

RF 스퍼터링 시스템을 이용하여 증착한 비정질 Ga₂O₃ 박막의 스퍼터링 파워에 따른 특성 평가

김형민, 박상빈, 김경환, 홍정수 

가천대학교 전기공학과

The Effect of Sputtering Power on Amorphous Ga₂O₃ Deposited by RF Sputtering System

Hyungmin Kim, Sangbin Park, Kyunghwan Kim, and Jeongsoo Hong
Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13306, Korea

(Received June 14, 2023; Revised July 6, 2023; Accepted August 2, 2023)

Abstract: The effect of sputtering power on the amorphous Ga₂O₃ thin film deposited using the radio frequency sputtering system was evaluated. Amorphous Ga₂O₃ is cheaper and more efficiently fabricated than crystalline Ga₂O₃, and is studied in various fields such as RRAM, photodetector, and flexible devices. In this study, amorphous Ga₂O₃ was deposited by radio frequency sputtering system and represented a transmittance of over 80% in the visible light region and a homogeneous and dense surface. The optical band gap energy decreased as the sputtering power increased owing to the quantum size effect. Thus, the specific band gap of amorphous Ga₂O₃ can be obtained by adjusting the sputtering power, it indicates amorphous Ga₂O₃ can be used in various fields.

Keywords: Ga₂O₃, Sputtering, Thin film

1. 서론

최근 반도체의 고성능, 저전력화로 인해 탄화규소(SiC), 질화갈륨(GaN) 그리고 산화갈륨(Ga₂O₃)과 같은 wide band gap 재료들이 차세대 반도체 재료로서 각광을 받고 있다. 그중 산화갈륨은 α , β , γ , δ 그리고 ϵ 의 5가지 결정 구조로 분류되며 [1-5], 특히 β -Ga₂O₃은 단사정계 구조를 가지고, ultra-wide 밴드갭 에너지(4.4~5.0 eV), 높은 항복전계(8 MV/cm), 뛰어난 열적 안정성 그리고 고품질의 단결정 성장이 가능하여 센서, 전력반도체 등 다양한 분야

에서 활발히 연구되고 있다 [6-9]. 하지만 β -Ga₂O₃은 700~1,000 °C의 고온 열처리를 통해 만들어지기 때문에 엄격한 제조 공정, 추가적인 열처리 장비와 공정 기술이 필요하다.

이에 따라 저온에서 균일하게 제도가 가능하며, 고온의 공정 과정을 생략할 수 있어 제조비용이 저렴하고 유연성이 좋은 비정질 Ga₂O₃이 주목받고 있다. 또한 최근 연구에서 비정질 Ga₂O₃ 기반의 deep ultraviolet (DUV) 광검출기가 β -Ga₂O₃ 기반의 광검출기보다 더 높은 응답도, 감지도 및 외부양자효율을 달성하였다 [10]. 이뿐만 아니라 재료 특성상 저온 공정으로 진행되는 플렉서블 소자, 비정질 구조의 산소 공공과 같은 결함을 이용하는 RRAM과 가스 센서에서도 이용될 수 있다. 비정질 Ga₂O₃은 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition, CVD), 원자층 증착(atoms layer deposition, ALD) 그리고 RF 스퍼터링법

✉ Jeongsoo Hong; hongjs@gachon.ac.kr

Copyright ©2023 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.

