

## HVPE 방법으로 성장된 알파-갈륨 옥사이드의 전처리 공정에 따른 특성 변화

최예지, 손호기, 라용호, 이영진, 김진호, 황종희, 김선욱, 임태영, 전대우 

한국세라믹기술원 광·전자부품소재센터

Effect of Pre-Treatment of Alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Grown on Sapphire by Halide Vapor Phase Epitaxy

Ye-ji Choi, Hoki Son, Yong-Ho Ra, Young-Jin Lee, Jin-Ho Kim, Jonghee Hwang, Sun Woog Kim,  
Tae-Young Lim, and Dae-Woo Jeon

Optic & Electronic Components Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology,  
Jinju 52851, Korea

(Received April 24, 2019; Revised May 31, 2019; Accepted June 25, 2019)

**Abstract:** In this study, we report the effect of pre-treatment of alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown on a sapphire substrate by halide vapor phase epitaxy (HVPE). During the pre-treatment process, 10 sccm of GaCl gas was injected to the sapphire substrate at 470°C. The surface morphologies of the alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers grown with various pre-treatment time (3, 5, and 10 min) were flat and crack-free. The transmittance of the alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epi-layers was measured to analyze their optical properties. The transmittance was over 80% within the range of visible light. The strain in the alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown with a pre-treat 5 min was measured, and was found to be close to the theoretical XRD peak position. This can be explained by the reduction of strain having caused a lattice mismatch between the alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer and sapphire substrate. The calculated dislocation density of the screw and edge were  $2.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$  and  $8.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , respectively.

**Keywords:**  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HVPE, Lattice mismatch

### 1. 서론

각종 전력산업, 전기자동차, 전력기기와 IT 등, 다양한 분야의 발전으로 대전류, 고전압, 고효율 및 경량화 등의 특성을 갖춘 반도체 소자가 요구되고 있다. 이러한 전력 반도체 소자의 개발을 위해 넓은 밴드갭을 가지는 소재의 연구가 필요하다.

갈륨 옥사이드(gallium oxide, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)는 III-VI족으로 투명하고 넓은 밴드갭을 가지는 소재이며, Baliga's

figure of merit (BFOM)과 Johnson's figure of merit (JFOM) 수치가 높아 차세대 전력 반도체 소재로서의 큰 잠재력을 가지고 있다고 할 수 있다. BFOM과 JFOM은 소재가 가지고 있는 전기적 및 물리적 특성(전자 이동도, 항복 전압, 열 전도성 등)을 하나의 종합적인 개념으로 표현하기 위한 것으로, 기존의 반도체 소자 재료와의 상대적인 수치를 나타내어 재료의 가치를 표현한다 [1]. 따라서 SiC (3.3 eV), GaN (3.4 eV)의 뒤를 이어 갈륨 옥사이드(4.8~5.3 eV)가 차세대 ultra wide band-gap 소재로 주목을 받으며 활발하게 연구되고 있다 [2].

갈륨 옥사이드를 기반으로 한 소자는 SiC 기반의 소자와 비교해서 높은 동작 온도와 낮은 누설 전류로 전력 손실이 적고, 높은 항복 전압과 온-저항으로 임계 전계가 우수하다. 또한, 액상 성장을 통한 단결정 벌크

✉ Dae-Woo Jeon; [dwjeon@kicet.re.kr](mailto:dwjeon@kicet.re.kr)

성장이 가능하여 높은 가격 경쟁력을 갖추고 있다 [3]. 갈륨 옥사이드 기판 제작에는 floating zone, edge defined film fed growth, Czocharalski 방법으로 성장한 단결정 벌크를 사용한다 [3]. 제작된 갈륨 옥사이드 기판을 이용하여 그 위에 에피택시 방법으로 갈륨 옥사이드 에피를 성장하여 전기적·광학적 특성이 우수한 자외선 광 검출기, 투명한 전도성 필름, 가스 센서, 산화막 반도체 전기장 효과 트랜지스터 (MOSFET), 쇼트키 배리어 다이오드(SBDs) 등의 소자로 제작된다 [4,5].

