

비정질 인듐-갈륨-아연 산화물 기반 박막 트랜지스터의 NBIS 불안정성 개선을 위한 연구동향

윤건주¹, 박진수¹, 김재민¹, 조재현¹, 배상우², 김진석², 김현후³, 이준신¹ 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 삼성전자 Foundry 개발QA그룹

³ 두원공과대학교 디스플레이공학과

Research Trends for Improvement of NBIS Instability in Amorphous In-Ga-ZnO Based Thin-Film Transistors

Geonju Yoon¹, Jinsu Park¹, Jaemin Kim¹, Jaehyun Cho¹, Sangwoo Bae², Jinseok Kim²,
 Hyun-Hoo Kim³, and Junsin Yi¹

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Technology Quality & Reliability Foundry Division Samsung Electronics Co., LTD., Yongin 17113, Korea

³ Department of Display Engineering, Doowon Technical University, Paju 10838, Korea

(Received May 13, 2019; Accepted July 12, 2019)

Abstract: Developing a thin-film transistor with characteristics such as a large area, high mobility, and high reliability are key elements required for the next generation on displays. In this paper, we have investigated the research trends related to improving the reliability of oxide-semiconductor-based thin-film transistors, which are the primary focus of study in the field of optical displays. It has been reported that thermal treatment in a high-pressure oxygen atmosphere reduces the threshold voltage shift from -7.1 V to -1.9 V under NBIS. Additionally, a device with a SiO₂/Si₃N₄ dual-structure has a lower threshold voltage (-0.82 V) under NBIS than a single-gate-insulator-based device (-11.6 V). The dual channel structure with different oxygen partial pressures was also confirmed to have a stable threshold voltage under NBIS. These can be considered for further study to improve the NBIS problem.

Keywords: Oxide semiconductor, Thin-film transistor, IGZO, Bias stress, NBIS

1. 서론

비정질 인듐-갈륨-아연 산화물(a-IGZO) 반도체는

스퍼터와 같은 증착 장비를 이용하여 상온에서 균일한 박막을 얻을 수 있고, 높은 전계 효과 이동도, 양호한 게이트 스윙, 3.4 eV의 넓은 밴드 갭을 가지므로 가시광 영역에 대한 투명함을 보이는 등 액정 디스플레이, 투명 디스플레이 및 유기 발광 다이오드 디스플레이와 같은 고급 평면 패널 디스플레이를 위한 백플레인 전자 장치에서 채널 재료로서 많은 관심을 끌어왔다 [1-3]. 산화물 반도체에 대한 연구는 ZnO, SnO₂ 등의 이성분

✉ Junsin Yi; junsin@skku.edu

Copyright ©2019 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.

계로부터 진행되었으며 특히 ZnO는 열처리를 통해 박막 트랜지스터의 활성층으로 사용할 수 있는 특성이 발표되면서 많은 관심을 받았다 [4]. 하지만 ZnO 박막은 증착 과정에서 결정화가 쉽게 발생하여 비정질상을 얻기가 어렵고, 결정립계의 존재로 인해 박막 트랜지스터 소자의 전자 이동도 및 임계전압의 불안정성, 캐리어 농도를 조절하기에 어렵다는 단점이 제기되었다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해서 ZnO에 Al, Ga, In 등을 도핑하여 삼성분계의 산화물 반도체를 만들었고 이후 2004년 말 Hideo Hosono 교수의 연구그룹은 캐리어 농도와 전도도를 개선하기 위해 In과 Ga를 도핑한 비정질 IGZO TFT를 개발하면서 산화물 반도체의 가능성을 알리고 주목을 받게 되었다 [5]. 비정질 IGZO의 경우 대부분 스퍼터링법을 이용하여 제조되었고, 향후 플렉서블 디스플레이를 위해 다양한 용액 기반의 연구가 진행되고 있다. 최근에는 1~2 V 임계전압, $10^7 \sim 10^8$ 의 전류 온/오프 비율, $10 \sim 50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도 및 100 mV/decade의 스윙 값과 같은 우수한 전기적 특성을 갖는 산화물 반도체 기반의 비정질 IGZO TFT가 보고되었다 [6-8]. 이러한 우수한 성능을 가진 비정질 IGZO TFT가 빛에 특히 취약하다는 단점을 가지고 있는데 청색광과 같이 높은 에너지를 갖는 빛이 산화물 반도체에 입사하게 되면 소자 내에 광전류의 발생으로 인해 트랜지스터의 임계전압이 음의 방향으로 이동하게 된다 [9]. 차세대 디스플레이는 전기적 특성에서의 높은 신뢰성을 요구하기 때문에 빛에 의해 열화되는 비정질 IGZO 박막의 특성을 개선하기 위한 연구가 끊임없이 이어지고 있다. 본 논문에서는 비정질 IGZO TFT가 negative bias illumination stress (NBIS)에서의 불안정성을 야기하는 원인과 문제를 개선하기 위해 제안된 기술들을 소개한다.

