


(-201)면 산화갈륨 단결정 기판 미세 결함 분석

최미희^{1,2}, 신윤지², 조성호^{2,3}, 정운현^{2,3}, 정성민², 배시영² 

¹ 한밭대학교 신소재공학과

² 한국세라믹기술원 반도체소재센터

³ 부산대학교 재료공학과

Characterizations of Microscopic Defect Distribution on (-201) Ga₂O₃ Single Crystal Substrates

Mee-Hi Choi^{1,2}, Yun-Ji Shin², Seong-Ho Cho^{2,3}, Woon-Hyeon Jeong^{2,3}, Seong-Min Jeong², and Si-Young Bae²

¹ Department of Materials Science and Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea

² Semiconductor Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

³ Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received July 21, 2022; Revised August 3, 2022; Accepted August 4, 2022)

Abstract: Single crystal gallium oxide (Ga₂O₃) has been an emerging material for power semiconductor applications. However, the defect distribution of Ga₂O₃ substrates needs to be carefully characterized to improve crystal quality during crystal growth. We analyzed the type and the distribution of defects on commercial (-201) Ga₂O₃ substrates to get a basic standard prior to growing Ga₂O₃ crystals. Etch pit technique was employed to expose the type of defects on the Ga₂O₃ substrates. Synchrotron white beam X-ray topography was also utilized to observe the defect distribution by a nondestructive manner. We expect that the observation of defect distribution with three-dimensional geometry will also be useful for other crystal planes of Ga₂O₃ single crystals.

Keywords: Gallium oxide, Defect, Etch pit, Topography, Edge-defined Film-fed growth

산화갈륨(Ga₂O₃)은 기존 반도체 소재(Si, SiC, GaN 등) 대비 넓은 에너지갭(4.4~5.3 eV)과 높은 임계전압(~8 MV/cm) 특성을 갖추고 있어, 차세대 전력반도체 소재로서 주목받고 있다 [1-4]. 산화갈륨은 주로 다섯 가지의 결정다형(α , β , γ , δ , ϵ (또는 κ))로 분류되며, 그 중 단사정계 구조(monoclinic structure) 형태의 β -상 산화갈륨이 열역학

적으로 가장 안정한 형태를 띠며, 단결정 기판으로 사용된다 [5-7]. 또한, β -상 산화갈륨은 여러가지 도펀트(Si, Sn 등)를 사용하여 n형 전자 농도를 10^{16} ~ 10^{19} cm⁻² 범위에서 조절할 수 있으므로, 다양한 구조의 전력 반도체 소자에 응용될 수 있다 [8,9]. 최근에는 일본 NCT (novel crystal technology)사에서는 옛지규정 필름공급 성장법(edge-defined film-fed growth, EFG)을 이용한 4인치급 β -상 산화갈륨 기판을 상용화하는데 성공했다 [10].

β -상 산화갈륨은 녹는점(1,800°C) 부근에서 용액상(liquid phase) 성장이 가능하여 기상(vapor phase) 성장법에 비해 대구경화 및 공정 제어가 비교적 용이하다 [11].

✉ Si-Young Bae; sybae@kicet.re.kr

Copyright ©2022 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.

이에 따라, EFG법 외에 수직브리짓지만(vertical bridgman) [12,13], 플로팅존(floating zone) [14-17], 초크랄스키(czochralski) 성장법 [18,19] 등이 산화갈륨 단결정 잉곳 성장에 적용되어 왔다. 이중, 수직브리짓지만 성장법과 플로팅존 성장법은 시딩(seeding) 원료의 제한적인 공급과 높은 열구배 차이로 인해 잉곳의 직경이 1인치 이하로 제한되는 특징이 있다 [14,20]. 초크랄스키 방법은 실리콘에서도 적용되는 가장 보편적인 용액성장법으로서, 산화갈륨의 경우 2인치급 (010) 면 단결정 잉곳이 성장될 수 있는 것으로 보고되었다 [21-23]. EFG법은 도가니 중심에 있는 수직으로 평행한 평면 다이(die)를 두고 그 사이의 좁은 틈을 통해 용융된 원료가 위로 올라오는 모세관 효과(capillary effect)를 이용하는 성장법이다. 도가니와 다이의 디자인에 따라 성장되는 결정의 형상 및 품질에 크게 영향을 미치지만, 다른 성장법 대비 성장속도가 매우 빠르고, 결정면 제어가 용이한 장점이 있다.

