

산화 갈륨을 활용한 광검출 소자의 동작 특성 분석 연구

반학준 · 이승원 · 홍슬기[†]

서울과학기술대학교 지능형반도체공학과

Study of the Operational Characteristics of Photodetectors Using Gallium Oxide

Hak Jun Ban, Seung Won Lee, and Seul Ki Hong[†]

Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea

(Received August 23, 2024; Revised August 27, 2024; Accepted August 29, 2024)

초 록: 반도체 시스템에서 센서의 동작은 정보의 인식을 담당하여 외부 정보를 처리하는 시스템의 시작점이라 할 수 있다. 본 연구에서는 갈륨 산화물을 이용한 자외선 검출 소자의 동작 특성에 대한 분석을 바탕으로 반도체 시스템에 활용 가능여부를 평가하였다. 갈륨 산화물은 자외선에 반응하여 저항값이 변화되는 특성을 가지고 있기 때문에 이를 활용한 검출 소자 구현이 가능하다. 하지만 반도체 시스템에 적용 가능여부를 판단하기 위해서는 동작 특성에 대한 세부 연구결과가 필요하다. 본 연구에서는 전극의 크기를 변화하여 갈륨 산화물이 자외선에 반응하여 전류가 흐르는 이동 통로를 만드는 것이 국부적인지를 판단하였으며, 상용화된 제품 수준의 자외선에 대한 반응 속도를 전기적 측정을 통하여 확인하였다. 이를 통해 갈륨 산화물의 상업적 응용 가능성을 확인하고 다양한 반도체 시스템에 통합될 수 있는 가능성을 확인하였다.

Abstract: In a semiconductor system, the operation of sensors plays a crucial role in recognizing information, serving as the starting point for processing external information. This study evaluates the applicability of semiconductor systems by analyzing the operational characteristics of ultraviolet (UV) detection devices using gallium oxide. Gallium oxide exhibits a property where its resistance changes in response to UV light, making it feasible to implement detection devices utilizing this material. However, to determine its applicability in semiconductor systems, detailed studies on its operational characteristics are necessary. In this study, by varying the size of the electrodes, we assessed whether the formation of current paths in gallium oxide in response to UV light is localized. Additionally, we confirmed the response speed to UV light, comparable to commercially available products, through electrical measurements. Through this, we verified the commercial applicability of gallium oxide and its potential integration into various semiconductor systems.

Keywords: Sensor device, Device engineering, Electrical analysis, UV detector

1. 서 론

최근 반도체 기술은 많은 양의 정보를 처리하기 위한 목적이 부각되면서 급속한 발전과 함께 소자 / 회로 / 패키징 / 단위 공정을 포함한 전 분야에서 다양한 연구들이 수행되고 있다¹⁻⁴⁾. 이러한 반도체 시스템에서 정보의 인식을 담당하는 부분으로 다양한 센서 기술이 핵심적인 역할을 하고 있으며, 특히 자외선 검출 기술은 환경 모니터링, 보안, 의료, 산업용 모니터링 등 여러 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있다⁵⁻⁷⁾. 자외선 검출 소자는 자외선 강도를 정확히 측정하고 빠르게 반응할 수 있어야 하며,

이러한 특성을 충족하는 소재로 최근 갈륨 산화물(GaO, Ga₂O₃)이 큰 주목을 받고 있다. 갈륨 산화물은 넓은 밴드 갭을 가지고 있어 자외선에 민감하게 반응할 수 있으며, 자외선 노출 시 저항값이 변화하는 특성을 보여 자외선 검출 소자의 핵심 소재로서의 잠재력을 가지고 있다⁸⁾.

그러나 갈륨 산화물을 이용한 자외선 검출 소자를 실제 반도체 시스템에 적용하기 위해서는 이 소재의 전기적, 물리적 특성에 대한 면밀한 분석이 선행되어야 한다. 특히, 자외선에 대한 반응 속도와 감도, 그리고 전극 구조와 같은 소자의 설계 요소들이 갈륨 산화물의 동작 특성에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 이해가 필요하다.

[†]Corresponding author
E-mail: skhong@seoultech.ac.kr

© 2024, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

이러한 특성 분석을 통해 갈륨 산화물이 반도체 시스템에 통합될 수 있는 가능성을 평가하고, 상업적 응용에 적합하지 판단할 수 있다.

