GaN LED 연구의 현재 및 미래

DOI: 10.3938/PhiT.23.051

서은경·홍창희·김현수·조제희

Physics and Technological Overview of III-V Nitride Semiconductor Based Light-emitting Diodes

Eun-Kyung SUH, Chang-Hee HONG, Hyun Soo KIM and Jaehee CHO

Development of high-power, high-efficiency blue light-emitting diodes (LED) based on III-V nitride semiconductor heterostructures has led to the era of solid-state lighting and technology convergence between photonics and various fields such as information and communication, agriculture, biology, and medicine. In this article, recent achievements and progress in the field of the III-nitride material system and its optoelectronic applications especially for high-power, high-efficiency short-wavelength LEDs are presented and reviewed. Major technical issues yet to be solved are also discussed

as a means to recognize future technological trends and research activities.

서론

20세기 말은 오랫동안 산업적으로 지지부진해 온 화합물 반도체 역사상 매우 중요한 시기였다. 그것은 버퍼층을 이용하여 양질의 GaN 에피층 결정 성장에 성공한 것을 시작으로 청색 발광 다이오드(LED)와 레이저다이오드(LD)가 개발되었기 때문이다.^[1,2] 곧이어 LED의 대량생산이 뒤따랐고 고효율 청색 LED를 이용한 반도체조명, LCD back-light, 광촉매, 공기 및 수질 정화, 고출력/고온 전력소자 등 친환경 및 에너지 절약과 바이오/의료 분야 등으로의 응용 연구가 활발히 진행되면서 현재는 광반도체 산업 시장이 기하급수적으로 증가하여 반도체 산업 판도를 크게 변화시키고 있다. 유엔에서는 2015년을 “빛의 해(International Year of Light 2015)”로 선언하였는데 이는 빛을 다루는 광기술이 에너지, 교육, 농업 및 의료 분야에서 인류 문명 발전에 지대한 공헌을 하였음을 인정함과 동시에 향후 다양한 분야에 적용되어 광 기반의 미래산업이 세계 경쟁을 주도할 것으로 예상하기 때문인 것으로 풀이 된다.

광반도체란 반도체가 외부로부터 전자를 공급받아 빛을 발생하거나 빛을 받아 전자를 발생하는 특성에 의해 정의되며 이와 관련된 산업을 광반도체 산업이라고 한다. 광소자는 크게 발광 소자와 수광 소자로 나누고 이중 발광소자로서 LED와 LD가 있는데 LED나 LD의 후보 물질은 직접전이형 밴드갭을 갖는 물질로서 결정 성장을 쉽게 할 수 있고, 성장 시 결정 결함이 적은 물질이어야 하며, n형 또는 p형 도핑을 쉽게 할 수 있는 물질이어야 한다. 또한 이종결정성장(hetero-epitaxy)이 쉽고 식각이나 금속 증착이 용이하며 산화나 액화, 외부 공격에 대한 내성이 커서 쉽게 변성이 없는 물질이 좋은 재료가 된다.

GaN를 비롯한 III-V족 질화물 반도체는 직접전이형 반도체

저자약력

서은경 교수는 1988년 미국 Purdue University에서 화합물 반도체 양자 구조의 광학적 특성 연구로 박사학위를 받은 후 전북대학교 물리학과 교수(1989-2002)를 거쳐 2002년부터 현재까지 전북대학교 반도체과학기술학과 교수로 재직하고 있다. 전북대학교 반도체물성연구소장(2004-2008)을 역임하였고, 2004년 올해의 여성과학기술자상을 수상한 바 있다. (eksuh@jbnu.ac.kr)

홍창희 교수는 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과에서 광전자 분야에서 박사학위를 받은 후 미국 미시간대 연구원, LG 종합기술원을 거쳐 1998년부터 현재까지 전북대학교 반도체과학기술학과 교수로 재직하고 있다. LED 반도체 조명학회 학회장(2011-2013)을 역임하였고, 현재 LED 농생명 융합기술 연구센터 센터장으로 재직 중이다. (chhong@jbnu.ac.kr)

김현수 교수는 광주과학기술원 신소재공학 박사(2003)로서 삼성종합기술원 전문연구원(2003-2007), 삼성전기 중앙연구소 책임연구원(2007-2008), Georgia Institute of Technology, postdoctoral fellow(2008-2009)를 거쳐 2009년부터 현재까지 전북대학교 반도체과학기술학과 교수로 재직 중이다. (hskim7@jbnu.ac.kr)

조제희 교수는 광소자 분야의 전문가로서 2009년 서울대학교에서 박사학위를 받았고 삼성종합기술원 전문연구원(1998-2007)과 미국 Rensselaer Polytechnic Institute 선임연구원(2008-2013)을 거쳐 2013년부터 전북대학교 반도체과학기술학과 교수로 재직 중이다. (jcho@jbnu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] H. Amano *et al.*, Appl. Phys. Lett. **48**, 353 (1986).
- [2] S. Nakamura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **64**, 1687 (1994).

