


질화물계 청색 마이크로 발광 다이오드의 소자 크기 및 온도 의존성 실험을 통한 전력 변환 효율 결정인자 분석

임하나, 최지예, 류민지, 김예진, 황일지, 한동표 

국립부경대학교 전기공학부 디스플레이반도체공학전공

Factors Limiting Power Conversion Efficiency in GaInN/GaN-Based μ -LEDs Investigated by Chip-Size and Temperature-Dependent Measurements

Hana Lim, Jiye Choi, Minji Ryu, Yejin Kim, Ilji Hwang, and Dong-Pyo Han

Display & Semiconductor Engineering, School of Electrical Engineering, Pukyong National University (PKNU), Busan 48513, Korea

(Received December 29, 2024; Revised January 17, 2025; Accepted January 17, 2025)

Abstract: This study aimed to elucidate factors limiting power conversion efficiency (PCE) in GaN-based micro-light-emitting diodes (μ -LEDs). To this end, we investigated the effects of operating temperature and chip-size of μ -LEDs on their efficiency. For the investigation, 460 nm-emitting μ -LEDs with various chip-sizes were fabricated; then their characteristics were carefully measured from 100 to 400 K. As the chip-size decreases and the operating temperature increases, their PCE and external quantum efficiency (EQE) decrease, while voltage efficiency (VE) increases. This indicates that the EQE plays a more important role than the VE in determining the PCE of μ -LEDs. Particularly, for a chip-size of $20 \times 20 \mu\text{m}^2$, the EQE was very lower and the ideality factor was unexpectedly higher compared to the others for all operating temperatures, which is believed to be due to the critical plasma damage at the sidewall during dry-etching process for the chip-size $< 20 \times 20 \mu\text{m}^2$.

Keywords: Micro-light-emitting diode, Gallium nitride, External quantum efficiency, Voltage efficiency, Ideality factor

1. 서론

일본 나고야 대학과 메이조 대학의 Hiroshi Amano와 Isamu Akasaki 등의 연구자들에 의해 최초로 시연된 사파이어 기판 위에 저온 버퍼층을 이용하여 유기 화학 증착법(metalorganic vapor phase epitaxy, MOVPE)으로 성장한 고품질 질화갈륨(gallium nitride, GaN) 박막은 질화물계 청색 발광 다이오드(light-emitting diodes, LEDs)의 제작을 가능하게 하였고 현재 일반 조명, 디스플레이

레이 등 여러 어플리케이션에서 주도적인 광원으로 사용되고 있다 [1,2]. 최근에는 웨어러블 기기, 증강현실 기기, 가상현실 기기 및 투명 TV 등의 고품질/고화질 디스플레이 등이 차세대 기술로 여겨지고 있으며, 이 기기들의 광원으로 LED의 크기를 수십 마이크로 스케일로 축소한 질화물계 마이크로-발광 다이오드(GaN-based μ -LEDs)의 연구 개발이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다 [3,4]. 특히 유기발광다이오드에서 빈번히 발생하는 번-인 현상이 일어나지 않고, 수명이 수만 시간 정도로 길고, 넓은 시야각을 구현할 수 있으며 빠른 응답속도, 고명암비를 가진다는 것이 GaN-based μ -LEDs의 큰 장점으로 여겨진다 [5]. 조사에 따르면 μ -LED 디스플레이 시장 확대 전망은 매우 긍정적이며, 꾸준히 성장해 2025년에는 약 211억 달러

✉ Dong-Pyo Han; han@pknu.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 성장할 것으로 예상된다 [6]. 그러나 GaN-based μ -LEDs는 소자의 크기가 수십~수 μm 스케일로 축소될 경우 효율이 급격히 감소하는 문제가 있으며, 이는 차세대 디스플레이의 구현에 있어 큰 걸림돌로 여겨진다 [7,8]. 따라서 GaN-based μ -LEDs의 소자 크기 감소에 따른 효율의 감소를 지배하는 메커니즘을 규명하는 것이 매우 중요하다.

이 연구에서는 GaN-based μ -LEDs의 소자 크기에 따른 효율의 감소 메커니즘을 규명의 목표로 하였다. 이를 위해 동일한 에피택셜 웨이퍼에서 제작된 다양한 크기의 GaN-based μ -LED를 제작하였고, 소자를 넓은 동작 온도(100~400 K)에서 구동하여 전력 변환 효율(power conversion efficiency, PCE), 외부 양자 효율(external quantum efficiency, EQE), 전압 효율(voltage efficiency, VE) 및 전류-전압 곡선의 특성곡선을 측정하고 분석하였으며, 그들의 소자 크기와 동작 온도 간의 상관성을 추적하였다. 이를 통해 이들의 변화를 설명하기 위한 물리적 모델을 제시하였다.

