

열처리 공정을 이용한 Si-doped β -Ga₂O₃ 박막의 전기적 특성의 이해

이경렬[‡] · 박류빈[‡] · Roy Byung Kyu Chung[†]

경북대학교 신소재공학부 전자재료전공

Understanding the Electrical Property of Si-doped β -Ga₂O₃ via Thermal Annealing Process

Gyeongryul Lee[‡], Ryubin Park[‡], and Roy Byung Kyu Chung[†]

School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, South Korea

(Received November 16, 2020; Corrected November 23, 2020; Accepted November 24, 2020)

초 록: 열처리 공정을 이용하여 Si 도핑된 n형 β -Ga₂O₃의 전기적 특성을 변화시킨 후 전도도 변화 메커니즘에 대한 분석을 진행하였다. β -Ga₂O₃ 시편들은 공기 또는 N₂ 분위기에서 800°C~1,200°C 온도범위 내에서 30분 동안 열처리되었다. 우선 열처리로 인한 결정성 개선은 전기 전도도에 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 하지만 공기중 열처리된 시편은 전도성이 악화된 반면 N₂ 열처리된 시편은 Hall 캐리어 농도와 이동도가 일부 개선되는 경향성을 보였다. X-ray photoemission spectroscopy(XPS)분석 결과, 산소공공(V_O)의 농도는 가스 분위기에 상관없이 모든 열처리된 시편에서 증가하는 경향성을 보였다. 공기중 열처리된 시편에서의 V_O 농도 증가는 β -Ga₂O₃내 V_O가 Shallow donor가 아님을 보여주는 결과로 볼 수 있다. 그러므로 N₂ 열처리된 시편은 V_O가 아닌 다른 메커니즘에 의해서 전도도가 향상되었을 가능성이 높다. Si의 경우 SiO_x 결합상태를 보이는 Si의 농도가 열처리 온도 증가에 따라 증가하는 경향성을 보였다. 특이하게도 SiO_x의 Si 2p peak의 면적 증가는 기존 Si의 화학적 변화 보다는 XPS 측정 영역내 Si농도 증가로 보였으며, SiO_x와 전기 전도도와의 상관성은 확인할 수 없었다. 결론적으로 본 연구를 통해 기존 보고된 실험결과와 달리 V_O가 Deep donor임을 확인하였다. 이와 같은 β -Ga₂O₃ 전도성의 결합 및 불순물 의존도에 대한 연구는 β -Ga₂O₃의 전기적 특성의 근본적인 이해를 바탕으로 물성 개선에 기여할 것으로 본다.

Abstract: In this work, the electrical property of Si-doped β -Ga₂O₃ was investigated via a post-growth annealing process. The Ga₂O₃ samples were annealed under air (O-rich) or N₂ (O-deficient) ambient at 800~1,200°C for 30 mins. There was no correlation between the crystalline quality and the electrical conductivity of the films within the experimental conditions explored in this work. However, it was observed the air ambient led to severe degradation of the film's electrical conductivity while N₂-annealed samples exhibited improvement in both the carrier concentration and Hall mobility measured at room temperature. Interestingly, the x-ray photoemission spectroscopy (XPS) revealed that both annealing conditions resulted in higher concentration of oxygen vacancy (V_O). Although it was a slight increase for the air-annealed sample, high resistivity of the film strongly suggests that V_O cannot be a shallow donor in β -Ga₂O₃. Therefore, the enhancement of the electrical conductivity of N₂-annealed samples must be originated from something other than V_O. One possibility is the activation of Si. The XPS analysis of N₂-annealed samples showed increasing relative peak area of Si 2p associated with SiO_x with increasing annealing temperature from 800 to 1,200°C. However, it was unclear whether or not this SiO_x was responsible for the improvement as the electrical conductivity quickly degraded above 1,000°C even under N₂ ambient. Furthermore, XPS suggested the concentration of Si actually increased near the surface as opposed to the shift of the binding energy of Si from its initial chemical state to SiO_x state. This study illustrates the electrical changes induced by a post-growth thermal annealing process can be utilized to probe the chemical and electrical states of vacancies and dopants for better understanding of the electrical property of Si-doped β -Ga₂O₃.

Keywords: β -Ga₂O₃, electrical conductivity, oxygen vacancy, Si activation, XPS

[†]Corresponding author

E-mail: roy.b.chung@knu.ac.kr

[‡]Co-first authors

© 2020, 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.

