

원자막증착법(ALD) SnO₂ 촉매를 적용한 AlGa_N/Ga_N 이중접합 트랜지스터 NO₂ 가스센서 NO₂ gas sensor using an AlGa_N/Ga_N Heterostructure FET with SnO₂ catalyst deposited by ALD technique

양 수 혁*, 김 형 탁*

Suhyuk Yang* and Hyungtak Kim*

Abstract

In this work, it was confirmed that a SnO₂ catalyst deposited by an atomic layer deposition(ALD) process can be employed in AlGa_N/Ga_N heterostructure FET to detect NO₂ gas. The fabricated HFET sensors on AlGa_N/Ga_N-on-Si platform demonstrated that the devices with or without n-situ SiN have sensitivity of 5.5 % and 38 % at 200 °C, respectively with response to 100 ppm-NO₂.

요 약

본 연구에서는, 원자막증착법(ALD) 공정으로 증착된 SnO₂ 촉매를 AlGa_N/Ga_N 이중접합 FET에 적용하여 NO₂ 가스 검출이 가능한 것을 확인하였다. AlGa_N/Ga_N-on-si 플랫폼에서 제작 된 HFET 센서로 NO₂ 100 ppm에 대하여 In-situ SiN이 있는 소자와 없는 소자가 각각 100 °C, 200 °C에서 10.1% 및 17.7%, 5.5% 및 38%의 감지성능을 확인하였다.

Key words : Atomic layer deposition (ALD), SnO₂, AlGa_N/Ga_N HFET, NO₂, Sensitivity, In-situ SiN

1. 서론

NO₂ 가스는 독성가스이며 주로 자동차, 내연기관 및 발전소에 의해서 생성된다. 이는 폐, 호흡기, 심혈관 등에 피해를 주는데, 이러한 영향을 줄이기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. 가스를 감지하는 센서의 사용은 이를 예방하기 위한 하나의 방법이라고 할 수 있으며 신뢰성이 있고 저렴하며 높은

감지성능을 갖는 가스센서를 개발하는 것이 중요하다[1-2].

AlGa_N/Ga_N 이중접합 FET의 2-DEG는 Ga원소와 N원소사이의 전기음성도 차이로 인한 자발분극과 AlGa_N과 Ga_N이 접하면서 발생하는 압전분극에 의해 발생하며 외부의 도핑 없이도 높은 2-DEG channel sheet carrier concentration과 전자 이동도를 갖는다. 따라서 AlGa_N/Ga_N 이중접합 FET에

* Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

★ Corresponding author

E-mail : hkim@hongik.ac.kr Tel : +82-2-320-3013

※ Acknowledgment

“This research was supported by Korea Electric Power Corporation (Grant Number: R18XA06-05). The EDA tool was supported by the IC Design Education Center.

Manuscript received Nov. 26, 2020; revised Dec. 29, 2020; accepted Dec. 30, 2020.

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.

가스에 노출되었을 때, 채널 전하 농도 변화의 따른 높은 전류 증폭도 및 가스 감지 성능을 기대할 수 있다[3-4].

금속산화물 기반의 가스 센서는 저렴한 비용, 높은 감지 성능, 빠른 반응시간과 회복시간 등 여러 가지 장점이 있다. 본 연구에서 이용한 SnO₂ 금속산화물 촉매는 oxygen vacancy로 인한 defect로 자연적으로 생성되는 전자로 인해 n-type 특성을 띄는 반도체이다. 가스 센서로서의 SnO₂ 작동 원리는 산소와 가스 사이의 반응으로 인한 SnO₂ 입자의 전기전도도 변화로 인해 발생한다. SnO₂ 표면에 NO₂ 가스와 같은 산화가스가 유입될 경우, SnO₂의 전도대로부터 전자가 이동하여 산소이온 O₂⁻, O⁻, O²⁻을 생성시키는 동시에 전자가 가스에 의해 흡수되어 ion gas가 생성된다. 이 산화가스 이온은 산소이온과 전자에 의해 새로운 안정된 가스와 O²⁻이온을 생성한다. 이로 인해, SnO₂ 표면에서 depletion region이 형성되고 전자 밀도 감소와 저항 증가가 야기된다[5].

