

The effects of Mg impurities on β -Ga₂O₃ thin films grown by MOCVD

Sang Hun Park, Seo Young Lee, Hyung Soo Ahn, Young Moon Yu* and Min Yang†

Department of Materials Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

*LED-Marine Convergence Technology R&BD Center, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

(Received January 2, 2018)

(Revised February 1, 2018)

(Accepted February 6, 2018)

Abstract In this study, we investigated the impurity effect of Ga₂O₃ doped thin film by simple doping method using Mg acetate solution. Both undoped Ga₂O₃ thin films and Mg-doped Ga₂O₃ thin films were grown on Si substrates at 600 and 900°C for 30 minutes by means of a customized MOCVD method. As a result of the surface analysis, there were no obvious morphological differences by Mg impurity implantation. The surface of the thin film grown at 900°C was rougher than those grown at 600°C and polycrystallization was achieved. As a result of the optical property analysis, in the case of the doped sample, the overall emission peak was red shifted and the UV radiation intensity was increased. As a result of the I-V curve, the leakage current of the 600°C growth thin film decreased by the Mg impurity and the photocurrent of the growth thin film of 900°C increased.

Key words MOCVD, Ga₂O₃, Impurities, Optical properties, p-Type

MOCVD로 성장한 β -Ga₂O₃ 박막에 대한 Mg 불순물 주입 효과

박상훈, 이서영, 안형수, 유영문*, 양민†

한국해양대학교 전자소재공학과, 부산, 49112

*부경대학교 LED-해양융합기술센터, 부산, 48547

(2018년 1월 2일 접수)

(2018년 2월 1일 심사완료)

(2018년 2월 6일 게재확정)

요약 본 연구에서는 Mg acetate 수용액을 사용한 간편한 도핑방법으로 불순물을 주입하여 성장한 Ga₂O₃ 박막의 불순물 주입 효과에 대해 연구하였다. MOCVD 방법을 이용해 Si 기판 위에 undoped Ga₂O₃ 박막과 Mg-doped Ga₂O₃ 박막을 각각 600°C와 900°C의 성장온도에서 30분간 성장하였다. 표면 형상 분석 결과 Mg 불순물 주입에 따른 큰 차이는 확인되지 않았으며 900°C에서 성장한 박막의 표면이 600°C에서 성장한 박막의 표면보다 큰 거칠기를 가지고 다결정화 되는 것을 확인하였다. 광학적 특성 분석 결과, 도핑된 샘플의 경우 전체적인 발광 피크가 red shift 되었고 UV 방출 세기가 커지는 특성을 보였다. I-V 측정 결과로부터 Mg 불순물에 의해 600°C 성장 박막의 누설전류가 감소하고, 900°C 성장 박막의 광전류는 증가하는 효과를 확인하였다.

1. 서론

β -Ga₂O₃는 단사정계 구조를 가진 산화물 반도체 물질 중 하나로 여러 Ga₂O₃ 상 중에서 가장 안정적인 상으로 알려져 있다[1, 2]. 또한 4.9 eV의 넓은 직접천이형 에너지 밴드갭과 8 MV/cm의 높은 임계장을 가지고 있기 때문에 고온, 고전압에서 구동이 가능하여 광전소자와 전력소자 양쪽에서 주목 받고 있는 물질이다[3-5]. 대부분

의 산화물 반도체처럼 β -Ga₂O₃도 자연적으로 발생하는 산소 공공으로 인해 주로 n-type 특성을 보이는 것으로 알려져 있다[6]. 자연적인 n-type 특성을 제거하고 p-type 특성을 얻는 것은 쉽지 않은 것으로 예상되지만 β -Ga₂O₃의 p-n 접합 제작을 통한 광소자 응용을 위해서 필수적인 연구과제로 여겨지며, 이에 따라 Ga 원자를 대체하여 p-type 캐리어를 얻을 수 있는 Mg, Zn 등의 불순물에 대한 연구가 여러 문헌을 통해 보고되었으나 아직 완전한 p-type β -Ga₂O₃ 성장에 대한 연구는 아직 발표되지 않았다[7, 8].