β -상 산화갈륨은 a, b, c 방향 격자상수가 각각 12.214, 3.037, 5.798 Å을 갖고, 한 각이 103.8° 기울어진 단사정계 구조를 가지며, 이로 인해 (100) 또는 (001) 결정면은 취성이 높은 벽개면(cleavage planes)으로 분류된다. 따라서, 산화갈륨 단결정 잉곳은 주로 <010> 방향을 성장축으로 하여 성장시키며, 이는 EFG를 이용한 산화갈륨 성장에서 (010) 결정면의 대면적화를 제한하는 요인이 된다. 현재 EFG법으로 상용화된 산화갈륨 기판은 (-201), (100), 그리고 (001)면을 주단면으로 하여 공급되고 있으며, 본 연구에서는 비교적 초창기부터 상용화되어 온 (-201)면 산화갈륨 기판에 대하여 주요 결함 분포를 분석하여 보고한다. 이를 통해, 향후 본 연구 그룹에서 EFG를 이용하여 성장할 예정인 산화갈륨 단결정에서 관찰되는 다양한 결함[전위결함(dislocation), 트윈(twin), 적층결함(stacking fault) 등]과 비교를 위한 초기 단계 연구로서 활용하고자 한다.

본 실험에서는 상용 (-201) β -상 산화갈륨 기판(novel crystal technology, 일본)을 이용하여 주요 결함의 종류 및 밀도를 조사하여 품질을 파악하였다. 기판 내 전위 및 공극결함을 가시적으로 분석하기 위해 85 wt% 인산(H₃PO₄) 용액에서 140°C로 60분 동안 습식식각(wet etching)하여 형성된 에치핏을 광학현미경과 원자간력현미경(atomic force microscope, AFM)을 통해 관찰하였다. 그리고 포항가속기연구소의 가속기 백색광 엑스레이 토포그래피(synchrotron white beam X-ray topography, SWBXRT)를 통해 비파괴적으로 관측한 결함의 분포 및 특성을 식각한 후 확인한 에치핏 분석 결과와 매칭 함으로써 보다 상세한 비교 분석을 진행하였다. 우선, 문헌 자료와 산화갈륨 고유의 라우에 회절(Laue diffraction) 패턴에

대한 시뮬레이션을 진행하여 회절 g-벡터(diffraction g-vector)를 유추하였다. 그 후, 산화갈륨 단결정에 3 GeV 급 고에너지 X-ray를 입사시켰을 때 나타나는 라우에 회절 패턴을 CCD 이미지로 확인 후, 원하는 g-벡터가 보이는 위치에 감광필름을 부착하여 촬영하였다. 이 후 현상액(developer)과 고정액(fixer)으로 감광필름을 현상한 뒤 광학현미경으로 관찰하는 방식으로 회절 패턴 속에 나타난 다양한 결함의 형상 및 특성을 분석하였다.

그림 1(a)는 EFG로 (-201)면을 주단면으로 하여 성장되는 산화갈륨 단결정 잉곳에서 다른 주단면(principal plane)을 함께 표현한 3차원 이미지를 나타낸다. [010] 성장 방향을 따라 존재하는 주단면인 (001)면과 (100)면은 (-201)면 위에서 각각 50.02°와 126.19°의 각도를 형성한다. 이러한 단사정계 구조내의 다양한 주단면은 안정화된 표면 에너지로 인해 적층결함을 포함한 다양한 결함을 포함할 가능성이 높다. 특히, (-201) 주단면을 갖는 β -상 산화갈륨 기판은 높은 전위결함과 공극(void)결함을 포함하는 것으로 보고되고 있다 [24]. 그림 1(b)는 단사정계 구조를 갖는 (-201) 산화갈륨 기판에서 주로 관찰되는 에치핏과 전위 결함의 3차원 이미지를 보여준다. 선형(line-shaped) 에치핏과 총알모양(bullet-shaped) 에치핏은 각각 공극결함과 전위결함에 기인하여 형성되는 것으로 보고되었다 [24,25]. 선형 에치핏은 [010] 방향을 따라 형성되고, 총알모양 에치핏은 [102] 방향을 따라 길쭉하게 형성되는 특징이 있다. 이 때, 총알모양 에치핏의 근원인 선전위의 버거스 벡터(burgers vector)는 (-201) 방향에 수직인 방향, (즉 [010] 또는 [0-10] 방향)인 것으로 알려져 있다 [25]. 그 외에도 [010] 방향으로 가늘고 긴 형태의 나노공극(nanovoid)결함이 관찰될 수 있는데, 이 결함은 식각 시간에 따라 형상이 달라지거나 과식각되어 사라져 버리는 특성이 있어서 전위결함과 쉽게 구분된다 [26].