갈륨 옥사이드 에피택시 성장을 위한 성장 장비는 원자층 증착(ALD), 분자 빔 에피택시(MBE), 유기 금속 화학 증착법(MOCVD), 미스트 화학 기상 증착법(Mist-CVD), 수소화물 기상 에피택시법(HVPE) 등이 있다. ALD, MBE와 MOCVD는 진공 장비로 원자 단위의 정확도를 가지며 성장된 박막의 특성이 우수하지만, 성장률이 매우 낮고 고가의 장비이기 때문에 상용화에 어려움이 있다 [4,6,7]. Mist-CVD는 상압 시스템으로 동작이 간단하고 저가의 장비지만, 성장 시 기판 전체에 박막을 균일하게 성장시키기 어려운 단점이 있다 [8]. HVPE 성장법은 Mist-CVD와 같이 상압 시스템으로 동작이 간단하고 MBE, MOCVD와 비교해서 생산적 측면에서 우수하여 상용화 가능성이 가장 크다. 또한, 성장률이 매우 높고 순도 높은 갈륨 옥사이드 에피의 성장이 가능하지만, 빠른 성장 속도로 인해 상대적으로 표면 거칠기가 높은 단점이 있다 [9].

갈륨 옥사이드는 알파, 베타, 감마, 엡실론, 델타의 5가지 상을 가지며, 최근 카파 상이 추가로 보고되고 있다 [10]. 현재의 연구들은 대부분 베타-갈륨 옥사이드에 집중되어 있으며, 나머지 상에 대해서는 보고가 적다. 베타-갈륨 옥사이드는 밴드갭은 4.8 eV이며, 열역학적으로 안정적인 상태로 가장 활발히 연구되고 있다. 이를 토대로 많은 연구에서 베타-갈륨 옥사이드를 기반으로 한 MOSFET, SBDs 등의 소자 개발의 결과를 보고하고 있다 [11]. 알파-갈륨 옥사이드는 밴드갭이 가장 넓으며(5.3 eV) 커런덤 구조로 되어 있어 기판으로 사용되는 사파이어와 격자 상수 차이( $a = 4.5\%$ ,  $c = 3.3\%$ )가 가장 적으며 다른 커런덤 구조의 소재들 ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )과의 조성 제어로 밴드갭 엔지니어링이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 열역학적으로 준 안정적인 상태이기 때문에 성장 온도가 낮고 이로 인해 알파-갈륨 옥사이드를 기반으로 하는 소자의 공정 온도가 제한적이다 [12]. 따라서 알파-갈륨 옥사이드의 소자 개발에 관한 연구 보고는 베타-갈륨 옥사이드와 비교하면 매우 적다. 알파-갈륨 옥사이드의

성장 공정에 관련된 보고는 앞서 언급한 여러 가지 성장 장비를 포함한 다양한 장비들과 성장환경(성장 온도, 성장압력, VI/III 비)에 대한 보고가 있다 [13,17]. 또한, 알파-갈륨 옥사이드 기반의 소자 개발에 필요한 결정학적, 광학적인 특성을 갖추기 위해 열처리, 버퍼 층 성장 등의 여러 가지 추가적인 연구가 진행되고 있다 [14].

알파-갈륨 옥사이드를 이종 기판 위에 성장할 때는 격자 상수 차이에서 비롯되는 잔류응력을 극복하는 것이 중요하다. 전처리 공정을 통한 고품질 GaN과 AlN 성장에 대한 선행 연구 보고에 의하면, 박막과 기판 사이에서 발생하는 격자 상수 차이로 인해 결정의 방향과 품질이 영향을 받는다. 전처리 공정은 박막과 기판 사이의 격자 상수 차이로 인해 발생하는 응력을 완화하고, 기판과 같은 결정 배향을 가지는 핵 형성을 통해 고품질 단결정의 성장이 가능하게 한다 [15].

또한, 전처리 공정 동안 기판 위에 2D 성장을 하여, 본 성장에서 결함이 없는 평평한 표면을 갖게 한다 [16]. 이는 초기 상태에서 기판의 질화를 억제하는 영향에 의한 것이며, 산화 공정에서도 같은 효과를 기대한다.