로서 가시광에서 자외선 영역까지의 광소자 응용에 아주 적합하며 열적, 구조적, 전기적 특성이 우수하여 광, 전기 소자 재료로 부각되어 많은 연구가 이루어졌다. 특히 고휘도 백색 LED의 개발과 조명에의 응용이 에너지 위기와 환경오염을 극복할 수 있는 국가적 대안으로 떠오르면서 현재 시장의 수요가 큰 청색 및 근자외선 LED 응용과 관련한 InGaN/GaN 구조가 연구와 개발의 중심에 있어 왔다. 일반적으로 LED 칩의 효율은 wall plug efficiency(WPE)로 평가되는데 구동회로의 효율과 전류주입효율, 내부양자효율, 광추출효율로 이루어져 있으며 각 부분의 효율을 증대시키기 위한 요소기술 연구가 이 분야의 연구 주제들이라 할 수 있다[그림 1].

현재 조명용 LED 반도체 소자 관련 기술은 90% 이상의 한계 목표 달성율을 보이고 있으며, 급격한 기술성장 단계를 벗어나 연구개발 및 기술의 발전 속도가 정체되고 있어, 대학·연구소 등 연구기관에서는 새로운 원천적 한계기술 분야의 연구를, 산업계에서는 생산성 및 품질향상을 위한 생산기술 분야와 LED를 적용한 응용·활용제품 개발 분야의 연구에 매진하고 있다. LED 산업은 타 산업과의 창의적 융합으로 발생하는 LED 융합산업으로 발전하고 있는데, LED 융합기술은 LED 기반기술과 응용개발 과정에서 수반되는 반도체 제조용 물리·화학·재료 및 공정장비 등 기계 분야의 성장 동기를 촉진하는 전방산업, 그리고 차세대 광원 및 조명에 대한 활용 측면에서 NT와 IT를 접목하는 기술(interface technology) 또는 LED광원을 적용한 LED 응용 제품 개발 등의 후방산업을 태동시키고 성장을 유발하는 차세대 핵심 신기술로 부각되고 있다. 그 밖에도 광산업은 스마트폰 등의 데이터 용량 증가와 3D 및 의료용 레이저 기술 이용률이 증가하면서 레이저 산업 또한 신고부가까지 산업으로 급성장하고 있다.

본 특집 기고문에서는 2014년 노벨물리학상 수상자들의 핵심 업적인 청색 LED 개발과 더불어 활발히 연구되고 있는 GaN를 비롯한 질화물 반도체 LED 소자 및 응용 기술과 관련된 연구 동향과 주요 이슈를 정리해 보며 향후 나아갈 방향 등을 생각해 보고자 한다.

GaN LED 연구 및 핵심 기술 개발 동향

LED 소자 관련 연구는 소자의 내부양자효율(internal quantum efficiency: IQE)과 광추출효율(light extraction efficiency: LEE), 전류주입효율(injection efficiency: IE), 전도효율(electrical efficiency: EE) 등 소자의 효율 극대화를 위한 요소 기술 개발에 초점이 맞춰져 있다. 내부양자효율은 반도체 재료의 결정성과 물성, 소자구조 등에 의해 결정되며 광추출효율과 함께 LED의 외부양자효율(external quantum efficiency: EQE)을 결

Fig. 1. LED efficiency.

정한다. 또한 외부양자효율과 전도효율의 곱이 WPE인데 이것은 전기적 출력 대비 발생하는 광출력으로 정의되며 LED 소자의 전체 효율을 지칭하는 핵심 용어이다. LED의 WPE를 개선하기 위해서는 특히 내부양자효율, 광추출효율 및 전도효율을 개선해야 하는데 이에 대한 핵심 기술 개발 동향은 아래와 같다.

1. III-V족 질화물 반도체 고품위 에피 박막 성장 및 물성 제어

고휘도 LED는 금속유기화학기상증착법(metalorganic chemical vapor deposition: MOCVD)을 이용한 원자층 제어 반도체 박막성장기술과 다중양자우물구조를 갖는 소자 개발을 통해 가능해졌다. LED의 내부양자효율 개선을 위한 연구는 III-V족 질화물 반도체 에피 박막의 결정성과 소자 구조 개선을 통해 물성을 제어함으로써 극대화할 수 있다. GaN를 비롯한 질화물 반도체는 덩어리 단결정 성장이 어려워 이종기판을 이용하는 에피성장기에 의존하고 있는데, 일반적으로 격자부정합과 열팽창 계수의 차이가 큰 사파이어를 기판으로 사용하고 있어 성장되는 에피층은 매우 높은 전위 및 결함 농도를 갖는다. 이종 에피 박막에 발생하는 전위나 결함은 비발광성 재결합 센터나 전하누설의 통로를 만들어 소자의 수명과 효율을 떨어뜨리는 역할을 하기 때문에 좋은 성능의 소자를 제작하기 위해 전위 밀도가 낮은 고품위의 에피층 성장 기술 확보는 가장 기본적인 원천기술이라 할 수 있어 이와 관련한 연구가 매우 다양하게 이루어져 왔다. 이를 위하여 저온 성장 버퍼층, 초격자구조, epitaxial lateral overgrowth, pendeo epitaxy, facet-initiated epitaxial lateral overgrowth, lateral epitaxy on a patterned substrate, 나노입자 및 패턴을 이용한 selective area growth 등의 고품위 에피성장방법들이 연구되어 왔다.^[3] 뿐만 아니라 응용에서 가장 중요한 구조인 양자우물구조에서는 piezoelectric

REFERENCES

- [3] H. Hirayama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **80**, 2057 (2002).