1. 서 론

전기 자동차의 모터 구동 스위칭 및 고전력, 고효율 전력 변환 등 높은 전력밀도가 필요한 다양한 분야에서 전력반도체에 대한 수요가 꾸준히 증가하면서 질화갈륨(GaN), 탄화규소(SiC) 뿐만 아니라 산화갈륨(Ga_2O_3)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁴⁾ Ga_2O_3 는 α , β , γ 상 등이 존재하며 상에 따라 결정 구조와 물성이 다르기에 적용 분야 또한 다양할 수 있어 각광 받고 있는 소재이기도 하다.⁵⁾ 특히 Monoclinic 구조를 가진 β 상 Ga_2O_3 ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$)는 Energy bandgap(E_g), 임계 항복전압이 각각 4.8eV, 8MV/cm 로 SiC과 GaN 대비 월등히 크기 때문에 고전력 밀도용 반도체 소재로 중요성이 부각되고 있다. 무엇보다도 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 Si 같이 Czochralski 공법을 이용한 기판 성장이 가능하기에 고품질 기판의 대규격화 개발이 가능할 것으로 예상된다.^{6,7)} 이러한 이유로 다른 상 대비 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 관련 연구가 활발히 진행중이고, 특히 동종기판 성장을 기반으로 한 고품질 박막 위에 Schottky barrier diode, Metal-oxide-semiconductor field effect transistor(MOSFET), Thyristor 같은 소자에 대한 결과가 많이 보고되고 있다.⁸⁻¹¹⁾

고품질 박막 덕분에 소자에 대한 연구 보고는 많이 되고 있지만 상대적으로 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 의 물성 연구는 부족하다. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 2가지 물성적 한계를 가지고 있다. 우선 p형 반도체 특성을 보이기 매우 어렵고, 열전도도가 GaN과 SiC 대비 약 10배 정도 낮다.^{2,12-15)} 양극성(Bipolar) 소자를 만들기 어렵다는 점과 고온환경에서의 낮은 열전도도는 Ga_2O_3 소재가 극복해야 하는 큰 과제이다. 이를 해결하기 위한 한가지 방안으로 열전도도가 높고 p형 전도도를 띄는 SiC 또는 GaN을 이용한 이종접합 소자 구조도 생각해볼 수 있다. 하지만 결정성 저하에 따른 다양한 문제점들이 존재하기 때문에 물성에 대한 보다 근본적인 이해가 필요하다. 예를 들면 Ga공공(V_{Ga}), O공공(V_O), 도펀트(Dopant)를 포함한 불순물 및 구조적 결함이 Ga_2O_3 의 전기적 특성에 미치는 영향을 명확하게 이해한다면 이종접합 소자 성능 개선의 중요한 기반이 될 것이다. V_O 의 경우 이론적으로는 Deep donor로 알려져 있지만 다양한 실험들의 결과를 보면 전기 전도성 증가에 대한 기여도가 이론적 예측보다는 높은 것처럼 보이기도 한다.^{16,17)} 아르곤(Ar) 플라즈마 처리를 통한 금속 전극의 접촉저항 개선이 V_O 의 농도 증가와 관련이 있다고 보고된 결과들이 단편적인 예이다.¹⁸⁾ 그리고 Si 도펀트의 경우, 열처리에 따라서 전기 전도도가 변한다는 보고는 있지만 아직 메커니즘에 대한 이해는 부족하다.

따라서 본 연구에서는 Si 도핑된 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 시편을 이용하여 다양한 조건에서 열처리 후 시편의 전기 전도도 변화와 X-ray photoemission spectroscopy(XPS) 기반 V_O 와 Si의 화학적 상태 변화의 연관성에 대해서 분석을 시도하였다.

2. 실험 방법

Hydride vapor phase epitaxy(HVPE) 성장법으로 $1\mu\text{m}$ 두께의 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 을 (0001)면 sapphire 기판 위에 성장했다. 이때 Si도핑 농도는 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 수준이었다. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 시편들은 공기 또는 질소 분위기에서 $800^\circ\text{C} \sim 1,200^\circ\text{C}$ 로 30분 열처리 공정을 진행하였다. 열처리 조건에 대한 세부 사항은 Table 1에 요약되어 있다. 이종 기판 성장이기 때문에 열처리 온도에 따라 결정성 변화가 있을 수 있어서 X-ray diffraction(XRD)로 결정성 변화를 분석하였다. 표면에서 열적 분해 발생 여부를 판단하기 위해 Scanning electron microscopy로 표면형상 변화를 관측했으며, 상온 Hall 효과 측정을 통해 열처리 따른 전기 전도도의 변화를 측정하였다. 그리고 마지막으로 XPS로 시편내 화학적 상태의 변화와 전기 전도도의 연관성에 대한 분석을 시도하였다.