본 연구에서는, 결정학적·광학적 특성이 우수한 알파-갈륨 옥사이드의 성장을 위한 전처리 공정의 효과에 대해 연구하였다. 알파-갈륨 옥사이드는 HVPE 성장법을 이용하여 사파이어 기판 위에 성장하였으며 전처리 공정이 알파-갈륨 옥사이드 박막의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 전처리 시간과 성장 시간에 따른 변화를 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

수평형으로 제작된 HVPE 장비를 이용하여 알파-갈륨 옥사이드를 사파이어 기판 위에 성장하였다. 사용된 HVPE 장비는 저항 가열 방식으로 승온되고 소스 영역과 성장영역으로 구성되어 있다. 소스 영역에서는 III족의 전구체로 사용되는 금속 갈륨과 HCl의 반응을 통하여  $\text{GaCl}_x$ 가 생성되고 성장영역에서 주입된 산소와 반응하여 갈륨 옥사이드가 사파이어 기판 위에 성장된다. 알파-갈륨 옥사이드의 성장 온도는 이전의 연구에서 성장된 결정의 광학적·결정적 특성이 가장 우수하게 나타난 470°C의 비교적 낮은 온도로 성장하였으며 [17], 캐리어 가스는 질소를 사용하였다. 전처리 공정 시에는 산소를 주입하지 않으며 HCl과 금속갈륨의 반응을 통해 생성되는  $\text{GaCl}_x$ 만을 반응 영역으로 주입시켰다. 전처리 공정의 영향을 세부적으로 비교하기 위해

전처리 시간은 각각 1분, 5분, 10분으로 하고 이후의 성장 시간은 10분으로 하여 전처리 공정이 본 성장에 미치는 직접적인 영향을 알아보았다. 전처리 공정 조건에 따라 sample A, B, C라고 한다(sample A: 전처리 1분-성장 10분, sample B: 전처리 5분-성장 10분, sample C: 전처리 10분-성장 10분).

성장 이후 샘플의 표면은 전계 방출-주사전자현미경(FE-SEM), 광학 현미경(OM)과 원자 간력 현미경(AFM) 측정을 통해 확인하였다. 샘플의 결정 특성은 X-ray 회절 분석법(XRD) 측정으로 얻은 알파-갈륨 옥사이드의 피크 위치와 강도를 통해 확인하였으며, 고해상도 X-Ray 회절 분석법(HR-XRD) 측정을 통해 반치폭(FWHM) 변화를 확인하고 전위밀도를 계산하였다. 샘플의 광학적 특성을 알아보기 위해 자외선-가시광선 분광기(UV-vis)로 투과율을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 전처리 공정의 도식화 이미지이다. C-plane 사파이어 기판 위에 갈륨이 핵을 형성하고 본 성장을 통해 갈륨과 산소가 반응하여 갈륨 옥사이드가 성장하게 된다. 전처리 과정에 있어서 상압 장비의 특성상 극소량의 산소가 유입될 가능성이 있다. 유입된 산소와 전처리 공정으로 생성된 GaCl<sub>x</sub>가 반응하여 기판 위에 생성되는 III족 원소인 갈륨의 비율이 매우 높은 갈륨 옥사이드가 형성된다. 이는 산소를 흘려주지 않았음에도 XRD 측정을 통해 알파-갈륨옥사이드 피크가 관찰되는 것으로 확인하였다.

그림 1의 AFM 측정 이미지와 FE-SEM으로 보아 전처리 1분 샘플에서는 표면에 다수의 구형 입자들이 관찰되었다. 이 입자들은 GaCl<sub>x</sub> 가스가 반응기 내에 존재하는 산소와 반응하여 기판의 표면에서 핵을 형성한 것으로 판단된다. 전처리 5분 샘플에서는 핵형성 과정에 의해 그 크기가 커져 긴 형태의 step-and-terrace 구조를 형성하였다. 이 구조는 에피택셜 성장에서 유리한 장점이 있다 [18]. 전처리 10분 샘플의 경우에는 전처리 5분의 샘플에서 보이던 구조는 사라지고 박막으로 성장 되는 것이 확인되었다.