효과에 의해 전기장이 형성되어 공간적으로 전자와 양공이 분리되는 간접 밴드갭을 갖게 된다. 기존의 반도체 물질의 경우 이러한 격자결함이나 결정 내 전기장 등의 특성들은 매우 낮은 발광효율로 나타나는 데 반해 질화물 반도체 광소자는 뜻밖에도 매우 높은 발광 효율을 보여주고 있는데, 이는 활성층으로 사용되고 있는 InGaN 에피층에서 일어나는 상분리 현상과 이에 따른 In 농도의 불균일로 인한 양자점 형성을 적절히 제어하면 운반자들을 강하게 국소화시켜 전위나 전기장의 영향을 크게 줄여주기 때문으로 생각된다.^[4] AlGaInP계 적색 LED의 내부양자효율은 90%를 능가하는 데 반해 AlGaInN계에서는 InGaN/GaN 양자우물 구조의 청색 LED의 경우 내부양자효율은 최고 70% 수준이고 녹색 LED의 경우는 36% 수준으로 최근 보고된 바 있다.^[5] 게다가 내부양자효율은 주입 전류 밀도가 증가하거나 접합온도가 증가할 경우 감소하게 된다. InGaN/GaN LED의 내부양자효율을 제한하는 핵심적인 인자로는 앞에서 언급한 바와 같이, 첫 번째로 $\sim 1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 수준의 높은 관통전위(threading dislocation) 밀도, 두 번째로는 높은 인듐 조성을 가지는 GaN 성장을 위해 감내해야 하는 저온성장 조건 및 이에 기인하는 높은 점결함(point defect) 밀도, 세 번째로 전자와 양공의 파동함수를 분리시켜 발광재결합 수명을 증가시키는 내부전기장 효과이다. 그밖에도 기존의 반도체 물질과는 아주 다른 p형의 특성에 대한 이해와 제어, 격자 불일치로 인해 발생하는 스트레인의 조절, quantum confined Stark effect(QCSE)를 줄이기 위한 비극성 에피성장 등 기초 물성에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

2. 광추출효율

활성층 내부에서 빛을 효율적으로 생성시킴과 동시에 생성된 광자를 LED 칩 외부로 추출하고 배광 분포를 조절하는 것은 매우 중요하다. GaN계 LED에서는 외부 봉지재(encapsulant) 또는 공기의 굴절률($n \sim 1.1\text{--}1.5$)에 비해 상대적으로 높은 반도체의 굴절률($n \sim 2.4\text{--}3.5$)로 인하여 내부 전반사 현상이 일어나 LED 칩 내부에 빛이 갇혀 광추출효율이 매우 낮아지게 된다. 이를 해결하기 위해 다양한 기술들이 적용되었으며 크게는 광선광학(ray-optics) 기반 기술과 파동광학(wave-optics) 기반 기술로 구분할 수 있다. 광선광학 기반 기술로는 LED 구조에 불규칙적인 산란 지점으로 작용하는 난반사 구조물을 의도적으로 삽입하는 것이 포함된다. 반구형 또는 다면체 형상을 이용하여 칩을 형상화(shaping)하는 것을 비롯하여^[6,7] LED 표면을 거칠게 하여 광자 전파방향을 불규칙화하는 것인데 습식 또는 건식 식각을 이용하여 표면을 거칠게 할 경우 50% 이상의 광추출효율 향상 효과가 있음이 입증되었다.^[8,9] 대표적으로는 건식 식각을 통하여 패터닝 사파이어 기판(patterned sapphire sub-

Fig. 2. Top-view and angle-tilted SEM images of the LED fabricated by wet etching.^[10]

strate; PSS) 구조를 사용하는 것이며, PSS를 사용하여 LED 에피구조를 성장하는 것은 광추출 효율의 증가뿐 아니라 GaN 에피 박막층 성장 시 기판에서부터 전파되어 오는 관통전위의 방향을 변경시켜 LED 구조의 n형 박막층 및 양자우물구조 활성층으로 전파되는 전위의 밀도를 감소시킴으로써 결정성을 향상시키는 효과도 있어 실제 양산에 널리 적용되고 있다. 최근 공정이 간단하고 공정단가가 저렴한 습식식각을 통한 광추출구조 연구도 보고되고 있는데 [그림 2]는 이러한 습식식각을 통해 형성한 결정학적 광추출구조의 예를 보여준다.^[10] 에피택셜 LED 층을 리프트오프(lift-off)함과 동시에 또 다른 이중기판에 접합시키는 웨이퍼본딩 기법은 박막 LED에서 두꺼운 창문층(window layer)을 제공하여 광추출효율 향상이 가능한 최신 기술 중 하나이다.^[11,12]

빛을 한 곳으로 모으거나 방향을 전환하는 등의 제어가 가능한 파동광학 기반 기술을 응용하기 위해서는 서브마이크로 크기를 이용한 굴절률의 주기적 변동을 통해 가능하다. 그러나 요구되는 서브마이크로 구조의 크기는 광선광학 기반기술에 비해 더욱 미세하며 비용이 많이 든다. 파동광학 기반의 대표적인 기술로는 우선 공진공동 LED(resonant-cavity LED)가 있는데 이것은 상부와 바닥 반사경에 의해 형성된 광공동(optical cavity)으로부터 형성되는 공동모드(cavity mode)에 기인한 자발발광(spontaneous emission)의 강화에 기반한다.^[13] 두 번째로는 반도체-금속 계면에서 발생하는 표면플라즈몬-폴라리톤 모드(surface plasmon-polariton mode)와 자발발광을 커플링시켜 발광

