

Formation of amorphous Ga₂O₃ thin films on Ti metal substrates by MOCVD and characteristics of diodes

Nam Jun Ahn, Jang Beom An, Hyung Soo Ahn, Kyoung Hwa Kim and Min Yang[†]

Department of Nano Semiconductor Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received June 23, 2023)

(Revised July 19, 2023)

(Accepted July 20, 2023)

Abstract Ga₂O₃ thin films were deposited on Ti substrates using metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) at temperatures ranging from 350 to 500°C. Lower deposition temperatures were chosen to minimize thermal deformation of the Ti substrate and its impact on the Ga₂O₃ film. Film surfaces tended to become rough at temperatures below 500°C due to three-dimensional growth, but the film formed at 500°C had the most uniform surface. All deposited films were amorphous in structure. Vertical Schottky diodes were fabricated and I-V and C-V measurements were performed. I-V measurements showed higher operating voltages compared to a typical SBD for films grown at different temperatures. The sample grown at 500°C, which had the most uniform surface, exhibited the lowest operating voltage. Higher growth temperatures resulted in higher capacitance values according to C-V measurements.

Key words MOCVD, Ga₂O₃, Amorphous, Metal substrate

MOCVD에 의한 Ti 금속 기판 위의 비정질 Ga₂O₃ 박막 형성과 다이오드 특성

안남준, 안장범, 안형수, 김경화, 양민[†]

한국해양대학교 나노반도체공학과, 부산, 49112

(2023년 6월 23일 접수)

(2023년 7월 19일 심사완료)

(2023년 7월 20일 게재확정)

요약 Ga₂O₃ 박막은 금속 유기 화학기상증착법을 사용하여 Ti 기판에 350~500°C 범위의 비교적 낮은 온도로 증착되었다. 낮은 온도를 선택하여 Ti 기판의 열적 변형과 Ga₂O₃ 박막에 미치는 영향을 최소화하였다. 500°C 이하에서 박막 형성 시, 기판 표면에서 원자들의 확산에너지가 충분하지 못하여 박막 표면이 3차원 성장으로 인해 거칠어지는 경향을 보였다. 그러나 500°C에서 형성된 박막은 2차원 박막 형태로 형성되었으며 비교적 균일한 표면을 가지고 있음을 확인하였다. 모든 증착된 박막은 비정질 구조였다. Ti 금속 기판 위에 형성된 Ga₂O₃ 박막 위에 금속 전극을 형성하여 수직 쇼트키 다이오드를 제작하였으며, 제작된 다이오드의 전류-전압(I-V) 및 캐패시턴스-전압(C-V) 특성을 평가하였다. I-V 측정 결과, 대부분의 다이오드 소자에서 매우 높은 동작 전압을 나타냈으며, 비교적 균일한 표면을 갖는 500°C에서 성장한 샘플은 가장 낮은 동작 전압을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, C-V 측정 결과, 박막의 성장 온도가 높을수록 커패시턴스 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

1. 서론

Ga₂O₃는 4.7~4.9 eV의 넓은 밴드갭과 8.0 MV/cm의 높은 항복전압을 가지며 GaN, SiC에 비해 Baliga 성능 지수가 3571로 훨씬 높아 차세대 초고압 전력 반도체에 활용될 것으로 기대된다[1,2]. 현재 Ga₂O₃ 결정은 호모 에피택시로 소자를 제작할 수 있지만 기판에 존재하는

높은 결함과 특히 낮은 열전도율로 인해 소자 성능 향상에 한계가 있다[3,4]. 이에 다양한 종류의 기판을 이용한 이종접합 박막을 이용하여 위에서 언급한 단점들을 극복하고 고성능 소자를 제작하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 다양한 기판 중에서 금속 기판을 연구한 결과는 거의 없었다. 금속 기판을 사용하면 열전도 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 특히 Ti 기판을 사용할 경우 열처리 조건과 추가적인 금속 증착을 통해 오히려 접착으로 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서

[†]Corresponding author

E-mail: myang@kmou.ac.kr

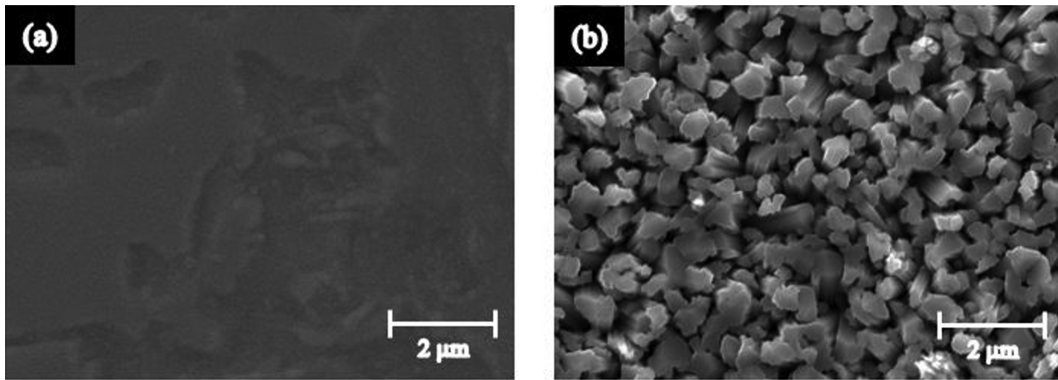


Fig. 1. (a) SEM image of Ga_2O_3 thin film deposited on Ti substrates at 500°C for 30 minutes, (b) followed by a heat treatment at 850°C for 10 minutes.