본 연구에서는, Atomic layer deposition(ALD) 공정으로 증착한 SnO₂ 촉매 gate를 AlGaIn/GaN 이중접합 FET에 적용하여 NO₂ 가스 감지여부를 확인하였다. AlGaIn/GaN 이중접합 FET의 SnO₂ gate에 NO₂가 노출되어 표면전위의 변화를 일으킨다면 채널전하 농도를 변조하여 가스의 검출이 가능하다. 또한 In-situ SiN 유무에 따른 감지성능을 비교하였다.

II. SnO₂ 촉매를 gate로 한AlGaIn/GaN 이중접합 FET 소자 제작 및 전달 특성, gas sensing performance 확인

1. SnO₂ 촉매를 gate로 한AlGaIn/GaN 이중접합 FET 소자 제작

그림 1은 AlGaIn/GaN 이중접합 FET 소자의 단면도를 나타낸 그림이다. 소자는 1 mm Silicon substrate, AlGaIn/AlN buffer layer, 4.2 μm GaN layer, 13 nm Al_{0.3}Ga_{0.7}N, 10 nm In-situ SiN으로 구성되어있다. Source와 Drain contact은 e-beam evaporator 장비를 사용하여 Ti/Al/Ni/Au(200/1200/250/500 Å)로 구성 및 증착하였으며, 이 후 lift-off를 진행하고 833 °C, N₂ 환경에서 약 32초 동안 rapid thermal annealing(RTA)를 진행하였다. MESA

isolation은 BCl₃/Cl₂ 가스를 이용하여 reactive ion etching으로 진행하였고 depth는 424nm이다. In-situ SiN etching을 진행한 소자는 그림 1 (b)와 같이 gate인 SnO₂가 증착될 부분만 etching 하였고 이후 SnO₂ 촉매를 그림 1 (a), (b)와 같이 증착하였다. SnO₂ 촉매는 ALD를 이용하여 Ar 20 sccm, O₂ 20 sccm 유량으로 75 °C에서 30 nm로 증착하였다. 마지막으로, 프로빙을 위한 Pad는 Ti/Au(200/3000 Å)로 구성하였다.

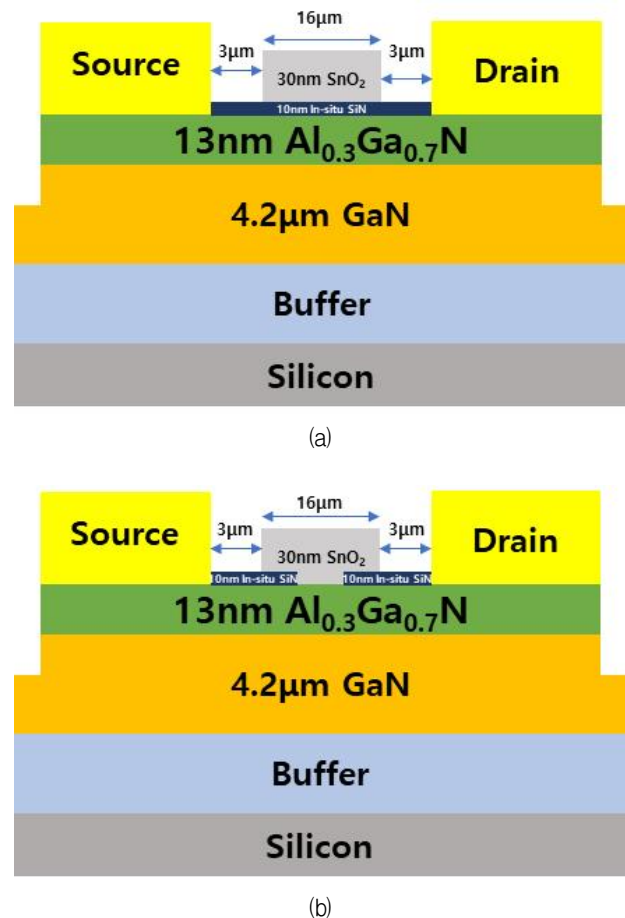


Fig. 1. Cross-sectional diagram of SnO₂ gated AlGaIn/GaN HFET In-situ SiN remaining (a) etching (b).