REFERENCES

- [4] D. Huang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **80**, 216 (2002).
- [5] M. R. Krames *et al.*, J. Disp. Technol. **3**, 160 (2007).
- [6] W. N. Carr *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices **12**, 531 (1965).
- [7] S. J. Lee *et al.*, Proc. SPIE **3621**, 237 (1999).
- [8] R. Windisch *et al.*, IEEE Electron Lett. **34**, 1153 (1998).
- [9] T. Fujii *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 855 (2004).
- [10] S. Jung *et al.*, Adv. Mater. **25**, 4470 (2013).
- [11] M. R. Krames *et al.*, Appl. Phys. Lett. **75**, 2365 (1999).
- [12] D. Morita *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 5945 (2004).
- [13] J. J. Wierer *et al.*, Appl. Phys. Lett. **74**, 926 (1999).

효율을 향상시키는 것이다.^[14] 세 번째로는 광결정(photonic crystal)이 있는데 이것은 주기적으로 패턴된 굴절률을 가지기 때문에 전자기파의 전파를 조작할 수 있으며 결과적으로 LED 박막 내부에서 측면방향을 따라가는 도파 모드(guided mode)를 제거함으로써 추출구조 개선이 가능하다. 빛의 특성 제어가 가능한 파동광학 기반 기술은 특히 프로젝터용 고방향성 고발광 광원이나 디스플레이 응용을 위한 분극제어 광원과 같은 특별한 응용 분야에서 활용 가치가 높다고 할 수 있다.

3. 전도효율 및 열특성

LED 구동 시 생성되는 열은 소자의 내부양자효율, 광출력 및 신뢰성에 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다. 이러한 발열 문제는 활성영역 결정격자의 온도로 지칭되는 접합온도로 정량화되며 구동전류의 함수로서 이해하는 것이 바람직하다. 열은 LED 소자의 전극 부분, 클래딩층 및 활성영역에서 생성되는데 일반적으로 저전류 수준에서의 주요한 열원은 비발광성 재결합에 의한 활성영역이고 고전류 수준에서는 Joule 가열이 I^2R (I : 전류, R : 저항)에 의존하기 때문에 전극과 클래딩층과 같은 기생저항의 기여가 주도적이게 된다. 따라서 발열 문제를 근본적으로 최소화하기 위해서는 내부양자효율의 향상 및 전극과 클래딩층에서의 저항을 감소시키는 것이 중요하다. 또한 소자의 저항은 전도효율을 결정하기 때문에 소자의 WPE를 향상시키기 위해서도 저항을 감소시켜야 한다.

LED 소자에서 특히 저항을 크게 차지하는 것은 p형 전극의 상대적으로 높은 접촉저항 성분인데 이는 전극과 p형 GaN 물질간의 일함수 차이가 커서 높은 쇼트키 장벽(Schottky barrier)을 형성할 뿐만 아니라 양공의 농도가 상대적으로 낮기 때문에 오믹접촉(ohmic contact) 형성이 쉽지 않기 때문이다. p형 저저항 오믹전극을 형성하기 위해 p형 GaN 박막성장 측면에서는 Mg 도핑 최적화, InGaN계 스트레인층 적용, 초격자, 터널접합층 적용과 같은 다양한 시도가 이루어졌으며 전극공정 측면에서는 다양한 화학적 표면처리, 열처리 온도 및 분위기 최적화, 레이저 표면처리, 이온주입, 나노입자 등이 연구되었다. 현재 양산을 위해서는 인듐주석산화물(ITO) 투명전극 또는 은(Ag)을 이용한 고반사막 전극을 적용한 후 열처리 최적화를 통한 저저항 오믹전극을 사용하고 있다.^[15]

실질적으로 소자의 발열을 완전히 억제하는 것은 어렵기 때문에 발생된 열을 효과적으로 제거하는 것은 응용 측면에서 중요하다. 이를 위해 열저항이 낮은 패키지 재료 및 구조 설계에 대한 연구가 많이 수행되어 왔으며 최근에는 LED 칩 수준에서 열을 효과적으로 분산, 방출시키기 위한 노력이 시도되고 있는데 [그림 3]은 열전도도가 높은 그래핀(graphene)을 LED 칩 내부에 삽입하여 열특성을 개선한 최근의 연구결과를 보여준다.^[16]

Fig. 3. (a) Cross-sectional TEM image of GaN/rGO/sapphire interface, and (b) temperature distribution on the surface of the conventional LED and the rGO-embedded LED by an infrared thermal imaging camera.^[16]

GaN LED 기술개발의 난제 및 미래 연구 방향

GaN LED 소자 분야의 미래 연구는 단기적으로는 현재 해결되지 못한 난제를 중심으로 이루어져 갈 것이며 장기적으로는 신물질·신구조를 이용한 신개념 LED 소자 개발로 이루어질 것으로 예측된다. 대표적인 문제점과 연구 방향에 대해 검토해 보고자 한다.