그림 2는 전처리 시간을 각각 0, 1, 5, 10분간 적용하고 갈륨 옥사이드를 약 10분간 성장한 샘플의 사진과 OM 측정 이미지이다. 전처리 공정을 하지 않았을 때(sample ref.) 표면에서 다수의 pit이 발견되며, 전처리 공정을 포함한 샘플들은(sample A, B, C) 모두 pit이

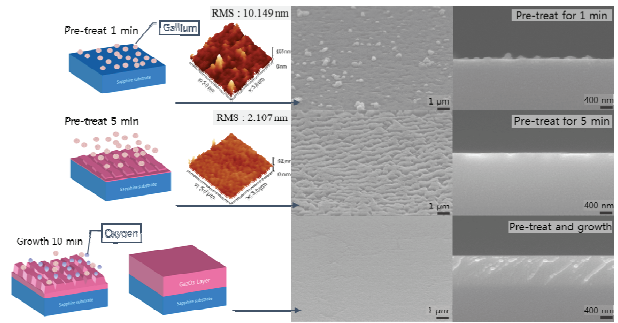


Fig. 1. Schematic diagram, AFM and FE-SEM images for pre-treatment process.

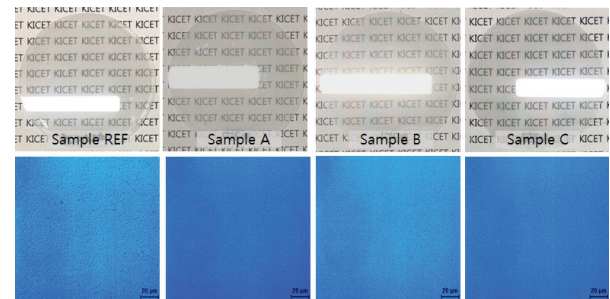


Fig. 2. OM and photo images of α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for sample ref., A, B, and C.

발견되지 않았다. 표면의 pit은 에피층 내부에서 발생하는 적층결함, 쌍정 등의 결함으로 인해 생성될 수 있다 [19]. 이는 전처리 공정을 통해 형성된 버퍼층의 부재와 박막으로 성장되는 과정에서 입자와 입자 사이의 거리에 의해 결합되지 않아 생긴 것으로 판단된다.

그림 3은 전처리 공정 이후 성장한 샘플의 AFM 측정 이미지이다. 전처리 공정이 없는 sample ref.와 비교해서 전처리 공정 이후 성장한 샘플들(sample A, B, C)의 표면 입자 형성과 거칠기에 뚜렷한 변화가 확인된다. 특히 전처리 5분 이후 성장 시(sample B) 표면의 입자들이 균일하게 형성되고 거칠기가 매우 낮아지는 것으로 나타난다. Sample A와 C도 역시 버퍼층 형성에 따라 sample ref.에 비해 표면 거칠기가 다소 향상된 결과를 얻었다.

그림 4(a)는 각 샘플들의 XRD 결과를 나타낸다. (0006) 알파-갈륨 옥사이드의 XRD 피크는 40.24°에서 발생된다고 알려져 있다(JCPDS no.06-0503). 일반적으로 XRD 피크의 위치는 성장된 박막의 잔류응력 상태를 나타낸다 [20]. Sample ref.를 제외한 모든 샘플의 피크는 응력이 없는 알파-갈륨 옥사이드 피크 위치

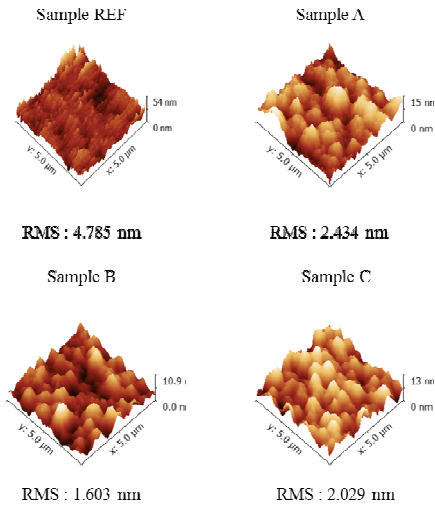


Fig. 3. AFM image of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for sample ref. A, B, and C.