3. 결과 및 토론

먼저 사파이어 위에 성장된 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 의 단결정 여부를 XRD 2θ - ω 스캔을 통해 확인하였다. Fig. 1에 따르면 열처리 전 시편(sample A)에서 β 상 외 다른 결정상은 확인할 수 없었다. 그리고 β 상이 열역학적으로 가장 안정한 상이기 때문에 열처리 후 다른 상이 출현할 가능성은 없다. 단결정성은 확인했지만 이종 기판 성장이기 때문에 결정성은 낮은 수준이다. 특별한 buffer 공정 없이 성장된 시편의 ($\bar{2}01$)면 Full width at half maximum(FWHM)은 0.85° 이다(Fig. 2 참조). 박막의 결정성은 열처리 분위기 상관없이 개선되는 경향을 보였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 ($\bar{2}01$) FWHM 값은 800°C 열처리 후 0.81° 로 감소하고 $1,200^\circ\text{C}$ 에서는 0.75° 수준까지 결정성이 개선됨을 볼 수 있다.

다음으로 본 연구의 실험조건 내에서 결정성과 전기 전도도 간의 상관관계를 분석하였다. Table 1을 보면 Sample A(as-is)의 Hall 농도는 $\sim 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 이동도는 $3.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

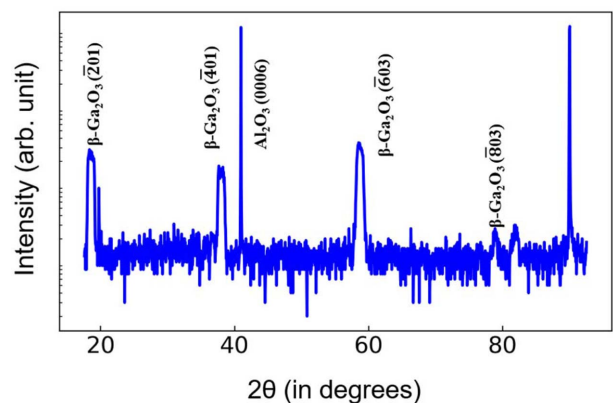


Fig. 1. XRD 2θ - ω scan of sample A showing the single phase $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

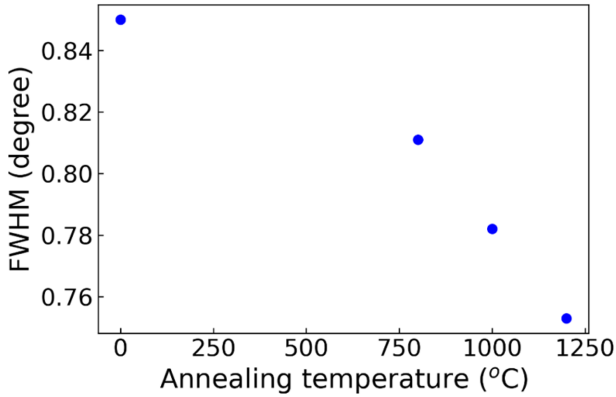


Fig. 2. FWHM values of on-axis (201) rocking curve as a function of annealing temperature under N₂ ambient.

Table 1. Summary of thermal annealing conditions

Sample ID	Annealing Temp. (°C)	Annealing ambient	Hall Conc. (/cm ³)	Hall Mobility (cm ² /Vs)
A (reference)	-	-	7.0 x 10 ¹⁷	3.3
B	900	Air	N/A	N/A
C	800	N ₂	3.0 x 10 ¹⁸	8.5
D	1000	N ₂	1.7 x 10 ¹⁸	7.0
E	1200	N ₂	N/A	N/A

수준이다. Shallow donor로 알려진 Si의 도핑 농도 대비 낮은 Hall 캐리어(Carrier) 농도를 보이는 이유는 2가지 가능성이 있다. 전위 같은 구조결함에 의한 compensation 효과 외에도 Si의 비활성화도 관련이 있을 수 있다.^{17,18)} 낮은 이동도 또한 높은 결함 밀도와 관련이 있을 수 있다. Table 1을 보면 전기 전도도는 결정성과 열처리 온도에 관계없이 열처리 분위기에 따라서 크게 달라짐을 확인할 수 있으며, 공기 중에서는 Hall장비로 측정이 어려울 정도로 전도도가 악화되었다. 반면 N₂ 분위기 열처리의 경우 Sample A 대비 Hall 캐리어 농도와 이동도 모두 개선되었다. 그렇지만 N₂ 분위기에서도 열처리 온도가 1,100°C 이상 올라가면 다시 전도성이 악화되는 기이한 현상을 보였다. 그리고 다른 특이한 점은 Sample C가 Sample D 보다는 전기 전도도가 좋다는 점이다. 따라서 이 결과들만 놓고 보면 N₂의 경우 결정성 보다는 온도가 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 산소의 경우, 지금까지 보고된 연구결과와 비슷하게 산소 분압이 상대적으로 높은 분위기 때문에 전도도가 악화되는 것으로 해석할 수 있다. 하지만 이미 언급한 바와 같이 V_O의 역할이 명확하게 규명되지 않았기 때문에 V_O 농도 변화와 전기 전도도 변화가 직접적인 관련이 있는지는 추가 분석이 필요하다. 특히 Si 도핑이 된 고품질 Ga₂O₃ 박막에서도 유사한 현상이 보고된 점을 고려한다면 본 실험의 시편 자체 보다는 더 근본적인 메커니즘이 존재할 것으로 본다.¹⁹⁻²¹⁾