따라서 본 연구에서는 MOCVD(Metal Organic Chemical

†Corresponding author

E-mail: myang@kmou.ac.kr

Vapor Deposition)를 이용한 Ga_2O_3 박막 성장 중 Mg acetate 수용액 전구체를 이용해 acceptor로 작용할 수 있는 Mg 불순물을 주입함으로써 성장된 박막의 특성 변화에 대해 알아보았다. 또한 비정질 박막과 결정화된 박막의 특성을 비교하기 위하여 $600^\circ C$ 와 $900^\circ C$ 두 온도에서 박막을 성장시켜 비교하였고 각 성장 온도와 불순물 주입 조건에 의한 구조적, 광학적, 전기적 특성 평가를 진행하였다.

2. 실험 방법

Ga_2O_3 박막 성장을 위해 사용된 Si (111) 기판의 자연 산화막 제거를 위해 buffered oxide etchant(BOE) 용액을 이용하여 1분간 세척하였고 세척 직후 MOCVD 장비의 석영관 반응로 내부의 흑연 susceptor에 장착하였다. Ga 전구체로는 Trimethylgallium(TMGa)을, O 전구체로는 DI water(H_2O)를 bubbling하여 사용하였으며 분위기 가스 및 캐리어 가스로는 N_2 가스를 사용하였다. 박막을 성장하기 전, 산소 소스에 의한 Si 기판의 표면 산화와 Si 기판과 Ga_2O_3 박막 간의 격자부정합에 의한 결정질 저하를 최소화 하기 위해 두께 20 nm의 저온 버퍼층을 $450^\circ C$ 에서 성장하였다. 버퍼층 성장 후, TMGa 소스의 공급만 중단하여 성장 온도까지 가열한 후 다시 TMGa 소스를 공급하여 30분 동안 Ga_2O_3 박막 성장을 진행하였다. 성장하는 동안 TMGa 소스와 H_2O bubbler에 통과하는 N_2 캐리어 가스의 유량을 각각 7과 300 sccm으로 고정하였다. Mg 불순물이 주입된 Mg-doped 박막 성장 시에는 저온 버퍼층까지는 동일하게 진행하였으나 박막 성장 직전에 DI water bubbler를 0.53 M의 Mg acetate 수용액으로 교체하여 주입하였다. Undoped와 Mg-doped Ga_2O_3 박막은 모두 $600^\circ C$ 와 $900^\circ C$ 두 온도에서 성장하였다. 수직형 소자 제작을 위해 electron beam evaporator를 사용하여 Si 기판 뒷면에 Al 전극을 100 nm 증착하였고 성장된 Ga_2O_3 박막 위에 Ti/Au를 10/100 nm 증착하였다. 결정성, 표면형상, 광학적 특성과 전기적 특성에 대한 불순물의 영향을 XRD(X-ray diffraction), SEM(scanning electron microscopy), CL(cathodoluminescence), I-V 특성 분석을 통해 조사하였다.

3. 결과 및 토론

Fig. 1에 저온 버퍼층 유무에 따라 다르게 성장된 Ga_2O_3 박막의 단면사진을 나타내었다. $700^\circ C$ 이상의 고온에서 Si 기판 위에 Ga_2O_3 박막을 직접 성장시킬 경우 격자부정합과 결정구조의 불일치에 의해서 Ga_2O_3 박막