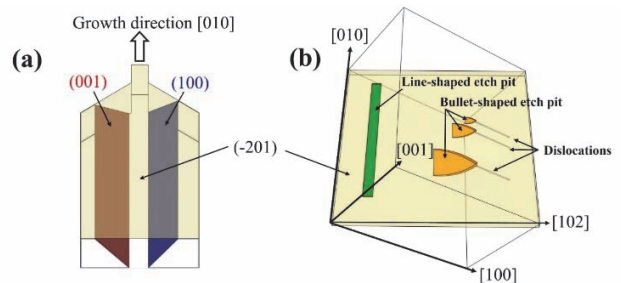


Fig. 1. (a) Three-dimensional schematics of (-201) single crystals grown by EFG method with other (001) and (100) principal planes and (b) commonly observed etch pits on (-201) Ga₂O₃ substrates.

그림 2는 (-201) 산화갈륨 기판을 인산에서 식각하여 얻어진 에치핏의 광학현미경 이미지를 보여준다. 그림 2(a)에서 나타난 총알모양 에치핏은 선전위로부터 기인되는 것으로서, 총알 모양의 기다란 방향은 [102] 방향을 향하지만, 에치핏이 균집된 형태는 기판 전반에 걸쳐 <010> 방향으로 정렬되어 있었다. 또한, 그림 2(b)와 같이 선형 에치핏 역시 <010> 방향으로 길게 정렬되는 것을 확인할 수 있었다. 총알모양 에치핏과 선형 에치핏의 밀도는 각각 약 $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 그리고 약 $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 수준으로, 총알모양 에치핏이 선형 에치핏보다 매우 높은 밀도로 분포하고 있는 것을 알 수 있었다. 그림 2(b)는 공극결함에 의해 기인한 것으로 알려진 선형 에치핏의 일부를 보여준다. 선형 에치핏은 전위결함의 수직방향인 [010] 방향으로 $50 \mu\text{m}$ 내외의 길이로 식각되어 나타났다. 이러한 선형 에치핏은 식각 시간이 길어질수록 [010] 성장방향과 [102] 방향으로 크기가 점점 커지게 되어, 에치핏의 전체 면적이 점차 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 이 때 막대형상 홈으로 전개된 선형 에치핏의 [102] 방향 너비는 최소 $\sim 5 \mu\text{m}$ 이상, 식각 깊이는 50 nm 이상으로 확인되었다.

대부분의 총알모양 에치핏은 깊이가 매우 얇고 크기가

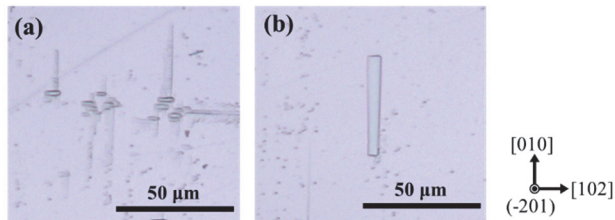


Fig. 2. Optical microscopy images of (a) a bullet-shaped etch pit and (b) line-shaped etch pits on (-201) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ substrate. These pits were etched by H_3PO_4 etchant at 140°C for 60 min.

수 μm 이하로 매우 작아서 광학현미경으로 분석을 진행하는 데 한계가 있다. 그림 3(a)는 총알모양 에치핏에 대하여 $2 \times 2 \mu\text{m}$ 영역으로 측정된 AFM의 결과를 3차원 이미지로 보여준다. 그림 3(b)는 총알모양 에치핏의 평면 이미지를 가로방향(A-A')과 세로방향(B-B')의 높이 프로파일 궤적과 함께 나타내었다. 그림 3(c)에서 보여지는 높이 프로파일 결과, 전위 결함과 연계되는 총알모양 에치핏의 높이는 $\sim 9 \text{ nm}$, 폭은 $\sim 1.2 \mu\text{m}$ 로 확인되었다. 일부 에치핏은 크기가 더 크고 식각 깊이도 더 깊은 것을 확인할 수 있었는데, 이는 여러 개의 전위결함이 서로 밀접하게 존재하여 식각된 영역이 중첩된 결과로 판단된다.

