

활성화 이온빔 처리된 Sapphire 기판 위에 성장시킨 MOCVD-GaN 박막의 격자변형량 측정

김 현 정¹, 김 공 호*

¹Chip T/G, 광통신연구소, LG 전선
한국과학기술연구원 세라믹공정 연구센터

Measurements of Lattice Strain in MOCVD-GaN Thin Film Grown on a Sapphire Substrate Treated by Reactive Ion Beam

Hyun-Jung Kim¹ and Gyeong-Ho Kim*

¹Chip T/G, Optoelectronic Device Lab., LG Cable Ltd.
Division of Materials, Korea Institute of Science and Technology

(Received September 21, 2000)

ABSTRACT

Introduction of the buffer layer and the nitridation of a sapphire substrate were one of the most general methods employed for the reduction of lattice defects in GaN thin films grown on sapphire by MOCVD. In an effort to improve the initial nucleation and growth condition of the GaN, reactive ion beam (RIB) of nitrogen treatment of the sapphire surface has been attempted. The 10 nm thick, amorphous AlO_xN_y layer was formed by RIB and was partially crystallized after the main growth of GaN at high temperature, leaving isolated amorphous regions at the interface. The beneficial effect of amorphous layer at interface in relieving the thermal stress between substrate and GaN film was examined by measuring the lattice strain value of the GaN film grown with and without the RIB treatment. Higher order Laue zone pattern (HOLZ) of $[\bar{2}201]$ zone axis was compared with simulated patterns and lattice strain was estimated. It was confirmed that the great reduction of thermal strain was achieved by RIB process and the amount of thermal stress was 6 times higher in the GaN film grown by conventional method without the RIB treatment.

Key words : GaN, HOLZ, Reactive ion beam, Sapphire substrate, Lattice strain

서 론

GaN 박막은 광소자로서의 응용에 적합한 직접천이

형 에너지 밴드구조를 가지고 있으며 물리적 안정성이 뛰어나 기존의 ZnSe 화합물보다 신뢰도가 높고 장시간 사용이 가능하다. GaN을 이용한 LED 제조에 관한 연구는 70년대에 시작되어 93년 말 일본의 니

* Correspondence should be addressed to Dr. Gyeong-Ho Kim., Division of Materials, Korea Institute of Science and Technology, 39-1, Hawolgok-dong, Sungbuk-ku, Seoul 136-791, Korea. Ph.: 02-958-5525, FAX: 02-958-5529, E-mail: ghokim@kist.re.kr

치아화학이 휘도가 1 칸델라인 고휘도 청색 LED를 개발하기까지 약 20여 년 동안의 연구로 이루어진 첨단 반도체 기술이다(Nakamura et al., 1994; Akasaki et al., 1997).

응용범위가 넓은 GaN은 물질의 특성상 벌크 형태의 단결정 제조가 매우 어려워 현재 상업화된 것은 화학기상증착법(MOCVD)을 이용하여 기판 위에 에피텍셜 성장한 박막물질로서 사용한다. 따라서 GaN 박막은 이종재료를 기판으로 사용하여 성장시키며 이에 따른 기판의 선택이 근본적인 문제점으로 대두된다. GaN과 이종기판 물질의 격자상수와 열팽창계수가 현저한 차이를 나타내므로 증착 초기의 핵생성 단계에서부터 기판과의 부정합에 기인한 격자결함이 발생될 수 있다. 특히 GaN 박막 성장에 사용되는 이종기판으로는(0001) Al₂O₃ 단결정(사파이어)의 사용이 대표적이나 GaN과의 격자 부정합이 16%나 되므로 박막 성장 초기부터 발생하는 부정합 전위, threading 전위, 적층결함 및 inversion domain boundary 등의 결함이 관찰된다(Strite et al., 1992). 이러한 결함의 감소는 소자의 수명과 발광효율을 높이는데 가장 중요한 관건이 되므로 결함밀도를 줄이는 노력이 여러 방법을 통해 시도되고 있다.

사파이어 기판과 같은 이종기판의 사용으로 발생하는 격자 부정합은 기판과 GaN 박막의 계면에 결함을 도입시키므로 계면처리 방법을 통해 격자결함을 최소화할 수 있다. 종래에 시도되었던 방법으로는 완충층을 사용하는 것이며, 완충층은 기판과 박막간의 격자부정합에 의한 계면 자유에너지를 흡수하는 역할을 하므로 GaN 성장초기에 발생하는 고립 island형 핵생성을 억제하여 균일한 GaN 핵생성을 돕는 것으로 보고되고 있다(Byun et al., 1996; Wu et al., 1996). 통상적으로 Amano(1986) 등에 의한 AlN이나 Nakamura(1991)에 의해 시도되어 성공을 거둔 GaN 완충층을 사용한다. 이와 더불어 기판 표면을 개질화하는 방법이 있으며 기판의 질화처리를 통해 완충층 특성을 향상시키는 방법이 있다. 질화처리법은 고온에서 N₂ 또는 NH₃ 가스를 기판 표면에 일정시간 노출함으로써 통상적으로 사용되는 사파이어 기판의 표면에 준안정상태의 얇은 층을 형성한다. 즉 GaN보다 기판과의 부정합도가 작은 Al과 N원자의 반응생성물을