금속 기판을 이용한 Ga_2O_3 이중접합 박막의 성장에 관한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다[3-9].

이전 실험들에서 Ga_2O_3 결정상 중 가장 안정한 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 박막을 고품질의 박막으로 성장하기 위해 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition)를 이용해 사파이어와 SiC 기판 위에 상대적으로 낮은 온도에서 Ga_2O_3 박막 성장 후 열처리를 통한 상전이를 통해 균일한 박막을 얻을 수 있었다[10-13]. 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 상대적으로 낮은 온도 범위에서 Ti 금속 기판 위에 Ga_2O_3 박막들을 성장하였으며, 각각의 성장 조건에 따른 박막들의 구조적 및 전기적 특성들을 평가하였다.

2. 실험 방법

수평 구조의 homemade MOCVD를 이용해 다결정 Ti 기판에 Ga_2O_3 박막을 형성하였다. Trimethylgallium(TMg)를 갈륨 전구체로 사용하였고, H_2O 를 bubbling하여 산소 전구체로 사용하였다. 캐리어 가스로는 고순도(6N) 질소 가스를 사용하였다. 박막 성장 시 TMg와 bubbler를 통과하는 캐리어 가스의 유량은 각각 7 sccm과 400 sccm으로 고정하였다. 박막의 성장 온도는 350°C 에서 500°C 까지 50°C 씩 변화를 주었다. 모든 Ga_2O_3 박막들은 상압에서 1시간 동안 성장하였다. 각각의 온도에서 형성된 Ga_2O_3 박막들의 구조적 특성을 확인하기 위해 X-선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD) 및 X-선 광전자 분광법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS), 광학 현미경 및 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy, SEM) 등의 분석을 하였다. Ga_2O_3 박막들의 전기적 특성을 확인하기 위해 전자빔 증착기(Electron beam evaporator)를 이용해 Ga_2O_3 박막들의 표면에 반지름이 $100\ \mu\text{m}$ 인 원형의 Ni/Au(25/50 nm) 전극을 증착하였다. I-V 측정 및 C-V 측정은 Ti 기판을 후면 전극으로 활용하여 수행하였다. 기판의 열처리는 성장 과정 동안 가해

진 온도에 의해서만 진행되었고, 추가적인 열처리는 수행되지 않았다.

3. 결과 및 토론

Figure 1에는 500°C 에서 다결정 Ti 금속 기판 위에 성장한 Ga_2O_3 박막의 표면 모습(a)과 500°C 에서 성장 후 850°C 에서 30분 동안 열처리를 한 후의 Ga_2O_3 박막의 표면 모습(b)을 보였다. 500°C 에서 성장한 Ga_2O_3 박막의 경우, 비교적 평탄한 2차원 박막 형태를 가짐을 확인할 수 있었다. 그러나 500°C 성장 후 850°C 온도에서 열처리를 추가로 실시하면 평균 $0.5\ \mu\text{m}$ 이하의 굽기를 가지면서 기판에 수직 한 방향으로 기둥 형상을 가지는 다결정 형태의 거친 표면으로 변환되는 것을 관찰할 수 있었다. Ga_2O_3 박막은 열처리 조건에 따라서 결정상이 다양하게 변하게 되는데, 850°C 정도의 고온에서 열처리하는 경우에는 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 결정상을 가지는 것으로 알려져

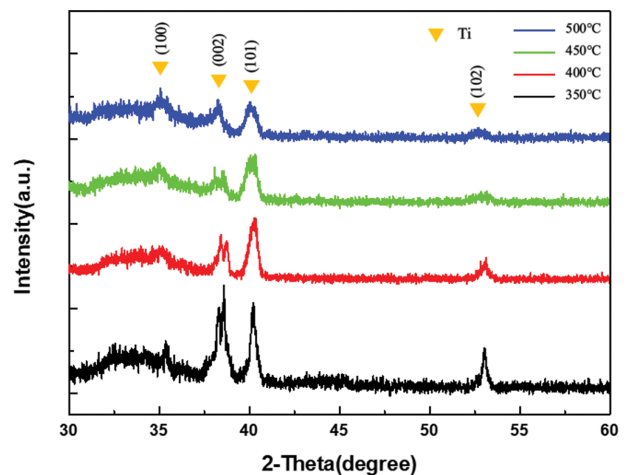


Fig. 2. XRD diffraction patterns of amorphous Ga_2O_3 thin films depend on deposited temperature.

