

청색 피크 파장이 LED 소자에 미치는 영향

한상호 · 김윤중 · 김정현 · 정종윤 · 김현철 · 조광섭*

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

(2012년 4월 9일 받음, 2012년 5월 21일 수정, 2012년 5월 23일 확정)

청색 발광다이오드(LED) InGaN/GaN의 방사 피크 파장에 따른 LED 소자의 성능 저하를 광학적 및 전기적 특성을 고려하여 조사하였다. 방사 피크 파장이 437~452 nm인 LED 소자에 전류를 각각 60 mA, 75 mA, 그리고 90 mA로 구동하여 장시간 동안 스트레스를 주었다. 형광체의 유무에 따라서 LED 소자의 광 감쇠 특성을 관측하였다. 형광체가 없는 소자의 광 감쇠 특성은 피크 파장이 단파장일수록 급속하게 떨어진다. 형광체가 있는 소자는 형광체가 없는 것보다 감쇠 특성이 둔감해진다. 전기적 특성은 방사 피크 파장에 의존하지 않고, 스트레스 시간에 따른 LED의 내부 저항이 서서히 증가하는 현상으로 나타난다. 피크 파장에 따른 외형변화는 동일 전류 조건에서 단파장일 때 열화현상이 심하게 발생한다. 이는 청색 발광다이오드에서 발생한 빛의 파장이 단파장영역으로 갈수록 칩 외의 재료에서 단파장 광 흡수가 증가하여 열화현상이 가속화되는 것으로 분석된다. 따라서 LED 소자의 장수명을 얻기 위해서는 청색 칩의 방사 피크 파장과 소자재료의 광 열화해석이 중요하다.

주제어 : 발광다이오드, 열화현상, 방사 파장, 신뢰성

I. 서 론

InGaN/GaN로 제작된 백색 발광다이오드(Light Emitting Diode, LED)는 LCD 후면광원(Backlight Units), 조명용 광원, 자동차 전조등의 광원, 그리고 통신 제품 등에 광범위하게 사용하는 잠재력 때문에 연구자들의 꾸준한 관심을 이끌고 있다. 많은 연구들은 광 출력 파워의 향상과 청색 칩의 효율 개선에 집중되고 있다. 그 결과로 90 lm/W 이상의 효율을 갖는 LED 소자들은 현재 상업적으로 활용 가능하며, 150 lm/W 이상의 효율을 갖는 LED 소자는 이미 연구 시료로 검증되었다 [1,2]. 이 결과물들은 GaN를 근간으로 한 발광다이오드가 현재 사용되고 있는 조명 광원들의 교체에 위한 뛰어난 후보자임을 설명하고 있다. 청색 발광다이오드는 황색 형광체의 조합 또는 2종 이상의 형광체를 섞어 연색성을 향상시키는 방향으로 백색을 구현한다 [3]. 일반적으로 백색 LED 소자를 이용한 제품들은 장수명을 요구된다. 이와 같이 장수명과 고효율을 얻기 위해서는 LED 칩 구조의 성능 향상뿐만 아니라, LED 칩을 실장하는 소자기술을 필요로 하고 있다. 기존의 연구에 의하면 LED의 광 감쇠 특성 및 결함은 칩의 구조와 열 특성에 의한 원인으로 보고되고 있다 [4]. 그 결과로 LED의 방열 개

선에 대한 많은 결과가 발표되고 있다 [5,6]. LED는 수명 기간 동안 점진적으로 광 출력 열화(Optical Power Degradation) 특성을 보인다. 따라서 LED는 신뢰성 측면에서 마모 메커니즘(Wear-out Mechanism)에 의한 고장을 중요한 특성으로 취급하는 대표적인 소자다. 광 출력 열화는 시간에 따른 광 출력 감쇠를 측정변수로 한다. 광 출력 저감시험은 조명제품에 보편적으로 사용되는 수명평가 시험방법이다. 일반적으로 조명제품은 유사한 광 출력 저감 특성을 보이지만, 광 열화를 발생시키는 원인과 메커니즘은 각각 다르다. 형광램프는 흑화 현상(Blackening)과 형광체의 광 열화가 주요인으로 작용한다. 백열램프는 텅스텐증착이 주요인으로 작용한다 [7,8]. LED 소자는 칩, 구성 재료, 방열 디자인 등 기존 광원보다 다양한 요인에 의해 복합적으로 광 출력 열화에 영향을 미칠 수 있다. 칩의 주요 열화 메커니즘은 LED의 접합온도(Junction Temperature)의 상승에 따른 활성화영역(Active Region)의 결정 결함 밀도(Crystal Defect Density) 증가와 전자-정공의 비발광성 재결합(non radiative recombination) 증가라고 알려져 있다 [9]. LED 소자에서의 광 열화 메커니즘은 복잡하며, 다수의 요소들이 복합적으로 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다 [10]. 칩으로부터 방출되는 열에너지는 LED