그림 1. SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET의 단면도 (a) In-situ SiN (b) In-situ SiN etching

2. SnO₂ 촉매를 gate로 한AlGaIn/GaN 이중접합 FET 전달 특성 및 gas sensing measurement

소자 제작 후 SnO₂ 촉매가 AlGaIn/GaN 이중접합 FET의 gate로 동작하는지 확인하기 위해 전달 특성을 측정하였으며 gas sensing 가능여부를 확인하기 위해 transient 측정을 진행하였다.

가. SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET의 전달 특성

그림 2는 SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET unit device이며 Gate length는 4/6/11/16 μm이다.

그림 3은 In-situ SiN 유무에 따른 전달특성을 V_D = 10 V, 상온에서 측정한 결과이다. SnO₂ 촉매가 AlGaIn/GaN 이중접합 FET의 gate로 동작하며 gate length가 증가함에 따라 current level이 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 In-situ SiN을 etching 하지 않은 소자와 etching을 진행한 소자의 문턱전압은 각각 -5 V, -0.6 V이며 전류레벨 또한 큰 차이를 나타낸다.

나. SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET의 gas sensing performance

본 실험에서 가스 감지성능 (Sensitivity) 은 dry air 상태의 전류와 NO₂ 가스 유입 후 변화된 전류 사이의 비율로 정의하였다[6]. 식 1은 가스감지성능 sensitivity의 정의에 대한 수식이다.

$$\text{Sensitivity (\%)} = (I_{\text{dryair}} - I_{\text{NO}_2}) / I_{\text{dryair}} * 100 \quad (1)$$



Fig. 2. SnO₂ gated AlGaIn/GaN HFET unit device.
그림 2. SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET unit device

Gas on 시점의 전류레벨과 gas off 시점의 전류레벨 차이를 I_a라고 할 때 gas on 시점에서 -0.9I_a가 되는 시점을 반응 시간으로 정의하고 gas off 시점에서 +0.9I_a가 되는 시점을 회복 시간으로 정의하였다[7].

그림 4는 SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET 센서이며 Gate length=15 μm이다. Gas sensing 측정 조건은 NO₂=100 ppm에서 V_D=6 V, stabilization

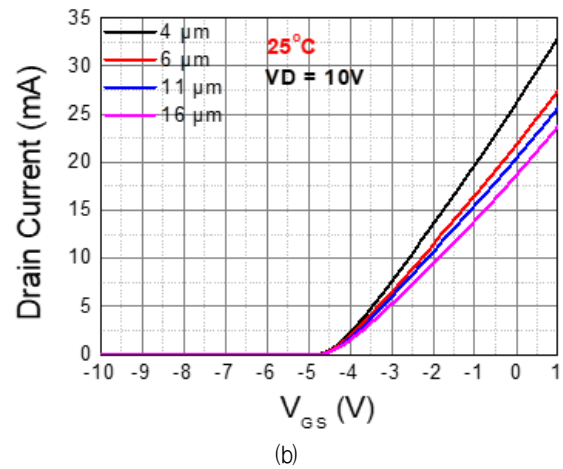
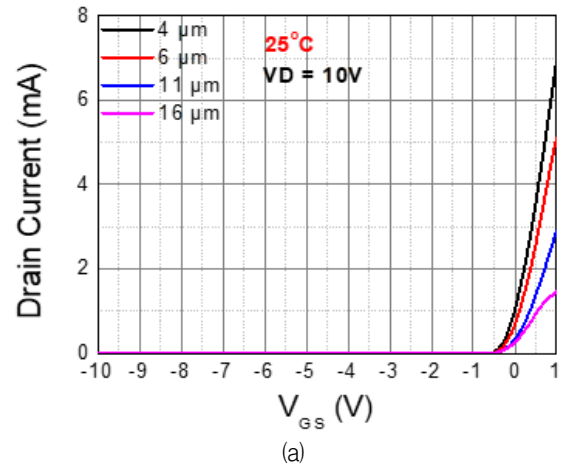