(radio frequency sputtering) 등으로 제작된다 [11-13]. 그중 RF 스퍼터링은 스퍼터링 파워, 진공도, 가스 유량비 등 다양한 공정 변수를 통해 박막의 특성을 조절할 수 있으며 고품질의 균일한 박막을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 다양한 소자에 적용하기 위해서 분야에 맞는 특성을 가진 비정질 Ga₂O₃가 필요하며, 스퍼터링 파워는 박막의 결정성, 증착률, 전기적, 광학적 특성 등에 영향을 끼친다 [14,15]. 따라서 스퍼터링 파워의 변화에 따른 비정질 Ga₂O₃의 결정학적, 전기적 그리고 광학적 특성을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 유리 기판 위에 Ga₂O₃ sputtering 타겟을 이용해 비정질 Ga₂O₃ 박막을 제작하였다. 공정 변수인 스퍼터링 파워는 50, 100, 150, 200 W로 조절되었으며, 제작된 Ga₂O₃ 박막은 모두 300 nm로 증착되었다. Ga₂O₃ 박막을 평가하기 위해서 X-ray diffraction (XRD)와 scanning electron microscope (SEM)을 통해 결정학적 특성을 평가하였고 UV-vis spectrophotometer를 이용하여 광학적 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

그림 1과 같은 RF 스퍼터링법을 이용해 50 nm 두께의 비정질 산화갈륨을 soda-lime 유리 기판 위에 증착하였다. 유리 기판은 deionized (D.I) water, isopropyl alcohol (IPA), acetone에 각각 10분씩 초음파 세척기를 이용하여 세척하였다. 공정 간에 챔버 압력은 0.666 Pa로 유지되었으며 플라즈마 형성을 위해 Ar 유량 속도는 0.02 L/min로 설정되었다. 공정을 시작하기 전, 박막의 품질을 향상시키기 위해 pre-sputtering을 10분간 진행하였고 기판을 3 rpm의 속도로 회전시켜 박막의 균일도를 향상시켰다. 스퍼터링 파워에 따른 비정질 Ga₂O₃의 특성 변화를 관찰하기 위해서 스퍼터링 파워는 50, 100, 150, 200 W로 변화시키면서 박막을 증착하였다. 표 1에 본 연구에 쓰인 스퍼터링 조건의 세부 정보를 나타내었다.

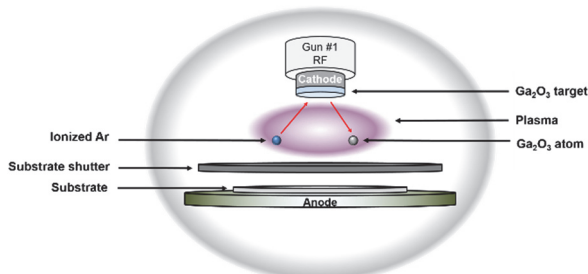


Fig. 1. Schematic of RF sputtering system.

Table 1. Details for sputtering conditions.

Parameters		Conditions			
Layer	Ga ₂ O ₃				
Targets	Ga ₂ O ₃ (4 N, 99.99%)				
Substrate	Soda-lime glass				
Base pressure	0.6 mPa				
Working pressure	0.666 Pa				
Gas flow rates	Ar: 0.02 L/min				
Input power (RF)	50 W	100 W	150 W	200 W	
Deposition time	81 m 5 s	39 m 28 s	28 m 50 s	21 m 54 s	

3. 결과 및 고찰

스퍼터링 파워에 따른 Ga₂O₃ 박막의 XRD 피크를 그림 2에 나타내었다. 증착된 Ga₂O₃ 박막은 모든 스퍼터링 파워 조건에서 결정질 박막의 특징인 좁고 뚜렷한 피크가 관찰되지 않아 비정질 Ga₂O₃가 증착되었음을 확인하였다. 결정질 Ga₂O₃는 700~1,000 °C의 고온 열처리를 통해 만들어지기 때문에 스퍼터링 파워에 따른 Ga₂O₃ 박막의 변화가 나타나지 않았다. 추가적인 비정질 Ga₂O₃ 결정학적 특성을 평가하기 위해 SEM 분석을 실시하였다.