* [전자우편] gscho@kw.ac.kr

소자 내부의 열기계적응력(Thermo-Mechanical Stress)을 발생시켜 전기접합부위(Electrical Contact)에서의 직렬저항(Series Resistance) 증가로 인한 광 출력 감소를 초래하기도 한다 [11]. 그러나 청색 칩의 방사 스펙트럼 특성에 따른 열화특성과 성능 유지에 대한 보고는 미미하다. 또한 몇몇 연구에 의하면 GaN를 근간으로 한 백색 LED 소자들은 장수명에 대하여 회의적이다 [12].

본 연구는 InGaN/GaN계로 제작된 청색 발광다이오드의 방사 피크 파장별 LED 소자에 미치는 영향을 분석한다. 또한, 형광체가 없는 상태와 형광체를 포함한 상태의 두 그룹으로 나누어 피크 파장에 따른 광 열화특성을 비교 분석한다. 전기적 특성은 내부 저항 값의 변화를 측정하여 광 특성에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로, 두 그룹의 피크 파장별 외형변화를 비교하여 광 출력 열화와 LED 소자의 외형변화 경향을 비교하고, 청색 칩 방사 피크 파장과 LED 소자의 신뢰성 관계를 이해하고자 한다.

본 연구의 구성은 실험에 사용된 청색 발광다이오드의 피크 파장별 초기 광 스펙트럼을 비교하고, 백색 LED 소자의 기본구조를 소개한다. 결과 및 논의에서는 시간에 따른 광학적, 전기적 특성을 분석하고, 외형변화 경향을 비교한다. 결론부에서는 칩 방사 피크 파장과 LED 소자 재료의 신뢰성관계를 논의한다.

II. 실험

본 실험은 437 nm부터 457 nm까지의 방사 피크 파장영역에서 InGaN/GaN로 제작된 청색 칩의 4가지 피크 파장에 대한 광 출력 열화(Optical Power Degradation) 특성을 알아본다. 실험에 사용한 청색 발광다이오드의 칩 사이즈는 $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 이다. 청색 칩은 사파이어(Sapphire)를 기재(Substrate)로 사용하여 InGaN/GaN층(layer)을 구성한 다중양자우물(Multi-Quantum Wells) 구조로 되어 있다. LED 소자는 일반적으로 조명용 또는 후면광원(Back-light Units)에 많이 사용되는 가로 3.0 mm 및 세로 2.0 mm로 제작하였다. 실험에 사용된 LED 소자는 Fig. 1과 같이 소자 안에 실리콘이 덮여 있으며, 청색 칩은 일반적인 Epi-up 방식으로 제작되었다.

형광체가 없는 상태의 소자는 실리콘만 덮여 제작하였으며, 형광체가 있는 상태의 소자는 실리콘과 형광체를 동시

에 섞어 제작하였다. 소자에 사용된 청색 칩의 피크 파장은 5 nm 간격으로 구분하여 4가지의 서로 다른 방사 스펙트럼을 갖는다. Molding Compound Reflector는 통상적으로 사용되는 PPA (Poly Phthal Amide)를 사용하였다. 백색 LED 소자는 실리콘에 녹색 형광체와 적색 형광체를 섞

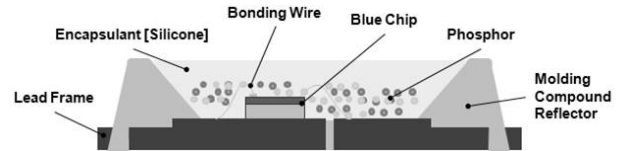


Figure 1. Schematic drawing of white LED device.