시편내 V_O 변화를 보기 위해 우선 XPS로 O 1s peak을 분석해보았다. Stoichiometric Ga₂O₃의 O 1s의 결합 에너지(binding energy, BE) 위치는 529.8~530.7eV로 알려져 있다.²²⁾ 그러므로 Fig. 3(a)에 나와있는 sample A의 에너지 스펙트럼(spectrum)에서 intensity가 가장 센 peak이 Ga₂O₃의 Ga-O 결합이다. 531~532eV BE를 보이는 Shoulder peak은 산소 결핍으로 인한 Non-stoichiometric Ga-O 결합이며 Shoulder peak의 면적 변화는 V_O 농도 변화로 해석할 수 있다. Sample A(Fig. 3(a))와 Sample B(Fig. 3(b))를 비교해보면 V_O peak의 면적의 변화가 거의 없다. Main peak의 면적을 기준으로 V_O peak의 면적비를 계산해보면 Sample B가 면적비가 17.7%에서 20.13%로 소폭 증가하였다. 이 결과를 놓고 본다면 공기중 열처리로 인한 전기 전도도 악화와 V_O 농도 변화는 상관성이 없음을 알 수 있다. Fig. 3(c)~(e)를 보면 N₂ 분위기에서 예상한대로 온도 증가에 따라 V_O 농도가 증가하는 뚜렷한 경향성을 보인다. 이 결과와 Hall 분석 결과를 같이 보면 마찬가지로 V_O 농도와 전도도 사이에 연관성이 없음을 알 수 있다. XPS는 표면 분석이기 때문에 열처리 실험의 경우 열적 분해의 의한 분석영역 변화의 영향도 고려할 필요가 있다. 상압 및 N₂ 분위기에서 Ga₂O₃의 열적 분해는 1,150°C 이상에서 발생하는 것으로 보고된 바 있다.²³⁾ 그러므로 Sample E는 표면에서 일부 분해가 되었을 가능성이 있지만 나머지 시편은 열적 분해의 영향은 미미할 것으로 본다. V_O의 donor역할에 대한 기존 연구결과들은 Ar 플라즈마 표면처리와 Ohmic 접촉 개선 여부를 기반으로 보고한 결과들이 대부분이다. 하지만 이 경우 플라즈마로 인한 표면 Damage 효과를 무시할 수 없기 때문에 잘못된 결론을 내릴 가능성이 있다. 본 실험 결과는 보다 명확하게 V_O와 전도도 사이에 상관관계가 없음을 보여주고 있다. 그러므로 V_O가 shallow가 아닌 deep donor일 가능성이 높으며 이는 이론적 예측과도 부합하는 결과이다.^{16,17)}

O 1s peak 외에도 Ga와 Si 관련 XPS peak 대한 분석도 진행하였다. Fig. 4는 sample A, B, C의 Ga 3d peak과 peak fitting결과를 보여주고 있다. Ga 3d의 경우 Stoichiometric Ga₂O₃의 Ga-O BE가 20.8~20.9eV에서 관측된다.²²⁾ Ga³⁺ peak의 상대적 면적 감소 및 Gaⁿ⁺(n < 3) peak 면적 증가 경향성이 뚜렷하고, Fig. 4에 표시된 붉은 점선을 보면 Ga 3d의 BE의 증가를 확인할 수 있다. Ga 3d에 관측된 2가지 경향 모두 V_O 농도 증가와 관련이 있기 때문에 특이점은 없었다. 하지만 Si은 특이한 경향성을 보인다. Fig. 5에서 Sample A의 Si 2p peak이 101~102.5eV의 BE에서 확인할 수 있다. SiO₂의 경우 Si 2p의 BE는 103.2~103.8eV에서 관측되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 Sample A의 에너지의 범위를 보면 Ga₂O₃내 존재하는 Si은 SiO₂가 아닌 SiO_x 형태의 결합을 가진 Si일 가능성이 크다. Fig. 5(b)를 보면 Sample B의 Si 2p peak 면적이 Sample A 대비 6.52%에서 7.30%로 소폭 증가했다. 이는 SiO_x 결합 상태를 가지는 Si의 농도가 증가했음을 의미하지만 전기 전