2. 샘플 제작 및 실험 방법

본 연구에 사용된 청색 GaN-based μ -LED 소자의 제작 과정은 다음과 같다. Si이 도핑된 n-type GaN과 460 nm의 광자를 방출하는 다중 양자 우물, Mg이 도핑된 p-type GaN을 차례로 MOVPE 방법을 통하여 사파이어 기판 위에 저온 버퍼층을 이용하여 성장시켰다. MOVPE 챔버에서 샘플을 제거 후 n-type GaN을 드러나게 하기 위해 유도성 결합 플라즈마-이온 반응 식각법(inductively coupled plasma-reactive ion etching, ICP-RIE)을 이용하여 n-type GaN까지 에칭하였다. Radio frequency sputtering을 이용하여 투명전극(indium tin oxide, ITO) 층과 SiO_2 절연층을 순차적으로 증착하였고, E-beam 증착기를 이용해 n-과 p-전극(Ti/Au)를 증착하였다. 특히 ITO와 SiO_2 절연층은 각각 전류 주입층, ICP-RIE 과정 중 플라즈마 데미지에 의해 손상된 측벽을 수동화층(passivation layer)으로 사용하였다 [9]. 제작된 샘플의 단순화된 3차원 구조는 그림 1(a)와 (b)에 개략적으로 표현되어 있다. 단일 웨이퍼를 이용하여 크기가 다른 소자를 제작하였으며 소자의 크기는 각각 20×20 , 100×100 , $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ 이다. 넓은 동작 온도(100~400 K)에서 구동하여 전류-전압 특성곡선, 광 파워-전류 특성 곡선을 측정하였다. 반도체 분석기를 이용하여 인가 전류 밀도는 $4 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 부터 $5 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$, 인가 전압은 -5 V 부터 5 V 범위에서 측정을 진행하였다. 또한 광 출력을 측정하

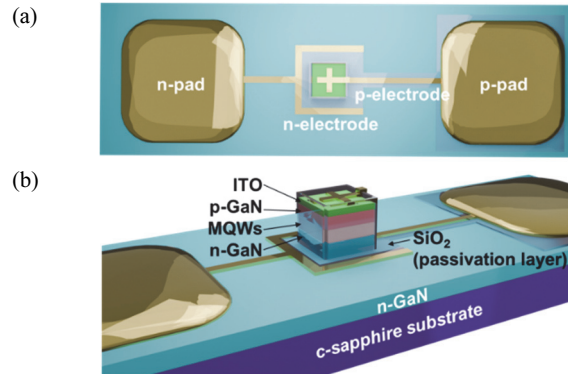


Fig. 1. Schematic 3D structural illustrations of the fabricated μ -LED (a) top view and (b) bird's-eye view.

기 위해 캘리브레이션된 실리콘 포토다이오드를 사용하였으며 광원으로부터 방출된 빛이 수직 방향으로 포토다이오드에 도달하도록 배치하였다. 입사된 포톤을 포토다이오드가 전기 신호로 바꾸면 해당 전류 값을 이용하여 광 출력을 계산하였다. VE를 계산하기 위해 필요한 중심 파장을 구하기 위해서 소자 크기 및 동작 온도/전류 주입별로 380~500 nm 파장 대역에 대하여 스펙트럼을 측정하였다. 동작 온도 제어를 위해 액화 질소를 이용해 냉각하는 핫플레이트가 장착된 밀폐 챔버 안에서 모든 실험이 진행되었다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 소자의 크기와 동작 온도가 PCE에 미치는 영향

먼저 동작 온도를 변화시켜가며 준비된 μ -LED의 PCE를 구동전류를 변화시켜가며 측정하였다. 여기서 PCE는 다음과 같이 표현된다 [10].

$$\eta_{PCE} = \frac{P_{out}}{V \cdot I} \quad (1)$$

여기서 η_{PCE} , V , I 는 각각 PCE, 인가 전압, 동작전류를 나타낸다. P_{out} 은 파장에 대해 캘리브레이션된 포토 다이오드로 측정된 전류 값을 광 파워로 변환하여 얻었다. 그림 2(a), (b), (c)는 각각 동작 온도 100 K, 300 K, 400 K에서 소자의 크기에 따른 PCE vs. current density 그래프를 보여준다. 여기서 current density는 동작전류를 각각의 소자 면적으로 나누어 구하였다.

그래프에서 보이는 것과 같이 PCE는 동작 온도와 소자

크기에 상관없이 인가된 전류 밀도에 따라 저전류 영역에서 증가했다가 특정 전류 이후 감소하는 경향을 보인다. 그림 2(a) 100 K에서 한 변의 길이가 20 μm 인 소자는 전류 밀도가 다른 크기의 소자에 비해 상대적으로 낮은 곳에서 최대 PCE에 도달하는 반면, 100, 250 μm 인 소자에서는 20 μm 인 경우보다는 크며 두 소자 모두 비슷한 전류 밀도에서 최대 PCE에 도달한다. 그림 2(b)는 (a)와 유사한 경향을 띄지만, 전체적으로 높은 전류 밀도에서 최대 PCE 값을 가진다. 특히, 20 μm 인 소자에서 온도가 100 K일 때는 전류 밀도가 0.75 A/cm^2 에서 최대 PCE 값을 가지지만, 300 K에서는 17.5 A/cm^2 에서 최대 PCE 값을 가진다. 또한 250 μm 에서 전류 밀도가 최대 PCE 값을 가진 이후 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 그림 2(c)에서는 고온으로 인해 각 소자의 크기에서의 최대 PCE가 전체적으로 감소한 경향을 보인다. 이때 20 μm 은 고온일 때 전류 밀도가 낮은 구간에서 300 K일 때보다 더 긴 구간 동안 저하된 효율이 유지된다.