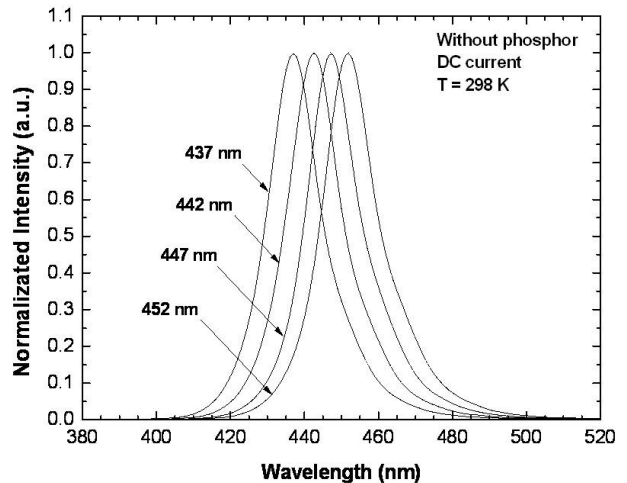


Figure 2. Emission spectrum of LED devices without phosphors.

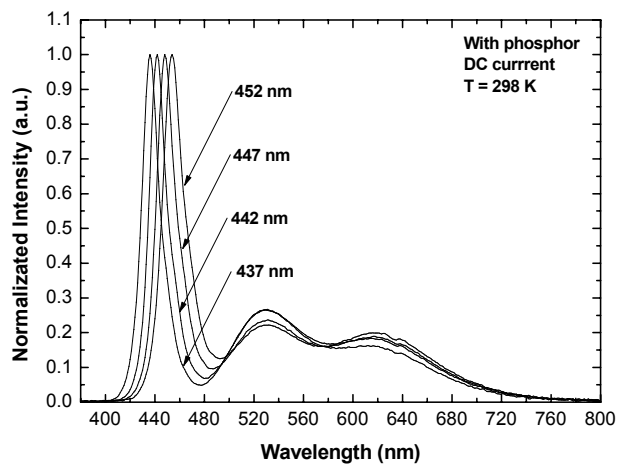


Figure 3. Emission spectrum of LED devices with phosphors.

어 칩 위에 도포하여 제작하였다.

Fig. 2는 형광체가 없는 상태에서 4종류 LED 소자의 초기 방사 스펙트럼이다. 실험에 사용된 LED 소자들은 437 nm 피크 파장부터 452 nm 피크 파장까지 유사한 방사 스펙트럼을 갖고 있다. 피크 파장이 437 nm인 LED 소자의 방출 스펙트럼의 분포는 400~510 nm이다. 또한, 437 nm 피크 파장에서 20 nm를 이동한 457 nm 피크 파장의 LED 소자는 410~520 nm의 파장분포를 갖는다.

Fig. 3은 형광체가 있는 4종류의 LED 소자에서 얻어진 초기 방사 스펙트럼이다. 측정 조건은 Fig. 2와 동일하게 주입전류 60 mA와 온도 298 K이다. 480 nm 이상의 스펙트럼은 녹색 및 적색 형광체에서 방사된 파장이다. 형광체에서 발생한 스펙트럼의 상대적 세기의 차이는 형광체의 여기/방사(Excitation/Emission)효율 차이 때문이다. 기존 연구에 의하면 청색 칩이 장파장으로 갈수록 형광체 여기/방사효율은 떨어진다 [13]. 본 실험에서 LED 소자의 방사 스펙트럼 분석을 위해 사용된 광 측정 장비는 HR 4000 Composite-grating Spectrometer이며, 전기적 스트레스에 따른 내부저항 특성의 변화를 측정하기 위해 키슬리(Keithley) 2602 A 소스미터로 I-V 특성 곡선 측정하였다. LED 소자의 전원 공급 장치는 2 Channel DC 전원 공급기

프로텍(ProTek) 3033의 정전류 모드를 사용하였다. 장시간 구동 실험은 3가지 전류 조건으로 실험을 진행하였으며, 각 소자의 주입 전류는 60 mA, 75 mA, 그리고 90 mA이다. 주위의 실내 온도가 25.0°C를 유지할 수 있도록 외부와 차단된 환경에서 측정 실험이 진행되었다. 구동 실험은 약 63일(1,500시간) 동안 연속 구동하여 250시간의 간격으로 1,000시간까지 측정하고, 최종 측정은 1,500시간에 종료하였다.