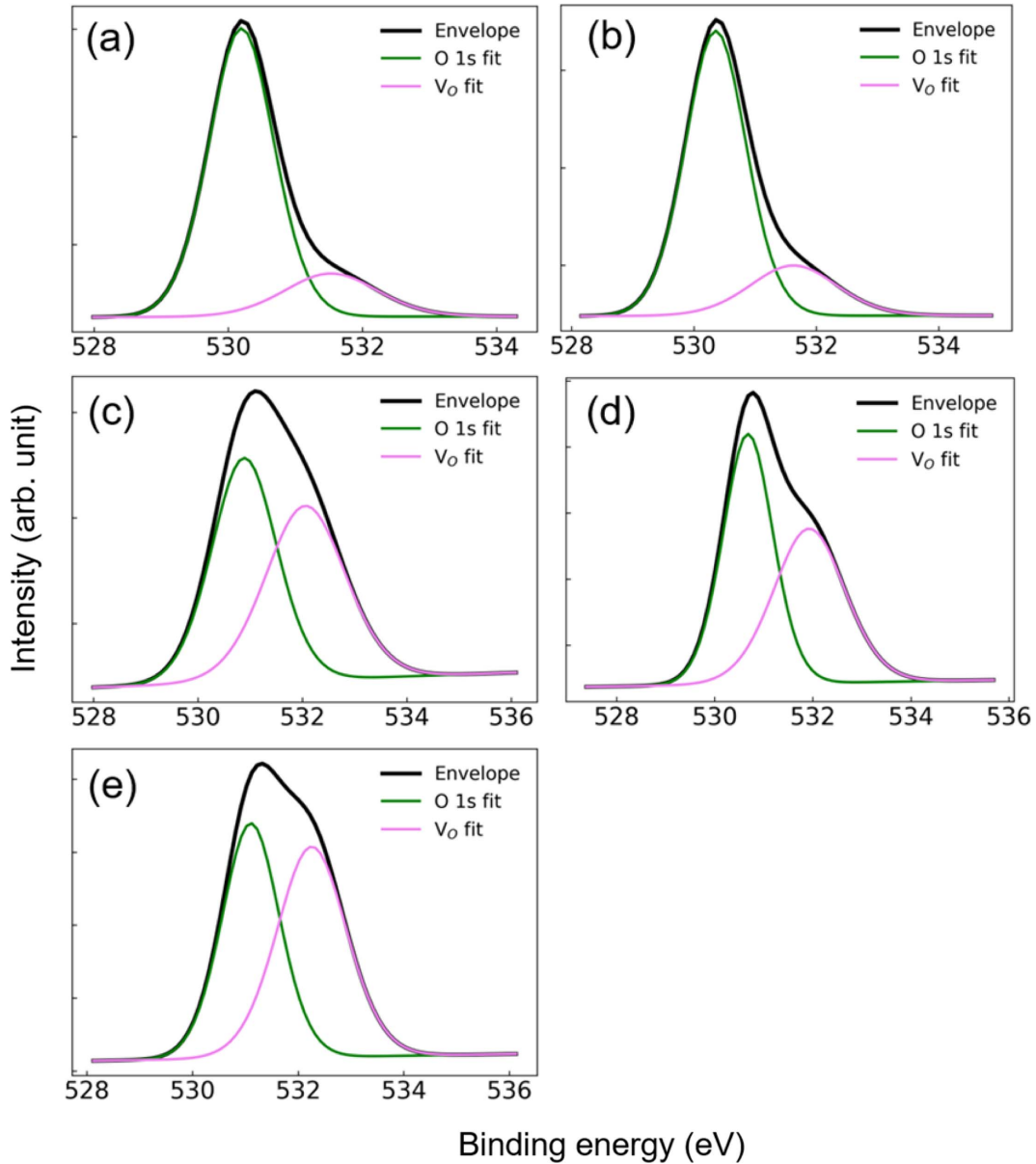


Fig. 3. XPS spectra of O 1s from samples (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, and (e) E.

