LED 에피성장 기술
	- 저저항 투명 전극 기술
	- 고추출 구조를 위한 나노 패턴닝 공정
	- 광량 증가를 칩 크기 및 형태 디자인
패키지	- 열특성 및 추출 구조 향상을 위한 수직형 LED 개발
	- 고방열 기반 및 패키징 소재 광미세유체기술을 이용한 형광체 도포
	- 광원소재 웨이퍼 레벨 칩 스케일 패키지 기술
	- 열 특성을 지표로 하는 다량 칩 LED 패키지/모듈에 대한 실 구동 환경적 수명 예측 모델 및 수명 연장 기술 개발

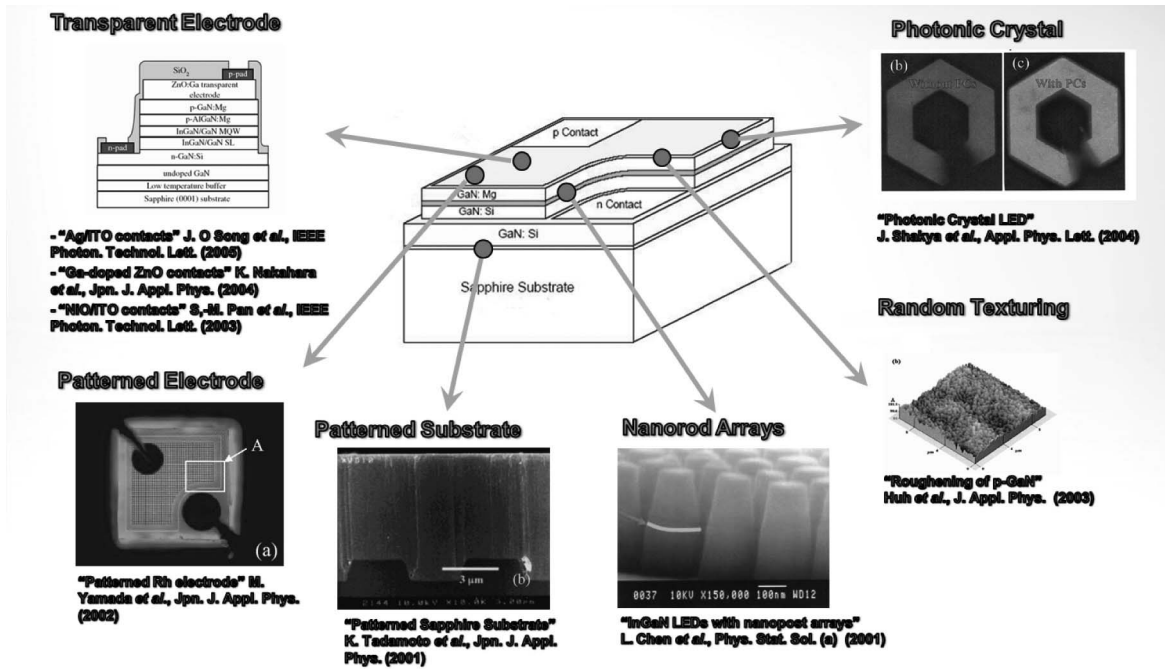


Fig. 3. 광 추출 효율극대화를 위해 LED 소자내의 연구 동향³⁻⁹⁾.

아에서는 사파이어 기판과 질화물 반도체 박막의 큰 격자상수 차이에 기인하여 많은 결정결함이 발생되어 광효율을 감소시키는 직접적인 원인이 되므로, 금속유기화학 기상증착법 (metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD)으로 각 성장변수 및 구조를 최적화하여 박막 내 전위를 감소시켜 고품질 LED 박막을 성장하고 있다. 추가적인 결정결함 감소방법으로는 측면성장법을 이용한 ELO (epitaxial lateral overgrowth)법, 패턴드 사파이어 기판 (patterned sapphire substrate, PSS)법 및 SiN 형성 등의 기술을 적용하여 실제 양산 가능한 균일한 품질을 얻고 있다. 하지만, 여전히 GaN 기판보다는 결함밀도와 결함 분포의 균일도가 떨어져 지속적인 고품질 에피박막 성장에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, LED 소자에서 가장 중요한 요소인 InGaIn 활성층의 물질 특성의 향상, InGaIn/GaN 다중양자우물구조의 최적화 설계 및 성장법 개발에 대한 지속적인 연구 개발을 통하여 현재 50% 이상의 높은 수준의 내부양자효율을 나타내고 있다. 또한, 최근 들어 효율저하 현상 (efficiency droop)에 대한 많은 연구 개발을 통하여 350mA 이상의 높은 주입