III. 결과 및 논의

각각 다른 4종의 피크 파장을 방출하는 LED 소자에서 시간에 대한 광세기의 변화를 III-1절에 기술한다. 또한 형광체 유무에 따른 광 성능 저하를 비교하여 광세기 감쇠에 대한 형광체의 영향을 확인한다. III-2절에서는 LED 소자의 내부저항 값의 변동을 관측하여 방사 피크 파장과 내부저항 변화와의 관계를 조사한다. III-3절에서는 LED 소자의 외형변화 경향을 시간에 따라 비교하여 방사 피크 파장과외의 관계를 비교한다.

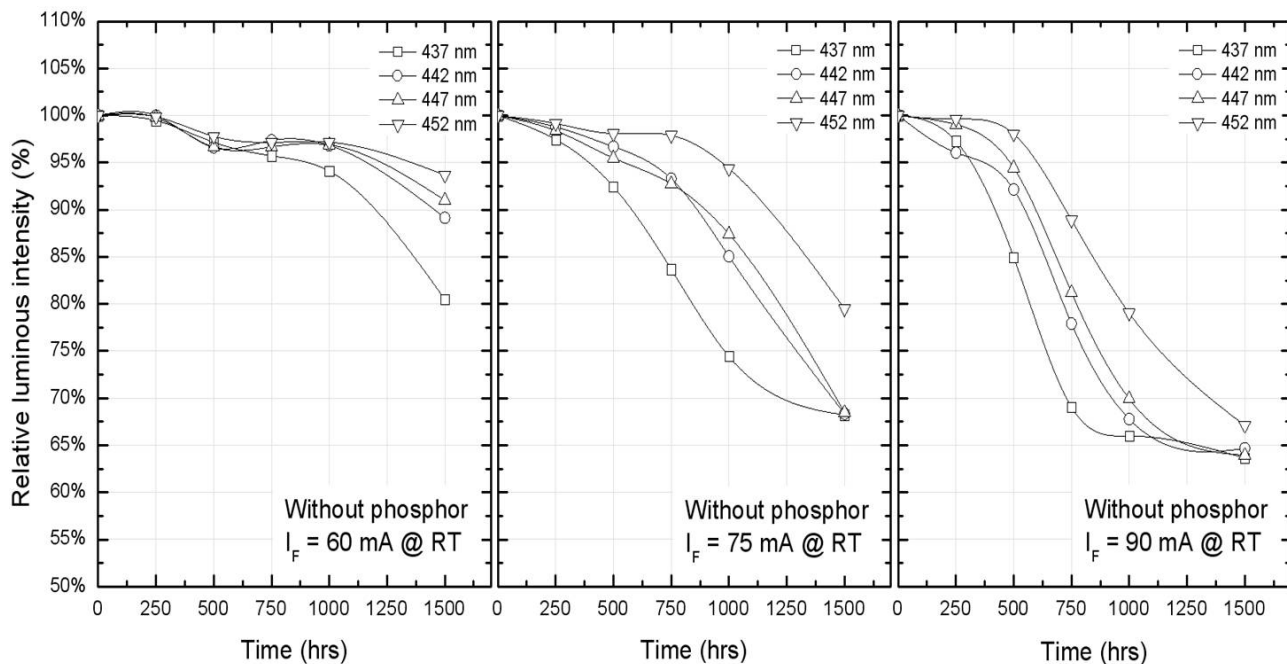


Figure 4. Relative luminous intensity versus aging time for LED devices without phosphors under different aging currents of 60 mA, 75 mA and 90 mA.

1. 구동 시간에 따른 광 성능 저하

Fig. 4는 형광체가 없는 상태에서 LED 소자들의 광 특성 변화를 구동 시간에 대하여 측정한 그래프이다. 주입 전류 60 mA조건에서 피크 파장이 437 nm인 소자가 가장 높은 폭으로 감소하였으며, 1,500시간 경과 후 약 19%까지 감소하였다. 440 nm 이상인 피크 파장 소자들은 1,000시간까지 유사한 감쇠 곡선을 보였으나, 1,500시간 이후 440 nm로 제작된 소자는 90% 이하로 감소하였다. 주입 전류 75 mA조건에서는 500 시간 경과 후 447 nm 이하 소자들에서 급하게 감쇠하는 현상이 발생하며, 최종 1,500시간 측정 결과에서는 452 nm는 20%, 그 외 3종의 피크 파장 소자들은 약 32%까지 감소하였다. 주입 전류 90 mA조건에서 250시간 경과 후 전 피크 파장 소자들은 급하게 감쇠하는 현상이 발생하며, 약 1,000시간 이후 450 nm 피크 파장을 제외한 전 피크 파장에서 감쇠현상이 둔감해지는 곡선을 보였다. 1,500시간 경과 후 전 피크 파장 소자들은 30% 이상 광세기가 감소하였다.