형성해줌으로서 부정합에 의한 잔류응력을 줄여 완충층의 초기 핵생성을 향상시키는 방법이다. GaN 성장 직전 증착의 일련과정으로서 행해지는 질화처리법은 처리시간에 매우 민감하게 변화하여 적정시간 동안 처리하여 형성된 질화처리층은 2차원적 성장을 촉진시키지만 장시간 질화처리할 경우에는 AlN island나 돌출부 등이 형성되며 특히 질화처리 초기에는 기판의 평활도가 원래 기판이 가지는 표면보다 좋아지다가 질화처리 시간의 증가에 따라 돌출부의 발생이 증가하여 점점 저하됨이 보고되고 있다. Hasimoto(1998) 등은 질화처리 시간에 따라 오히려 거친 표면의 결과를 초래하여 저품위의 GaN이 형성되었음을 보고하였고 Uchida(1997) 등은 질화처리된 사파이어 기판의 표면에 비정질 형태의 화합물이 생성되어 돌출부 표면을 형성한다고 보고하였다. 질화처리의 적정 조건의 변수가 질화처리 시간과 온도임을 감안할 때 재현성의 문제를 가진다. 따라서 질화처리법보다 재현성이 우수하고 간단한 표면처리법으로서 활성화 이온빔 처리법이 제안되었다. 사파이어 기판의 표면에서 질소이온빔 처리에 의하여 생성되는 화합물은 비정질 AlO_xN_y계인 것으로 보고되고 있으며 대기 중에서 장시간 보존과 세척공정을 거치는 동안에도 화학적으로 안정한 상으로 존재한다(Byun et al., 1998). 특히 기판에 조사된 질소이온빔의 분포가 균일하고 처리에너지에 따라 화학적, 물리적 변화량을 제어할 수 있으므로 공정 측면에서의 기판 표면개질 효과가 더욱 우수하다.

Byun(1998) 등은 활성화 이온빔 처리된 사파이어 기판 표면에 약 10 nm 두께의 비정질층이 존재하며 고온에서 GaN 박막을 성장시키는 도중 결정화되어 부분적으로 비정질 영역이 계면부위에 존재하고 있음을 보였다. Mahajan(1996)에 의하면 이와 같은 얇은 비정질층은 격자부정합이 큰 기판/박막 계면에서 효과적으로 threading 전위의 수를 감소시킬 수 있으며 비정질 층의 변형을 통해 냉각 시 도입되는 열응력을 감소시킬 수 있음을 제안하였다. 따라서 활성화 이온빔 처리법은 기판 표면의 평활도 향상을 통해 격자결함을 감소시키며 아울러 사파이어 기판에 성장된 GaN 박막 내부의 열응력을 감소시켜 광학적 특성을 향상시킬 수 있는 우수한 표면처리법이다. 본 연

구에서는 수렴성 빔 전자회절법을 이용하여 사파이어 기판 위에 성장된 GaN 박막의 격자변형률을 직접 측정함으로써 활성화 이온빔 처리에 의한 열응력 감소효과를 정량적으로 평가하는 것을 목표로 하였다.