전류에서 효율 저하가 발생하지 않는 LED 개발을 위해, 결함 억제, 캐리어 누설, 압전현상억제 등의 기술적 돌파구를 찾기 위한 노력이 이루어지고 있다 (Fig. 2)⁹⁾.

LED 소자 측면에서 살펴 보면, 저저항 기술 및 광추출 효율 향상기술의 두 축으로 볼 수 있다. 우선 저저항 측면에서는 n형 및 p형 금속 접합기술 개발이 될 것이다. 특히, p형 질화물계 반도체 박막은 큰 일함수에 기인하여 오믹형성기술이 어렵다고 알려져 있다. 최근 들어, 광추출 효율 향상을 위한 투명 전극을 p형 위에 도포 후 금속 접합을 진행하므로 투명 전극으로 사용되는 산화물 및 금속접합에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한, 낮은 접촉 저항을 나타내면서도 투명도를 증가시키기 위한 투명전극 물질이 산화물반도체인 ZnO를 기반으로 연구되고 있다. 광추출 효율 증가를 위한 또 하나의 노력으로 고풍출 구조를 위한 나노 패터닝 공정 및 다양한 칩 크기/형태의 디자인도 집중을 받고 있다. Fig. 3은 광추출 효율 극대화를 위한 질화물계 LED 소자내의 칩제조 기술을 요약한 것이다³⁻⁹⁾. 앞서 언급한 투명전극 기술, 포토닉 크리스탈, 패터닝 전극, 패터닝 기판 및 나노 어레

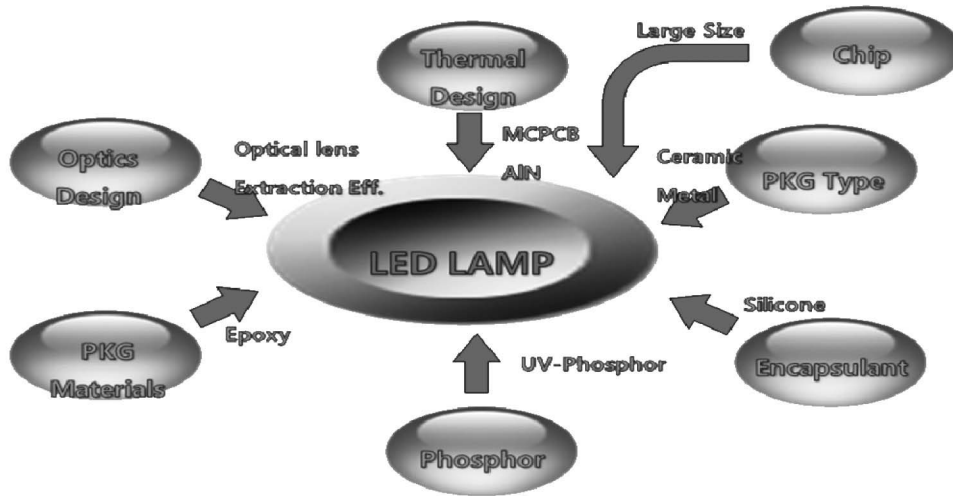


Fig. 4. 고효율 LED 램플 패키지를 위한 핵심 기술 요약.

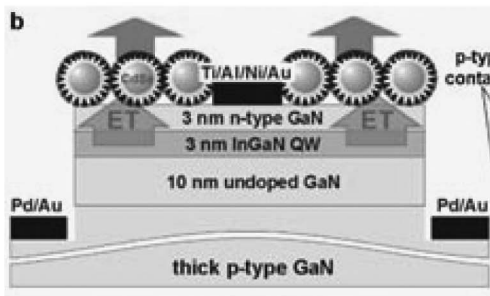
이를 통한 광추출 효율 극대화가 연구의 핵심으로 진행되고 있다.