Fig. 3. Transfer characteristics of SnO₂ gated AlGaIn/GaN HFET for gate length = 4/6/11/16 μm In-situ SiN remaining (a) etching (b) at RT.

그림 3. 4/6/11/16 μm gate length에 대한 SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET의 전달 특성
(a) In-situ SiN (b) In-situ SiN etching at RT

time=2 min, response time=2 min, recovery time =6 min로 각각 100 °C, 200 °C에서 진행하였으며 gate는 floating 상태에서 진행하였다.

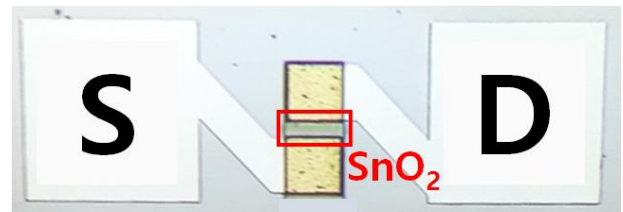


Fig. 4. SnO₂ gated AlGaIn/GaN HFET sensor.
그림 4. SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이중접합 FET 센서

그림 5와 6은 각각의 온도에서 진행한 gas sensing의 결과이다.

100 °C에서, In-situ SiN 유무에 따라 각각 10.1

%, 17.7 %의 sensitivity를 나타낸다. 반응 시간은 각각 68초, 96초이며 In-situ SiN etching을 진행한 소자의 회복 시간은 176초인 반면 etching을 진행하지 않은 소자는 6분이 지나도 회복된 상태를 보이지 않았다. In-situ SiN이 있는 소자의 반응속도가 빠르지만 완전히 회복되지 않기 때문에 In-situ SiN etching 소자가 안정적으로 동작하는 센서라고 할 수 있다.