2. 실험 방법

이번 논평에서 진행된 실험은 비정질 IGZO 채널 층의 경우 주로 스퍼터링 기술에 의해 진행되었다. 채널 층의 경우 기존의 비정질 IGZO 단일 층 외에 이중구조와 같은 구조적 변화를 통해 소자특성을 개선하는 실험이 진행되었고, 게이트 절연층은 ALD, PECVD 등의 증착 장비를 이용하여 소자를 제작 후 NBIS 환경에서의 불안정성을 확인하고 열을 가하는 후처리 공정, 두 물질을 적층한 구조적 변화 같은 방법을 적용하여 특성을 개선하는 방식으로 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 신뢰성 저하 메커니즘

NBIS가 소자에 인가되면 그림 1에서 볼 수 있듯이 전체 채널 영역이 공핍되므로 채널 영역에는 전기장이 존재하게 된다. 빛에 의해 형성된 전자와 홀 EPHs ($\text{EPH} \rightarrow e^- + h^+$)은 전기장으로 인해 분리되며 전자는 게이트에 인가되는 음의 전압에 의해 채널 표면으로 이동하고 홀은 게이트 절연막과 채널 간 계면 방향으로 이동하게 된다. 이동된 홀을 계면에 포획되기 때문에 활성층 내부에는 잉여전자들을 남기게 되고 이러한 현상으로 인해 트랜지스터의 임계전압을 음의 방향으로 이동시킨다 [10]. 따라서 NBIS 인가를 중단하여도 음의 방향으로 이동한 임계전압값은 기존의 상태로 회복을 하지 못하는데 이를 홀 트랩핑(hall trapping)이라 부른다. 이를 방지하기 위한 방법으로, 홀 배리어 역할이 가능하도록 높은 에너지 레벨을 갖는 게이트 절연막을 적용한 많은 연구가 진행되고 있다. 두 번째로 산소 공공(oxygen vacancy, V_o)의 여기에 의한 신뢰성 저하가 제안되었다. 활성층의 deep state에 존재하는 중성 산소 공공이 V_o^{2+} 로 여기되는 과정에서 전도대에 기여되는 자유 전자 때문에 임계전압이 음의 방향으로 이동한다 [11]. 여기 된 V_o^{2+} 결함은 준안정 상태이므로 NBIS 환경을 제거한 이후에도 원래의 안정한 상태인 V_o 상태로 회복하지 못하는 특성을 보인다 [12]. 세 번째로 외부의 수분이나 산소가 표면에 흡착 또는 탈착되면서 표면 전하를 유도하게 되기 때문에 산화물 반도체가 적용된 박막 트랜지스터의 임계전압 이동을 유발한다 [14-17].

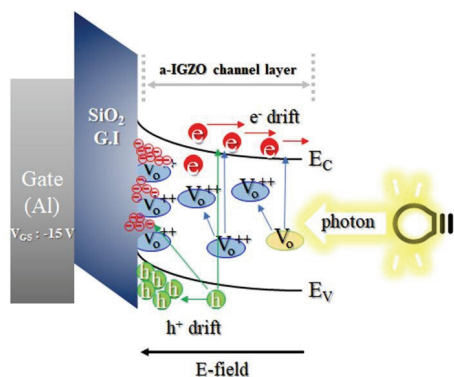


Fig. 1. Schematic energy band diagram to explain the trapping or/injection of a photo induced hole carrier.