재료 및 방법

1. 사파이어 기판의 활성화 이온빔 처리공정 및 GaN 박막 증착공정

GaN 박막 증착을 위한 사파이어 기판의 활성화 이온빔 처리는 유기물과 산화막의 제거를 위한 세척공정을 거친 기판에 총 주입량을 10^{16} cm^{-2} 으로 고정하고 이온빔의 전류와 전압을 변화시키며 처리하였다. 이온빔의 에너지는 $300 \sim 1,200 \text{ eV}$, 압력은 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ torr}$, 이온주입량은 10^{16} cm^{-2} 그리고 이온빔 전류는 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{A}$ 로 변화시켰다. 활성화 이온빔 처리된 기판은 87.4°C 이상의 TEC (trichloroethylene) 용매에서 20분간 처리한 후 56.2°C 이상의 아세톤에서 20분간 그리고 64.7°C 이상의 메탄올에서 20분간의 순서로 3단계 유기물 세척을 한 후 탈이온수로 수 회 초음파 세척을 하여 건조시키고 즉시 MOCVD 반응기에 장착하였다. 수평식 반응기에서 Ga와 N의 공급원을 각각 TMG (trimethyl gallium)와 NH_3 (99.996%) 그리고 이송가스로는 고순도 H_2 (99.9999%)가스를 사용하였다. 수평식 반응기는 직경 38 mm의 석영관을 사용하였으며 반응기 내부에는 고순도 탄소를 가공하여 제작된 susceptor 위에 기판을 위치시켰다. susceptor는 흑체복사를 전제로 하여 4개의 2kW 출력의 IR (infrared) 램프를 병렬 연결한 반사로를 이용하여 가열하였고 반응기 내부의 온도는 K-형 열전대를 사용하여 측정하였다. 반응가스의 유량은 질량유량조절기로 제어하고 반응기의 압력은 2부분으로 구분하였다. 먼저 TMG 유량을 조절하기 위한 버블러의 압력을 needle 밸브로 미세 조절하고 반응기 내부의 압력을 throttle 밸브를 이용하여 대기압보다 낮은 300 torr를 유지하였다. GaN의 완충층 성장을 위하여 기판을 수소분위기 하에서 $1,080^\circ\text{C}$ 에서 120초간 열세척한 후 암모니아와 이송가스를 유입하여 반응기 내부압력을 740 torr로서 유지하고 완충층의 성장온도인 560°C 까지

서서히 가열시킨 후 90초간 성장시켰다. GaN 박막은 $1,080^\circ\text{C}$ 까지 $0.2^\circ\text{C}/\text{초}$ 의 속도로 서서히 증가시켜 60분 내외의 반응으로 GaN 에피박막을 성장시켰다. 각 단계별 TMG의 유량은 각각 70과 $112 \mu\text{mol}/\text{min}$ 이었으며 NH_3 의 유량은 3,500 sccm, 그리고 이송가스의 유량은 1,850 sccm으로 유지시켰다.

2. 투과전자현미경 시료제작 및 분석

GaN 박막의 단면시료는 3 mm 직경의 Ti 그리드 내부에 약 $0.5 \times 2 \text{ mm}$ 크기의 시료를 표면이 마주 접하도록 삽입한 후 에폭시 (Gatan, G-1)로 경화시켰다. 경화된 시편은 약 $100 \mu\text{m}$ 두께로 연마된 후 dimple grinder (Gatan, Model 656)를 사용하여 양면 연마로 최종 두께인 $20 \mu\text{m}$ 까지 시편을 연마하였다. 이온밀링기는 Gatan사의 Duomill (Model 600)을 사용하였으며 6 kV의 가속전압 하에서 11° 의 양면 밀링각도로 80° 의 single sector control mode로 시편을 밀링하였고 Gun current는 0.5 mA로 유지시켰다. 미세조직의 관찰을 위하여 사용된 투과전자현미경은 Philips사의 CM-30으로 200 kV의 가속전압으로 사용하였다. 상온에서 GaN의 $[\bar{2}201]$ 정대축도형을 얻고 수렴각 2 nm^{-1} 의 조건으로 고차 Laue 도형 (HOLZ)을 기록하였다. 사용된 전자탐침의 크기는 8 nm이었다. Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE)법으로 성장시킨 약 $200 \mu\text{m}$ 두께의 GaN을 표준시료로 사용하여 이 시료의 표면부에서 같은 조건으로 HOLZ 도형을 얻었다. 또한 전산모사 도형은 동역학적 (dynamic) 전산모사의 경우 EMS-Online 프로그램을 사용하였고 운동학적 (kinematic) 전산모사는 IdealMicroscope (EMLab Software) 프로그램을 이용하였다.

결과 및 고찰

사파이어 기판 위에 성장된 GaN 박막의 미세구조를 투과전자현미경 (TEM)으로 관찰한 사진이 Fig. 1 (a)이며 사파이어 기판과의 계면에서 생성된 전위가 GaN 박막의 성장방향을 따라 전파했음을 보여준다. 활성화 이온빔 처리를 하지 않은 사파이어 기판 위에 성장된 GaN 박막의 전위밀도는 10^9 cm^{-2} 이었으며 활성화 이온빔 처리에 의해 GaN의 전위밀도는 10^8