1. 그린갭(Green gap)

질화물 반도체 기반 청색 LED와 인산계 반도체 기반 적색 LED의 수십 년에 걸친 지속적인 발전의 와중에도 그 중간에 위치한 녹색 파장 영역의 LED는 낮은 광효율을 보이는데 이를 그린갭(green gap)이라고 한다. [그림 4]는 녹색 파장 부근에서 GaInN 기반의 질화물 반도체 LED의 광효율이 급격하게 감소하고 있는 결과를 보여준다. 이는 InN와 GaN 사이에 큰 격자부정합과 더불어 결정구조에서 유래한 내부극성이 청색에서 장파장으로 진행할수록 악화되어 높은 밀도의 결함과 높은 내부압전 전기장을 발생시키기 때문이다. 동시에 인산계 AlGaInP 기반의 LED는 적색 파장에서는 높은 광효율을 보여주지만, 알루미늄(Al) 증가를 통해 단파장을 만들면 Al이 증가하면서 AlGaInP 반도체가 직접천이 반도체에서 간접천이 반도체로 변하기 때문에 효율이 마찬가지로 감소됨을 알 수 있다.

그린갭 이슈는 빛의 삼원색 중 하나인 녹색 광원의 성능 향상을 목적으로 오랜 기간 LED 연구개발의 주요한 초점이 되어 왔으며, 최근 구현 가능한 해결책과 대안으로서 GaInN 박막의 호모 에피택시(homo-epitaxy) 및 증착 방법 개선, 새로운 III-V 혹은 II-VI 반도체 탐색, 그리고 형광체를 활용한 녹색

REFERENCES

- [14] K. Okamoto *et al.*, Nat. Mater. **3**, 601 (2004).
- [15] J. O. Song *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices **57**, 42 (2010).
- [16] N. Han *et al.*, Nat. Commun. **4**, 1452 (2013).

Fig. 4. State-of-the-art EQEs for LEDs emitting at various wavelengths. (1) InGa_xN TFFC LEDs, (2) InGa_xN VTF LEDs, (3) InGa_xN PSS LEDs, and (4) AlGaInP TIP LEDs. Also shown is $V(\lambda)$, the luminous eye response curve.^[5]

Fig. 5. (a) Schematic illustration and (b) SEM image of the nano-rod LED comprising graphene and Ag nanowires.^[17]

광원 개발 등을 거론할 수 있다. 특히 고농도 인듐을 포함한 GaInN 박막에 대한 연구가 그린캡을 해결할 가장 가능성 높은 방법으로 알려져 있으며, 주요 연구 방향은 LED 내부의 응력과 내부 전기장을 줄이는데 그 초점이 맞추어져 있다. 일례로 비극성 GaN 기판 위에 성장된 LED는 내부 전기장과 응력의 감소를 통한 높은 In 주입이 가능하며 소자의 특성이 개선되는 것을 볼 수 있는데, 530 nm 파장에서 약 30%를 상회하는 내부양자효율과 함께 100 lm 출력, 80 lm/W 효율 등의 성능을 보여주고 있다.^[5] 최근 [그림 5]와 같이 InGa_xN/GaN nanorod LED에 그래핀과 은 나노막대를 융합하여 유연한 투명전극을 제작하여 적용함으로써 녹색 LED 효율을 개선시킨 결과가 보고되어 나노구조를 활용한 신개념 LED 연구가 진행될 것으로 보인다.^[17]

2. Efficiency droop

고효율/고출력 LED를 달성하기 위한 기술적인 난제 중에서 가장 주목 받고 있는 중요한 현안은 고전류 주입 시 LED의

Fig. 6. Power efficiency versus current showing a decrease in efficiency with increasing current.

효율이 감소하는 현상이다. [그림 6]에서 보는 바와 같이 질화물 반도체 LED의 경우 낮은 전류에서는 높은 효율을 보여주고 있지만, 동작 전류가 증가함에 따라 효율이 50% 이상 감소하고 있다. 이러한 현상을 Efficiency droop(효율감소)이라 하며, 단순히 소자의 발열에 기인한 현상으로는 설명되지 않는다. 대부분의 질화물 반도체 LED에서 효율감소가 나타나는 것을 볼 수 있으며, [그림 6]과 같이 단파장 LED보다 장파장 LED에서 이 현상이 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있다.

현재까지 효율감소에 대한 원인으로는 캐리어 비편재화, 결합 의존 터널링, Auger 비발광재결합, 그리고 내부전기장에 의한 나르개 주입효율 악화 등이 제시되고 있다. 이 중에서 지난 몇 년간 공고히 지지를 받고 있는 두 개의 가설은 Philips Lumileds사에서 처음 제안한 Auger 비발광 재결합^[18]과 나르개 주입효율 악화이다.^[19] Auger 재결합은 높은 전류 밀도에서 크게 부각되는 비발광 재결합의 한 현상으로서 전류에 따른 효율 감소를 직관적으로 설명하기에는 유리하나, 질화물 반도체와 같은 밴드갭이 큰 물질에서는 일반적으로 작은 Auger 계수를 가지게 되며, 전하밀도의 세제곱($\sim n^3$)에 비례하는 Auger 재결합 과정은 LED에서는 흔히 나타나지만, 상대적으로 낮은 전류밀도에서 동작하는 LED에서는 그 영향이 작은 편이라고 알려져 있다. 이와 달리 미국 Rensselaer Polytechnic Institute 대학의 연구그룹에서는 전자와 양공의 이동도 차이에 기인하여 LED 효율감소를 설명하였다. 즉, 농도와 이동도가 상대적으로 작은 양공은 동작전압이 증가할수록 활성층 내부로 충분히 주입되지 못하는 반면 농도와 이동도가 큰 전자는 활성층 외부로 전자의 누설이 가속되고 결과적으로 누설 전류에 의한 p형 반도체 층

REFERENCES

- [17] T. H. Seo *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **47** 315102 (2014).
- [18] Y. C. Shen *et al.*, Appl. Phys. Lett. **91**, 141101 (2007).
- [19] M. H. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **91**, 183507 (2007).