에치핏을 이용한 결함 분석은 산화갈륨 기판 내 결함의 종류와 특성을 가시적으로 파악하기에 매우 용이한 방법이다. 하지만 한번 식각된 기판은 후속 분석과 소자 공정을 위해 정밀한 표면연마를 다시 진행해야 한다는 문제가 있다. 이러한 식각 분석법의 한계를 보완하기 위해 본 연구에서는 에치핏 결함 분석과 함께 가속기 백색광 엑스레이 토포그래피(SWBXRT) 분석을 별도로 진행하였다. SWBXRT 분석으로 관찰되는 결함 중에서 전위결함과 같이 결정학적인 정보의 손실이 있는 경우에는 하얀색 점이나 선 형상으로 나타나며, 결함 주변 응력이 클수록 전위선의 진행방향에 따라 형상과 명암의 정도가 다르게 표현된다. 그 외 기판 표면 부근에만 존재하는 공극결함, 표면 단차나 물리적 스크래치와 같은 경우에는 결함이 위치한 부분에서 얻을 수 있는 결정학적 정보가 없으므로 빈 구멍과 같은 형태로 나타날 수 있다.

그림 4(a)와 4(b)는 (-201) 산화갈륨 기판의 동일한 영역에 대해 g벡터를 달리하여 촬영한 토포그래피 이미지이다. 산화갈륨 기판 표면의 결함을 효과적으로 분석하기 위해 그레이징 입사(grazing incidence) 모드를 사용하였다. 선명한 회절 이미지를 얻기 위해 산화갈륨 기판을 X-ray

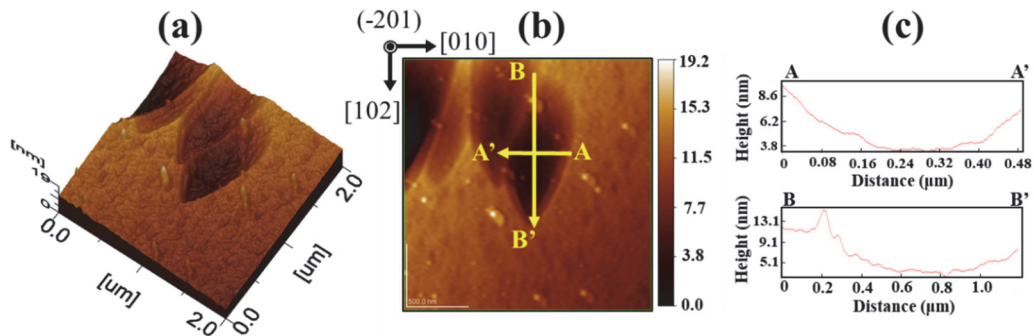


Fig. 3. (a) Three-dimensional AFM image, (b) its plan-view image, and (c) height profile of bullet-shaped etch pit in A-A' and B-B' scanning lines.

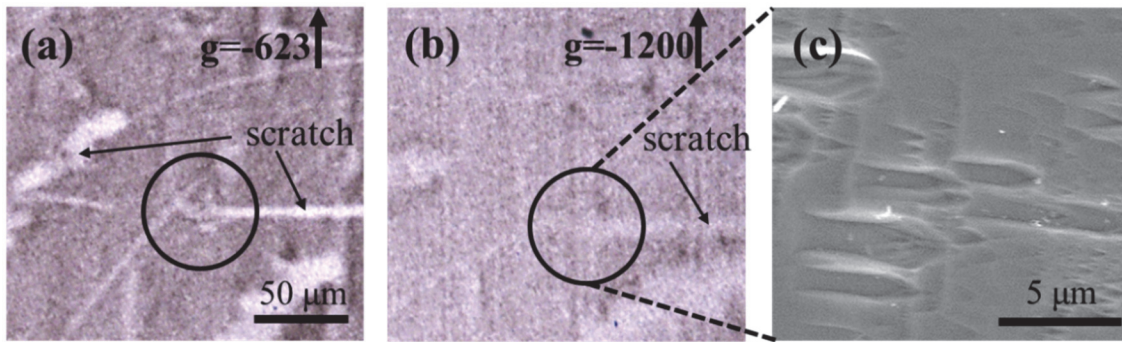


Fig. 4. X-ray topography images on the same area with different g-vector at (a) $g=-623$, (b) $g=-1,200$, respectively, and (c) SEM image of bullet-shaped etch pits corresponded to XRT topography image.