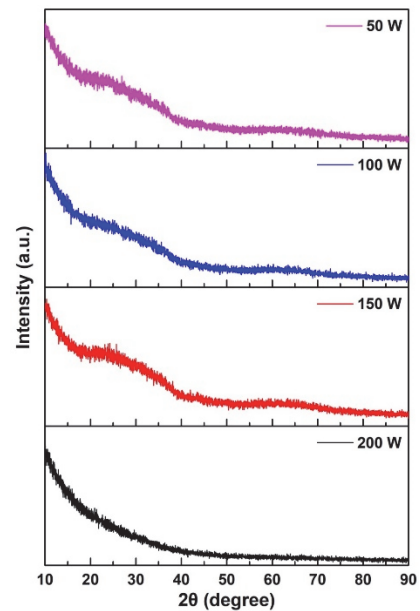


Fig. 2. The XRD patterns of the Ga₂O₃ films at various post-annealing temperatures.

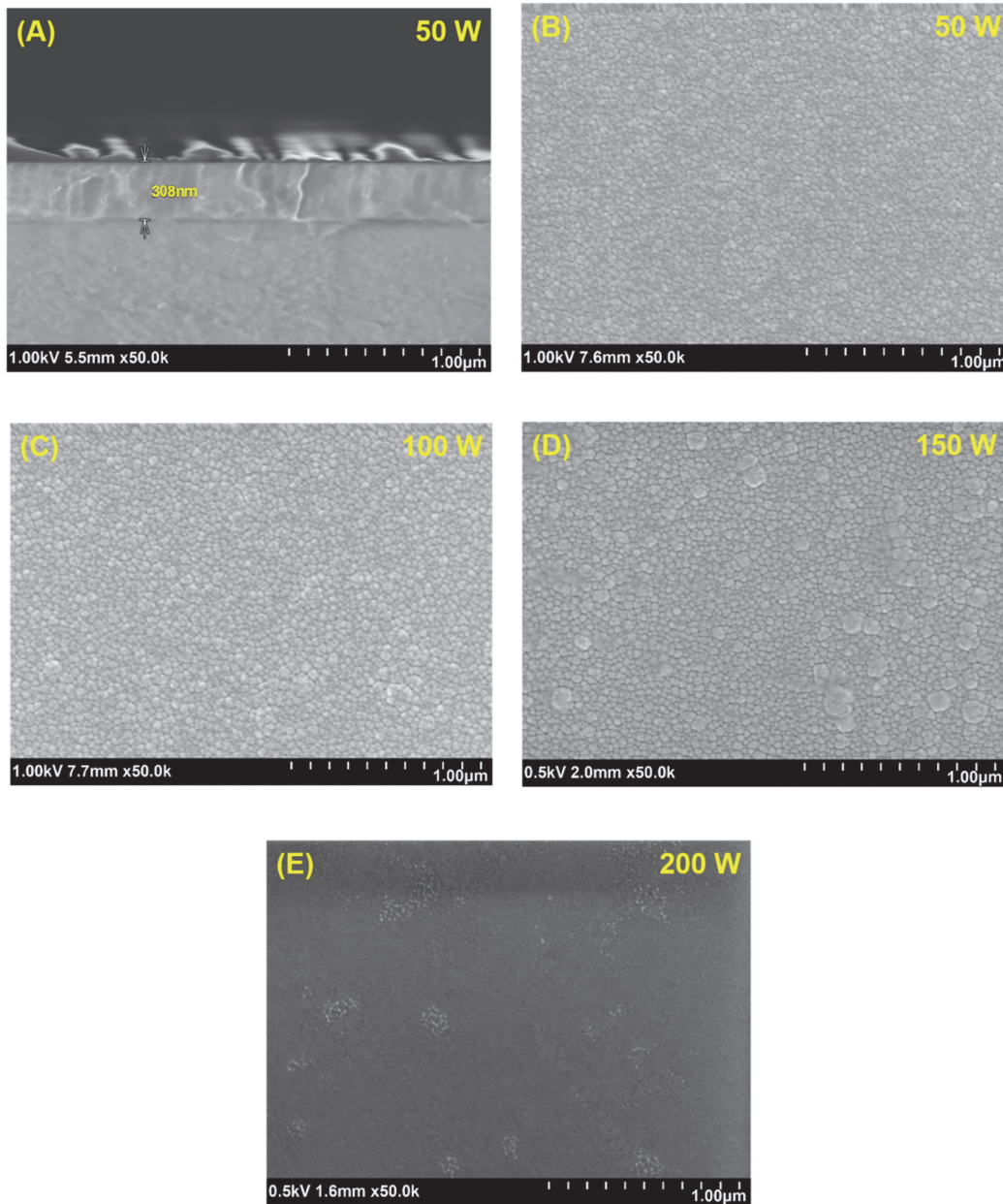


Fig. 3. The SEM images of the amorphous Ga_2O_3 films at various RF sputtering power; (a) the section of Ga_2O_3 fabricated at RF sputtering power 50 W, (b) the surface of Ga_2O_3 fabricated at RF sputtering power 50 W, (c) 100 W, (d) 150 W, and (e) 200 W.

SEM으로 측정된 비정질 Ga_2O_3 의 단면을 그림 3(a)에, 스퍼터링 파워에 따른 표면을 그림 3(b)~(e)에 나타내었다. 그림 3(a)를 통해 비정질 Ga_2O_3 가 유리 기판 위에 300 nm 두께로 증착되었음을 확인하였다. 스퍼터링 파워에 따른 비정질 Ga_2O_3 단면들은 모두 고르고 균일한 표면을 나타내었지만, 큰 차이는 발견되지 않았다. 이는 Ga_2O_3 는 결정화 온도가 굉장히 높으며, 밴드갭 에너지가 굉장히 크고 전도성이 낮기 때문에 SEM 측정이 어렵기 때문이다. 추가적