3.2 공정 조건 가변을 통한 신뢰성 개선 연구

그림 2는 비정질 IGZO TFT를 200°C의 산소 분위기에서 열처리 후 NBIS 환경에서의 신뢰성을 보여준다. 열처리에 사용된 산소의 압력이 0.2 atm에서 10 atm까지 증가함에 따라 NBIS 환경에서 임계전압 변화는 -7.1 V에서 -1.9 V로 개선된 것을 볼 수 있다. 이는 산소 열처리 과정에서 트랜지스터의 채널 영역으로 들어간 산소에 의해 산소 공공의 농도가 감소했기 때문이다. 이러한 산소 공공과 관련된 분석과 연구보고들의 경우 가장 보편적인 방법으로 X선 광전자 분광법(X-ray photoelectron spectroscopy)을 이용한다. 산소 공공의 양을 확인하는 방법으로는 산소의 O 1s peak를 금속-산소 간 결합이 없는 결합(O_I), 금속-산소 결합에서 산소가 비어 있는 상태의 결합(O_{II}), 흡착된 수분이나 OH 결합(O_{III})의 peak들로 X선 광전자 분광법을 통해 deconvolution하여 각 peak의 상대적인 정량 비를 통해 산소 공공의 양을 알 수 있다 [13]. 그림 3과 4에서는 SiO_2 , Si_3N_4 , SiO_2/Si_3N_4 의 서로 다른 게이트 절연 물질을 적용함으로써 산소의 흡착, 탈착뿐만 아니라 홀 트랩핑으로 인해 열화되는 소자특성이 개선됨을 보여준다. Si_3N_4 가 절연체로 사용된 소자(a)는 NBIS 시간이 늘어남에 따라 임계전압 값이 큰 폭으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 반면에 SiO_2 가 적용된 소자(b)에서는 -2.1 V의 임계전압을 보였고 -11.6 V의 임계전압을 갖는 Si_3N_4 에서 보다 NBIS 환경에서 신뢰성이 확보되었으며, (b)보다는 SiO_2/Si_3N_4 두 물질이 적층된 구조를 가지는 소자

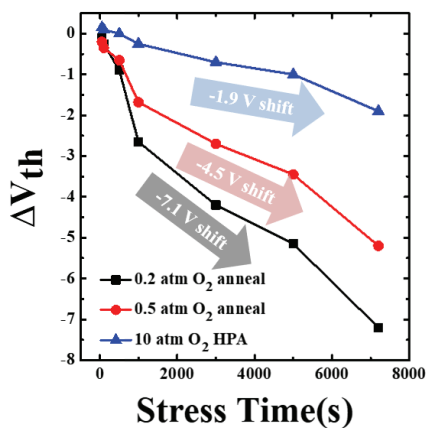


Fig. 2. Threshold voltage shift in the NBIS condition of the O_2 annealed device at different pressures. The ΔV_{th} shift of the 0.2 atm, 0.5 atm, and 10 atm device are -7.1 V, -4.5 V and -1.9 V, respectively [13].

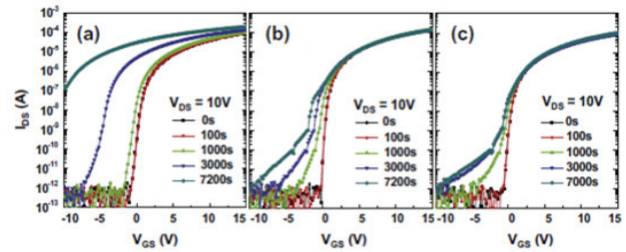


Fig. 3. The transfer characteristics for the (a) Si_3N_4 , (b) SiO_2 , and (c) SiO_2/Si_3N_4 as gate insulator as a function of the NBIS time [20].