입사 방향으로 5° 기울여 분석하였으며, 이 때 x-ray 침투 깊이는 g -벡터에 따라 약 $5.2\sim 19.9\ \mu\text{m}$ 로 예측하였다 [27]. 전위결함은 회절 벡터(g)와 버거스 벡터(b)의 상호작용에 따라서 $g \cdot b = 0$ 인 경우 보이지 않고(*invisible*), 반대로 $g \cdot b \neq 0$ 의 조건을 만족하는 경우 뚜렷하게 보이는 (*visible*) 특성을 보인다. 이와 같은 가시/비가시 조건에 따라서 전위결함의 버거스 벡터를 유추하고, 더 나아가 칼날 전위 혹은 나선전위 등 전위결함의 종류까지 파악할 수 있다. 본 연구에서는 산화갈륨 기판 내 전위결함을 분석하기 가장 용이한 $g=-623$ [그림 4(a)]와 $g=-1,200$ [그림 4(b)]의 두가지 회절면을 각각 비교 분석하여 전위결함의 특성을 파악하였다. 그림 4(a)에서는 스크래치로 인한 비정형적인 패턴 가운데 전위결함으로 추정되는 작은 흰 점이 밀집한 영역(검정색 원 안쪽)을 관측할 수 있었다. 반면, 그림 4(b)에서 동일한 위치를 $g=-1,200$ 로 비교한 결과, 스크래치로 인한 패턴은 동일하게 확인되었으나, 전위결함으로 추정되는 밀집된 흰점이 보이지 않았다. 전위결함이 $g=-623$ 에서 가시화(*visible*), $g=-1,200$ 에서 비가시화(*invisible*) 특성을 갖는 경우, 이 전위결함은 $\langle 010 \rangle$ 버거스 벡터 특성을 갖는다고 알려져 있으므로, 본 연구에서 토포그래피로 확인한 전위결함은 이와 동일할 것으로 판단된다 [28]. 그림 4(c)는 토포그래피 이미지와 동일한 위치에서 에치핏을 형성한 시료의 전자현미경 사진이다. 여러 총알모양 에치핏이 다양하게 균집되어 있는 것으로 보아 다수의 전위결함이 근접하여 존재하고 있을 것으로 판단된다. 한가지 주목할 점은, 실제 식각을 통해 가시적으로 확인된 전위결함의 밀도는 매우 높았으나, 토포그래피에서 확인할 수 있는 전위결함은 극히 일부분에 지나지 않았다. 그 이유를 다음과 같은 두가지로 추정할 수 있는데, 첫째, 산화갈륨 기판 내 전위결함이 갖는 버거스 벡터가 그 주위 트윈결함 또는 적층결함 대비 비교적 적은 응력 분포를 가지고 있어서 이

미지 상에서 상대적으로 적은 콘트라스트를 가지고 있기 때문이고 [28], 둘째, 총알모양으로 나타난 에치핏이 100% 전위결함에 의한 것이 아니라 기판 최표면에만 존재하는 비결정학적 표면결함이 다수 포함되어 있을 가능성도 고려할 수 있다 [26].

본 연구를 통해 $(-201)\beta$ -상 산화갈륨 기판내 주요 결함의 종류 및 분포 특성을 파악하였다. X-ray 토포그래피를 이용하여 비파괴적 방식으로 산화갈륨 기판 내 결함의 분포를 확인하고, 더 나아가 g -vector에 따라 가시화/비가시화 특성을 갖는 전위결함을 분석함으로써 해당 전위의 버거스 벡터가 $\langle 010 \rangle$ 특성을 갖는 것을 알 수 있었다. 추가적으로 인산을 이용한 화학적 식각 분석을 통해 드러난 총알모양과 선형 에치핏을 관찰함으로써 기판내 전위결함 및 공극결함의 분포 및 밀도를 확인하였다. 이 때 기판내 총알모양 에치핏의 밀도는 약 $3 \times 10^7\ \text{cm}^{-2}$, 그리고 선형 에치핏의 밀도는 약 $2 \times 10^3\ \text{cm}^{-2}$ 수준인 것으로 나타났다. 향후에는 EFG 성장 후 단결정 잉곳의 결정면에 따라 다르게 관측되는 전위결함이나 트윈 등의 결함에 대해서도 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

ORCID

Si-Young Bae

<https://orcid.org/0000-0002-8284-0649>

감사의 글

본 연구는 세라믹전략기술개발사업(KPP22013)의 지원을 받아 수행되었습니다. 포항방사광가속기에서의 실험은 과학기술정보통신부와 포항공대의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