LED 칩의 성능 향상 및 신뢰성 확보를 위한 패키지 공정 기술에 대한 핵심 기술을 Fig. 4에 나타내었다. 최근의 LED 패키지 기술은 신뢰성, 백색 LED의 색지수 및 열 특성에 대해 집중되고 있다⁹⁾. 우선적으로, LED 소자에서 발생하는 열을 효율적으로 방출하기 위한 패키지 형태 및 물질에 대한 연구가 국내 및 일본을 중심으로 개발되고 있다. 또한, 광추출 효율을 패키지 차원에서 향상시키기 위한 봉지재에 대한 연구도 진행되고 있다. 특히, 가시광영역에서 UV 영역으로 LED 소자의 발광 파장이 감소함에 따라서 높은 에너지에도 견딜 수 있는 새로운 봉지재의 개발이 필수적일 것이다. 또한, 청색 LED 기반

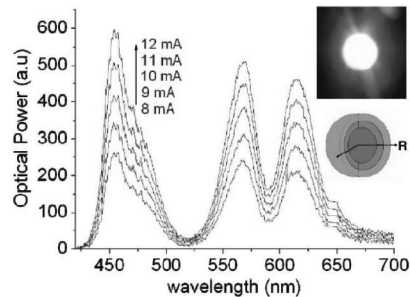
의 백색 LED 형성을 위한 고효율의 광변환 물질의 개발도 핵심 이슈로 떠오르고 있다.

2.2. 질화물계 나노구조 LED 소자의 연구 개발 동향

기존의 질화물계 가시광 및 백색광 LED 소자의 지속적인 발전에도 불구하고 응용 분야의 확대를 위해 더욱 높은 광출력을 요구되고 있다. 이를 해결하기 위한 기술로 기존의 질화물계 LED 소자 기술과 나노 기술을 융합한 나노 구조 LED 소자에 대한 기술적 요구가 지속적으로 증가하여 최근 해외 연구 그룹인 Los Alamo 연구실, 펜실베이니아 주립대 연구실 등에서 나노 구조의 형태로 녹색 이상의 파장의 LED를 시연하였다¹⁰⁾. 또한, 국내에서도 서울대, 성균관대, KAIST를 중심으로 나노 구조



(a)



(b)

Fig. 5. PL 발광구조를 이용한 FRET의 LED(a) 및 전류 주입형 FRET LED 구조 (b)^{10,11)}.

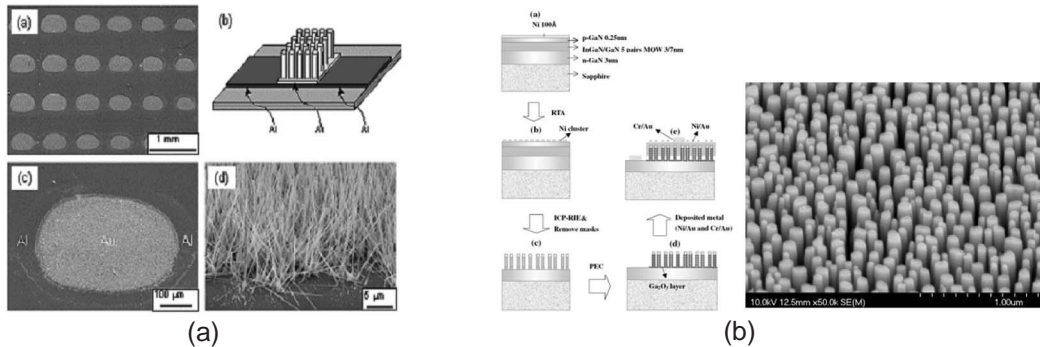


Fig. 6. KIST에서 Au 촉매를 이용한 ZnO 나노선을 성장하는 방법 (a) 및 매만의 Chiao Tung 대학에서 나노 막대 구조를 LED의 적용한 표면 사진 (b)^{12,13}.

화합물 반도체 발광소자에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재 연구되고 있는 질화물계 나노 구조 LED 연구 개발 분야를 크게 3분류로 나눌 수 있다. 첫 번째로는 공명에너지 전달 수직형 나노 LED 개발, 두 번째로는 나노 구조체 LED 개발, 세 번째로는 나노 광물질을 기반으로 한 높은 광추출 구조의 LED 개발분야로 세분화 시킬 수 있을 것이다.