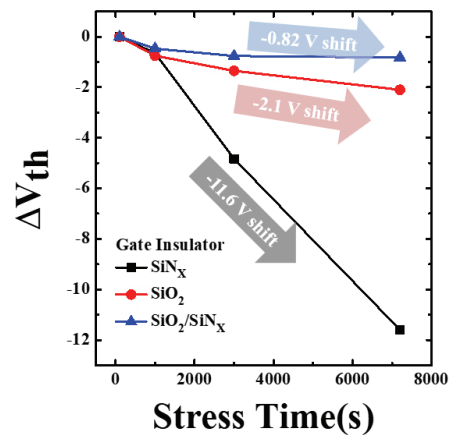


Fig. 4. The ΔV_{th} shift of the Si_3N_4 , SiO_2 , and SiO_2/Si_3N_4 gate insulator are -11.6 V, -2.1 V and -0.82 V [20].

(c)에서 향상된 광 안정성을 보이는데 이는 홀의 주입 또는 홀 트랩핑 메커니즘으로 설명할 수 있다 [18,19]. SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 와 같은 우수한 게이트 절연체 또는 채널 보호층을 사용하여 소자를 제작할 경우 대기와의 반응을 원천적으로 차단함으로써 빛에 대한 소자의 열화를 상당 부분 억제한다. 이중구조의 절연층 SiO_2/Si_3N_4 를 적용하였을 때 임계전압이 음의 방향으로 이동하는 현상이 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

3.3 소자의 구조 변화를 통한 신뢰성 개선 연구

소자의 구조적인 면을 새롭게 개발함으로써 개선된 특성을 얻어내는 방법으로, 박막 트랜지스터의 채널을 이중으로 사용하여 기존의 단일 채널을 적용한 박막 트랜지스터보다 우수한 전기적 특성을 보이는 소자구조가 개발되었다 [21-23]. 그림 5에는 이중 채널 박막 트랜지스터의 단면이 묘사되어 있다. NBIS 환경에서의 신뢰성을 개선시키기 위해 스퍼터링 공정 중 비정질

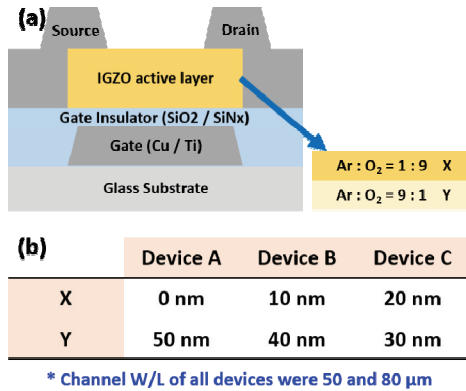


Fig. 5. (a) Schematic diagram of device with dual IGZO active layer. (b) Compare the oxygen-poor layer and oxygen-rich layer thickness of each device.

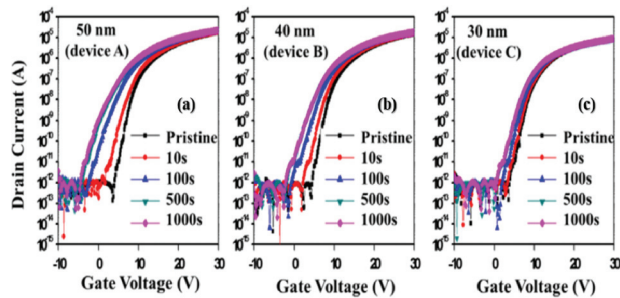


Fig. 6. (a) Evaluation of the transfer characteristics for (a) device A, (b) device B, and (c) device C as a function of applied NBIS times.

IGZO 적층 시 채널 내의 산소량을 늘려 산소 공공 농도의 양을 줄일 수 있다. 비정질 IGZO 단일 채널을 사용하는 경우, 채널 내의 산소량을 늘리면 이동도가 저하된다는 단점이 있다 [24]. 하지만 이중 채널 박막 트랜지스터의 경우 채널층을 공정 산소 분압이 낮은 비정질 IGZO를 사용하여 이동도를 개선하고, 산소 분압이 높은 비정질 IGZO를 그 위에 적층하여 NBIS 환경에서의 신뢰성을 확보하는 연구가 보고되었다 [25].