본 연구는 이러한 필요성에 따라 갈륨 산화물을 기반으로 한 자외선 검출 소자의 동작 특성을 심층적으로 분석하고자 한다. 특히, 전극의 크기를 변화시키면서 갈륨 산화물이 자외선에 반응하여 전류가 흐르는 경로가 국부적으로 형성되는지를 검토하였다. 또한, 상용화된 제품 수준에서 요구되는 자외선에 대한 빠른 반응 속도를 확보할 수 있는지를 전기적 측정을 통해 확인하였다. 이러한 분석 결과를 바탕으로, 갈륨 산화물이 상업적 응용에 적합한 소재로서의 가능성을 검토하고, 나아가 다양한 반도체 시스템에 효과적으로 통합될 수 있는지를 평가하였다 [9]. 이로써 갈륨 산화물 기반 자외선 검출 소자의 개발 방향과 향후 연구의 초점을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 금속-반도체-금속(MSM) 구조를 가진 GaO 기반 UV 검출 센서를 제작하고, 그 특성을 분석하였다. UV 검출 센서는 200nm~280nm의 자외선 파장대를 탐지하는 데 매우 유용하며, 특히 미세한 UV 신호를 감지하기 위해서는 고성능의 센서 구조가 필요하다. 본 연구에서는 GaO를 기반으로 한 박막을 이용하여 이러한 센서를 구현하였으며, 실험에 사용된 센서의 구조와 제작 과정은 Figure 1 (a)에 나타내었다.

우선, SiO₂ (300nm) 층이 형성된 Si 기판을 활용하였다. 이 기판 위에 50nm 두께의 GaO 박막을 RF 스퍼터링 공

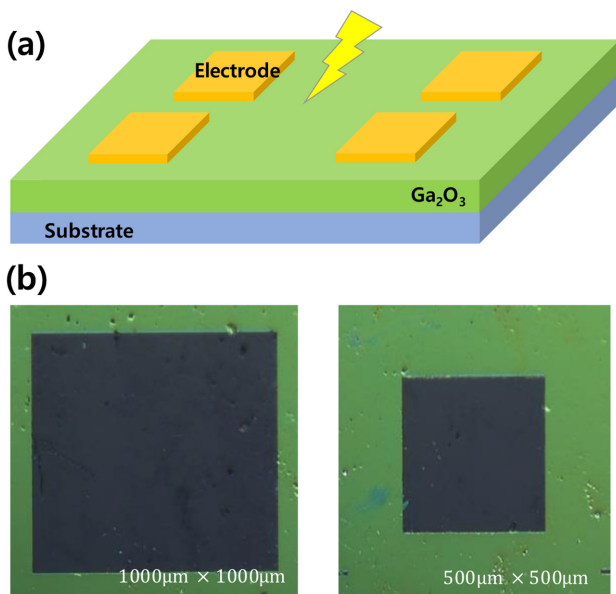


Fig. 1. (a) Structure of the UV detection device using Ga₂O₃ and (b) microscope images of samples with varying electrode areas for analyzing operational characteristics.

정을 통해 증착하였다. 스퍼터링 공정은 고진공 상태에서 이루어지며, 타겟으로부터 GaO 물질을 기판 위에 증착시키는 방식이다. 이렇게 증착된 GaO 박막은 결정성이 부족하기 때문에, 추가적으로 고온 열처리 공정을 통해 박막을 결정화하였다. 결정화 과정은 GaO 박막의 결정립을 성장시키고, 전기적 특성을 개선하는 데 중요한 역할을 한다. 다음 단계로, 센서의 전극을 형성하였다. 전극 재료로는 Ti (5nm)와 TiN (200nm)를 선택하였으며, 이들 박막을 같은 RF 스퍼터링 방법을 이용해 증착하였다. Ti는 전극과 GaO 박막 간의 접합력 향상을 위해 사용하였으며, TiN은 높은 전도성과 내구성을 가지고 있어 활용하였다. 증착된 박막은 리소그래피 공정을 통해 원하는 패턴으로 패터닝 하였다.

소자의 동작 특성을 평가하기 위해 상용화된 UV lamp (~280nm, 4µW/cm²)를 광원으로 사용하여 측정을 진행하였다. 해당 lamp는 실험실 환경에서 일정한 강도의 UV 광을 지속적으로 제공하여, 이를 통해 소자의 전기적 특성 변화를 확인할 수 있다. UV 광이 센서에 조사되었을 때의 전류 응답을 측정함으로써, 소자의 감도와 반응 속도를 평가하였다. 이때, 전극의 크기가 소자의 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 두 가지 다른 전극 크기를 사용하여 실험을 수행하였으며, 전극 크기는 Figure 1(b)에 나타낸 것 처럼 1000µm × 1000µm와 500µm × 500µm로 제작되었으며, 각 크기에 따른 전류 반응 특성을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 토의

Figure 2는 앞서 언급한 실험 방법으로 제작된 시료의 전기적 특성 측정 결과를 나타낸다. 전압이 인가됨에 따라 전극간 흐르는 전류가 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 전류값은 UV 광원에 노출된 경우 그 크기가 더 커진다는 것을 Figure 2(a)를 통해서 확인할 수 있다. 이는 UV 광원에 GaO가 노출 되면 절연막 특성에 변화가 발생하여 절연막의 저항값이 더 낮아진다는 것을 의미한다. Figure 2(b)는 그래프는 서로 다른 전극 크기(1000µm × 1000µm와 500µm × 500µm)를 가진 센서의 전류-전압 특성을 나타낸다.