있다[10-13]. 본 실험에서 사용한 기판은 다결정 Ti 금속으로서 저온(500°C)에서 성장된 비교적 평탄했던 Ga₂O₃ 박막이 고온(850°C)의 열처리 과정을 겪으면서 Ti 기판의 다양한 정렬 방향을 가지는 결정립들의 영향과 함께 비정질 Ga₂O₃ 박막이 자체적으로도 불규칙한 결정상 변화 과정을 거치면서 매우 거친 형상으로 변하는 것으로 추

측된다. 일반적으로 표면이 매우 거친 형상을 가지는 경우, 포토리소그래피 공정 및 금속 전극 형성 공정을 진행하기 어렵기 때문에 소자로 제작하기에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 박막 성장 후 추가적인 열처리는 실시하지 않고 비교적 저온 영역에서 성장 온도에만 변화를 주어 박막들을 형성하였으며, 서로 다른 온도

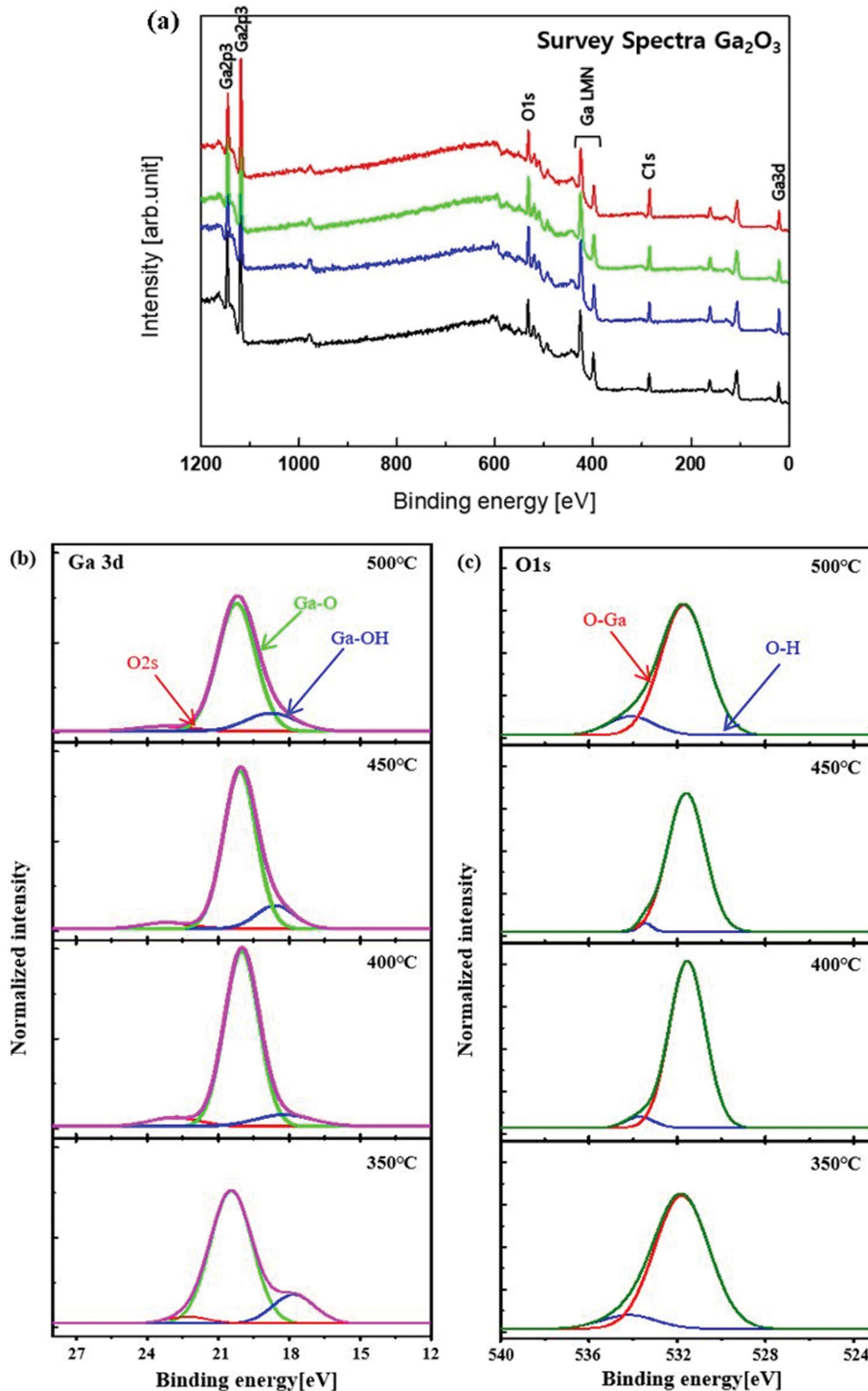


Fig. 3. (a) XPS survey spectra and (b) Ga 3d core level and (c) O 1s core level XPS spectra depend on deposited temperature.

에서 성장한 박막들의 특성들에 대해서 논의하고자 한다.