기존 단일 a-IGZO 채널층 구조의 소자는 NBIS 환경에서 임계전압이 음의 방향으로 8.5 V만큼 이동했고, 서로 다른 산소분압을 가지는 a-IGZO 이중 채널층을 적용한 구조에서는 6.8 V, 3.2 V로 NBIS에 따른 임계전압의 변화가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 6에 나타난 바와 같이 이중 채널층에서 산소 분압이 높은 층의 체적비율을 증가시킴에 따라 임계전압의 변화가 감소하게 되는 것을 말하고, 결과적으로 산소분압이 높은 층이 백 채널 영역을 보호하는 역할을 하여 개선된 안정성을 얻을 수 있다. 스퍼터링 공

정 시 산소분압비의 최적화가 가장 중요한 핵심이다. 산소 분압을 높여서 제작 후 열처리를 진행하면 우수한 전기적인 특성을 얻을 수 있지만 바이어스 스트레스에 대한 신뢰성은 나빠진다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 높은 산소 분압에서는 음이온 손상에 의한 절연층 표면에서의 트랩 형성이 주된 원인이다. 그러므로 채널층을 증착할 시 표면에 트랩이 형성하는 것을 최소화하는 공정의 도입이 필요하다.

4. 결 론

현재 연구 및 산업에서 가장 많이 사용되고 있는 비정질 IGZO 산화물 반도체의 NBIS 환경에서 특성이 열화되는 원인을 확인하고 이를 해결하기 위해 진행된 많은 연구들을 정리해 보았다. 게이트 절연층에 사용되는 물질, 채널층을 이중으로 적층하는 소자의 구조적 변화 등 음의 게이트 전압 바이어스 하에서 광을 조사 시 임계전압이 음의 방향으로 이동하는 특성을 개선하기 위한 다양한 방법의 연구가 계속해서 진행 중이다. 게이트 절연체로 사용된 Si_3N_4 보다 SiO_2 가 더 높은 에너지 레벨을 갖기 때문에 NBIS 환경에서 특성이 열화되는 메커니즘 중 홀 트랩핑 효과로 인해 임계전압이 음의 방향으로 이동하는 문제를 개선할 수 있다. 이와 같은 원리로 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 이중층 구조를 적용하여 더 높은 신뢰성을 얻을 수 있었다. 또한 O_2 어닐링을 통해 비정질 IGZO 채널 내의 산소 공공 농도를 감소시켜 신뢰성이 개선됨을 역시 확인할 수 있다. 산소 분압이 낮은 비정질 IGZO와 산소 분압이 높은 비정질 IGZO의 이중 채널구조는 채널 내 산소 공공의 양을 줄여 NBIS 환경에서의 신뢰성을 확보하는 동시에 고이동도를 얻어냈다. 이러한 결과를 통해 산화물 반도체가 빛에 의해 열화되는 특성이 개선되면 산화물 반도체의 적용 범위는 계속해서 확장될 것으로 예상된다.