도도 증가에 개선에 기여하지 않음을 Hall 분석 결과를 바탕으로 유추할 수 있다. N_2 열처리 시편들도 열처리 온도 증가에 따라 Si 2p의 상대적 면적이 14.29% (Sample C) \rightarrow 17.08% (Sample D) \rightarrow 20.44% (Sample E)로 지속적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다(Fig. 5(c)와 (d) 참조). 하지만 Fig. 5에서 SiO_x 관련 Si 2p peak의 면적 증가에 따른 다른 화학적 상태를 가지고 있는 Si 2p의 면적 감소는 본 실험에서는 확인할 수 없었다. 따라서 이 결과만 놓고 본다면 XPS분석 영역에서 Si 농도 자체가 증가한 것으로 해석이 가능하다. Ga_2O_3 의 열적 분해 가능성이 낮기 때문에 시편 마다 다른 영역을 분석했다고 보기는 어렵다. Si의 확산으로 인한 분석 영역내 Si 증가로 볼 수 있으나 아직 메커니즘이 명확히 규명되지는 않았다. Si의 화학적 상태 분석을 위해서는 박막의 두께별 XPS분석이 추가적으로 필요하다. 그리고 산소 분위기 열처리에 의한 전도

도 변화는 V_O 농도의 변화 보다는 Si Compensation 효과가 있는 것으로 알려진 V_{Ga} 의 역할이 클 가능성이 있기에 V_{Ga} 농도의 열처리 분위기 조건 의존도에 대한 연구가 필요하다.²⁴⁾

4. 결 론

본 실험에서는 Si 도핑이 된 $\beta-Ga_2O_3$ 의 전기적 특성의 열처리 조건에 따른 V_O 및 Si의 화학적 변화를 XPS를 통해 분석하였다. 기존 실험 결과들과는 달리 V_O 농도와 전기 전도도 개선 사이 상관관계를 보지 못했다. 따라서 V_O 는 deep donor일 가능성이 매우 크다. 하지만 공기 분위기와 N_2 분위기 열처리에 따른 전기 전도도의 차이는 확인할 수 있었다. 그러므로 Si 도핑의 활성화 관점에서 열처리 분위기의 영향을 분석을 시도하였다. Si

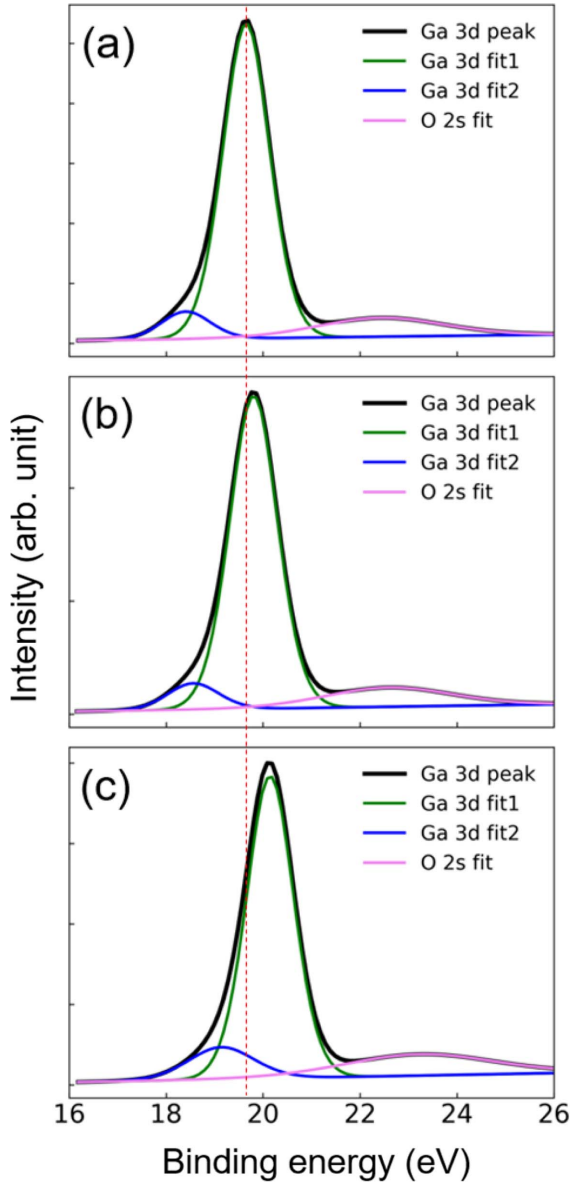


Fig. 4. XPS spectra of Ga 3d from samples (a) A, (b) B, and (c) C. The red dotted line indicates the shift of main Ga 3d peak associated with Ga-O bonds in the stoichiometric Ga₂O₃.

이 SiO_x의 결합상태임을 확인은 했지만 특이하게도 Si의 화학적 변화 보다는 XPS분석 영역내 Si의 절대농도가 증가하는 경향성을 보였다. 결론적으로 산소 분위기 열처리에 따른 Ga₂O₃의 전기 전도도의 변화는 V_O와는 무관한 것으로 보이지만 Si의 활성화/비활성화 현상을 XPS 분석으로는 확인이 어려웠다. V_{Ga}와 Si Compensation 효과와의 상관성에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 본다. 궁극적으로 Ga₂O₃ 전기적 특성에 대한 보다 근본적인 이해는 Ga₂O₃ 소자 성능 개선에도 기여할 수 있을 것이다.