그림 2(a), (b), (c)에서 20 μm , 100 μm 소자의 경우 온도가 높아질수록 최대 PCE에 도달하는 전류 밀도가 증가한다. 20 μm 에서 100 K일 때 0.75 A/cm^2 , 300 K일 때 17.5 A/cm^2 , 400 K일 때 25 A/cm^2 , 100 μm 에서 100 K일 때 0.7 A/cm^2 , 300 K일 때 3 A/cm^2 , 400 K일 때 4 A/cm^2 로 확인된다. 250 μm 소자의 경우 100 K에서 300 K로 동작 온도가 증가할 경우 1.28 A/cm^2 에서 3.2 A/cm^2 로 증가하지만 300 K에서 400 K로 증가할 경우 최대 PCE에 도달하는 전류 밀도가 동일하다.

또한 100 K에서 20 μm 은 100, 250 μm 의 peak에 비해서 37.25%, 300 K에서 52.73%, 400 K에서 58.67%가 감소하여 동작 온도가 증가할수록 20 μm 인 소자의 최대 PCE 값이 다른 소자에 비해 감소하는 정도가 큰 것을 확인할 수 있다. 요약하자면 그림 2(a)~(c)로부터 측정된 특징들은 다음과 같이 정리할 수 있다. (i) 크기가 가장 작은 20 μm 소자는 동작 온도가 증가할수록 PCE 값이 가장 많이 감소한다. (ii) 온도가 증가할 때, 20 μm 소자의 PCE 피크값이 나타나는 전류 밀도의 변화가 다른 크기의 소자에 비해 매우 심하다. (iii) 크기가 가장 큰 250 μm 소자는 최대 PCE에 도달한 이후 전류 밀도가 증가함에 따라 효율이 급격히 감소하며, 이러한 현상은 특히 고온 조건에서 두드러지게 나타난다.

3.2 PCE의 성능 결정 요인 분석

PCE는 VE와 EQE에 의해 결정된다. 이 챕터에서는 소자의 앞서 측정된 PCE를 VE와 EQE로 분리하여 동작 온

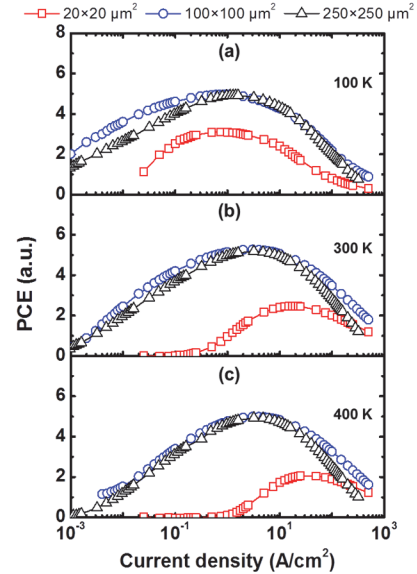


Fig. 2. Experimental results of PCEs depending on the chip-size at (a) 100, (b) 300, and (c) 400 K as a function of the current density of prepared μ -LED samples plotted in a semi-log scale.

도와 소자 크기에 따른 변화 특성을 관찰하여 성능 결정 요인을 분석하려 시도하였다.

3.2.1 전압효율

먼저 VE가 PCE의 주요 결정 요인인지 살펴보겠다. 그림 3(a), (b), (c)는 각각 동작 온도 100 K, 300 K, 400 K에서 세 소자에 대한 VE를 전류 밀도의 함수로 나타낸 것이다. VE는 다음과 같이 표현할 수 있다 [11].

$$\eta_{VE} = \frac{h\bar{\nu}}{qV} \quad (2)$$

여기서 η_{VE} , q , $h\bar{\nu}$ 는 각각 전압 효율, 기본 전하량, 평균 광자 에너지를 나타낸다. 특히 이 연구에서는 피크 파장 대신, 평균 광자 에너지를 사용하였으며 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h\bar{\nu} = \frac{1240}{\lambda_{center} (nm)} (eV) \quad (3)$$

λ_{center} 는 center wavelength를 나타내며 전류 밀도에서 측정된 전계발광 스펙트럼에서 노이즈를 제거한 후 스펙트럼의 산술적 평균으로 계산된 파장 값이다 [12].

그림 3(a)에서 VE는 10 A/cm^2 까지의 저전류 범위에 대해 소자 크기에 관계없이 거의 일정한 수준을 유지한다.