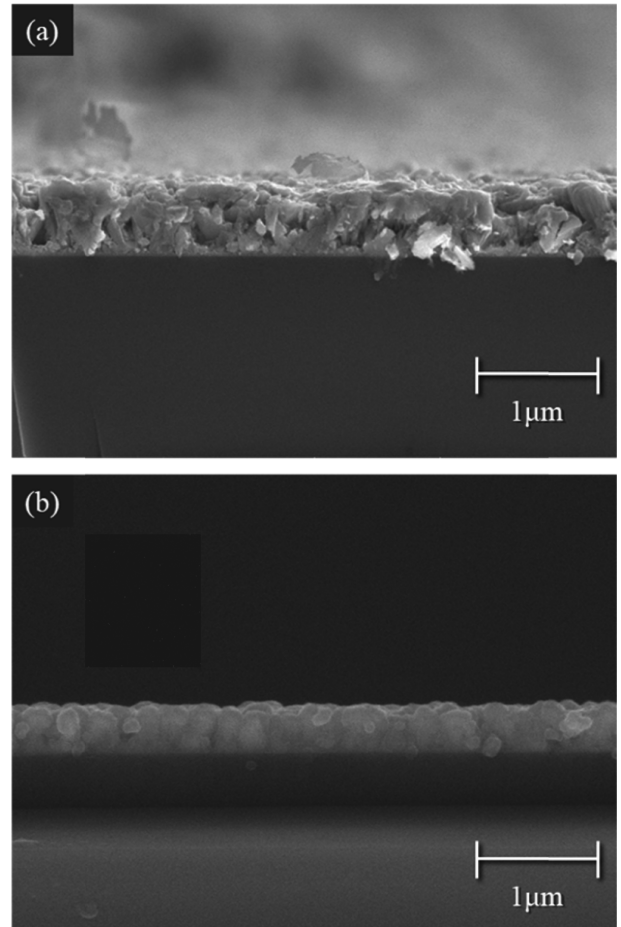


Fig. 1. Cross sections of Ga_2O_3 thin films (a) with out buffer layer and (b) with buffer layer.

이 균일하게 성장되지 않고 표면이 거친 모습을 보였다. 이에 따라 Si와 Ga_2O_3 같이 격자상수 및 결정구조의 차이가 큰 이종성장을 하는 경우 버퍼층 생성이 필수적임을 확인하였으며, 본 연구에서는 박막성장시 저온 버퍼층을 성장시켜 실험을 진행하였다.

Fig. 2(a)에 $600^\circ C$ 에서 성장한 undoped와 Mg-doped $\beta-Ga_2O_3$ 박막의 XRD 스펙트럼을 나타내었다. 28.8° 와 58.9° 에서 확인되는 피크는 각각 Si (111)과 (222) 기판 피크이다. Undoped 샘플은 $\beta-Ga_2O_3$ ($\bar{3}11$), ($\bar{6}01$), ($\bar{7}12$) 피크가 38.8° , 44.4° , 64.8° 에서 확인되었으며 ($\bar{3}11$) 결정면이 가장 강한 세기를 띠었다. Mg-doped 샘플에서는 가장 우세한 ($\bar{3}11$) 피크 외 다른 피크들의 세기가 감소한 것을 확인할 수 있었으며 40.5° 부근에서 $\beta-Ga_2O_3$ 결정면에서 확인되지 않는 피크가 미세하게 발견되었다. 이 피크는 $\alpha-Ga_2O_3$ (0006)면으로 추정되는데 종래의 연구에 의하면 성장 조건에 따라 β 상이 아닌 다른 상의 Ga_2O_3 가 성장할 수 있으며 $550^\circ C$ 의 저온에서 $\alpha-Ga_2O_3$ 가 성장된 보고가 있기 때문에 타당한 추측이라고 판단된다[9]. Undoped $\beta-Ga_2O_3$ 박막에서는 나타나지 않은

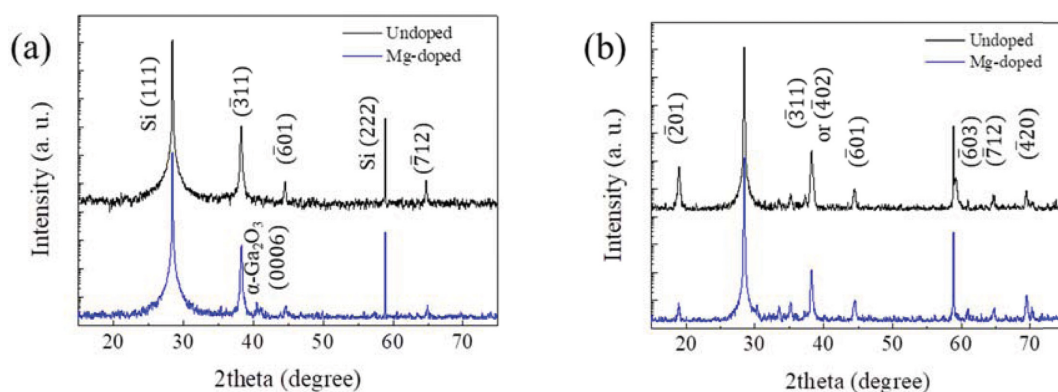


Fig. 2. XRD spectra of undoped and Mg-doped Ga₂O₃ thin films grown at (a) 600°C and (b) 900°C.