Figure 2는 Grazing Incidence X-ray diffraction (GIXRD) 측정을 통해 서로 다른 성장 온도에서 성장한 박막들의 회절을 나타내었다. 대부분의 박막들에 대해 31° ~ 37° 의 넓은 영역에서 비정질 Ga_2O_3 박막에 관계되는 회절 신호를 관찰할 수 있었다. 모든 시료에서 관찰되는 주요한 피크는 35.09° , 38.42° , 40.19° , 53.01° 에서 확인되었으며, 이들 모두 Ti 기판의 (100), (002), (101), (102) 결정면들에서 회절 되는 것으로 확인되었다. 박막 성장 온도가 낮을수록 Ti 기판의 피크 세기가 증가하는 것으로 관찰되고 있는데, 이는 성장 온도가 낮을수록 박막 성장률이 낮아 기판으로부터의 회절 강도가 더 강하게 관찰되는 것으로 해석할 수 있다. Ti (002) 피크 근처에서 350°C 와 400°C 의 경우 두 개의 피크로 구별이 되다가 성장 온도가 증가하면서 하나의 피크로 합쳐지는 현상을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Ti (002) 회절 피크에 참여하는 결정립들이 저온에서는 아주 미세하게 결정면간 간격의 차이를 보이다가 고온이 되면서 점차 한 종류의 결정립이 우세해지는 경향에 의한 것으로 해석된다.

Figure 3에 Ga_2O_3 의 정량 분석을 위해 X선 광전자 분광기(X-ray photoelectron spectrometer, XPS) 스펙트럼을 나타내었다. Figure 3(a)는 각 샘플의 XPS 스펙트럼을 0 eV부터 1200 eV의 결합 에너지(binding energy, BE) 범위에서 측정한 결과이다. 스펙트럼에서는 Ga (Ga2p, Ga3d, GaLMM Auger) 및 O(O1s) 뿐만 아니라 탄소(C1s)에 대한 피크가 관찰된다. Figure 3(b)~(c)에서는 모든 샘플에 대한 각각 Ga3d, O1s 궤도의 광전자 스펙트럼을 자세하게 나타내었다. Figure 3(b)의 Ga3d 분포 결과에서 binding energy(BE)가 20~20.47 eV의 범위에서 강한 피크를 가지는 Ga-O 결합의 존재가 확인되었고, 이를 통해 Ga_2O_3 박막의 형성을 확인할 수 있다 [14,15]. 더 높은 BE(22.3~23.1 eV)와 더 낮은 BE(17.8~18.7 eV)에서 O2 코어 레벨과 Ga-OH에 대한 약한 피크가 나타났다. Figure 3(c)의 O1s 분포 결과에서 BE (531.5~531.8 eV)에서 O1s에 대한 존재가 확인되었고,

BE(533.4~534.1 eV)에서 OH에 대한 약한 피크가 나타났다[16,17]. 이를 통해 XRD 결과에서 비정질 박막으로 추정하였던 Ga-O의 결합을 확인할 수 있다. 측정된 XPS 스펙트럼 그래프의 면적을 통해 각 원소의 at%를 계산한 결과 500°C 에서 성장한 샘플의 경우에만 Ga-O의 원자 비율이 2:3에 가까운 값으로 계산되고, 다른 샘플들의 경우에는 Ga-O 원자 비율이 1:1로 계산된다. 이를 통해 500°C 에서 성장한 샘플만이 정확한 화학적 당량 비율을 가지고 Ga_2O_3 로 형성되는 것으로 판단되며, 다른 온도 조건에서 성장한 박막들은 500°C 에서 성장한 경우와는 다른 형성 기구를 따르는 것으로 추측된다. 하지만, XPS 측정 전 표면 에칭 처리를 하지 않아 측정된 표면 반응에 의한 C1s에 대한 at%가 모든 샘플에서 40% 이상 나타나기 때문에 Ga-O at%가 다르게 나올 가능성이 있다. 이 때문에 보다 정확한 원인 규명을 위해서는 표면 처리를 통한 추가실험이 필요할 것으로 판단한다.

Figure 4는 각 샘플의 광학현미경 사진을 나타냈다. 표면 형상은 성장 온도가 낮을수록 탁한 표면이 관찰되었고, 성장 온도가 가장 높은 500°C 샘플에서 가장 선명한 표면이 관찰되었다. 500°C 샘플의 경우 기판과 박막 사이의 간섭 효과에 의해 가시광 영역의 다양한 색상을 가지는 것으로 보아 기판과 박막 간의 경계 및 표면 상태가 양호한 것으로 판단된다.

각각의 온도에서 성장한 박막의 SEM image를 Fig. 5에 나타내었다. Figure 5(a)와 (b)에 확인할 수 있듯이 350°C 와 400°C 에서 성장한 샘플의 경우 나노 사이즈의 3차원 비정질 입자의 형태로 성장되었다. 반면 Fig. 5(c)와 (d)에서 450°C 와 500°C 에서 성장한 샘플은 입자와 박막 형상이 혼합된 모습을 보여준다. 이러한 형상의 차이는 상대적으로 낮은 온도인 350°C 와 400°C 에서 충분하지 않은 열에너지에 의해 표면 확산에너지가 낮아서 3차원 성장 위주로 박막이 형성되다가 성장 온도가 450°C 근처를 경계 온도로 하여 온도가 올라가면서 확산에너지 증가로 인해 2차원 성장이 시작된 것으로 생각된다.