VE의 감소 속도가 빨라지는 고전류 범위에서의 소자 크기 별 감소 속도를 비교하기 위하여 50 A/cm²에서 200 A/cm²에 해당하는 VE의 감소율을 계산하였다. 20 μm 소자의 경우 64.77%에서 60.06%로 7.27%, 100 μm 소자의 경우 65.60%에서 59.55%로 9.22%, 250 μm 소자의 경우 62.74%에서 50.33%로 19.78% 감소하는 것을 확인하였다. 다시 말해, VE는 소자의 크기가 클수록 빠르게 감소한다. 그림 3(b)에서 VE는 (a)와 마찬가지로 10 A/cm²까지 소자 크기에 관계없이 비슷한 경향을 나타낸다. 50 A/cm²부터 200 A/cm²까지 VE는 20 μm 소자의 경우 91.26%에서 80.87%로 11.39%, 100 μm 소자의 경우 92.86%에서 79.58%로 14.30%, 250 μm 소자의 경우 83.47%에서 58.96%로 29.35% 감소하였다. (a)와 비교하여, 50 A/cm² 이후 고전류 범위에 대해 소자 크기에 따른 VE의 감소율 차이가 확연하게 나타난다. 그림 3(c)에서 VE는 10 A/cm²까지 소자 크기에 관계없이 비슷한 경향을 나타내며, 50 A/cm²부터 200 A/cm²까지 20 μm 소자의 경우 95.48%에서 86.70%로 9.19%, 100 μm 소자의 경우 96.56%에서 83.93%로 13.08%, 250 μm 소자의 경우 85.73%에서 58.71%로 31.51% 감소하였다. (c)의 VE 추세는 전체적으로 (b)와 유사하다.

그림 3(a)~(c)를 통해 확인하였듯이, VE는 일정한 동작 온도에서 소자 크기에 관계없이 10 A/cm²까지 거의 유사한 수준을 나타낸다. 이를 통해 해당 구간에서 VE가 PCE에 미치는 영향은 매우 작을 것으로 판단된다. 이후 고전류에서는 모든 동작 온도에서 소자 크기가 클수록 VE가 빠르게 감소하는 경향을 보인다. 이는 그림 2(a)~(c)에서 측정된 것과 같이, PCE가 소자 크기 20 μm에서 급감한 것과 반대되는 방향성을 가진다. 따라서 소자 크기가 감소할 때 PCE가 감소하는 것에 대해 VE는 큰 역할을 하지 않는 것으로 해석할 수 있다. 그림 3(a), (b), (c)에서 소자 크기에 관계없이 동작 온도가 100 K에서 400 K로 높아질수록 VE가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면 PCE는 동작 온도가 증가할 때 감소함을 그림 2(a)~(c)에서 확인하였다. 따라서 VE는 동작 온도가 증가하면서 PCE가 감소하는 것에 큰 역할을 하지 않는다고 여겨진다. 이로써 소자 크기와 동작 온도 두 가지 관점에서 모두 VE가 PCE에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다.

추가로 동작 온도가 증가함에 따라 VE가 높아지는 현상의 원인은 다음과 같다고 생각할 수 있다. 첫 번째, 온도가 높아지면 이온 간 결합 에너지가 약해져 에너지 밴드갭은 작아진다. 이에 따라 문턱 전압이 낮아지면서 VE는 증가할 수 있다 [13]. 두 번째, 열에 의해 에너지를 받은 전자들이 높은 state로 이동하여 포텐셜 에너지가 높아져 VE는

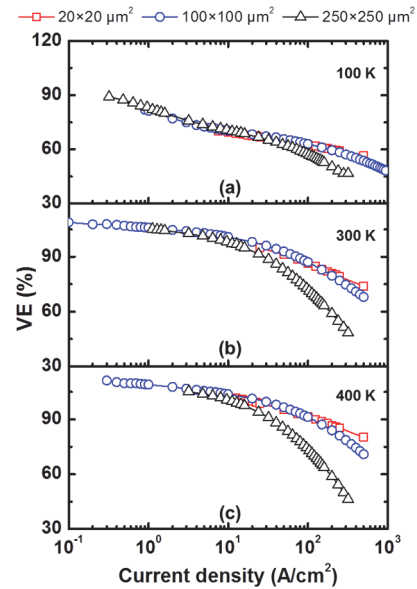


Fig. 3. Experimental results of VEs depending on the chip-size at (a) 100, (b) 300, and (c) 400 K as a function of the current density of prepared μ-LED samples plotted in a semi-log scale.

증가할 수 있다 [14]. 세 번째, 에너지 밴드갭이 작아지면 가전자대와 엑셉터 레벨 사이 간격도 함께 좁아지기 때문에 정공의 활성화 에너지가 낮아진다. 가전자대역에 존재하는 정공의 농도가 높아지면 직렬 저항은 감소하여 VE의 증가를 가져올 수 있다 [15].