2.2.1. 공명에너지 전달 수직형 나노 LED 개발

미국의 Alamos 연구실에서는 2004년도 포토루미네선스 구조를 이용한 FRET 개념을 처음으로 LED 분야에 제시¹⁰⁾한 이후 터키의 Bilkent 대학교에서는 실제로 전류를 인가하여 FRET LED구조에서 녹색 파장이상의 장파장 LED 및 백색 LED를 보고하였다¹¹⁾(Fig. 5).

2.2.2. 나노 구조 LED 개발

2000년대에 들어오면서 질화물계 LED 소자의 내부양자효율의 증가와 더불어 외부양자효율의 증대를 위한 추출구조 향상을 위해 LED 표면에 나노 구조를 형성하

로 LED의 추출 효율을 극대화하려는 노력이 진행되었다. 특히 산화물 반도체인 ZnO 나노 막대를 GaN 표면에 형성하여 효율을 증가시키려는 노력이 대만, 영국, 미국을 중심으로 진행되고 있고, 국내에서도 삼성종합기술원, KIST 및 대학을 중심으로 연구가 진행되고 있다 (Fig. 6)^{12,13}.

2.2.3. 나노 광물질 기반의 고추출 구조 LED 개발

나노 광학을 기반으로 한 포토닉 크리스탈 및 표면 플라즈몬을 이용한 광추출 효율 향상기술이 미국, 일본, 대만을 중심으로 연구되었고, 국내에서는 광주과학기술원, LG 전자기술원 등에서 진행되었다 (Fig. 7)¹⁴⁾. 우선, 포토닉 크리스탈은 기존의 LED 표면에 광자 결정을 형성하여 광추출 효율을 극대화 하고자, 나노 임프린팅 및 표면 식각 공정을 이용하였다^{14,15)}., 또한, 표면 플라즈몬 층을 LED 표면에 형성하여 내부양자효율을 증대하고자 하는 연구가 미국, 대만 등에서 진행되었으며 국내에서는 대학을 중심으로 진행되고 있다. 현재 광주과학기술원에서는 표면 플라즈몬 층을 LED 내부에 삽입함으로써 LED 효율을 증대할 수 있는 연구가 진행되고 있고¹⁶⁾, 다양한 금속에 대한 나노 구조를 제작하여 표면 플라즈몬으로 사용하고자 하는 검토 단계라고 볼 수 있다. 또한, 나노 구조체 형성 기술은 미국은 2000년 수립된 “국가나노기술전략”에 의해 나노 기술 전반에 대한 연구, 특히 나노 재료, 융합 연구분야 및 나노 포토닉스 기술에 대한 연구가 진행되어 LED 소자로의 응용으로 확대되고 있다. 국내에서는 서울대, 고려대 등의 대학을 중심으로 레이저 홀로그

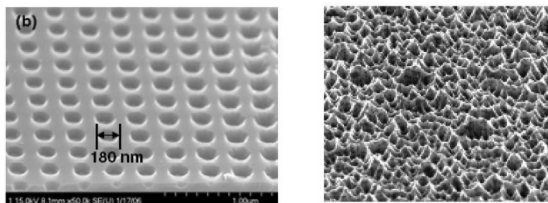


Fig. 7. LG전자기술원에서 주기적인 광결정을 p형 GaN에 형성한 구조 (a)와 대만의 Chiao Tung 대학에서 표면의 요철을 형성한 구조 (b)^{14,15)}.

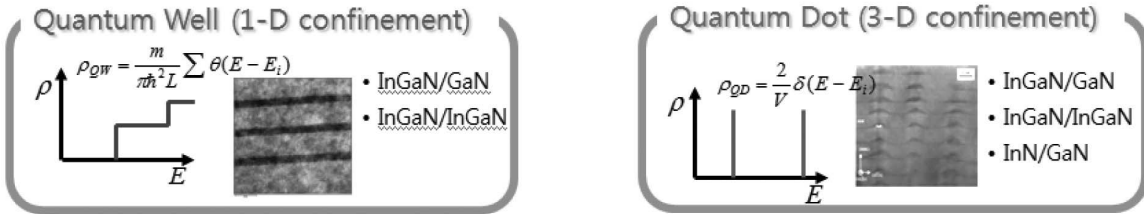


Fig. 8. 1차원 제한의 양자우물구조와 3차원 제한의 양자점 구조의 활성층.