Fig. 5는 형광체가 있는 상태에서 LED 소자들의 광 특성 변화를 측정한 그래프이다. 주입 전류 60 mA조건에서 피크 파장 별 소자들의 광세기는 전 피크에서 서서히 감쇠

하며, 1,500 시간 이후 90% 이상을 모두 유지하였다. 주입 전류 75 mA조건에서도 전 피크 파장이 1,000 시간까지 90% 이상을 유지하였으나, 1,500 시간 이후 437 nm 피크 파장 소자는 13%까지 감소하였다. 주입 전류 90 mA조건에서는 전 피크 파장에서 지속적으로 감쇠하는 곡선을 보이며, 437 nm에서 최고 20%까지 감소하였다. 형광체가 없는 소자들은 전류에 관계없이 형광체가 있는 소자들보다 빠르게 감소한다. 이는 칩에서 발생한 빛이 소자 재료에 직접적으로 영향을 주고 있다는 결과이다. 또한 모든 조건에서 437 nm 피크 파장이 다른 피크 파장에 비해 빠르게 감소한다. 이는 가시광선 영역일지라도 청색 칩의 단파장이 소자 재료를 빠르게 열화 시킬 수 있는 원인으로 확인된다.

2. 구동 시간에 따른 전기적 특성 변화

실험에 사용된 LED 소자들의 전기적 변화를 알기 위해 장시간 구동하면서 I-V 특성 곡선을 측정하였다. 이 측정의 목적은 칩으로부터 방출되는 열에너지가 LED 소자 내부의 열기계적응력(Thermo-Mechanical Stress)을 발생시켜 전기접합부위(Electrical Contact)에서의 직렬저항(Series Resistance) 증가로 인한 광 출력 감쇠를 초래하였