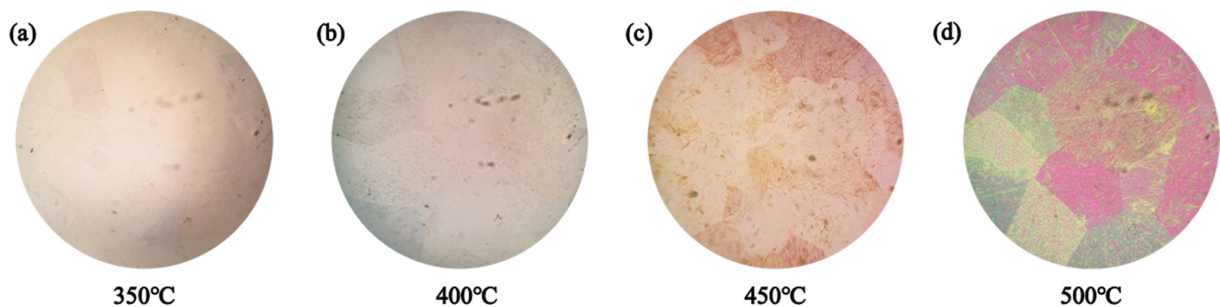


Fig. 4. Optical images of Ga_2O_3 thin films deposited at (a) 350°C , (b) 400°C , (c) 450°C , (d) 500°C .

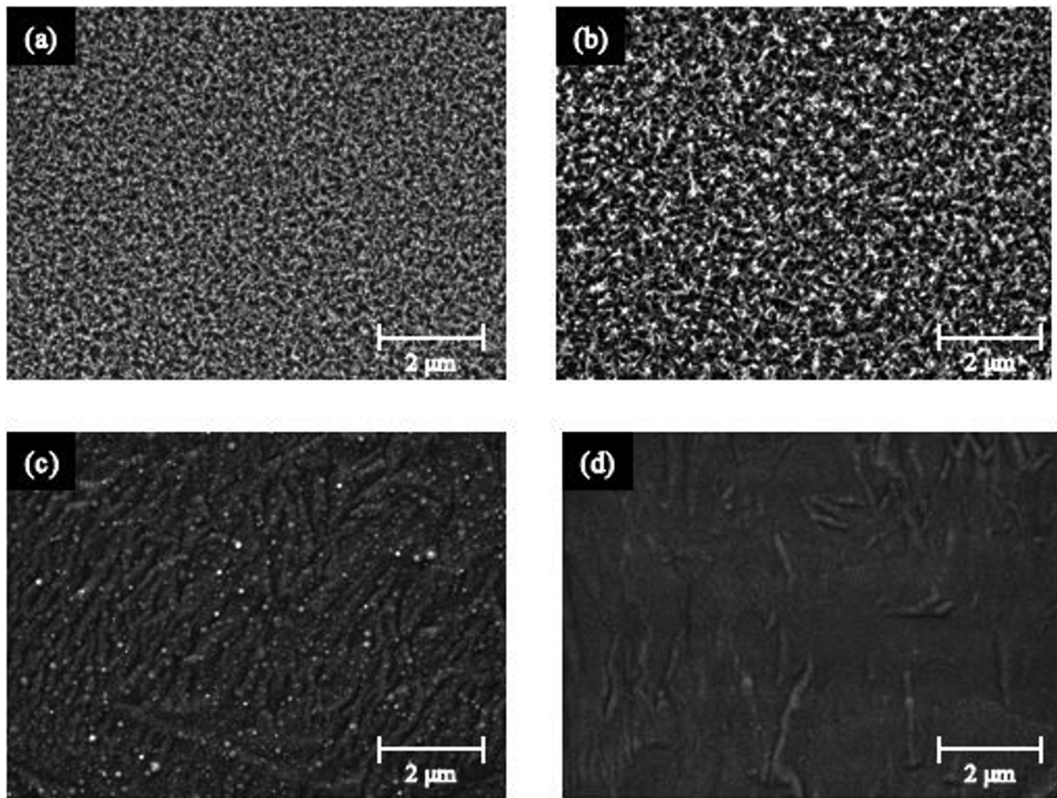


Fig. 5. SEM images of Ga₂O₃ thin films deposited at (a) 350°C, (b) 400°C, (c) 450°C, (d) 500°C.

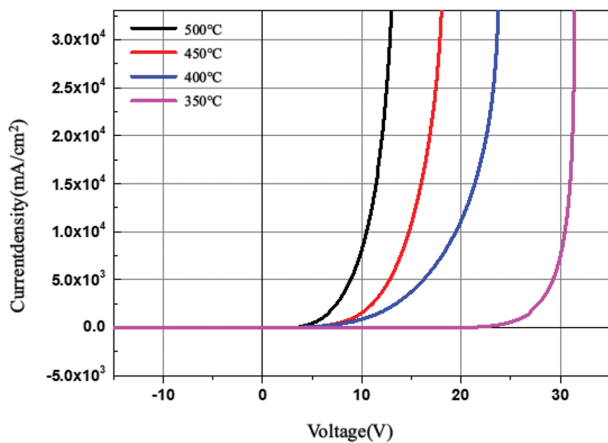


Fig. 6. I-V characteristic curves of Ga₂O₃ thin films deposited at different temperatures.