또한 인가전류가 증가함에 따라 VE가 감소하는 현상의 원인은 다음과 같다고 생각할 수 있다. 먼저 GaN-based LED의 경우 GaN 층과 사파이어 기판 사이 격자상수 차이에 의해 에너지 밴드가 휘어지면서 Piezo electric field가 생성된다. 휘어진 우물에 전류를 인가하면 처음에는 전자와 정공이 공간적으로 중첩되지 않아 재결합하지 못한다. 캐리어가 어느 정도 쌓이면 공간 및 위상이 겹치는 캐리어들이 재결합을 시작하는데, 이때 광자의 에너지는 본래 에너지 밴드갭보다 크므로 VE가 100%를 초과하게 된다. 그런데 고전류 영역으로 갈수록 캐리어가 장벽 층보다 높게 쌓여 흘러 overflow가 발생하여 VE가 감소하게 된다 [16]. 또한 동일한 동작 온도에서 소자의 크기가 증가하면 전류 면적의 증가보다 전류 경로의 길이 증가가 더 크게 나타나 전류 흐름이 길어지게 된다. 이로 인해 직렬 저항이 증가하며 결과적으로 VE가 감소하는 현상을 관찰할 수 있다 [17].

3.2.2 외부 양자 효율

앞서 VE가 PCE의 주요 결정 요인이 아님을 확인했으므로, 이번에는 EQE가 PCE에 미치는 영향에 대해 살펴보겠

다. 그림 4(a), (b), (c)는 각각 동작 온도 100 K, 300 K, 400 K에서 세 소자의 EQE를 전류 밀도의 함수로 나타낸 것이다. EQE는 위에서 측정한 PCE와 VE를 이용하여 다음과 표현할 수 있다 [18].

$$\eta_{EQE} = \frac{\eta_{PCE}}{\eta_{VE}} \quad (4)$$

전체적으로 EQE 그래프의 형태는 PCE 그래프와 유사하게, 전류 밀도에 따라 증가하다가 특정 지점을 지나면 감소하는 곡선을 보인다.

그림 4(a) 100 K에서 최대 EQE는 소자 크기가 작아질수록 감소한다. 저전류 범위에서는 100 μm , 250 μm , 20 μm 의 순서로 EQE 값이 작아지며, 100 μm 과 250 μm 간의 차이는 크지 않지만 250 μm 과 20 μm 간의 차이는 두드러진다. 최대 EQE에 도달하는 전류 밀도는 20 μm 에서 2.5 A/cm^2 , 100 μm 에서 4 A/cm^2 , 250 μm 에서 6.4 A/cm^2 로, 소자 크기가 커질수록 최대 EQE에 해당하는 전류 밀도가 증가하는 경향을 보인다. 그림 4(b) 300 K에서 최대 EQE는 100 K와 유사한 경향을 보이나, 100 μm 과 250 μm 사이의 값 차이는 줄어들고, 250 μm 과 20 μm 간의 차이는 커진다. 최대 EQE에 도달하는 전류 밀도는 20 μm 에서 25 A/cm^2 , 100 μm 에서 5 A/cm^2 , 250 μm 에서 6.4 A/cm^2 로, 100 μm 과 250 μm 에서는 온도가 변해도 최대 EQE에 도달하는 전류 밀도에 큰 차이가 없지만, 20 μm 에서는 더 높은 전류 밀도에서 최대 EQE를 기록한다. 그림 4(c) 400 K에서도 앞선 (a)와 (b)와 동일한 경향을 보이며, (a)와 (b)를 비교했을 때 100 μm 과 250 μm 간의 차이는 더욱 줄어들고, 250 μm 과 20 μm 간의 차이는 더욱 커진다. 최대 EQE에 도달하는 전류 밀도는 20 μm 에서 50 A/cm^2 , 100 μm 에서 5 A/cm^2 , 250 μm 에서 6.4 A/cm^2 로 확인되며, 100 μm 과 250 μm 에서는 변화가 없고 20 μm 은 더 높은 전류 밀도에서 최대 EQE를 기록한다.

온도에 따른 최대 PCE를 살펴보면, 100 K에서는 20 μm 에서 0.75 A/cm^2 , 100 μm 에서 0.7 A/cm^2 , 250 μm 에서 1.44 A/cm^2 , 300 K에서는 20 μm 에서 17.5 A/cm^2 , 100 μm 에서 3 A/cm^2 , 250 μm 에서 3.2 A/cm^2 , 400 K에서는 20 μm 에서 25 A/cm^2 , 100 μm 에서 4 A/cm^2 , 250 μm 에서 3.2 A/cm^2 로, 온도가 증가함에 따라 20 μm 에서 더 큰 전류 밀도에서 최대 PCE를 기록한다. 또한 300 K와 400 K에서 100 μm 과 250 μm 간의 차이가 크지 않다는 점은 EQE와 공통으로 나타나는 현상이다.