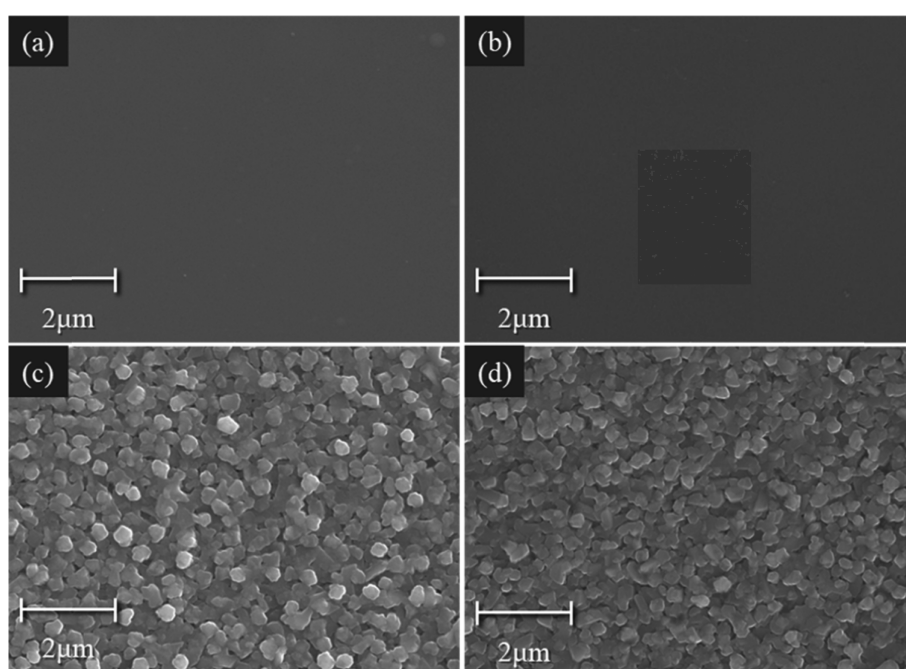


Fig. 3. SEM images of (a), (c) undoped and (b), (d) Mg-doped Ga₂O₃ thin films grown at 600°C and 900°C, respectively.

상 변화 현상이 Mg 불순물을 주입한 경우에서만 나타난 이유는 Ga³⁺ 이온 반경(76 pm)과 Mg²⁺ 이온 반경(86 pm)의 차이에 의한 미세한 격자 거리 변화 및 결합 에너지 변화가 발생했기 때문으로 보인다.

Fig. 2(b)에 900°C에서 성장한 undoped와 Mg-doped β -Ga₂O₃ 박막의 XRD 스펙트럼을 나타내었다. Undoped 샘플에서는 β -Ga₂O₃ ($\bar{2}01$), ($\bar{4}02$), ($\bar{6}01$), ($\bar{6}03$), ($\bar{7}12$), ($\bar{4}20$)의 피크가 18.9°, 38.2°, 44.4°, 59.2°, 64.7°, 69.4°에서 각각 확인되었다. 600°C 성장에서 볼 수 없었던 새로운 결정면들이 확인되는 것으로 보아 900°C 성장 샘플은 600°C 성장 샘플보다 더욱 다결정 형상을 띠는 것을 알 수 있다. 이는 900°C의 높은 성장 온도에서 표면 에너지 상승과 충분한 활성화 에너지로 인해 새로운 결정면들이 형성되기 때문인 것으로 보인다. 또한 600°C

성장 샘플에서 확인된 α -Ga₂O₃가 존재하지 않는 이유는 β -Ga₂O₃가 고온에서 유일하게 열적으로 안정한 상이기 때문에 900°C의 높은 성장 온도에서 준 안정상인 α 상이 존재할 수 없기 때문이다.

Fig. 3에 600°C와 900°C에서 성장한 undoped와 Mg-doped 샘플의 SEM 이미지를 나타내었다. 600°C에서 성장한 undoped와 Mg-doped 샘플은 표면이 비교적 매끈하고 편평한 구조를 가졌다. 900°C에서 성장한 undoped와 Mg-doped 샘플은 XRD 결과에서도 확인하였듯 뚜렷하게 다결정화 됨을 SEM 이미지를 통해서도 확인할 수 있었다. 불순물의 주입에 의한 표면 형상의 차이는 보이지 않았지만 거칠기가 감소한 모습을 볼 수 있다.