에서 약간 red shift 되어 측정되었다. 이는 일반적으로 이종 기판 위에 에피택시 성장 시, 성장되는 에피와 기판 사이의 격자 상수 차이와 열팽창계수로 인한 잔류응력 발생으로 인한다. 전처리 공정을 포함한 샘플들은 알파-갈륨 옥사이드 피크 위치의 이론값인 40.24°에 가까워졌다. 특히, 전처리 5분과 성장 10분 샘플(sample B)의 XRD 피크 값이 이론값에 가장 근접하게 나타났다. 이는 전처리 공정으로 인해 기판과 갈륨 옥사이드 사이의 격자 상수 차이에 의해 발생하는 응력을 완화시키는 데 영향을 주어 고품질 알파-갈륨 옥사이드 성장이 가능하다고 할 수 있다. 이러한 결정 품질의 향상은 광학 특성에도 영향을 미친다. 그림 4(b)는 UV-vis을 통해 각 샘플의 투과율을 측정된 결과이다. 투과율은 sample ref.를 제외한 모든 샘플이 가시광선 영역에서 80% 이상으로 매우 높게 나타났다. 특히 전처리 5분-성장 10분 샘플(sample B)은 투과율 90%에 근접하며, sample ref.와 비교하면 10%에 가까운 수치가 높아지는 것으로 나타났다. 이것은 전처리 공정으로 인해 표면 거칠기가 향상됨에 따라 나타난 결과로 볼 수 있다.

표 1은 성장된 알파-갈륨 옥사이드의 결정 특성을 더욱 상세하게 알아보기 위해 HR-XRD 측정을 통해 반치폭 값을 보여주고 있다.

(0006)과 (10-14) 반치폭은 전처리 5분-성장 10분 샘플(sample B)에서 각각 29, 2,011 arcsec으로 가장 낮았다. 그러나 sample A와 C의 경우에는 반치폭 측정 결과를 sample ref.와 비교해 볼 때 앞서 측정된 투과도와 표면 거칠기의 결과와는 다른 양상을 보이고

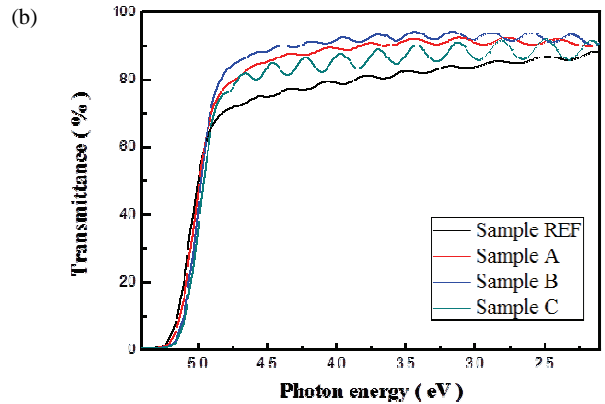
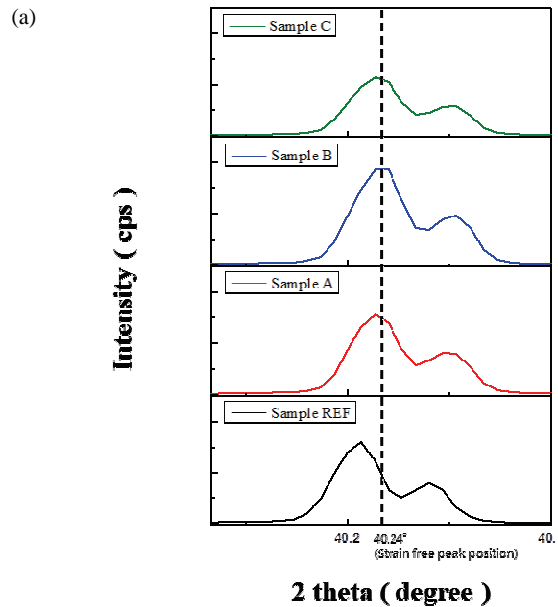


Fig. 4. XRD  $\theta/2\theta$  scan spectra and transmittance of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for sample ref. A, B, and C.

Table 1. (0006) and (10-14) FWHM of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for sample ref. A, B and C.