크기 관점에서 20 μm 에서의 효율이 다른 크기에 비해 낮다는 점이 두드러지며, 이는 EQE와 PCE 모두에서 확인

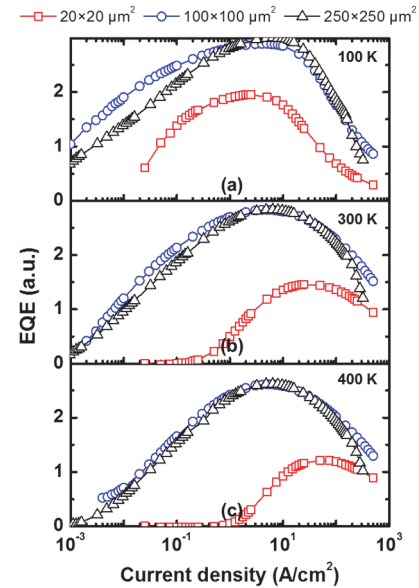


Fig. 4. Experimental results of EQEs depending on the chip-size at (a) 100, (b) 300, and (c) 400 K as a function of the current density of prepared μ -LED samples plotted in semi-log scale.

된다. 동작 온도의 관점에서도 온도가 증가함에 따라 20 μm 에서 더 큰 전류 밀도에서 최대값을 가진다는 점이 두드러진다. 또한, 온도가 높아질수록 EQE가 감소하는 경향이 PCE에서도 동일하게 나타났다. 이러한 측면에서 EQE는 PCE에 큰 영향을 미치는 요인으로 작용함을 확인할 수 있다. 따라서 ICP-RIE 과정 중 소자 측벽에 발생한 플라즈마 데미지가 우리의 제작 조건에서는 20 μm 크기 정도에서부터 소자의 표면 비발광 재결합을 많이 증가시키는 것을 예상케 한다. 이러한 현상을 확인하기 위해 전류-전압 곡선 특성의 조사가 매우 유용하다.

3.3 이상계수를 통한 EQE 해석

측벽에 발생한 플라즈마 데미지가 비발광 재결합을 증가시켜 효율 감소에 얼마나 영향을 주었는지 파악하기 위해 이상계수에 대한 분석을 수행하였다. 이상계수는 전류-전압 특성과 쇼클리 다이오드 방정식(Shockley diode equation)의 미분을 통해 구할 수 있으며 다음과 같이 표현된다 [19].

$$n_{ideal} = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln(I))} \quad (5)$$

측정된 이상계수를 통해 다층구조 활성층 내에서의 주

도적인 재결합 메커니즘에 대해 추측할 수 있다 [20]. 이상 계수의 값이 1일 때, 주된 재결합은 전자와 정공이 직접 재결합하여 빛을 내는 band-to-band 발광 재결합이다. 이 경우 소자는 이론적으로 이상적인 동작을 수행한다. 이상 계수의 값이 2일 때, 주된 재결합은 결함에 의해 생성된 에너지 트랩을 통하여 재결합하여 열을 방출하는 Shockley-Read-Hall (SRH) 비발광 재결합이다. 이상계수의 값이 2 이상인 경우에는 위의 두 가지 이외의 재결합이나 전도, 예를 들어 터널링 누설전류나 표면재결합, 캐리어 호핑 등에 의해 활성층 외부에서 발생하며, 이들은 소자의 성능 및 효율을 저하시키는 요인이다 [21].

그림 5는 식 (5)를 통해 구한 소자의 크기별 동작 온도별 이상계수 vs. 전류 밀도의 그래프이다. 이상계수는 대부분 동작 온도와 소자 크기와 관계없이 인가된 전류에 따라 저전류 영역에서 감소했다가 특정 전류 이후 증가하는 경향을 보인다.

그림 5(a) 100 K에서는 20 μm , 100 μm , 250 μm 의 모든 크기에 대해 이상계수가 2를 초과하여, 이상 계수를 통해 다층구조 쿼터웰 내에서 발생하는 재결합에 대한 정보를 얻기 어렵다. 이는 저온에서 역셉터 활성화 에너지의 급격한 증가로 인해 정공의 농도가 급격히 감소하면서 직렬 저항성분이 매우 커져 이를 무시할 수 없기 때문이다 [22].

그림 5(b) 300 K에서는 (a)보다 전반적으로 이상계수 값이 감소하며 저전류 영역에서 100 μm 와 250 μm 는 주로 1.3~2.5의 값을 가지지만, 20 μm 는 이보다 더 큰 2~3에 머무는 값을 가진다. 이상계수 최솟값은 각각 20 μm , 100 μm , 250 μm 에서 각각 2.32, 1.31, 1.4이다. 20 μm 에서 이상계수가 2를 초과하는 것은 활성층 내에서 일어나는 band-to-band나 SRH 재결합의 비율보다 이들 이외의 위에서 언급된 활성층 이외의 재결합이나 전도가 주도적이기 때문이다. 반면, 100 μm 와 250 μm 에서의 이상계수는 20 μm 보다 낮은 1.3~2.5의 값을 보이므로 활성층 내에서 일어나는 재결합이 주도적인 메커니즘이라 생각할 수 있다.

그림 5(c)에서는 (b)와 큰 변화 없이 100 μm 와 250 μm 에서 1.3~2.5의 값을 가지고 이상계수의 최솟값은 각각 1.24, 1.33이다. 20 μm 에서는 이상계수 값이 2를 초과하는 값을 가지며, (a)와 (b)의 20 μm 소자에서와 다르게 저전류에서 첨두치를 보이는 비정상적인 형태의 곡선을 나타낸다.