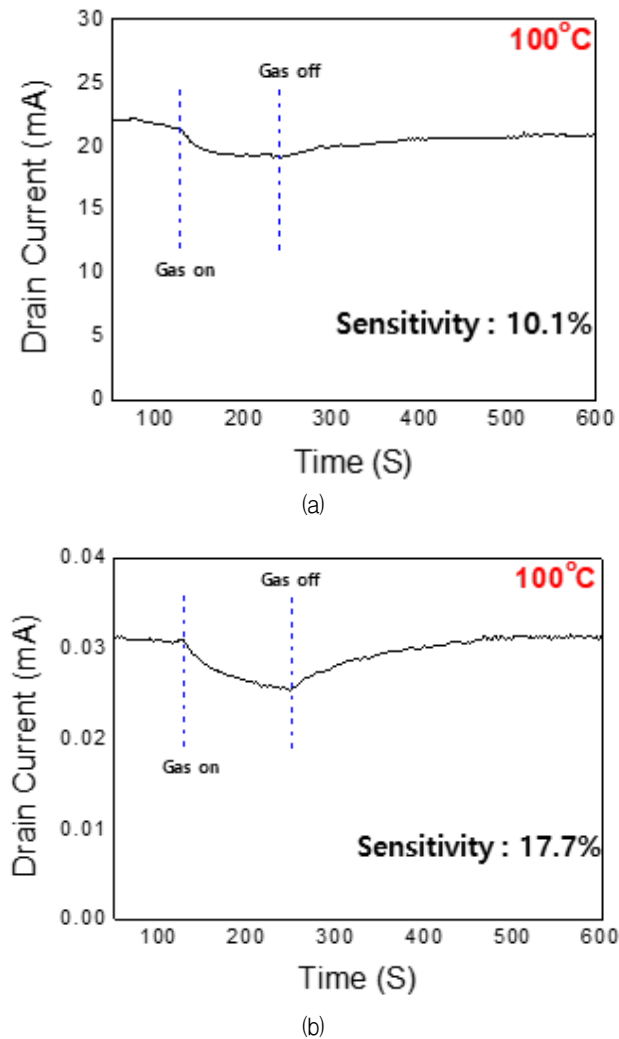


Fig. 5. NO₂ gas sensing performance of SnO₂ gated AlGaIn/GaN HFET sensor In-Situ SiN remaining (a) etching (b) at 100 °C.
 그림 5. SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이종접합 FET 센서의 NO₂ 가스 센싱 결과
 (a) In-situ SiN (b) In-situ SiN etching 100 °C

200 °C에서, In-situ SiN 유무에 따라 각각 5.5 %, 38 %의 sensitivity를 나타낸다. 그러나 In-situ SiN이 있는 소자의 sensitivity는 공식에 따라 추출

한 것이며 그림 6 (a)에서 볼 수 있듯이 불안정한 전류변화로 인해 센서로 동작이 거의 불가하였다. 반면 In-situ SiN이 etching 된 소자의 반응 시간은 12초이며 회복 시간은 68초로 100 °C 보다 200 °C에서 더 우수한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

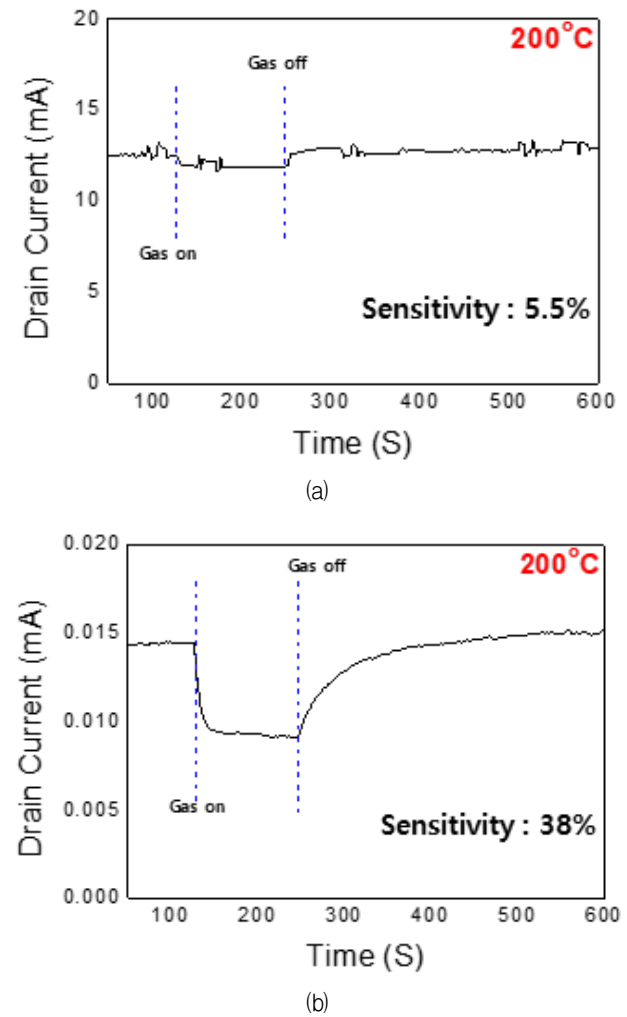


Fig. 6. NO₂ gas sensing performance of SnO₂ gated AlGaIn/GaN HFET sensor In-Situ SiN remaining (a) etching (b) at 200 °C.