래피를 이용한 나노 구조체 개발 및 나노 임프린트법을 이용한 나노 구조체 형성 기술을 이용하여 LED의 효율 향상을 위해 연구가 진행되고 있다^{17,18)}.

2.3. 차세대 질화물계 양자구조 LED의 연구 개발 동향

고효율 질화물 반도체계 LED 소자의 활성층으로 InGaN/GaN 다중양자우물구조가 사용되고 있다. 하지만, 시장의 요구에 따라 더 높은 광출력을 얻기 위해서는 양자효과를 이용한 양자선 및 양자점 기반의 차세대 LED 소자에 대한 연구가 추가적으로 대학을 중심으로 진행되고 있다. 일반적으로, InN 기반의 양자점 구조의 LED의 연구가 가장 활발하게 진행되고 있는 상태이지만, InN의 물질의 성장기술의 한계에 의하여 현재까지 기존의 양자우물구조를 능가하는 결과를 나타내지는 못하고 있는 실

정이다. 하지만, Fig. 8에서 나타내었듯이, 이론적으로 양자우물구조보다는 양자선 및 양자점 구조의 활성층이 우수하기 때문에 물질의 한계를 극복한다면 현재의 LED 소자보다 더욱 높은 광출력을 얻을 수 있는 LED의 활성층 구조로 여겨지고 있다. 또한, InN 기반의 양자점 구조 LED는 양자점의 크기를 조절함에 의하여 녹색 및 황색 영역의 green gap을 해결할 수 있는 또 하나의 기술로 여겨지고 있다¹⁹⁾.

InGaN의 물질의 특성인 상분리 현상을 인위적으로 이용하여 파장을 조절할 뿐 아니라, 기존의 청색 다중양자우물구조와 고농도의 InGaN의 상분리 현상을 이용하여 파장변환체가 존재하지 않고 LED 칩 자체에서 백색광을 얻고자 하는 연구가 삼성종합기술원에 진행되었다 (Fig. 9)²⁰⁾. 이는 하부 InGaN/GaN 다중양자우물 구조에서

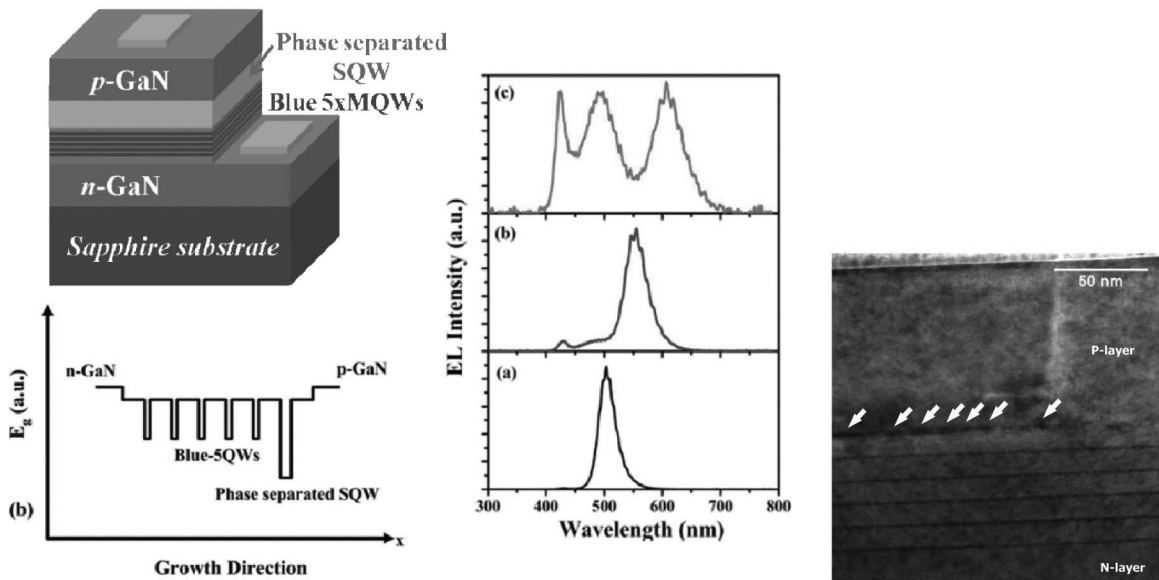


Fig. 9. Phase separated InGaN층을 이용한 phosphor-free white LED²⁰⁾.