인 비정질 Ga_2O_3 의 특성을 평가하기 위해 UV-vis spectrophotometer를 통해 투과율을 측정하였다.

그림 4에는 UV-vis spectrophotometer를 이용하여 비정질 Ga_2O_3 의 투과율을 측정하였다. 모든 스퍼터링 파워에서 증착된 Ga_2O_3 는 가시광선 영역에서 80%의 높은 투과율을 보여 투명한 박막이 증착되었음을 확인하였다. 또한 모든 비정질 Ga_2O_3 에서 굴곡진 파형을 보여주었는데 이는 간섭 현상으로 증착된 박막의 표면이 균일함을 나타내

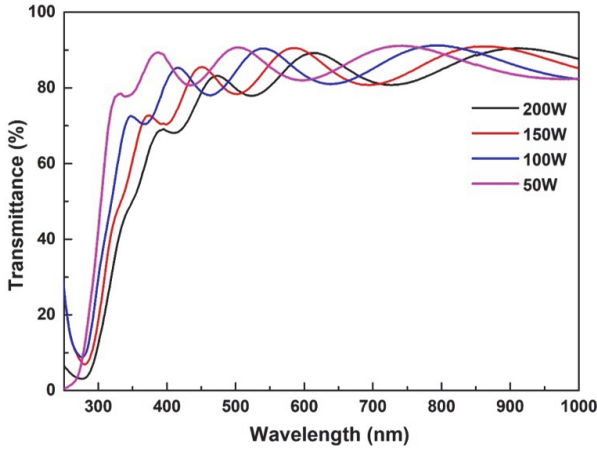


Fig. 4. The transmittance of the amorphous Ga₂O₃ films at various RF sputtering power.

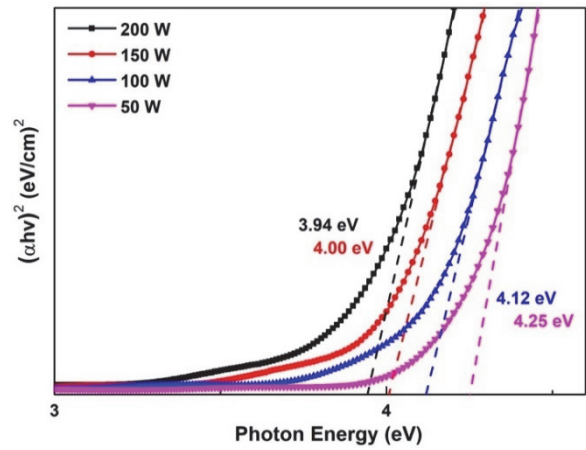


Fig. 5. The optical bandgap energy of the amorphous Ga₂O₃ films at various RF sputtering power.