두 경우 모두 UV 광원이 켜진 상태에서 전류가 측정되었으며, UV 세기는 4µW/cm²로 일정하게 유지되었다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 전극 면적이 큰 경우(검은색 점선)에 전극 면적이 작은 경우(검은색 실선) 보다 동일한 전압에서 전류값이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 전극 면적이 클 수록 전류 밀도가 높아져 반응성이 향상되는 것을 의미한다. 즉 UV 광원에 GaO가 노출되었을 때 특정 부분만이 상변화가 발생하는 것이 아닌 박막 전체에 상변화가 발생한다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 또한 전하가 이동할수 있는 경로 역시 특정 부분에 한정되지 않고 박막에 고르게 분포되어 이동한다는 것을 간

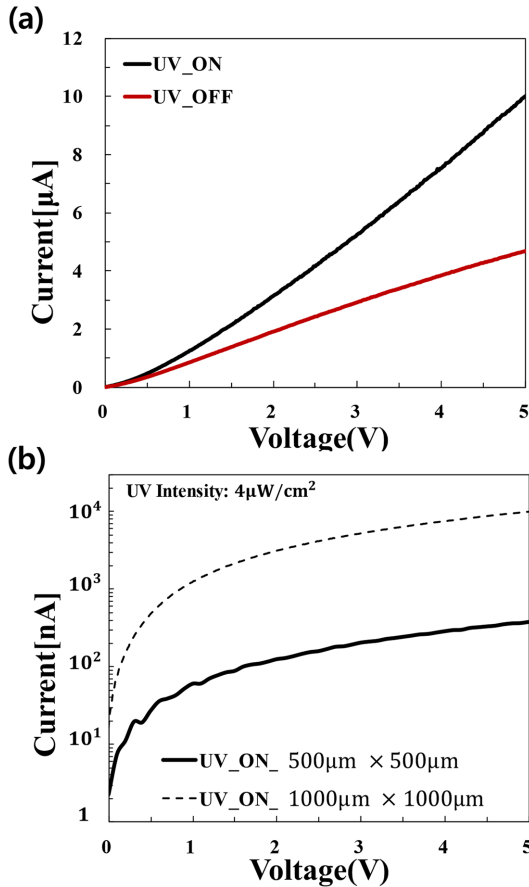


Fig. 2. (a) Current variation characteristics in response to commercial UV light source on/off and (b) current variation characteristics graph for different electrode areas.

접적으로 확인할 수 있는 결과이다. 만약 상변화와 전하의 이동이 박막의 특정영역에만 한정 되었다면 전극의 크기 변화와 상관없이 전류의 값은 유사한 결과가 도출되었을 것이다.

Figure 3은 은 GaO 기반 UV검출 소자의 전압이 인가되는 양과 반응속도에 대한 결과를 보여주는 그래프이다. 이 그래프는 서로 다른 바이어스 전압(1V, 2V, 3V)이 인가된 상태에서, 시간이 경과함에 따라 소자의 전류값이 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 그래프의 y축은 전류(nA)를 로그 스케일로, x축은 시간(s)을 선형 스케일로 표현하고 있다.

우선, 그래프에서 가장 낮은 전압인 1V(녹색 선) 조건을 살펴보면, 시간이 경과하면서 전류가 서서히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 초기에는 전류가 낮은 수준에서 유지되다가 시간이 지나면서 점진적으로 증가하며, 약 100초 이후에는 일정한 전류 수준에 도달한다. 이 구간은 센서가 UV 광에 반응하여 점차적으로 전자를 생성하고, 전류가 증가하는 과정을 반영하고 있지만 전류의 상승폭은 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다.

다음으로, 2V(빨간색 선) 조건을 살펴보면, 초기 전류가 1V 조건보다 높게 시작되며, 시간이 경과함에 따라 전

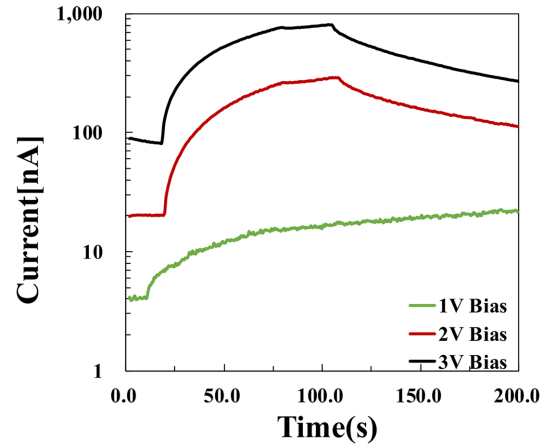


Fig. 3. Application of voltage in horizontal direction in hybrid bonding.