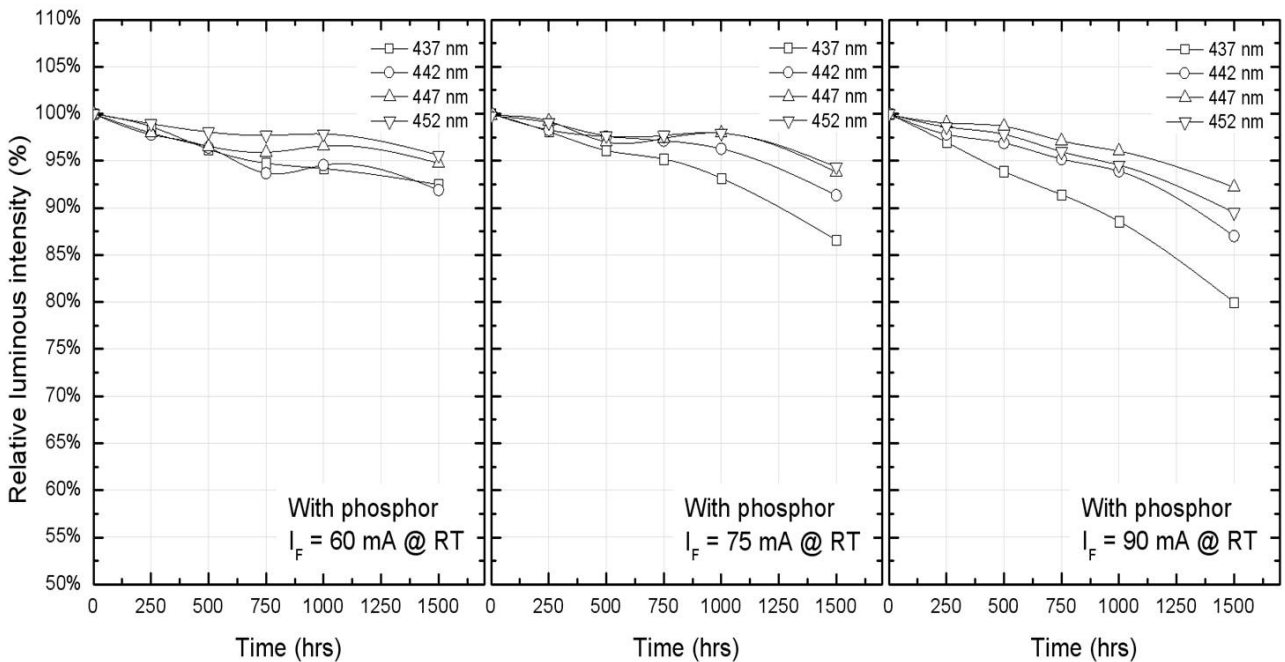


Figure 5. Relative luminous intensity versus aging time for LED devices with phosphors under different aging currents of 60 mA, 75 mA and 90 mA.

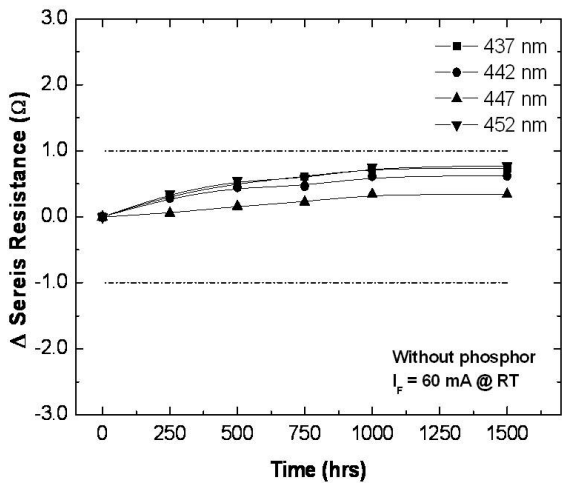


Figure 6. Variation of series resistance versus aging time for LED devices without phosphors under the aging currents of 60 mA.

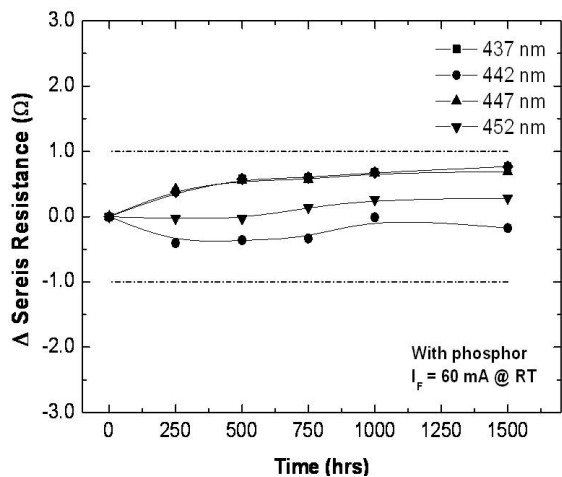


Figure 7. Variation of series resistance versus aging time for LED devices with phosphors under the aging currents of 60 mA.

능가를 확인하기 위함이다.

Fig. 6은 60 mA 주입 전류에서 형광체가 없는 LED 소자들을 시간에 따라 직렬저항의 변화를 비교한 그래프이다. 또한, Fig. 7은 형광체가 있는 LED 소자들의 직렬저항의 변화를 비교한 그래프이다. 두 실험 모두 초기 값 대비 1,500 시간 이후 전 피크 파장에서 1옴(Ω) 이내를 유지하고 있다. 또한 변화 경향은 칩의 방사 피크 파장의 값과 무관하다.

3. 구동 시간에 따른 외형 특성 변화

시간에 따른 LED 소자들의 외형 변화는 형광체가 없는

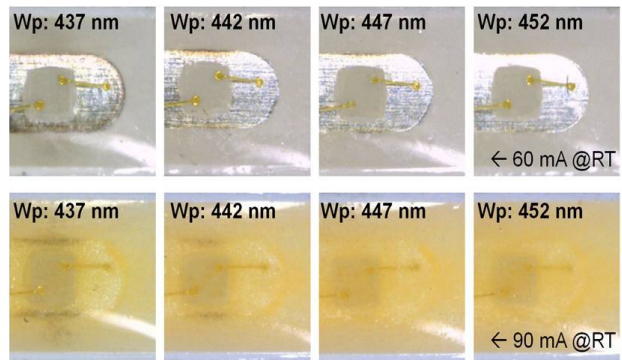


Figure 8. Photograph of LED devices after aging 1,500 hours.