는 현상이다 [16]. 비정질 Ga₂O₃ 박막의 광흡수단은 약 280~300 nm로 스퍼터링 파워가 증가할수록 넓은 파장으로 이동하였다. 최대 흡수단에 도달한 뒤 약 270 nm에서부터 투과율이 재증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 광원의 에너지가 급격하게 감소하였기 때문이다 [17]. 그림 4를 이용하여 비정질 Ga₂O₃ 박막의 투과율을 알 수 있을 뿐만 아니라 tauc plot을 통해 광학적 밴드갭 에너지를 계산할 수 있다.

$$(ah\nu)^n = A(h\nu - E_g) \tag{1}$$

여기서, α 는 흡수 계수, $h\nu$ 는 광자 에너지, A 는 상수, E_g 는 광학적 밴드갭 에너지, 그리고 n 은 물질에 따라 달라지는 지수이다.

식 (1)을 활용하여 계산된 비정질 Ga₂O₃의 광학적 bandgap을 그림 5에 나타내었다. 스퍼터링 파워가 50 W에서 200 W로 증가할수록 광학적 밴드갭 에너지는 4.25 eV에서 3.94 eV로 감소하였다. 스퍼터링 파워에 따른 광학적 밴드갭 에너지의 변화는 크기와 밴드갭 에너지의 관계를 설명하는 quantum size effect로 설명할 수 있다. 비정질 Ga₂O₃는 굉장히 작은 결정 크기를 가지고 있으며 스퍼터링 파워가 증가할수록 그 결정의 크기는 낮은 스퍼터링 파워에서 증착된 Ga₂O₃에 비해 상대적으로 증가하게 된다. Quantum size effect는 물질의 크기가 나노미터 단위 일 때, 양자적 특성으로 인해 크기가 증가할수록 밴드갭 에너지가 감소하는 현상을 나타낸다 [18]. 따라서 스퍼터링 파워가 증가할수록 비정질 Ga₂O₃의 밴드갭 에너지가 감소

함을 통해 결정의 크기는 상대적으로 증가함을 알 수 있다.

비정질 Ga₂O₃의 스퍼터링 파워에 따른 I-V 특성을 평가하기 전에 Ga₂O₃ 박막의 면적 성분을 일치시키기 위해 7.5×2.5×0.1 cm의 유리 기판 전면에 스퍼터링 파워별로 동일한 두께의 Ga₂O₃를 증착하였으며, 1.8×0.4 mm 크기의 Ni 상부 전극을 50 nm 두께로 증착하였다. 그 후 파워 제너레이터(2611B, SourceMeter, Keithley)를 사용하여 -4 V에서 4 V까지의 I-V 특성을 측정하였다. 그림 6(a)에 모든 스퍼터링 파워 조건에서 V=IR 그래프가 측정되어 비정질 Ga₂O₃와 Ni 상부 전극이 Ohmic 접합을 성공적으로 이루었음을 확인하였다. 또한 스퍼터링 파워가 강해질수록 기울기가 증가하여 전류가 증가함을 알 수 있다. 그림 6(b)에서는 옴의 법칙에 의해 계산된 저항 값을 나타내었다. 이 실험에서 제작된 비정질 Ga₂O₃는 그림 5에서 광학적 밴드갭 에너지가 3.94~4.25 eV의 값을 가져 높은 저항을 가지고 있을 것으로 예상되었다. 실제로 비정질 Ga₂O₃의 저항은 약 10 GΩ으로 측정되었다. 또한 스퍼터링 파워가 증가함에 따라 저항 값이 감소하였다. 낮은 스퍼터링 파워에 비해 높은 스퍼터링 파워에서 증착되는 원자들은 기판에 도달하였을 때 더 많은 에너지를 가지고 있기 때문에 자리에서 핵 성장을 이루기보다 확산을 하게 되면서 비교적 더 큰 결정을 형성하게 된다. 그림 5에서 quantum size effect를 통해 스퍼터링 파워가 강해질수록 결정의 크기가 상대적으로 커졌음을 확인하였고, 큰 결정의 크기는 박막 내 전자의 자유행정거리를 증가시켜 박막의 저항을 감소시킨다.