청색을 발광하는 동시에 응력을 상부 InGaN층에 부가하여 InGaN가 적색과 녹색을 나타내는 두 개의 상으로 분리됨으로써 청색, 녹색, 적색의 삼원색을 파장변환물질이 없이 단일칩에 구현하였다. 하지만, 이 구조의 백색 LED도 파장변환물질이 없는 간단한 소자이지만, 효율측면에서 기존의 인화물을 이용한 백색 LED 소자에 미치지 못한 상태로 지속적인 효율 향상에 대한 연구가 이루어지고 있는 상태이다.

3. 맺음말

지금까지 차세대 조명으로 각광을 받고 있는 질화물계 나노구조 LED 소자에 대한 연구동향을 살펴보았다. 기존의 InGaN/GaN 다중양자우물 구조의 LED 소자에서 내부양자효율을 증가시키기 위한 노력이 에피성장 측면에서 집중되었다. 신개념 고효율 LED 소자로서 양자점 및 양자선 구조의 LED 소자뿐 아니라, 파장 변환물질이 존재하지 않는 상분리 나노구조 백색 LED에 대한 개발도 진행되고 있었다. 또한, 소자제작 측면에서 광추출효율을 향상시키기 위한 나노 구조 LED 및 나노 광물질의 개발에 대한 노력도 지속적으로 이루어지고 있다. 이런 일련의 모든 연구 개발은 향후 조명분야에서 질화물계 LED 소자가 기존의 조명을 대체할 수 있을 정도의 효율을 얻기 위한 차세대 핵심 기술이라고 판단되며, 이를 우선적으로 개발하는 연구그룹이 차세대 LED 분야를 이끌어갈 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. E. Fred Schubert, "Light-Emitting Diodes", Cambridge University Press, 2006.
2. M. F. Schubert, S. Chhajed, J. K. Kim, E. F. Schubert, D. D. Koleske, M. H. Crawford, S. R. Lee, A.J. Fischer, G. Thaler, and M. A. Banas, "Effect of Dislocation Density on Efficiency Droop in GaInN/GaN light Emitting Diodes", *Appl. Phys. Lett.*, **91** 231114 (2007).
3. J. O. Song, D. S. Leem, J. S. Kwak, S. W. Chae, and T. Y. Seong, "Improvement of The Luminous Intensity of Light Emitting Diodes by Using Highly Transparent Ag-Indium Tin Oxide P-type Ohmic Contact",

- IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** 291 (2005).
4. K. Nakahara, K. Tamura, M. Sakai, D. Nakagawa, N. Ito, M. Sonobe, H. Takasu, H. Tampo, P. Fons, K. Matsubara, K. Iwata, A. Yamada, and S. Niki, "Improved External Efficiency InGaN-Based Light Emitting Diodes with Transparent Conductive Ga-doped ZnO as P-electrode", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** L180 (2004).
5. S. M. Pan, R. C. Tu, Y. M. Fan, R. C. Yeh, and J. T. Hsu, "Enhanced Output Power of InGaN-GaN Light Emitting Diodes with High Transparency Nickel-Oxide Indium Tin Oxide Ohmic Contacts", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15** 646 (2003).
6. M. Yamada, T. Mitani, Y. Narukawa, S. Shioji, I. Niki, S. Sonobe, K. Deguchi, M. Sano, and T. Mukai, "InGaN-Based Near-Ultraviolet and Blue-Light Emitting Diodes with High External Quantum Efficiency Using a Patterned Sapphire Substrate and a Mesh Electrode", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** L1431 (2002).
7. K. Tadamoto, H. Okagawa, Y. Ohuchi, T. Tsunekawa, Y. Imada, M. Kato, and T. Taguchi, "High Output Power InGaN Ultraviolet Light Emitting Diodes Fabricated on Patterned Substrates Using Metalorganic Vapor Phase Epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** L583 (2001).
8. C. Huh, K. S. Lee, E. J. Kang, and S. J. Paek, "Improved Light-Output and Electrical Performance of InGaN-Based Light Emitting Diode by Microroughening of The P-GaN Surface", *J. Appl. Phys.*, **93** 9383 (2003).
9. J. Shakya, K. H. Kim, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "Enhanced Light Extraction in III-Nitride Ultraviolet Photonic Crystal Light-emitting Diodes", *Appl. Phys. Lett.*, **85** 142 (2004).
10. M. Achermann, M. A. Petruska, S. Kos, D. L. Smith, D. D. Koleske, and V. I. Klimov, "Energy-Transfer Pumping of Semiconductor Nanocrystals Using an Epitaxial Quantum Well", *Nature*, **429** 642 (2004).
11. S. Nizamoglu, E. Sari, J. H. Baek, I. H. Lee, and H. Volkan Demir, "Green/yellow Solid State Lighting Via Radiative and Nonradiative Energy Transfer Involving Colloidal Semiconductor Nanocrystals", *IEEE. J. Special Topics in Quantum Electronics.*, **15** 1163 (2009).
12. J. H. Park, W. J. Ko, Y. J. Choi, and J. G. Park, "Alignment of ZnO Nanowires on Al, Ti, Pt Electrodes", *Materials Letters*, **60** 2282 (2006).
13. C. H. Chiu, T. C. Lu, H. W. Huang, C. F. Lai, C.



- C. Kao, C. C. Yu, H. C. Kuo, S. C. Wang, C. F. Lin, and T. H. Hsueh, "Fabrication of InGaN/GaN Nanorod Light-emitting Diodes with Self-assembled Ni Metal islands", *Nanotechnology*, **18** 445201 (2007).
- 14 S. H. Kim, K. D. Lee, J. Y. Kim, M. K. Kwon, and S. J. Paek, "Fabrication of Photonic Crystal Structure on Light Emitting Diodes by Nanoimprint Lithography", *Nanotechnology*, **18** 055306 (2007).
15. W. C. Peng and Y. C. S. Wu, "Improved Luminance Intensity of InGaN-GaN Light Emitting Diode by Roughening Both the P-GaN Surface and The Undoped-GaN Surface", *Appl. Phys. Lett.*, **89** 041116 (2006).
16. M. K. Kwon, J. Y. Kim, B. H. Kim, I. K. Kim, C. Y. Cho, C. C. Byeon, and S. J. Park, "Surface Plasmon enhanced Light Emitting Diodes", *Adv. Materials*, **20** 1253 (2008).
17. H. W. Huang, C. C. Kao, J. T. Chu, W. D. Liang, H. C. Kuo, S. C. Wang, and C. C. Yu, "Improvement of InGaN/GaN Light Emitting Diode Performance with a Nano-Roughened P-GaN Surface by Excimer Laser irradiation", *Materials Chemistry and Physics*, **99** 414 (2006).
18. W. N. Ng, C. H. Leung, P. T. Lai, and H. W. Choi, "Photonic Crystal Light-emitting Diodes Fabricated by Microsphere Lithography", *Nanotechnology*, **19** 255302 (2008).
19. B. Damilano, N. Grandjean, J. Massies, and F. Semond, "GaN and GaInN Quantum Dots: An Efficient Way to Get Luminescence in the Visible Spectrum Range", *Appl. Surf. Sci.*, **164** 241 (2000).
20. S. N. Lee, H. S. Paek, H. Kim, and Y. Park, "Monolithic InGaN-based White Light-emitting Diodes with Blue, Green and Amber Emission", *Appl. Phys. Lett.*, **92** 081107 (2008).

●● 이성남



- 2006년 서울대학교 재료공학부 박사
- 2007년 삼성종합기술원 포토닉스랩 전문연구원
- 2008년 삼성전기 중앙연구소 책임연구원
- 2009년 현재 한국산업기술대학교 나노광공학과 조교수