그림 6. SnO₂ gated AlGaIn/GaN 이종접합 FET 센서의 NO₂ 가스 센싱 결과
 (a) In-situ SiN (b) In-situ SiN etching 200 °C

III. 결론

본 실험들을 통해 Atomic layer deposition(ALD) 공정으로 증착한 SnO₂ 촉매 gate가 AlGaIn/GaN 이종접합 FET의 gate로 동작 및 NO₂ 가스 감지가 가능한 것을 확인하였다. 또한 In-situ SiN이 제거된 소자의 동작이 안정적이며 200 °C에서 더 우수

한 특성을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 In-situ SiN 유무에 따른 특성들을 비교하였을 때 etching 된 소자의 전류레벨이 매우 낮은 문제가 있다. 이를 개선하는 동시에 SnO₂ gated AlGa_N/Ga_N 이중 접합 FET sensor의 안정적인 동작과 높은 감지성능을 얻을 수 있는 온도조건을 확립해야 할 것으로 보인다.

References

- [1] S. -T. Hung, C. -J, Chang, "SnO₂-gated AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors based oxygen sensors," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol.30, p.041214, 2012.
DOI: 10.1116/1.4736974
- [2] H. -S. Jeong, M. -J. Park, S. -H. Kwon, H. -J. Joo and H. -I. Kwon, "Highly sensitive and selective room-temperature NO₂ gas-sensing characteristics of SnO_x-based p-type thin-film transistor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol.288, pp.625-633, 2019.
DOI: 10.1016/j.snb.2019.03.046
- [3] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y. -F. Wu, "AlGa_N/Ga_N HEMTs-An Overview of Device Operation and Applications," *Proc. IEEE*, vol.90, no.6, pp.1022-1031, 2002.
DOI: 10.1109/JPROC.2002.1021567
- [4] S. -T. Hung, C. -J. Chang, C. -H. Hsu, B. H. Chu, C. F. Lo, C. -C. Hsu, S. J. Pearton, M. R. Holzworth, P. G. Whiting, N. G. Rudawski, K. S. Jones, A. Dabiran, P. Chow and F. Ren, "SnO₂ functionalized AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor for hydrogen sensing applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.37, no.18, pp.13783-13788, 2012.
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.124
- [5] B. Yulianto, G. Gumilar and N. L. W. Septiani, "SnO₂ Nanostructure as Pollutant Gas Sensors: Synthesis, Sensing Performances, and Mechanism," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol.2015, pp.1-14, 2015. DOI: 10.1155/2015/694823
- [6] Y. Halfaya, C. Bishop, A. Soltani, S. Sundaram, V. Aubry, P. L. Voss, J. P. Salvestrini and A.

Ougazzaden, "Investigation of the Performance of HEMT-Based NO, NO₂ and NH₃ Exhaust Gas Sensors for Automotive Antipollution Systems," *Sensors*, vol.16, no.3, p.273, 2016.

DOI: 10.3390/s16030273

[7] J. -H. Choi, H. Kim, H. -K. Sung and H. -Y. Cha, "Investigation of Stability and Power Consumption of an AlGa_N/Ga_N Heterostructure Hydrogen Gas Sensor Using Different Bias Conditions," *Sensors*, vol.19, no.24, p.5549, 2019. DOI: 10.3390/s19245549

BIOGRAPHY

Su-hyuk Yang (Member)



2019 : BS degree in Electronic and Electrical Engineering, Hongik University.

2019~Present : MS degree in Electronic and Electrical Engineering, Hongik University.

Hyungtak Kim (Member)



1996 : B.S degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
1998~2003 : M.S degree and Ph.D degree in ECE, Cornell University.
2003~2007 : Senior Engineer, Semiconductor R&D Center, Samsung Electronics.

2007~present : Professor, Electronic and Electrical Engineering, Hongik University.