각각의 성장 온도에서 형성된 박막들의 전기적 특성을 확인하기 위하여 Ga₂O₃ 박막들 위에 전극을 증착(Ni/Au(25/50 nm))하여 수직형 다이오드를 제작하였다. 제작된 수직형 다이오드의 전류-전압 특성 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적인 Schottky barrier diode(SBD)와는 다르게 모든 샘플에서 turn-on 전압에서 전류가 가파르게 증가하지 않고 완만하게 증가하는 특성을 보인다. 동작 전압(3×10^4 mA/cm² 기준)도 350°C~500°C 범위에서

각각의 온도별로 31.4 V, 23.6 V, 17.8 V, 12.8 V로서 일반적인 SBD에 비해 큰 값이 나타났다. 이러한 큰 동작 전압 및 초기 전류가 완만한 기울기로 증가하는 경향에 대해서는 여러 가지의 원인에 의해 발생할 수 있지만, 가장 큰 원인은 SEM 이미지에서 확인된 것처럼 성장 온도가 낮을수록 2차원 박막의 형태가 아닌 3차원 비정질로 형성되며 캐리어가 이동하는 경로에 존재하는 결정립 경계들의 밀도가 커지는 것을 한 가지 원인으로 들 수 있다. 또 다른 원인으로 2차원 박막 형성된 경우에도 단결정 혹은 다결정 박막이 아니고 비정질 박막이기 때문에 전하 이동이 상당히 어려워져서 낮은 전압에서는 전하 수송이 거의 일어나지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 낮은 성장 온도의 경우 동작 전압이 커지는 또 다른 이유는 박막 형성 과정에서 후면 전극인 Ti 기판과 박막 사이에 가해지는 열처리 효과를 들 수가 있다. 박막 형성 온도가 350~450°C의 경우에는 Ti 기판과 박막 사이에 완전한 오믹 접촉을 이루지 못해 동작 전압이 크게 나타날 수 있다. 이러한 특성으로 인해 정류 특성은 나타나지만 일반적인 SBD와는 거리가 있기 때문에 일반적으로 SBD에서 사용하는 열전자 방출 이론[18]을 적용하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 열전자 방출 이론을 적용하는 대신에, 전류-전압 특성과 성장 온도에 대한 의존성과의 관계를 조사하기 위해 전류가 상승하기

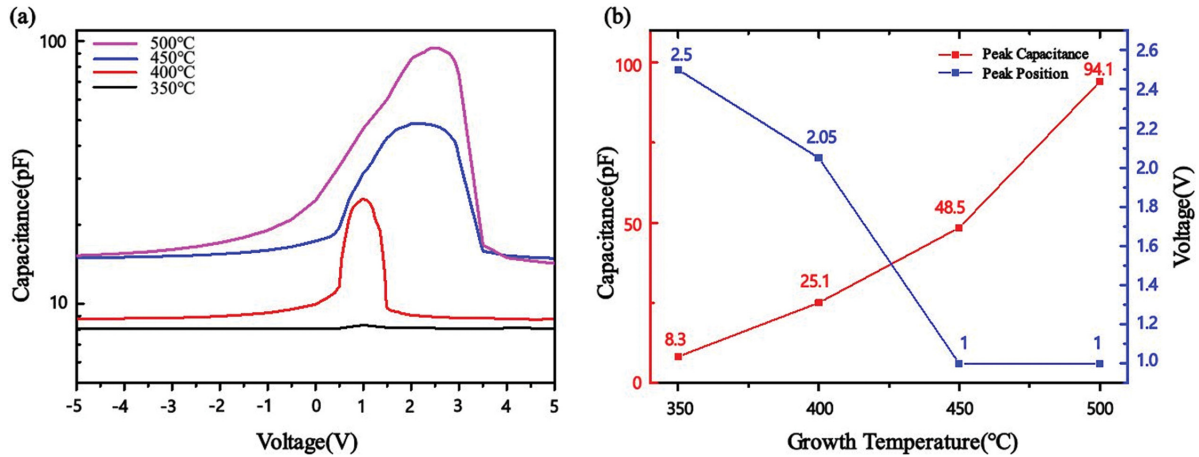


Fig. 7. (a) C-V characteristic curves of Ga_2O_3 thin films deposited at different temperatures (b) maximum capacitance and corresponding peak voltage.

시작하여 동작 전압에 이르기까지의 완만한 전류 증가 곡선 부분에서 다양한 형태의 함수를 적용해 보았다. 실험 결과에 가장 잘 맞는 함수 형태는 다항식 $I = Av^0 + Bv^1 + \Gamma v^2 + \dots + \Delta v^n$ 의 함수 형태가 가장 근접하게 실험 결과들에 적용될 수 있음을 확인하였다. 성장 온도에 따른 전류-전압 결과와 잘 일치하는 다항식의 차수 n 은 350°C 에서 $n=9$, 400°C 에서 $n=8$, 450°C 에서 $n=7$, 500°C 에서 $n=6$ 까지의 고차항들이 필요한 것을 확인하였다. 정확한 피팅을 위해서 성장 온도가 낮을수록 고차항이 필요한 이유는 성장 온도가 낮을수록 2차원 박막 성장보다는 3차원적 형성에 가까운 박막들의 특성이 캐리어 수송에도 직접적으로 영향을 주기 때문에 추가적인 캐리어 수송 과정이 추가되기 때문인 것으로 추측된다. 전류-전압 관계식을 다항식을 이용하여 설명하는 것에 대한 타당성을 설명하기에는 부자연스러운 면이 없지만, 아직은 Ti 금속 기판 위에 비정질 Ga_2O_3 박막 형성 및 전기적 특성에 대한 초기 연구 단계로서, 향후에 진전된 연구 결과들을 기반으로 보다 정확한 원인 분석이 가능할 것으로 예상된다. 전류-전압 특성은 이상적인 SBD와는 특성이 크게 다르지만, 오히려 이러한 특성은 큰 전압 범위에서 사용되는 전압 제어용 소자(레귤레이터)로의 응용 가능성도 있을 것으로 기대된다.