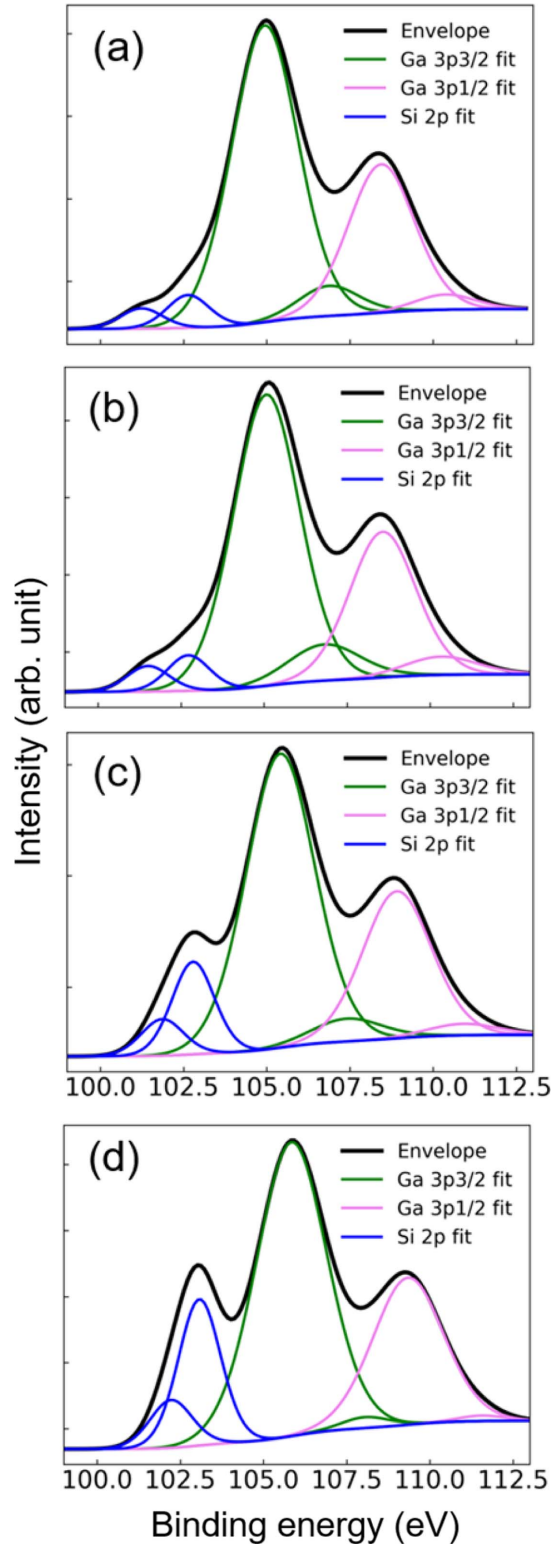


Fig. 5. XPS spectra of Si 2p from samples (a) A, (b) B, (c) C, and (d) E.

감사의 글

본 논문은 대한민국 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2019R1G1A1100204)의 지원을 받은 과제로 수행된 연구임.