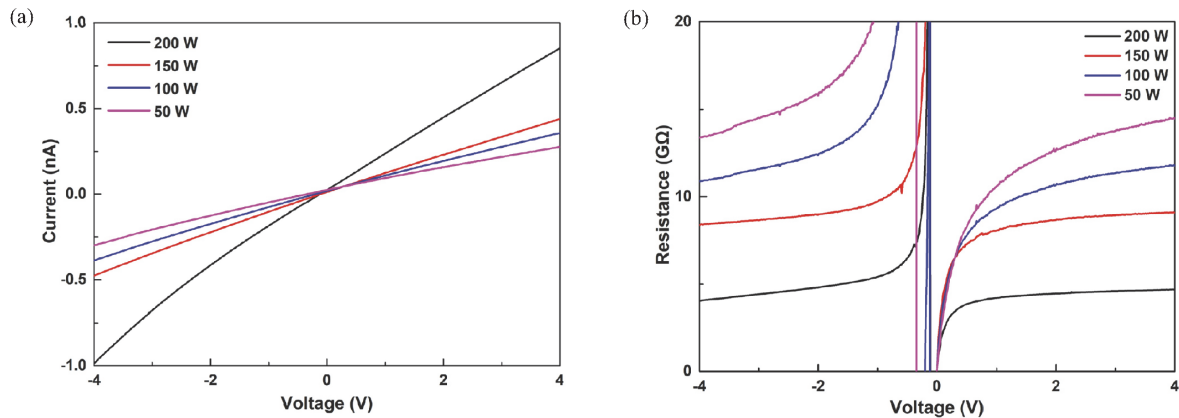


Fig. 6. (a) The I-V curve and (b) the resistance of amorphous Ga_2O_3 thin films at various RF sputtering power.

4. 결론

스퍼터링 파워를 조절하여 RF 스퍼터링을 통해 Ga_2O_3 박막을 유리 기판 위에 증착하였다. 증착된 모든 Ga_2O_3 박막은 뚜렷한 피크가 관찰되지 않아 비정질 Ga_2O_3 임을 확인하였다. SEM을 통해 측정된 비정질 Ga_2O_3 의 박막은 고르고 균질한 표면을 나타내었다. 또한 Ga_2O_3 박막의 투과율은 가시광선에서 80% 이상의 투과율을 보여주어 투명한 박막으로 활용될 수 있으며, 280~300 nm의 파장을 흡수하는 것으로 측정되었다. Tauc plot으로 계산된 광학적 밴드갭 에너지는 스퍼터링 파워에 따라 3.94~4.25 eV로 계산되었으며, quantum size effect로 인해 광학적 밴드갭 에너지의 변화가 나타났다. 또한 비정질 Ga_2O_3 박막에 Ni 상부 전극을 증착하였을 때, I-V curve를 통해 ohmic 접합이 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다. 또한 스퍼터링 파워가 증가할수록 결정의 크기가 커졌으며 그와 동시에 Ga_2O_3 박막의 저항이 감소하였다. 이를 통해 스퍼터링 파워를 조절하여 비정질 Ga_2O_3 의 밴드갭 에너지와 저항을 조절할 수 있어 다양한 분야에서 활용될 것으로 예상된다.