Figure 7에는 실온에서 $30\text{ mV}_{\text{rms}}$ 진폭의 AC 신호로 100 kHz 에서 측정된 C-V 특성 곡선을 나타내었다. C-V 측정 결과 성장 온도가 높아질수록 커패시턴스 값이 증가하는 경향이 나타났다. 350°C 에서는 8.3 pF , 400°C 에서는 25.1 pF , 450°C 에서는 48.5 pF , 500°C 에서는 94.1 pF 으로 측정되었다. 또한, FWHM 값도 350°C 에서 0.61 , 400°C 에서 0.8 , 450°C 에서 2.1 , 500°C 에서 1.83 으로 증가하는 경향을 보인다. 커패시턴스의 피크값은 양의 전압 영역에서 나타났으며, 성장 온도가 높아질수록 피크가 나타나는 전압도 350°C 와 400°C 에서는 1 V , 450°C

에서는 2.05 V , 500°C 에서는 2.5 V 로 증가하는 경향을 보인다. 양의 전압 영역에서 커패시턴스 값이 피크 형태의 최대값을 가지는 원인으로 높은 시리즈 저항(R_s), 계면 상태(N_{ss}) 및 계면 층(interface layer)의 존재 등을 그 원인으로 들 수 있다[19]. 또 다른 원인으로 후면 전극으로 사용되는 기판의 불완전한 오믹에 의해서 발생할 수도 있다[20,21]. 일반적으로 R_s 의 값이 클수록 더 큰 커패시턴스가 관찰되는 현상을 보이는데, 본 실험에서는 R_s 값이 가장 큰 350°C 샘플에서 커패시턴스가 가장 작은 결과를 보였다. 따라서, 성장 온도가 높을수록 더 큰 값의 커패시턴스 값을 보이는 이유로는 비정질 박막 내에 존재하는 다양한 종류의 결함들의 밀도가 증가하는 것에 원인을 들 수 있다. 또한, 성장 온도가 증가함에 따라서 박막이 성장되는 동안 Ti 기판과 박막 사이 계면의 상호작용이 더욱 증가하고, 이로 인해 계면 결함 밀도도 증가하여 커패시턴스 값도 증가하고, 피크가 발생하는 전압의 위치가 양의 값으로 점점 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

MOCVD를 이용해 Ti 기판 위에 서로 다른 온도에서 Ga_2O_3 를 형성하였다. 상대적으로 저온인 $350\sim 500^\circ\text{C}$ 에서 성장한 샘플의 XRD 결과 Ti 기판 피크와 비정질 상의 피크 영역이 나타났고, XPS 결과를 통해 비정질 상의 Ga_2O_3 가 형성되었음을 확인하였다. 350°C 와 400°C 에서 성장한 샘플은 3차원 형태로 성장되었고, 450°C 이상에서 2차원 형태를 보였다. 또한, 500°C 에서 성장한 Ga_2O_3 박막이 가장 균일한 표면 평탄도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 Ti 기판에서 2차원 박막을 얻기 위해서는 450°C 이상에서 Ga_2O_3 박막들을 형성해야 할

것으로 판단된다. 모든 샘플에 Ni/Au 전극을 증착하고 Ti 기판을 후면 전극으로 사용하여 I-V 측정한 결과, 일반적인 SBD보다 더 높은 동작 전압과 완만한 기울기를 가지며 전류가 상승하는 것이 확인되었다. 이러한 특징에 대해 논의한 결과 2차원 및 3차원의 비정질 박막의 형성으로 저 전압에서 전하 이동에 영향을 주었거나, 후면 전극의 오믹이 완전하지 않아 나타날 수 있다고 추정하였다. C-V 측정의 결과를 통해 성장 온도가 높을수록 더 높은 커패시턴스가 관찰되었으며, 피크 값도 양의 전압영역에서 나타났다. 이는 성장 온도가 증가함에 따라 Ti 기판과 박막 사이 계면의 상호작용이 더욱 증가하여 계면 결합 밀도가 증가하여 나타난 것으로 추정하였다. 이러한 특성들을 통해 이상적인 SBD와는 특성이 크게 다르지만, 향후에 보다 체계적인 연구들을 통하여 고전압 범위에서 사용되는 전압 제어용 소자(레귤레이터)로서의 응용 가능성도 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부) 및 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구이며(RS-2022-00154720, Si-on-SiC 구조기반 차세대전력 반도체 개발), 2021년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(P0012451, 2021년 산업전문인력역량강화사업).