Sample	(0006)	(10-14)
Ref.	33 arcsec	2,317 arcsec
A	90 arcsec	2,235 arcsec
B	29 arcsec	2,011 arcsec
C	65 arcsec	2,671 arcsec

있다. 이는 전처리 공정 시간에 따라 표면에 형성되는 상대적으로 높은 비율의 갈륨 옥사이드 버퍼층에 의해 사파이어 기판과의 격자 상수 차이를 줄여주어 표면 특성이 개선되고 응력이 다소 완화되는 것으로 판단된

다. 그러나 형성된 결함밀도의 감소는 전처리 공정 시에 형성되는 버퍼층의 형태에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다. 특히 5분간의 전처리 공정을 통해 형성되는 높은 단차를 갖는 아일랜드 형태의 버퍼층상에 산소와 갈륨소스를 동시에 공급하면 측면 성장이 활발히 일어나 계면에서 형성된 결함들의 휘어짐을 발생시켜 결함밀도 감소에 유리한 것으로 판단된다.

이는 sample ref.와 sample B를 비교해 보면 앞서 측정된 다른 결과들과 유사한 경향을 보였으며, 특히 (0006) 반치폭이 매우 개선되어 나타났다. (0006) 반치폭은 c-축 방향의 변형과 관련이 있으며, 이를 바탕으로 나선형 전위밀도를 구할 수 있다. (10-14) 반치폭은 a-축과 c-축 방향과 관련이 있으며, 이를 바탕으로 칼날 전위밀도를 구할 수 있다. 측정된 반치폭의 값을 아래의 식에 대입하여 각각의 전위 밀도를 계산하였다 [21].

$$D_S = \frac{F_{(0006)}^2}{9b_c^2}, \quad D_E = \frac{F_{(10-14)}^2}{9b_a^2} \quad (1)$$

$D$ 는 전위 밀도를 나타내고,  $F$ 는 반치폭이고,  $b$ 는 버거스벡터를 나타낸다.

Ref. 샘플은 나선형 전위밀도  $3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ , 칼날 전위 밀도  $1.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  전처리 1분-성장 10분 샘플 (sample A)은 나선형 전위밀도  $2.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ , 칼날 전위 밀도  $1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ , 전처리 5분-성장 10분 샘플 (sample B)은 나선형 전위밀도는  $2.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ , 칼날 전위밀도는  $8.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , 전처리 10분-성장 10분 샘플 (sample C)은  $1.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ , 칼날 전위밀도  $1.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 로 계산되었다.

주목할 만한 것은 전처리 5분-성장 10분 샘플 (sample B)로, 가장 낮은 결과를 나타내었다.

이 결과를 볼 때 사파이어 기판 위에 알파-갈륨 옥사이드 성장 시에 전처리 공정을 통해서 성장 되는 박막의 결정성을 개선할 수 있으며 전처리 공정 시간에 따라서 특성이 개선될 수 있다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 HVPE 성장법을 이용하여 알파-갈륨 옥사이드 에피층 성장 시의 전처리 공정 효과에 대해 알아보았다. 전처리 공정 이후 성장된 에피층은 균열이 없는 경면으로 성장하였으며, 전처리 공정을 통해 모든 샘플의 광학 특성과 결정 특성이 향상되는 것으로 나

타났다. 특히, 전처리 5분 공정 이후 성장 된 샘플은 표면 거칠기가 1.603 nm로 매끄러운 표면 특성을 보였다. 또한, XRD 피크의 위치가 이론값에 가장 가깝게 나타났으며 (0006) 반치폭 29 arcsec으로 매우 낮은 값으로 나타났으며 투과율은 약 90% 정도로 매우 높게 나타났다. 따라서 전처리 공정이 사파이어 기판과 알파-갈륨 옥사이드의 헤테로-에피택시로 인한 격자 상수 차이에 의해 발생하는 응력을 완화해 주는 것으로 판단되며 사파이어 기판과의 갈륨 옥사이드의 계면에 형성되는 결함밀도는 전처리 공정의 시간에 따라 버퍼층의 형태에 따라 변화되는 것으로 사료된다.