ORCID

Junsin Yi

<https://orcid.org/0000-0002-6196-0035>

감사의 글

본 연구는 2019년도 삼성전자의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

REFERENCES

- [1] T. Kamiya, K. Nomura, and H. Hosono, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **11**, 044305 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/11/4/044305>]
- [2] M. K. Ryu, S. Yang, S.H.K. Park, C. S. Hwang, and J. K. Jeong, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 173508 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3257726>]
- [3] J. K. Jeong, J. H. Jeong, H. W. Yang, T. K. Ahn, M. Kim, K. S. Kim, B. S. Gu, H. J. Chung, J. S. Park, Y. G. Mo, H. D. Kim, and H. K. Chung, *J. Soc. Inf. Disp.*, **17**, 95 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1889/jsid17.2.95>]
- [4] J. F. Wager, *Science*, **300**, 1245 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1085276>]
- [5] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, **432**, 488 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nature03090>]
- [6] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Gonçalves, A. Marques, L. Pereira, and R. Martins, *Thin Solid Films*, **487**, 205 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.01.066>]
- [7] H. Yabuta, M. Sano, K. Abe, T. Aiba, T. Den, H. Kumomi, K. Nomura, T. Kamiya, and H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 112123 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2353811>]
- [8] A. Suresh, P. Wellenius, A. Dhawan, and J. Muth, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 123512 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2716355>]
- [9] J. H. Shin, J. S. Lee, C. S. Hwang, S.H.K. Park, W. S. Cheong, M. Ryu, C. W. Byun, J. I. Lee, and H. Y. Chu, *ETRI J.*, **31**, 62 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.4218/etrij.09.0208.0266>]
- [10] A. Janotti and C. G. Van de Walle, *Phys. Rev. B*, **76**, 165202 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.165202>]
- [11] J. S. Park, J. K. Jeong, H. J. Chung, Y. G. Mo, and H. D. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 072104 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2838380>]
- [12] B. Ryu, H. K. Noh, E. A. Choi, and K. J. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 022108 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3464964>]
- [13] K. H. Ji, J. I. Kim, H. Y. Jung, S. Y. Park, R. Choi, U. K. Kim, C. S. Hwang, D. Lee, H. Hwang, and J. K. Jeong, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 103509 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3564882>]
- [14] J. K. Jeong, H. W. Yang, J. H. Jeong, Y. G. Mo, and H. D. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 123508 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2990657>]
- [15] Y. C. Chen, T. C. Chang, H. W. Li, S. C. Chen, J. Lu, W. F. Chung, Y. H. Tai, and T. Y. Tseng, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 262104 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3457996>]
- [16] S. Y. Sung, J. H. Choi, U. B. Han, K. C. Lee, J. H. Lee, J. J. Kim, W. Lim, S. J. Pearton, D. P. Norton, and Y. W. Heo, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 102107 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3357431>]
- [17] K. H. Lee, J. S. Jung, K. S. Son, J. S. Park, T. S. Kim, R. Choi, J. K. Jeong, J. Y. Kwon, B. Koo, and S. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 232106 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3272015>]
- [18] J. Y. Kwon, J. S. Jung, K. S. Son, K. H. Lee, J. S. Park, T. S. Kim, J. S. Park, R. Choi, J. K. Jeong, B. Koo, and S. Y. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 183503 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3513400>]
- [19] K. H. Ji, J. I. Kim, Y. G. Mo, J. H. Jeong, S. Yang, C. S. Hwang, S.H.K. Park, M. K. Ryu, S. Y. Lee, and J. K. Jeong, *IEEE Electron Device Lett.*, **31**, 1404 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2010.2073439>]
- [20] K. H. Ji, J. I. Kim, H. Y. Jung, S. Y. Park, R. Choi, Y. G. Mo, and J. K. Jeong, *Microelectron. Eng.*, **88**, 1412 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.03.069>]
- [21] C. H. Kim, Y. S. Rim, and H. J. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 6108 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1021/am400943z>]
- [22] K. M. Kim, W. H. Jeong, D. L. Kim, Y. S. Rim, Y. Choi, M. K. Ryu, K. B. Park, and H. J. Kim, *IEEE Electron Device Lett.*, **32**, 1242 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2160612>]
- [23] Y. S. Rim, H. Chen, X. Kou, H. S. Duan, H. Zhou, M. Cai, H. J. Kim, and Y. Yang, *Adv. Mater.*, **26**, 4273 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201400529>]
- [24] S. Parthiban and J. Y. Kwon, *J. Mater. Res.*, **29**, 1585 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.187>]
- [25] M. H. Kim, Y. S. Ko, H. S. Choi, S. M. Ryu, S. H. Jeon, J. H. Jung, and D. K. Choi, *Phys. Status Solidi A*, **213**, 1873 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201533052>]