References

- [1] M. Orita, H. Ohta and M. Hirano, "Deep-ultraviolet transparent conductive β -Ga₂O₃ thin films", *Appl. Phys. Lett.* 77 (2000) 4166.
- [2] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Development of gallium oxide power devices", *Phys. Stat. Soli. (a)* 211 (2014) 21.
- [3] M. Handweg, R. Mitdank, Z. Galazka and S.F. Fischer, "Temperature-dependent thermal conductivity in Mg-doped and undoped β -Ga₂O₃ bulk-crystals", *Semicond. Sci. Technol.* 30 (2015) 024006.
- [4] P. Jiang, X. Qian, X. Li and R. Yang, "Three-dimensional anisotropic thermal conductivity tensor of single crystalline β -Ga₂O₃", *Appl. Phys. Lett.* 113 (2018) 232105.
- [5] D. Vaca, L. Yates, N. Nepal, D.S. Kayzer, B.P. Downey, V. Wheeler, D.J. Meyer, S. Graham and S. Kumar, "Thermal conductivity of β -Ga₂O₃ thin films grown by molecular beam epitaxy", 2020 19th IEEE ITherm Conference (2020) 1011.
- [6] M. Higashiwaki, " β -Ga₂O₃ material properties, growth technologies, and devices: a review", *AAPPS Bulletin.* 32 (2022) 3.
- [7] H. Kim, "Control and understanding of metal contacts to β -Ga₂O₃ single crystals: a review", *SN Appl. Sci.* 4 (2021) 27.
- [8] M. Zhang, Z. Liu, L. Yang, J. Yao, J. Chen, J. Zhang, W. Wei, Y. Guo and W. Tang, " β -Ga₂O₃-based power devices: A concise review", *Crystals.* 12 (2022) 406.
- [9] S.K. Lee, C.M. Zetterling, M. Östling and B.M. Moon, "Electrical characterization of titanium-based ohmic contacts to 4H-silicon carbide for high-power and high-temperature operation", *J. Korean Phy. Soc.* 40 (2002) 572.
- [10] J. Lee, H. Kim, L. Gautam, K. He, X. Hu, V.P. Dravid and M. Razeghi, "Study of phase transition in MOCVD grown Ga₂O₃ from κ to β phase by ex situ and in situ annealing", *Photonics.* 8 (2021) 17.
- [11] J.H. Park, R. McClintock, A. Jaud, A. Dehzangi and M. Razeghi, "MOCVD grown β -Ga₂O₃ metal-oxide-semiconductor field effect transistors on sapphire", *Appl. Phys. Express.* 12 (2019) 095503.
- [12] H. Lee, S. Kim, H. Ahn, K. Kim and M. Yang, "Formation of high-quality heteroepitaxial β -Ga₂O₃ films by crystal phase transition", *Cryst. Res. Technol.* 56 (2021) 2000149.
- [13] S. Kim, J. Lee, H. Ahn, K. Kim and M. Yang, "Growth of Ga₂O₃ films on 4H-SiC substrates by metal organic chemical vapor deposition and their characteristics depend on crystal phase", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 31 (2021) 149.
- [14] I. Donmez, C. Ozgit-Akgun and N. Biyikli, "Low temperature deposition of Ga₂O₃ thin films using trimethylgallium and oxygen plasma", *J. Vac. Sci. Technol. A* 31 (2013) 01A110.
- [15] J.F. Moulder, K.D. Bomben, W.F. Stickle, P.E. Sobol and J. Chastain, "Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy: a reference book of standard spectra for identification and interpretation of XPS data", (Perkin-Elmer, Physical Electronics Division, Eden Prairie, MN, 1992).
- [16] S. Ghose, S. Rahman, L. Hong, J.S. Rojas-Ramirez, H. Jin, K. Park, R. Klie and R. Droopad, "Growth and characterization of β -Ga₂O₃ thin films by molecular beam epitaxy for deep-UV photodetectors", *J. Appl. Phys.* 122 (2017) 095302.
- [17] C.V. Ramana, E.J. Rubio, C.D. Barraza, A. Miranda Gallardo, S. McPeak, S. Kotru and J.T. Grant, "Chemical bonding, optical constants, and electrical resistivity of sputter-deposited gallium oxide thin films", *J. Appl. Phys.* 115 (2014) 043508.
- [18] S.K. Cheung and N.W. Cheung, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Appl. Phys. Lett.* 49 (1986) 85.
- [19] Ş. Altındal and H. Uslu, "The origin of anomalous peak and negative capacitance in the forward bias capacitance-voltage characteristics of Au/PVA/n-Si structures", *J. Appl. Phys.* 109 (2011) 074503.
- [20] B. Bati, Ç. Nuhoğlu, M. Sağlam, E. Ayyıldız and A. Türüt, "On the forward bias excess capacitance at intimate and MIS schottky barrier diodes with perfect or imperfect ohmic back contact", *Phys. Scr.* 61 (2000) 209.
- [21] J. Werner, A.F.J. Levi, R.T. Tung, M. Anzlowar and M. Pinto, "Origin of the excess capacitance at intimate schottky contacts", *Phys. Rev. Lett.* 60 (1988) 53.