ORCID

Jeongssoo Hong

<https://orcid.org/0000-0002-5946-7815>

감사의 글

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(RS-2023-00227306) 및 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥

원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012451, 2022년 산업 혁신인재성장지원사업).

REFERENCES

- [1] M. Marezio and J. P. Remeika, *J. Chem. Phys.*, **46**, 1862 (1967). doi: <https://doi.org/10.1063/1.1840945>
- [2] V. M. Bermudez, *Chem. Phys.*, **323**, 193 (2006). doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2005.08.051>
- [3] H. Y. Playford, A. C. Hannon, M. G. Tucker, D. M. Dawson, S. E. Ashbrook, R. J. Kastiban, J. Sloan, and R. I. Walton, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 16188 (2014). doi: <https://doi.org/10.1021/jp5033806>
- [4] S. Yoshioka, H. Hayashi, A. Kuwabara, F. Oba, K. Matsunaga, and I. Tanaka, *J. Phys.: Condens. Matter*, **19**, 346211 (2007). doi: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/19/34/346211>
- [5] 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>
- [6] D. Guo, Z. Wu, P. Li, Y. An, H. Liu, X. Guo, H. Yan, G. Wang, C. Sun, L. Li, and W. Tang, *Opt. Mater. Express*, **4**, 1067 (2014). doi: <https://doi.org/10.1364/OME.4.001067>
- [7] D. Guo, Q. Guo, Z. Chen, Z. Wu, P. Li, and W. Tang, *Mater. Today Phys.*, **11**, 100157 (2019). doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2019.100157>
- [8] 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>
- [9] T. Park, S. Park, J. H. Park, J. Y. Min, Y. Jung, S. Kyoung, T. Y. Kang, K. Kim, Y. S. Rim, and J. Hong, *Nanomaterials*, **12**, 2983 (2022). doi: <https://doi.org/10.3390/nano12172983>
- [10] J. Wang, Y. Xiong, L. Ye, W. Li, G. Qin, H. Ruan, H. Zhang, L. Fang, C. Kong, and H. Li, *Opt. Mater.*, **112**, 110808 (2021).

- doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.110808>
- [11] Y. Yuan, W. Hao, W. Mu, Z. Wang, X. Chen, Q. Liu, G. Xu, C. Wang, H. Zhou, Y. Zou, X. Zhao, Z. Jia, J. Ye, J. Zhang, S. Long, X. Tao, R. Zhang, and Y. Hao, *Fundam. Res.*, **1**, 697 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.11.002>
- [12] D. Y. Guo, Z. P. Wu, Y. H. An, P. G. Li, P. C. Wang, X. L. Chu, X. C. Guo, Y. S. Zhi, M. Lei, L. H. Li, and W. H. Tang, *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 042105 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4907174>
- [13] S. C. Siah, R. E. Brandt, K. Lim, L. T. Schelhas, R. Jaramillo, M. D. Heinemann, D. Chua, J. Wright, J. D. Perkins, C. U. Segre, R. G. Gordon, M. F. Toney, and T. Buonassisi, *Appl. Phys. Lett.*, **107**, 252103 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4938123>
- [14] W. F. Wu, B. S. Chiou, and S. T. Hsieh, *Semicond. Sci. Technol.*, **9**, 1242 (1994).
doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/9/6/014>
- [15] S. Yu, W. Xu, H. Zhu, W. Qiu, Q. Fu, and L. Kong, *J. Alloys Compd.*, **883**, 160622 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160622>
- [16] M. Lee, Y. Park, K. Kim, and J. Hong, *Thin Solid Films*, **703**, 137980 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.137980>
- [17] Y. Huang, H. Wu, Y. Zhi, Y. Huang, D. Guo, Z. Wu, P. Li, Z. Chen, and W. Tang, *Appl. Phys. A*, **124**, 611 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2037-z>
- [18] A. Van Dijken, E. A. Meulenkamp, D. Vanmaekelbergh, and A. Meijerink, *J. Lumin.*, **90**, 123 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(99\)00599-2](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(99)00599-2)