상태와 형광체가 있는 상태를 서로 구분하여 관찰하였다. 피크 파장에 따른 외형 변화를 확인하기 위해 광세기 감쇠가 유사한 전류 조건을 비교하였다. Fig. 8은 60 mA 조건에서의 형광체가 없는 소자들과 90 mA 조건에서의 형광체가 있는 소자들을 장시간 구동 후 비교한 사진이다. 실리콘만 덮여있는 437 nm 피크 파장 소자는 Molding Compound Reflector와 리드프레임(Lead frame)에서 광 열화 현상이 심하게 나타났다. 또한 형광체가 있는 437 nm 소자도 다른 파장에 비해 열화현상이 가장 심하게 나타났다. 452 nm로 제작된 소자에서는 형광체 도포와 상관없이 광 열화현상이 거의 나타나지 않았다. 장시간 구동에 따른 소자들의 열화현상은 동일 구동 조건에서 피크 파장이 짧을수록 심하게 나타났다.

장시간 구동에 의한 피크 파장별 LED 소자들의 광 열화 특성은 437 nm 경우 급속하게 감쇠하여 광세기가 최대 30% 이상 감소한다. 이것은 Fig. 8의 외형변화에서도 확인 가능하다. 이는 437 nm의 청색 칩이 갖고 있는 400 nm에서 약 420 nm까지의 방사에너지가 다른 소자들 보다 강하기 때문이다. 이 단파장영역이 소자재료에 치명적 손상을 준다고 해석할 수 있다. 형광체가 있는 소자의 경우가 광 열화 특성이 둔감하게 발생하는데, 이는 실리콘에 섞인 형광체가 칩에서 방사된 빛을 흡수, 산란시키기 때문이다. 즉, 형광체가 Molding Compound Reflector와 리드프레임(Lead frame)의 변색을 방지하는 차단막 역할을 하기 때문이다. 허나 주입전류가 높아지면 400~420 nm영역의 방사에너지도 커지므로 형광체가 없는 상태의 소자와 유사한 손상을 준다. LED 소자의 광 열화 특성을 향상하기 위해서는 청색 칩에서 발생하는 방사 스펙트럼과 세기를 비교하여 소자의 재료를 선택할 필요가 있다.

IV. 결 론

청색 발광다이오드의 방사 피크 파장별 제작된 소자로 열화특성 실험을 수행하였다. 432 nm로 제작된 LED 소자는 다른 파장으로 제작된 소자들 보다 급속하게 광 감쇠 현상이 발생한다. 이는 Molding Compound Reflector 재료인 PPA (Poly Phthal Amide)와 광 출력 열화에 직접적인 관계가 있다. 또한 형광체가 없는 상태와 형광체가 있는 상태에서의 LED 소자들도 광세기 감쇠현상에서 10% 이상 차이를 보인다. 이는 청색 칩에서 발생한 빛이 형광체와 흡수, 산란하여 Molding Compound Reflector에 직접적으로 영향을 주지 않는 것으로 해석된다. LED 소자에서의 전기적 특성은 내부직렬저항 값 변동이 피크 파장과 무관하게 변동한다. 또한 III-1과 III-2 실험 결과에서 광세기 감쇠와 내부 직렬저항은 관련성이 없다. 청색 발광다이오드의 장수명을 얻기 위해서는 칩에서 발생한 방사 스펙트럼과 소자에 사용된 재료와의 광 특성 관계 해석이 중요하다. 가시광선영역의 청색파장이라도 400 nm 이상의 광세기가 일정량 이상이 되면 LED 소자에 치명적 영향을 준다. 따라서 LED 소자의 열화현상을 개선하기 위해서는 420 nm 이하의 광세기를 억제하는 청색 칩의 사용과 구동 전류조건이 바람직하다. 본 연구의 결과는 현재 고성능이고 있는 청색 발광다이오드의 신뢰성 향상과 장수명을 이룰 수 있는 기초 신뢰성 향상 가능성을 제공한다.