Fig. 4에 600, 900°C의 온도에서 성장된 박막 단면의 SEM 이미지를 나타내었다. 박막의 두께는 600, 900°C

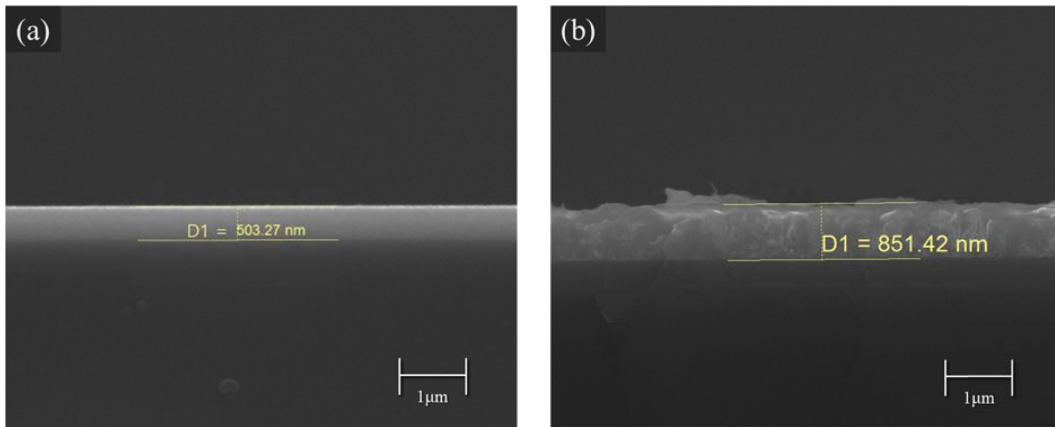


Fig. 4. Cross section of undoped Ga_2O_3 thin films (a) 600°C and (b) 900°C .

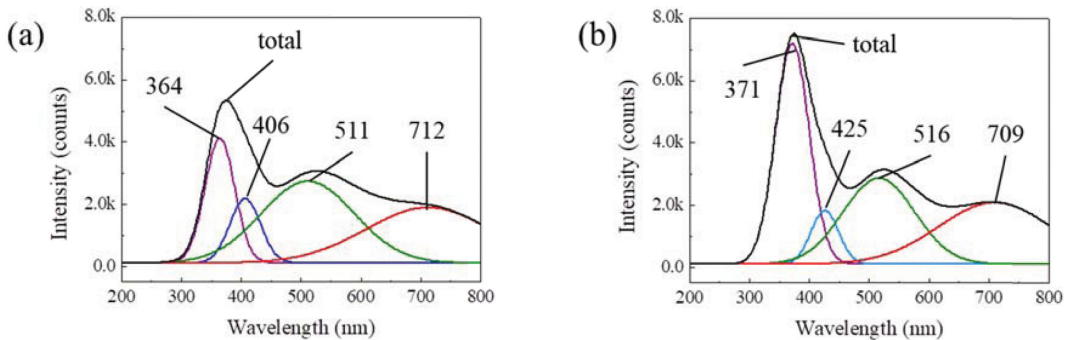


Fig. 5. CL spectra of (a) undoped and (b) Mg-doped Ga_2O_3 thin films grown at 900°C .

의 성장온도에서 각각 약 500 nm, 850 nm이다. 600°C 의 낮은 성장 온도에서는 전구체의 열분해율이 낮아 동일한 유량의 소스를 공급해 주었음에도 불구하고 상대적으로 낮은 성장률을 보이는 것을 알 수 있다.

900°C 에서 성장한 undoped와 Mg-doped 샘플의 CL 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었으며 두 샘플 모두에서 UV, blue, green, near IR 범위의 피크가 발견되었다. UV에 해당하는 피크의 경우 undoped 샘플은 364 nm에서 나타났고 Mg-doped 샘플은 371 nm에서 피크가 나타났다. 이 UV 천이는 Ga_2O_3 성장 중 발생한 산소 공공에 의한 donor 밴드에서부터 가전자대 최상단부까지의 천이가 원인으로 알려져 있다[10]. 그 외의 천이 메커니즘에 대한 원인은 논란의 여지가 많지만 blue와 green 범위의 방출은 donor 밴드에서 냉각과정에서 발생한 산화 분위기로 인해 형성된 Ga 공공 준위 $E_{V_{\text{Ga}_1}}$, $E_{V_{\text{Ga}_2}}$ 까지의 천이에 의해 발생한 것으로 판단된다. Blue와 green 범위에 해당하는 피크는 undoped 샘플은 406과 511 nm에서, Mg-doped 샘플은 425와 516 nm에서 각각 확인되었다. Near IR 범위 방출은 donor 밴드에서 캐리어 가스와 대기가 스로부터 나온 질소에 의해 생성된 deep acceptor 준위의 천이에 의해 발생한 것으로 보이며 undoped 샘플