- [1] S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Cary, F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, and M. A. Mastro, *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 011301 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5006941>]
- [2] M. H. Wong, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, *IEEE Electron Device Lett.*, **40**, 431 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2884542>]
- [3] M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura, M. H. Wong, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 123511 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4821858>]
- [4] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 013504 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3674287>]
- [5] X. Wang, M. Faizan, G. Na, X. He, Y. Fu, and L. Zhang, *Adv. Electron. Mater.*, **6**, 2000119 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aelm.202000119>]
- [6] H. Y. Playford, A. C. Hannon, E. R. Barney, and R. I. Walton, *Chem. Eur. J.*, **19**, 2803 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.201203359>]
- [7] S. S. Kumar, E. J. Rubio, M. Noor-A-Alam, G. Martinez, S. Manandhar, V. Shutthanandan, S. Thevuthasan, and C. V. Ramana, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 4194 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1021/jp311300e>]
- [8] K. Akaiwa, K. Kaneko, K. Ichino, and S. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 1202BA (2016). [DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.1202BA>]
- [9] M. Orita, H. Ohta, M. Hirano, and H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 4166 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1330559>]
- [10] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 1202A2 (2016). [DOI: <http://doi.org/10.7567/JJAP.55.1202A2>]
- [11] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 013504 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3674287>]
- [12] K. Hoshikawa, T. Kobayashi, Y. Matsuki, E. Ohba, and T. Kobayashi, *J. Cryst. Growth*, **545**, 125724 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125724>]
- [13] K. Hoshikawa, E. Ohba, T. Kobayashi, J. Yanagisawa, C. Miyagawa, and Y. Nakamura, *J. Cryst. Growth*, **447**, 36 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.04.022>]
- [14] E. G. Villora, K. Shimamura, Y. Yoshikawa, K. Aoki, and N. Ichinose, *J. Cryst. Growth*, **270**, 420 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.06.027>]
- [15] H. Cui, H. F. Mohamed, C. Xia, Q. Sai, W. Zhou, H. Qi, J. Zhao, J. Si, and X. Ji, *J. Alloys Compd.*, **788**, 925 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.076>]
- [16] N. Suzuki, S. Ohira, M. Tanaka, T. Sugawara, K. Nakajima, and T. Shishido, *Phys. Status Solidi C*, **4**, 2310 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssc.200674884>]
- [17] Z. Galazka, *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 113001 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aadf78>]
- [18] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Proc. SPIE 10533, Oxide-based Materials and Devices IX, 105330E* (SPIE, California, 2018), p. 9-14. [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2301405>]
- [19] Z. Galazka, S. Ganschow, K. Irmscher, D. Klimm, M. Albrecht, R. Schewski, M. Pietsch, T. Schulz, A. Dittmar, A. Kwasniewski, R. Grueneberg, S. B. Anooz, A. Popp, U. Juda, I. M. Hanke, T. Schroeder, and M. Bickermann, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, **67**, 100511 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100511>]
- [20] E. Ohba, T. Kobayashi, T. Taishi, and K. Hoshikawa, *J. Cryst. Growth*, **556**, 125990 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125990>]
- [21] Z. Galazka, K. Irmscher, R. Uecker, R. Bertram, M. Pietsch, A. Kwasniewski, M. Naumann, T. Schulz, R. Schewski, D. Klimm, and M. Bickermann, *J. Cryst. Growth*, **404**, 184 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.07.021>]
- [22] J. D. Blevins, K. Stevens, A. Lindsey, G. Foundos, and L. Sande, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, **32**, 466 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TSM.2019.2944526>]
- [23] Z. Galazka, *J. Appl. Phys.*, **131**, 031103 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0076962>]
- [24] T. S. Ngo, D. D. Le, J. Lee, S. K. Hong, J. S. Ha, W. S. Lee, and Y. B. Moon, *J. Alloys Compd.*, **834**, 155027 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155027>]
- [25] O. Ueda, N. Ikenaga, K. Koshi, K. Iizuka, A. Kuramata, K. Hanada, T. Moribayashi, S. Yamakoshi, and M. Kasu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 1202BD (2016). [DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.1202BD>]
- [26] K. Hanada, T. Moribayashi, T. Uematsu, S. Masuya, K. Koshi, K. Sasaki, A. Kuramata, O. Ueda, and M. Kasu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 030303 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.030303>]
- [27] Y. Yao, Y. Ishikawa, and Y. Sugawara, *Phys. Status Solidi A*, **217**, 1900630 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201900630>]
- [28] Y. Yao, Y. Sugawara, and Y. Ishikawa, *J. Appl. Phys.*, **127**, 205110 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0007229>]