감사의 글

본 연구는 교육과학부의 BK21 및 2012년도 광운대학교 학내 연구비에 의하여 수행되었음.

참고문헌

[1] R. D. Dupuis and M. R. Krames, *Journal of Lightwave Technology* **26**, 1154-1171 (2008).
 [2] L. W. Jang, D. S. Jo, J. W. Jeon, T. Y. Ahn, M.

J. Park, B. J. Ahn, J. H. Song, J. S. Kwak, J. S. Kim, I. H. Lee, and H. K. Ahn, *J. Korean Vacuum Soc.* **20**, 288-293 (2011).
 [3] R. M. Mach, G. Mueller, M. R. Krames, H. A. Hoppe, F. Stadler, W. Schnick, T. Juestel, and P. Schmidt, *Physica Status Solidi A* **202**, 1727-1732 (2005).
 [4] L. Trevisanello, M. Meneghini, M. Pavesi, and G. Meneghesso, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* **8**, 304-311 (2008).
 [5] D. W. Hong and S. J. Lee, *Korean Journal of Optics and Photonics* **21**, 118-122 (2010).
 [6] S. H. Han, Y. J. Kim, J. H. Kim, D. J. Kim, J. Y. Jung, S. Kim, and G. S. Cho, *J. Korean Vacuum Soc.* **20**, 280-287 (2011).
 [7] H. C. Hwang, J. M. Jeong, J. H. Kim, D. J. Kim, J. H. Bong, J. Y. Chung, J. H. Koo, and G. S. Cho, *J. Korean Vacuum Soc.* **17**, 481-486 (2008).
 [8] D. H. Gill, S. B. Kim, H. S. Song, D. G. Yu, S. H. Lee, M. S. Pak, J. G. Kang, G. S. Cho, M. G. Myung, and Y. Y. Kim, *J. Korean Vacuum Soc.* **15**, 266-272 (2006).
 [9] B. Monemar and B. E. Sernelius, *Applied Physics Letters* **91**, 181103 (2007).
 [10] S. C. Yang, P. Lin, C. P. Wang, S. B. Huang, C. L. Chen, P. F. Chiang, A. T. Lee, and M. T. Chu, *Microelectronics Reliability* **50**, 959-964 (2010).
 [11] G. Meneghesso, S. Levada, E. Zanoni, G. Scamarcio, G. Mura, S. Podda, M. Vanzi, S. Du, and I. Eliashevich, *Microelectronics Reliability* **43**, 1737-1742 (2003).
 [12] G. Meneghesso, M. Meneghini, and E. Zanoni, *Journal of Physics D: Applied Physics* **43**, 354007 (2010).
 [13] N. Hirotsaki, R. J. Xie, K. Kimoto, T. Sekiguchi, and Y. Yamamoto, *Applied Physics Letters* **86**, 211905 (2005).

Influence of Blue-Emission Peak Wavelength on the Reliability of LED Device

S. H. Han, Y. J. Kim, J. H. Kim, J. Y. Jung, H. C. Kim, and G. S. Cho*

Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701

(Received April 9, 2012, Revised May 21, 2012, Accepted May 23, 2012)

The dependance of degradation on the blue-peak wavelength is investigated with the blue light-emitting diode (LED) of InGaN/GaN with respect to the optical and the electrical characteristics of the devices. The LED devices emitting the blue-peak wavelength ranging from 437 nm to 452 nm is prepared to be stressed for a long aging time with three different currents of 60 mA, 75 mA and 90 mA, respectively. The degradation of optical intensity is observed with and without phosphor in the devices. The device without phosphor has been degraded significantly as the wavelength of blue-peak is decreased while the optical intensity of LED device with phosphor become less sensitive than that of device without phosphor. The electrical property does not depend on the emission peak wavelength. However, the series-resistance of LED device is slowly increased as the aging time is increased. The deformation of device is observed severely the short wavelength of blue-peak even with the same current since the short wavelength is absorbed substantially at the materials of device during the aging time. Consequently, in order to enhance the lifetime of LED devices, it is important to understand the optical degradation property of the materials against the specific wavelengths emitted from the blue chip.

Keywords : Light-emitting diode, Degradation, Emission wavelength, Reliability

* [E-mail] gscho@kw.ac.kr