은 712 nm에서, Mg-doped 샘플은 709 nm에서 각각 피크가 나타났다[11]. CL 측정 결과에서 주목할 만한 점은 가장 우세한 발광 피크인 UV 피크가 Mg-doped 샘플에서 0.07 eV 만큼 shift 된 3.34 eV에서 관찰되었고 방출 세기가 눈에 띄게 강해졌다는 것이다. 그 외 방출은 세기의 변화가 거의 없었으나 전체적으로 red shift 된 모습이 보인다. 이에 대한 원인은 Mg 불순물에 의한 새로운 에너지 준위의 형성으로 볼 수 있다.

위에서 언급한 Mg 불순물 주입에 따른 새로운 에너지 준위의 형성 원인에 대해 다음과 같이 두 가지 추측이 가능하다. 첫 번째 메커니즘으로 acceptor 준위가 형성되었다고 가정해보았다. Acceptor 준위는 가전자대 최상단부의 바로 위에 있을 것이나 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 박막의 높은 저항으로 현재로서는 홀 측정으로 증명이 힘들 것으로 보인다. 하지만 정성적으로 평가해 볼 때 SiC나 GaN 같은 wide bandgap 반도체의 acceptor 준위 형성을 위한 활성화 에너지는 일반적으로 매우 높은 수백 meV에 달하며 대부분의 산화물 반도체의 가전자대 최상단부는 매우 낮게 위치해있기 때문에 acceptor 준위 형성이 더욱 힘들 것으로 보인다[12]. 또한 산소 2p 궤도로 구성된 가전자대는 분산이 적고 큰 정공질량을 발생시키기 때문에

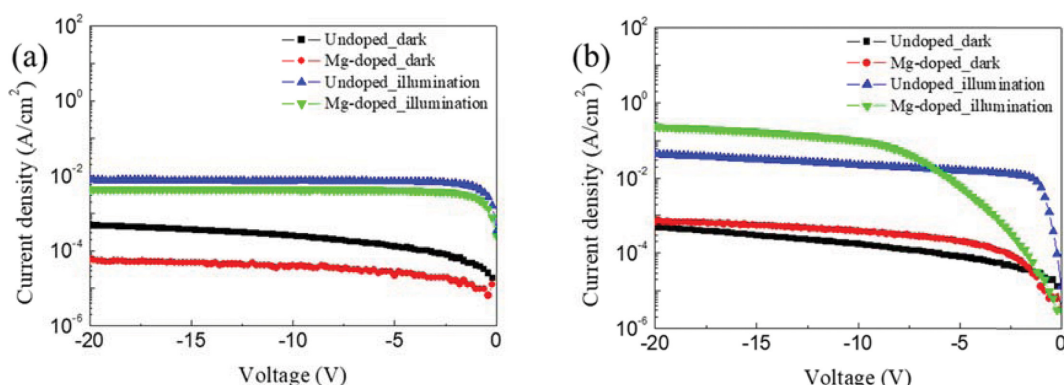


Fig. 6. I-V curves of Ga₂O₃ thin films grown at (a) 600°C and (b) 900°C in the condition of dark and illumination.

p-type 형성이 쉽지 않다[6]. 이러한 이유로 첫 번째 매커니즘으로 불순물 준위의 형성을 설명하기 힘들다. 때문에 두 번째 매커니즘으로 donor 준위의 70 meV 아래에 불순물에 의한 새로운 천이 준위가 형성되었다고 판단하였다. 이 준위는 Ga 자리에 Mg 불순물의 치환으로 생성된 것이 아닌 촉매 매커니즘에 의한 것으로 산소 공공 농도를 증가시켜 donor 준위 자체를 shift 시켰거나, donor 준위의 70 meV 아래에 위치한 불순물 준위의 활성화 시킴으로써 새로운 천이 준위를 생성한 것으로 판단된다. 결과적으로 새로운 준위의 생성으로 Mg-doped 샘플의 UV 방출에서 70 meV의 차이를 보임과 동시에 UV 방출을 향상시킨 것으로 판단된다. 그 외의 방출 역시 새로운 에너지 준위에 영향을 받았으나 Mg 불순물 첨가로 인한 촉매작용으로 결합준위 또한 변화했기 때문에 shift 된 정도의 차이가 있는 것으로 보인다.