류도 보다 빠르게 증가하여 급격한 전류 상승이후 약 60초 이후에 saturation 되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 광원이 꺼졌을 때 서서히 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이와 같은 패턴은 센서가 UV 광에 강하게 반응하여 전자 흐름이 있도록 경로를 형성하지만, 전자의 흐름이 시간이 지날수록 안정화 되는 것을 의미한다. 또한 광원이 제거되었을 때 역으로 상변화 하는 시간은 비교적 느리다는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로, 3V(검은색 선) 조건에서는 가장 높은 초기 전류를 보여주며, 2V와 마찬가지로 약 60초 이후부터 안정화되는 경향을 보인다. 전류의 절대적인 크기를 제외하면 나머지 특성 역시 2V 조건과 유사함을 확인할 수 있다.

이 그래프는 GaO 기반 UV 검출 소자가 전압에 따라 매우 다른 전류 응답을 보임을 명확히 보여준다. 전압이 높을수록 소자 반응 속도와 전류 변동폭이 커지며, 이는 소자의 감도와 동작 특성을 조절하는 중요한 인자로 작용할 수 있다. 다만 1V가 인가 되었을때의 결과와 같이 특정 기준치 이상의 전압이 인가되어야 소자로서 가치는 동작을 기대할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 GaO 기반 UV 검출 소자의 성능에 영향을 미치는 주요 요인들을 규명하고, 이를 바탕으로 소자의 설계 및 최적화에 중요한 기초 자료를 제공한다. 특히, 전극 면적과 바이어스 전압이 소자의 검출 감도와 동작 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석함으로써, 향후 고성능 UV 검출 소자 개발을 위한 유용한 정보로 활용될 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안된 GaO 기반 UV 센서 구조와 제작 방법은 다양한 응용 분야에 적용될 수 있으며, 차세대 자외선 센서 개발에 중요한 기여를 할 것으로 기대한다.

앞으로의 연구에서는 해당 소자 구조를 다양한 반도체

소재와 결합하여 성능을 더욱 향상시키는 방법을 탐구할 수 있다. 또한, 실제 환경에서의 성능 평가와 장기적인 안정성 테스트를 통해, GaO 기반 UV 센서의 상용화 가능성을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00239657). The interconnect samples were fabricated using Sputtering System (SRN-110), S-FAB at Seoul National University of Science and Technology. The EDA tool was supported by the IC Design Education Center(IDEA), Korea.

References

1. Y. Kim, et al., "A Review on the Bonding Characteristics of SiCN for Low-temperature Cu Hybrid Bonding", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 30(4), 8-16 (2023)
2. S. Park, Y. Kim, S. E. Kim, "Evaluation of 12nm Ti Layer for Low Temperature Cu-Cu Bonding", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 28(3), 9-15 (2021)
3. Y. Kim, S. Park, S. E. Kim, "Effect of Ag Nanolayer in Low Temperature Cu/Ag-Ag/Cu Bonding", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 28(2), 59-64 (2021)
4. S. Choi, G. Kim, H. Seo, S. E. Kim, Y.-B. Park, "Effects of Ar/N₂ Two-step Plasma Treatment on the Quantitative Interfacial Adhesion Energy of Low-Temperature Cu-Cu Bonding Interface", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 28(2), 29-37 (2021)
5. S. Oh and T.-I. Kim, "Ultrasensitive Crack-based Mechano-sensor Inspired by Spider's Sensory Organ", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 31(1), 1-6 (2024)
6. M. S. Islam, M.-J. Kim, K.-M. Ku, H.-Y. Kim, and K. Kim, "Study on Fault Diagnosis and Data Processing Techniques for Substrate Transfer Robots Using Vibration Sensor Data", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 31(2), 45-53 (2024)
7. W.-J. Lee, S.-M. Lee, and S.-K. Kang, "Applications of Self-assembled Monolayer Technologies in MEMS Fabrication", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 30(2), 13-20 (2023)
8. H. Ryou, S. Kim, M. Shin, J. Cho, and W. S. Hwang, "Fast-Response Colorimetric UVC Sensor Made of a Ga₂O₃ Photocatalyst with a Hole Scavenger", *Sensors*, 21(2), 387 (2021)
9. T. Y. Hong, S. E. Kim, J. K. Park, and S. K. Hong, "Guidelines for Area Ratio between Metal Lines and Vias to Improve the Reliability of Interconnect Systems in High-Density Electronic Devices", *Electronics*, 12(21), 4403 (2023)