Fig. 7. Schematic illustration of the conduction band (E_c) and valence band (E_v) energies of a InGaN LED. Arrows represent regions of electron and hole injection and recombination.^[21]

에서의 비발광성 재결합을 야기한다. 전자와 양공 이동도의 비대칭성은 활성층으로 전하를 효율적으로 주입하지 못하는 결과를 초래해 내부양자효율의 감소로 이어지고 이러한 현상은 전류밀도가 증가하면서 더욱 가속되게 된다. [그림 7]은 InGaN 기반 LED의 에너지 밴드 구조가 내부 전기장과 계면 분극에 의해 변형된 것을 보여주고 있다. 양자우물의 삼각형 밴드 구조뿐만 아니라 소자의 p-형 반도체 층에 위치한 전자 차단층 (electron blocking layer: EBL)의 에너지 장벽의 감소도 모두 강한 분극현상에 의해 발생된다. 이렇게 왜곡된 에너지 밴드 구조 하에서 전자/양공의 비대칭성에 기인한 주입효율의 감소 효과는 더욱 악화되어 심각한 효율감소를 가져오게 된다. 이같은 효율감소를 해결하는 대책으로 분극 완화 LED 구조가 제안되었고, 이를 통해 청색 LED에서 효율감소를 약 18%로 감소시키는 결과가 보고되었다.^[20] 또한 비극성 기판을 사용하여 활성층에 생기는 분극을 줄이는 방법과 고농도 p형 반도체를 사용하여 비대칭성을 해결하고자 하는 시도 등이 진행 중이다. 현재까지도 전류에 따른 효율감소의 원인 및 대책에 대해서는 여전히 활발히 연구가 진행 중이지만, 높은 전류밀도 수준에서도 LED 활성층 내부의 전자와 양공의 농도 분포를 균일하게 만드는 것이 당면 과제이다.

3. 단파장 자외선(Deep ultraviolet: DUV) LED

오늘날 가시광 LED가 조명을 비롯한 응용분야에 활발하게 적용되고 있는 가운데, 과학·공업, 의료·환경, 반도체 산업 등에서 광범위하게 사용되고 있는 UV 광원은 대부분 대규모, 고전력 소비의 장치를 이용하고 있어 반도체 재료를 이용한 UV-LED 소자의 개발 및 구현이 중요한 연구 분야로 남아 있고 기술 개발 선점을 위한 국제적 경쟁이 고조되고 있다. UV-LED 관련기술의 수준단계는 연구개발 도입 및 잠재기를 지나서, 성장기를 진입하는 초기단계로서, 현재 전 세계적 연구그룹들의 폭발적 기술도약이 예측되는 시점이라고 할 수 있다.

Blue LED

DUV LED

Fig. 8. Flow charts of electrical and optical losses during operation of blue and DUV LEDs. The exemplary WPE is indicated for each device.^[22]

다양한 반도체 물질 중에서 UV 광원으로 사용될 수 있는 최적 후보의 화합물반도체는 InGaN-GaN-AlGaIn 질화물반도체 시스템을 구성하는 물질로서, 이론적으로 적외선 및 가시광선을 포함하여, UV-A, B, C 전 영역의 반도체 발광소자를 구현하는 것이 가능하다. 특히, AlGaIn 질화물 반도체는 밴드갭이 3.4 eV (~360 nm)에서 6.2 eV (~200 nm)까지 변화시킬 수 있는 물질로서 UV 영역의 발광소자를 제작하는데 매우 적합한 물질이다. 고효율 UV-LED를 구현하기 위한 핵심 요소기술은 ① 고품위 AlGaIn 에피택시 박막성장, ② 높은 내부양자효율 구현을 위한 양자우물 구조 및 이중접합 밴드갭 양자구조의 성장, ③ 광방출 효율을 극대화하기 위한 전극구조 및 광추출 표면구조 등 크게 3분야로 구분할 수 있다.

고농도 Al 조성비를 갖는 에피박막 성장은 흔히 박막에 균열이 발생하고 성장된 박막 내부에 높은 전위밀도를 가지고 있어 고품위 박막을 얻는 데에 어려움이 있으며 AlGaIn으로 구성되는 p층 반도체의 낮은 전기전도도는 전체 소자의 성능을 저하시키는 대표적인 기술적 난제이다. 마그네슘(Mg)의 높은 이온화 에너지에 기인한 p형 AlGaIn층의 낮은 전기전도도는 양공의 주입을 저해함으로써 활성층에서 전자와의 재결합을 감소시키며 결과적으로 효율을 감소시키게 된다. 참고로 Mg이 도핑된 p형 GaN의 이온화에너지가 170 meV 정도임에 비하여, Al 조성이 증가할수록 이온화 에너지는 AlN의 약 500 meV에 이르기까지 선형적으로 증가한다. 그 결과, p형 AlN에서 얻을 수 있는 양공의 농도는 10^{14} cm^{-3} 남짓으로 매우 낮으며, 따라서 이로 구성된 LED에서 정상적인 동작을 기대하기는 어렵다. 이를 해결하기 위해 초격자구조를 사용하여 밴드변

REFERENCES

- [20] J. Xu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **94**, 011113 (2009).
- [21] M. H. Crawford *et al.*, IEEE J. Select. Top. Quant. Electron. **15**, 1028 (2009).
- [22] M. Shatalov *et al.*, Int. J. Hi. Spe. Ele. Syst. **21**, 1250011 (2011).