Fig. 6(a), (b)에 각각 600, 900°C에서 성장한 β -Ga₂O₃ 박막의 I-V 특성 곡선을 나타내었다. I-V 특성은 암실과 외부 광원으로 백색 LED를 이용한 경우로 두 번 측정했고 하나의 그래프에 나타내었다. 측정된 Ti/Au 전극의 면적은 $3.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 이고 빛에 노출된 박막의 면적은 $7.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 이다. Fig. 6(a)에 나타낸 600°C 성장 샘플의 -10 V에서 측정된 누설전류는 undoped와 Mg-doped 샘플에서 각각 $2.8 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, $3.9 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 로 약 7배 가량 차이를 보였다. 반면 광전류 값은 두 샘플이 비슷한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 산화물 반도체의 누설전류의 주된 원인은 산소 공공으로 알려져 있으며 이에 따라 Mg 불순물이 박막 성장 중에 촉매로 작용하여 박막질을 향상시키고 산소 공공 형성을 억제하여 누설전류를 감소시킨 것으로 판단할 수 있다[13, 14].

Fig. 6(b)에 900°C 샘플을 측정된 I-V 특성 곡선을 나타내었다. Undoped 샘플의 누설전류는 600°C에서 성장한 샘플의 누설전류와 별 차이가 없지만 도핑된 샘플의 경우 -10 V에서 약 10배 가량 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 SEM 측정에서 보인 표면현상의 차이로

설명할 수 있다. 900°C에서 성장한 샘플은 polycrystalline grain들로 이루어진 매우 거친 표면을 가지고 있기 때문에 Mg 불순물이 grain boundary 같은 낮은 표면에너지 영역에 국한되고 누설전류의 원인으로 작용하여 누설전류를 상승시키는 결과가 발생한 것이다. 또한 광전류의 크기가 Mg-doped 샘플에서 더 증가한 이유는 CL 분석 결과로부터 이해할 수 있다. CL 측정 결과에서 Mg 불순물에 의한 새로운 에너지 준위가 donor 밴드의 0.07 eV 아래에 형성되었을 것이라고 언급하였다. 그 때문에 백색 광원 없이 암실에서 측정 한 경우 상온의 열에너지 0.026 eV로 불순물 준위의 전자를 천이시킬 수 없기 때문에 자유전자 캐리어로써 전류의 흐름에 기여하지 못해 암전류에는 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 UV 광원으로 형광체를 여기시킨 백색 LED 광원을 조사하였을 때는 불순물 준위가 충분히 활성화 되어 0.07 eV의 갭 이상으로 전자가 여기하여 undoped 샘플보다 강한 광전류가 발생한 것으로 판단된다.

Mg 불순물 도핑으로 완전한 p-type 특성을 볼 수 없었지만 광학적, 전기적 특성의 변화가 존재했다. 본 연구에서 사용한 결정 성장 조건은 Mg 원자의 결정 내부로 혼입이 가능한 조건은 아니지만 결정성에 영향을 미친 것으로 보인다. $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 를 성장하기 위해 공급한 In이 주성분으로 포함되는 것뿐만 아니라 Ga₂O₃ 성장에 촉매작용을 했다는 종래의 연구가 있다[15]. 따라서 현재로서는 Mg acetate 화합물의 분해에 의해 형성된 Mg와 C 같은 원자들의 Si 기판 표면에서의 촉매 작용에 의해 결정 성장에 기여하는 원자들의 확산거리, 활성화 에너지 등의 물리 화학적 변수에 영향을 주어 결정질에 변화를 준 것으로 보인다. Mg이 사용된 결정 성장의 경우에 결정 결함의 생성을 억제하여 열에너지 및 외부 광원에 의해 생성된 캐리어의 포획에 기여하는 결정 결함 또는 이동도를 감소시키는 산란중심의 밀도를 낮추어서 Mg이 사용되지 않은 경우에 비하여 양호한 I-V 특성을 얻을 수 있는 것으로 추측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Mg acetate 수용액을 이용해 Ga₂O₃ 박막 성장 중 불순물을 주입하는 새로운 도핑 방법을 소개하였다. Mg-doped 샘플과 undoped 샘플의 결정성, 표면형상, 광학적, 전기적 특성을 비교한 결과 p-type 특성은 확인할 수 없었으나 Mg 불순물 주입에 따른 긍정적인 효과를 확인할 수 있었다. 불순물 주입에 따른 표면형상 변화는 큰 차이가 없었으며 600°C의 저온 성장 시 Mg에 의해 부분적인 상 변화가 발생한 것을 확인하였다. 광학적 특성 분석 결과에서는 Mg 불순물 주입에 의해 acceptor 준위가 아닌 donor 준위 아래에 새로운 에너지 준위가 형성되어 UV 효율이 높아진 것을 확인하였다. 또한 전기적 특성 분석 결과 Mg 불순물 주입에 따라 600°C 성장 샘플에서는 누설전류가 감소되고 900°C 성장 샘플에서는 UV 효율 상승에 의해 광전류가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 acetate 수용액을 연구체로 이용한 새로운 도핑 방법이 Mg 불순물로 인해 UV 발광 효율 및 누설전류, 광전류와 같은 박막 특성이 향상되는 의미 있는 효과를 가져온 것으로 판단된다. 아직 초기 연구 단계임을 감안하여 이후 세부조건을 최적화시킨다면 다양한 목적의 광전소자 응용이 가능한 우수한 UV 효율을 가지는 β-Ga₂O₃ 박막성장이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 수송기기 특화조명 핵심기술개발 전문인력양성사업(과제번호: N0001363, 조선·해양플랜트·해양환경 LED융합조명 핵심기술개발 전문인력양성)으로 지원된 연구입니다.