References

1. M. Higashiwaki, K. Sasaki, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Recent Progress in Ga₂O₃ Power Devices", *Semicond. Sci. Technol.*, 31, 34001 (2016).
2. M. A. Mastro, A. Kuramata, J. Calkins, J. Kim, F. Ren, and S. J. Pearton, "Perspective—Opportunities and Future Directions for Ga₂O₃", *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 6(5), 356, (2017).
3. J. Yang, Z. Sparks, F. Ren, S. J. Pearton, and M. Tadjer, "Effect of Surface Treatments on Electrical Properties of β-Ga₂O₃", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 36, 061201 (2018).
4. K.-H. Kim and S.-H. Choa, "Recent Overview on Power Semiconductor Devices and Package Module Technology", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 26(3), 15 (2019).
5. Y. Yao, S. Okur, L. A. M. Lyle, G. S. Tompa, T. Salagaj, N. Sbrockey, R. F. Davis, and L. M. Porter, "Growth and Characterization of α-, β-, and ε-Phases of Ga₂O₃ Using MOCVD and HVPE Techniques", *Mater. Res. Lett.*, 6, 268 (2018).
6. M. Baldini, Z. Galazka, and G. Wagner, "Recent Progress in the Growth of β-Ga₂O₃ for Power Electronics Applications", *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 78, 132 (2018).
7. S. B. Reese, T. Remo, J. Green, and A. Zakutayev, "How Much Will Gallium Oxide Power Electronics Cost?", *Joule*, 3, 903 (2019).
8. M. H. Wong, K. Goo, Y. Morikawa, A. Kuramata, S. Yamakoshi, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, "All-Ion-Implanted Planar-Gate Current Aperture Vertical Ga₂O₃ MOSFETs with Mg-Doped Blocking Layer", *Appl. Phys. Express*, 11, 064102 (2018).
9. T. Harada, S. Ito, and A. Tsukazaki, "Electric Dipole Effect in PdCoO₂/β-Ga₂O₃ Schottky Diodes for High-Temperature Operation", *Sci. Adv.*, 5, eaax5733 (2019).
10. S. J. Pearton, F. Ren, M. Tadjer, and J. Kim, "Perspective: Ga₂O₃ for Ultra-High Power Rectifiers and MOSFETs", *J. Appl. Phys.*, 124, 220901 (2018).
11. K. Tetzner, E. B. Treidel, O. Hilt, A. Popp, S. B. Anooz, G. Wagner, A. Thies, K. Ickert, H. Gargouri, and J. Würfl, "Lateral 1.8 kV β-Ga₂O₃ MOSFET With 155 MW/cm² Power Figure of Merit," *IEEE Electron Device Lett.*, 40, 1503 (2019).
12. S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Cary IV, F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, and M. A. Mastro, "A Review of Ga₂O₃ Materials, Processing, and Devices", *Appl. Phys. Rev.*, 5, 011301 (2018).
13. B. E. Kananen, N. C. Giles, L. E. Halliburton, G. K. Foundos, K. B. Chang, and K. T. Stevens, "Self-Trapped Holes in β-Ga₂O₃ Crystals", *J. Appl. Phys.*, 122, 215703 (2017).
14. K. Park and G. Choi, "A Study on Technology Trend of Power Semiconductor Packaging using Topic Model", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 27(2), 53 (2020).
15. E. Chikoidze, A. Fellous, A. Perez-Tomas, G. Sauthier, T. Tchelidze, C. Ton-That, T. T. Huynh, M. Phillips, S. Russell, M. Jennings, B. Berini, F. Jomard, Y. Dumont, "P-type β-Gallium Oxide: A New Perspective for Power and Optoelectronic Devices", *Mater. Today Phys.*, 3, 118 (2017).
16. J. B. Varley, J. R. Weber, A. Janotti, and C. G. Van De Walle, "Oxygen Vacancies and Donor Impurities in β-Ga₂O₃", *Appl. Phys. Lett.*, 97, 142106 (2010).
17. M. D. McCluskey, "Point Defects in Ga₂O₃", *J. Appl. Phys.*, 127, 101101 (2020).
18. Y. W. Huan, S. Sun, C. Gu, W. Liu, S. Ding, H. Yu, C. Xia, and D. W. Zhang, "Recent Advances in β-Ga₂O₃-Metal Contacts", *Nanoscale Research Letters*, 13, 246 (2018).
19. A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, and S. Yamakoshi, "High-Quality β-Ga₂O₃ Single Crystals Grown by Edge-Defined Film-Fed Growth", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 1202A2 (2016).
20. N. T. Son, K. Goto, K. Nomura, Q. T. Thieu, R. Togashi, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, M. Higashiwaki, A. Koukitu, S. Yamakoshi, B. Monemar, and E. Janzén, "Electronic Properties of the Residual Donor in Unintentionally Doped β-Ga₂O₃", *J. Appl. Phys.*, 120, 235703 (2016).
21. S. Kim and J. Kim, "Electrical Properties of Thermally Annealed β-Ga₂O₃ Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors with Pt/Au Schottky Contacts", *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 8, Q3122 (2019).
22. A. V. Naumkin, A. Kraut-Vass, S. W. Gaarenstroom, and C. J. Powell, "NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database", National Institute of Standards and Technology, (Sep. 15, 2012) from <https://srdata.nist.gov/xps/Default.aspx>
23. T. Rie, K. Nomura, C. Eguchi, T. Fukizawa, K. Goto, Q. T. Thieu, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and A. Koukitu, "Thermal Stability of β-Ga₂O₃ in Mixed Flows of H₂ and N₂", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 54, 41102 (2015).
24. E. Korhonen, F. Tuomisto, D. Gogova, G. Wagner, M. Baldini, Z. Galazka, R. Schewski, and M. Albrecht, "Electrical Compensation by Ga Vacancies in Ga₂O₃ Thin Films", *Appl. Phys. Lett.*, 106, 242103 (2015).