앞서 그림 5(a), (b), (c)를 통해 크기가 가장 작은 20 μm 소자의 경우 세 가지 온도 모두에서 이상계수 값이 2를 초과하고 비정상적인 곡선 형태를 띠는 것을 확인하였다. 이는 20 μm 소자가 쇼클리 다이오드 방정식에 부합한 다이오드로 작동을 하지 않음을 의미하며, 20 μm 에서 활성층

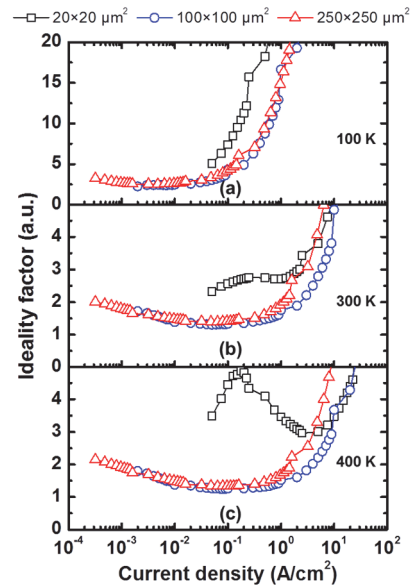


Fig. 5. Calculated ideality factor at (a) 100, (b) 300, and (c) 400 K as a function of current density of three prepared μ -LEDs plotted in a semi-log scale.

내에서의 재결합보다 활성층 외부에서 전도나 재결합이 우세하기 때문이라 생각된다. 특히 20 μm 소자가 다이오드로 작동하지 않게 된 원인에 대하여 생각해 보면 크기가 작아지면서 전체 부피 대비 플라스마 데미지가 받은 부피의 비율이 커지게 되어, 측벽에서 발생하는 sidewall 비발광 재결합의 비율이 높아져 EQE가 감소했다고 판단할 수 있다. 다시 말해, sidewall의 비발광은 활성층 내부의 재결합과 상관없고 쇼클리 다이오드 방정식에서 포함되지 않기 때문에 비이상적인 큰 수가 측정되었다 [23].

4. 효율 비교 분석 및 결론

EQE는 모든 소자 크기에 대해 동작 온도가 높아지면 감소한다. 특히 타 소자 크기 대비 20 μm 에서 감소율이 급증한다. PCE는 100 μm , 250 μm 에서 거의 유사한 수준으로 나타나며 300 K에서 최댓값을 가진다. 20 μm 의 경우 100 μm , 250 μm 와 다르게 동작 온도가 높아지면 빠르게 감소한다. EQE와 PCE 모두 400 K에서 감소하는 경향을 보이는데, 이는 고온 환경에서 소자 내부 저항이 증가하여 전하 수송 및 추출 효율이 저하되었기 때문으로 보인다. 또한 100 μm , 250 μm 소자의 경우 온도가 증가할 때 EQE 및 PCE의 감소율이 20 μm 대비 작음을 확인할 수 있다. VE는 모든 소자 크기에서 400 K일 때 최댓값을 가지며 소자

의 크기가 작을수록 동작 온도가 증가할 때 VE가 빠르게 증가한다. 특히 20 μm 에서 온도 증가에 의한 VE의 증가율이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

종합적으로 소자의 크기가 작은 경우 효율의 증감률이 크게 변화하며, 이는 고온 환경에서 표면재결합의 활성화 비율이 더욱 높아지기 때문이다. 또한 3.3에서 언급했듯이 소자의 크기가 작아지면 플라즈마 데미지에 의해 손상된 sidewall이 소자 전체 부피에서 차지하는 비율이 커지기 때문에 sidewall 비발광 재결합이 증가하여 EQE의 감소, 결과적으로는 PCE의 감소를 초래한다. 플라즈마 데미지에 의해 손상된 sidewall의 에너지 밴드 다이어그램을 그림 6에 표시하였다. Sidewall에서는 결정 구조가 파괴되어 다수의 트랩이 활성화되며 밴드 굽힘 현상이 발생해 가전자대와 엑셉터 레벨 사이 간격이 넓어짐을 확인할 수 있다. Sidewall에 존재하는 캐리어들은 쉽게 트랩에 포착되어 열을 방출하면서 비발광 재결합하며, 이러한 메커니즘에 의해 20 μm 소자의 EQE 및 PCE가 다른 크기의 소자 대비 현저히 작은 값을 가지는 것으로 보인다.