References

- [1] M. Higashiwaki, H. Murakami, Y. Kumagai and A. Kuramata, "Current status of Ga₂O₃ power devices", Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 1202A1.
- [2] H.Y. Playford, A.C. Hannon, E.R. Barney and R.I. Walton, "Structures of uncharacterised polymorphs of gallium oxide from total neutron diffraction", Chem. Eur. J. 19 (2013) 2803.
- [3] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Gallium oxide (Ga₂O₃) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β-Ga₂O₃ (010) substrates", Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 013504.
- [4] K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui and E.G. Villora, "Device-quality β-Ga₂O₃ epitaxial films fabricated by ozone molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Express. 5 (2012) 035502.
- [5] G. Pozina, M. Forsberg, M.A. Kaliteevski and C. Hemmingsson, "Emission properties of Ga₂O₃ nano-flakes: effect of excitation density", Sci. Rep. 7 (2017) 42132.
- [6] B.G. Svensson, S.J. Pearton and C. Jagadish, "Oxide semiconductors", fourth ed. (Academic Press, Cambridge, 2013), 360 p.
- [7] X. Feng, Z. Li, W. Mi, Y. Luo and J. Ma, "Mg-doped β-Ga₂O₃ films with tunable optical band gap prepared on MgO (110) substrates by metal-organic chemical vapor deposition", Mater. Sci. Semicond. Process. 34 (2015) 52.
- [8] P.C. Chang, Z. Fan, W.Y. Tseng, A. Rajagopal and J.G. Lu, "β-Ga₂O₃ nanowires: Synthesis, characterization, and p-channel field-effect transistor", Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 222102.
- [9] K. Akaiwa, K. Kaneko, K. Ichino and S. Fujita, "Conductivity control of Sn-doped α-Ga₂O₃ thin films grown on sapphire substrates", Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 1202BA.
- [10] C.H. Ho, C.Y. Tseng and L.C. Tien, "Thermoreflectance characterization of β-Ga₂O₃ thin-film nanostrips", Opt. Express. 18 (2010) 16360.
- [11] Y.P. Song, H.Z. Zhang, C. Lin, Y.W. Zhu, G.H. Li, F.H. Yang and D.P. Yu, "Luminescence emission originating from nitrogen doping of β-Ga₂O₃ nanowires", Phys. Rev. B. 69 (2004).
- [12] S. Fischer, C. Wetzel, E.E. Haller and B.K. Meyer, "On p-type doping in GaN—acceptor binding energies", Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 1298.
- [13] L. Dong, R. Jia, B. Xin, B. Peng and Y. Zhang, "Effects of oxygen vacancies on the structural and optical properties of β-Ga₂O₃", Sci. Rep. 7 (2017) 40160.
- [14] P. Ravadgar, R.H. Horng and T.Y. Wang, "Healing of surface states and point defects of single-crystal β-Ga₂O₃ epilayers", ECS J. Solid State Sci. Technol. 1 (2012) N58.
- [15] P. Vogt, "Growth kinetics, thermodynamics, and phase formation of group-III and IV oxides during molecular beam epitaxy", Ph. D., Berlin: Humboldt University (2017).