Fig. 9. Transmission spectrum of an ITO film.

화를 이용하여 Mg 이온화를 용이하게 하거나 터널접합을 활용하여 양공 주입을 향상시키는 방법 등이 연구되고 있다.

그러나 DUV 단파장대역에서 유의한 수준의 효율과 안정적인 동작이 가능한 LED 구조를 성장하고 제조하는 것은 기술적으로 매우 어렵다. 현재의 개발수준으로는 GaN 및 InGaN 활성층 물질을 이용한 350~400 nm 대역의 근자외 LED는 외부양자효율이 10~50% 정도로 높은 수준까지 도달하여 있으나, 여전히 가시광 LED에 비하여는 크게 못 미치는 수준이며, AlGaIn 활성층 물질을 이용하는 UV-A, -B (280~350 nm) 발광영역의 UV-LED는 EQE 2~6% 정도에 머물고 있다. 또한, AlN 물질을 기반으로 하는 200 nm 근방의 UV-C LED는 최대 EQE ~1%, 광출력 수십 nW로 학술적 연구단계에 머물고 있는 상황이다. [그림 8]을 살펴보면 청색 LED와 비교했을 때 DUV LED의 경우 매우 낮은 내부양자효율, 전류주입효율과 함께 낮은 광추출효율을 보이는 것을 알 수 있다. 특히 나르개 주입효율은 상당히 좋지 않은 것으로 나타나 고효율 DUV LED의 개발은 주입효율과 추출효율의 향상이 매우 중요하다는 것을 시사한다.

아울러 UV-LED의 경우, 투명전극 물질로 가시광 LED에서 보편적으로 사용되고 있는 ITO 등이 UV 영역에서는 광투과도가 급격히 저하되어 사용하기 어려운 문제를 보이고 있다. [그림 9]

따라서 UV 전 영역에서 광흡수가 극히 적고, 2차원 면상의 전자이동도가 매우 높은 그래핀을 UV-LED의 투명전극층으로 적용하는 연구가 많이 진행되었다. 하지만 그래핀은 물질 자체의 전기 전도도 및 광투과성은 우수하나, 얇은 두께로 인한 저항의 증가 문제 및 그래핀과 GaN 사이에서의 강제적인 불순물 준위형성으로 인해 터널링을 통한 오믹 특성을 구현하지 못하는 단점 등이 나타나고 있다. 최근에 오믹성 나노구조를 p-GaN에 형성하고 그 위에 그래핀을 도포하여 전류피집 특성을 향상시키는 등, [그림 10]과 같이 그래핀과 금속 나노재료를 융합한 구조를 자외선 LED에 적용하여 p-GaN과 전극 사이에 접촉저항을 크게 낮추고 동시에 표면 거칠기 효과에 의

Fig. 10. (a) Schematic illustration and (b) I-V characteristics of the UV LED with a graphene and Ag nanocluster network.^[23]

하여 광 추출 효율을 크게 개선한 결과가 보고되는 등,^[23] 효율 개선을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

4. 2차원 신물질을 이용한 LED 개발 및 구조개선

최근 높은 기계적 강도와 열 전도성 특성을 가지고 있는 2차원 구조의 그래핀이나 h-BN 등의 박막을 성장하여 복합차원 나노소재를 제조하는 연구가 널리 진행되고 있다. 질화물 반도체 연구 분야에서도 그래핀 위에 GaN 박막을 결정성장하여 LED를 제작하였으며,^[24] 앞서 언급한 것처럼 패터닝된 그래핀 위에 LED를 제작하여 열특성이 향상된 것을 확인하는 등^[16] 2차원 신물질을 에피박막 성장에 직접 활용하는 연구가 진행되고 있다. 향후에는 층상구조의 2차원 소재와 GaN 기반의 LED가 결합된 형태의 새로운 구조를 개발하고 물리적인 현상 및 신소재 특성을 관측함으로써 2차원 소재-반도체 융합 분야의 연구가 보다 활발해질 것으로 예측된다.

LED 융합기술의 동향 - 농생명 응용 분야를 중심으로

LED 광원은 일반 조명 분야 이외 ICT(정보통신기술), 농·생명, 해양, 의료, MICE 산업 등과 융합하여 새로운 응용 분야를 창출하여 다양한 신 비즈니스 모델을 선도할 것으로 기대된다. LED 일반 조명을 이용한 가시광 무선통신기술, 적색 및 청색 LED를 이용한 농·생명에의 응용기술, 자외선과 적색 및 근적외선 LED의 의료기기 응용기술, LED 디스플레이의 문화 및 관광 콘텐츠와의 융합 분야 등이 LED 융합산업의 단적인 예가 된다.