#### ORCID

Dae-Woo Jeon

<https://orcid.org/0000-0002-4896-6862>

#### 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2018R1D1A1B07048429)으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] A. T. Neal, S. Mou, R. Lopez, J. V. Li, D. B. Thomson, K. D. Chabak, and G. H. Jessen, *Sci. Rep.*, **7**, 13218 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13656-x>]
- [2] S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Cary IV, F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, and M. A. Mastro, *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 011301 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5006941>]
- [3] S. Zhang, X. Lian, Y. Ma, W. Liu, Y. Zhang, Y. Xu, and H. Cheng, *J. Semicond.*, **39**, 8 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/8/083003>]
- [4] H. Murakami, K. Nomura, K. Goto, K. Sasaki, K. Kawara, Q. T. Thieu, R. Togashi, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and A. Koukitu, *Appl. Phys. Express*, **8**, 015503 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.7567/apex.8.015503>]
- [5] Y. Zhang, F. Alema, A. Mauze, O. S. Koksaldi, R. Miller, A. Osinsky, and J. S. Speck, *APL Mater.*, **7**, 022506 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5058059>]
- [6] J. W. Roberts, J. C. Jarman, D. N. Johnstone, P. A. Midgley, P. R. Chalker, R. A. Oliver, and F.C.P. Massabuau, *J. Cryst. Growth*, **487**, 23 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.02.014>]

- [7] T. Oshima, Y. Kato, M. Imura, Y. Nakayama, and M. Takeguchi, *Appl. Phys. Express*, **11**, 065501 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.7567/apex.11.065501>]
- [8] D. Shinohara and S. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**, 7311 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1143/jjap.47.7311>]
- [9] Y. Oshima, E. G. VÍllora, and K. Shimamura, *Appl. Phys. Express*, **8**, 055501 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.7567/apex.8.055501>]
- [10] V. Gottschalch, S. Merker, S. Blaurock, M. Kneiß, U. Teschner, M. Grundmann, and H. Krautscheid, *J. Cryst. Growth*, **510**, 76 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.01.018>]
- [11] Y. Zhang, F. Alema, A. Mauze, O. S. Koksaldi, R. Miller, A. Osinsky, and J. S. Speck, *APL Mater.*, **7**, 022506 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5058059>]
- [12] K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito, and S. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 020201 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.7567/jjap.51.020201>]
- [13] H. K. Son, Y. J. Choi, Y. H. Ra, J. H. Hwang, Y. J. Lee, M. J. Lee, J. H. Kim, S. W. Kim, T. Y. Lim, and D. W. Jeon, *J. Korean Cryst.*, **28**, 135 (2018).
- [14] H. K. Son, Y. J. Choi, J. H. Hwang, and D. W. Jeon, *Solid State Sci. Technol.*, **8**, Q3024 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0051907jss>]
- [15] K. Doverspike, L. B. Rowland, D. K. Gaskill, and J. A. Freitas, *J. Electron. Mater.*, **24**, 269 (1995). [DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02659686>]
- [16] Y. Ohba and R. Sata, *J. Cryst. Growth*, **221**, 258 (2000). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-0248\(00\)00695-3](https://doi.org/10.1016/s0022-0248(00)00695-3)]
- [17] H. K. Son and D. W. Jeon, *J. Alloys Compd.*, **773**, 631 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.230>]
- [18] S. Rafique, M. R. Karim, J. M. Johnson, J. Hwang, and H. Zhao, *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 052104 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5017616>]
- [19] M. Baldini, M. Albrecht, A. Fiedler, K. Irmscher, R. Schewski, and G. Wagner, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **6**, Q3040 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0081702jss>]
- [20] K. D. Leedy, K. D. Chabak, V. Vasilyev, D. C. Look, J. J. Boeckl, J. L. Brown, S. E. Tetlak, A. J. Green, N. A. Moser, A. Crespo, D. B. Thomson, R. C. Fitch, J. P. McCandless, and G. H. Jessen, *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 012103 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4991363>]
- [21] Y. Chen, H. Song, D. Li, X. Sun, H. Jiang, Z. Li, G. Miao, Z. Zhang, and Y. Zhou, *Mater. Lett.*, **114**, 26 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.09.096>]