하지만 계속되는 고화질 및 고집적 소자에 대한 수요에 대응하기 위해서는 앞서 살펴본 20 μm 소자보다 작은 마이크로 스케일 소자의 효율이 고온 환경에서 안정적인 수준이 유지되어야만 할 것이다. 소자 내부에서의 표면 재결합을 최소화하거나 내부의 구조적인 설계를 통해 전류 밀집을 최적화하는 기술을 개발하여 소자 크기의 한계를 극복하고 고온 환경에서도 안정적으로 구동할 수 있게 되면 차세대 디바이스에 $\mu\text{-LED}$ 를 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

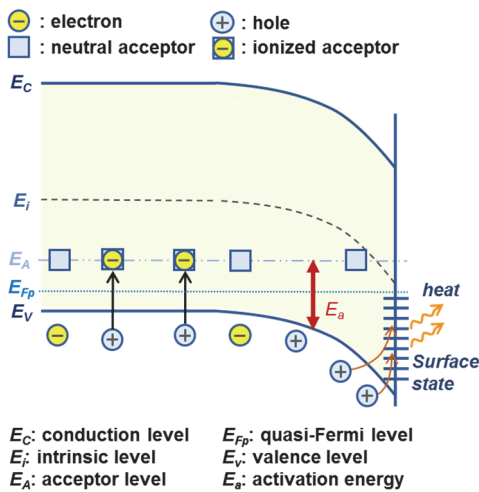


Fig. 6. Schematic illustration of energy band diagram including sidewall effect in $\mu\text{-LEDs}$.

ORCID

Dong-Pyo Han

<https://orcid.org/0000-0002-4108-6440>

감사의 글

이 논문은 2023학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(202315400001).

REFERENCES

- [1] I. Akasaki, *Rev. Mod. Phys.*, **87**, 1119 (2015). doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.1119>
- [2] H. Amano, *Rev. Mod. Phys.*, **87**, 1133 (2015). doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.1133>
- [3] B. J. Kim, S. H. Ryu, H. S. Yang, Y. B. Moon, and C.-B. Yoon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 494-499 (2023). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.9>
- [4] P. J. Parbrook, B. Corbett, J. Han, T.-Y. Seong, and H. Amano, *Laser Photonics Rev.*, **15**, 2000133 (2021). doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.202000133>
- [5] J. Park, J. H. Choi, K. Kong, J. H. Han, J. H. Park, N. Kim, E. Lee, D. Kim, J. Kim, D. Chung, S. Jun, M. Kim, E. Yoon, J. Shin, and S. Hwang, *Nat. Photonics*, **15**, 449 (2021). doi: <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00783-1>
- [6] Global Micro-LED Market with COVID-19 Impact, Research and Markets. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5067415/>
- [7] J.-H. Park, M. Pristovsek, W. Cai, H. Cheong, A. Tanaka, Y. Furusawa, D.-P. Han, T.-Y. Seong, and H. Amano, *Adv. Opt. Mater.*, **11**, 2203128 (2023). doi: <https://doi.org/10.1002/adom.202203128>
- [8] C. Park, T. K. Kim, J. S. Kwak, and D.-P. Han, *ACS Photonics*, **11**, 3456 (2024). doi: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.4c01455>
- [9] Z. Zhuang, D. Iida, and K. Ohkawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, SA0809 (2022). doi: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac1a00>
- [10] J.-I. Shim and D.-S. Shin, *Nanophotonics*, **7**, 1601 (2018). doi: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0094>
- [11] D.-P. Han, C.-H. Oh, D.-S. Shin, J.-I. Shim, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, and I. Akasaki, *J. Appl. Phys.*, **128**, 123103 (2020). doi: <https://doi.org/10.1063/5.0008041>
- [12] C. Park, J.-I. Shim, D.-S. Shin, and D.-P. Han, *J. Appl. Phys.*, **136**, 075302 (2024). doi: <https://doi.org/10.1063/5.0211934>
- [13] D. S. Meyaard, J. Cho, E. F. Schubert, S.-H. Han, M.-H. Kim, and C. Sone, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 121103 (2013).

- doi: <https://doi.org/10.1063/1.4821538>
- [14] D.-P. Han, G. W. Lee, S. Min, D.-S. Shim, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, and I. Akasaki, *Sci. Rep.*, **10**, 17433 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74585-w>
- [15] H. Kim, S.-J. Park, and H. Hwang, *IEEE Trans. Electron Devices*, **48**, 1065 (2001).
doi: <https://doi.org/10.1109/16.925227>
- [16] C. Park, J. Park, S. Min, J.-I. Shim, and D.-S. Shim, *ACS Photonics*, **11**, 464 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.3c01263?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>
- [17] H. Kim, S.-J. Park, H. Hwang, and N.-M. Park, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1326 (2002).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1499994>
- [18] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 4th ed. (Google books, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA, 2023), Chapter 13.
- [19] C.-H. Oh, J.-I. Shim, and D.-S. Shin, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, 012005 (2019).
doi: <https://doi.org/10.7567/1347-4065/aae92f>
- [20] C.-H. Oh, J.-I. Shim, and D.-S. Shin, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, SCCC08 (2019).
doi: <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab09db>
- [21] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 4th ed. (Google books, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA, 2023), Chapter 7.
- [22] J. H. Park, J. Cho, E. F. Schubert, and J. K. Kim, *Energies.*, **10**, 1277 (2017).
doi: <https://doi.org/10.3390/en10091277>
- [23] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 4th ed. (Google books, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA, 2023), Chapter 4.