특히 최근 농업에서 각광받고 있는 LED 조명 융합기술은 식물이 광을 흡수하는 많은 광 수용체 단백질들을 보유하고 있고 그에 따라 식물의 생장과 발달, 유용물질 생합성에 결정적인 영향을 미치는 주요 환경요인 중의 하나가 되기 때문에

REFERENCES

- [23] T. H. Seo *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 251114 (2011).
- [24] K. Chung *et al.*, Science **330**, 655 (2010).

Fig. 11. Absorption spectra of chlorophyll and the emission wavelength region of typical blue and red LEDs.

가능하다. 광은 광합성 작용의 주 에너지원일뿐만 아니라 식물의 발아, 개화 등과 같은 주요한 발달 단계에서 주요한 외부 자극(신호)으로서 작용하며, 이는 광량, 광질, 광주기 및 방향을 감지하는 다양한 광 수용체 단백질들이 다양한 광반응을 매개하고 있기 때문이다. 파토크롬은 적색 및 적외선 파장의 빛을 감지하고, 포토트로핀, 크립토크롬, 그리고 제이트루프는 UV-A와 청색광을 흡수한다. 이러한 광 스펙트럼은 작물별, 재배 방법별, 혹은 생장단계별로 최적화될 수 있다. 예를 들면 용도에 따라 식물 생산 및 생장 촉진용 LED, 개화 조절용 LED, 과실 성숙이나 당도 향상용 LED, 유용 이차대사물질이나 기능성 물질 증진용 LED 등으로 차별화하여 농업적으로 유용한 작물의 특성에 맞는 맞춤형 조명이 가능하다.

[그림 11]에서 보는 바와 같이, 현재 가장 보편적으로 이용되는 식물재배용 LED는 660 nm 적색 LED와 450 nm 청색 LED이다. 엽채류와 같은 일부 작물에서는 청색 LED보다 적색 LED에서 광합성 효율이 더 높은 것으로 보고되었다.^[25] 적색 LED는 주요 광합성 색소인 클로로필의 흡수 피크와 유사한 파장이다. 청색광은 기공개폐를 포함하는 광 형태성에 중요한 역할을 하며 특히 어린묘의 생장을 억제하는 것으로 알려져 있다.^[26] 대부분의 식물에서 청색광이 10~20% 내외일 때 광합성 효율이 가장 높으며 엽생육 및 종자 생산이 증가하는 것으로 알려졌다.

최근 UV가 작물의 생장에 영향을 주며 영양성분을 향상시키는 것으로 알려져 그에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 식물의 초장, 엽면적, 엽장 등은 UV에 의해 감소하는 반면 엽두께는 증가하는 경향이 있다. 식물은 UV 피해로부터 자신을 보호하기 위해 다양한 플라보노이드나 페놀류 등의 이차대사물질을 생산 축적한다. 이러한 이차 대사물질들은 대개 강력한 항산화 물질로서 사람의 건강기능 개선에도 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.^[27]

현재 LED 광원을 이용하는 완전 밀폐형 식물공장은 가장 발달된 형태의 시설재배라 할 수 있다. 온도, 습도, 이산화탄소의 농도는 물론이고 광량 및 광질까지도 조절할 수 있어, 외부

Fig. 12. Technology roadmap of the LED plant factory.

환경에 상관없이 연중 지속적인 생산이 가능하고, 연중 생장 속도가 동일하며, 철저한 계획 생산이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이에 따라 엽채류 생산 이외에 고부가가치 기능성 약용작물을 대량 생산하는 식·의약품 산업, 개화시기를 조절하는 화훼산업, 삽복이나 종자를 이용하여 무병우량 종묘를 생산하는 육묘산업 등 다양한 분야에서 LED 식물공장 활용을 시도하고 있다. 현 시점에서 LED 식물공장은 시설재배 형태 중 하나로, 아직까지는 선택의 문제일 수 있다. 그러나 미래의 LED 식물공장은 선택이 아닌 필수가 될 것이다. 무엇보다도 농업 분야뿐만 아니라, [그림 12]와 같이 단계별 LED 식물공장 기술 로드맵에 따라 고부가가치 산업 중에 하나인 GMO (genetically modified organisms) 농작물을 이용한 의약품 생산과 같은 바이오 분야에도 적용할 수 있기 때문이다.

맺음말

20세기 기계, 화학, 전자 기술을 바탕으로 발전해 온 과학 기술은 21세기에는 광 기술로 발전하고 있으며 광 기반의 미래 산업이 세계 경제에 큰 영향력을 가질 것으로 기대된다. 올해의 노벨물리학상을 수상한 청색 LED 개발 업적은 하고 싶은 분야의 일을 다년간 꾸준히 할 수 있었던 과학자의 열정, 반복되는 실험과 함께 계속적으로 도전하는 인내와 지구력, 그리고 실패를 두려워하지 않고 오히려 새로운 영감을 통해 끝내 성공의 발판으로 삼는 도전 정신의 산물이라고 생각된다. 질화물 반도체 LED 연구는 향후 신물질·신개념의 융합 기술 연구로 승화되면서 21세기의 광 기반 융합산업을 선도할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [25] Grow LED Grow Cubes, Spotlights and Grow Panels, Enlightening the World with LED Products and Information page, Retrieved on June 15, 2013 from <http://www.ledbuys.com/>.
- [26] A. Schwartz *et al.*, *Planta* **161**, 129 (1984).
- [27] A. Mitchell *et al.*, *Horticul.* **52**, 6 (2012).