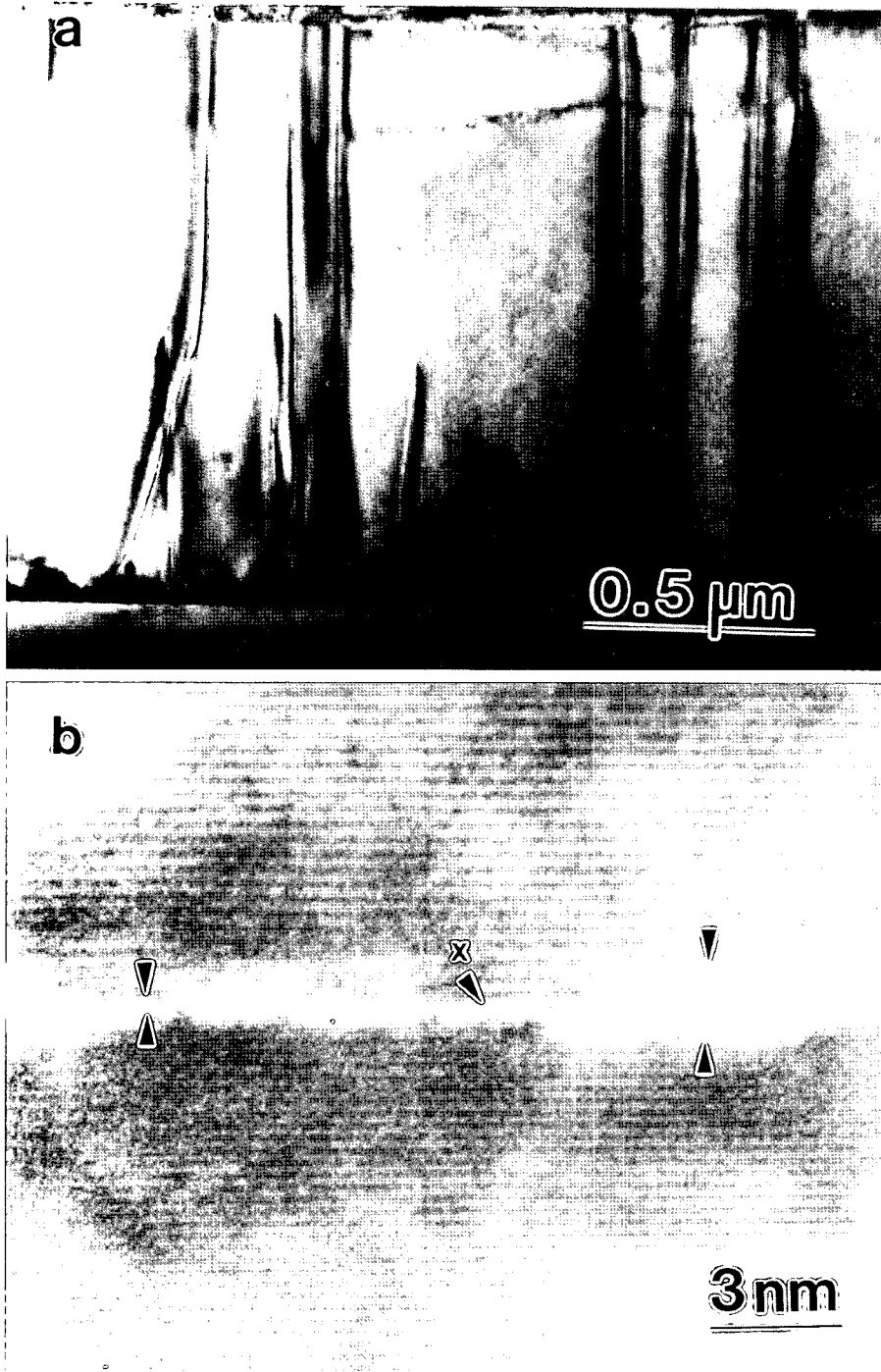


Fig. 1. TEM images of GaN film grown on sapphire substrate, (a) microstructure of GaN film containing dislocations, (b) HREM image of GaN/sapphire interface treated with reactive ion beam showing amorphous regions at the interface.

cm⁻²으로 감소하였다. 전위밀도 감소의 한 가지 원인으로 계면구조의 변화를 들 수 있는데 Fig. 1(b)는 활성화 이온빔 처리된 사파이어 기판과 그 위에 성장된 GaN 계면의 원자구조를 보여주는 고분해능 TEM 사진으로 계면부위에 불연속적으로 비정질 상이 존재함을 알 수 있다. Fig. 1(b)에 “x”로 표시된 부위에는 비정질 상이 없이 사파이어 기판과 GaN이 직접 접촉하고 있으나 주위에는 두께가 균일하지 않은 비정질 상이 분포되어 있다. 만일 계면에 비정질 상이 존재하지 않으면 사파이어 기판과 GaN 간의 격자부정합(성장온도에서 15.8%)에 의한 응력은 부정합전위의 생성에 의해서 완화될 수 있으며 따라서 전위밀도는 높아지게 된다. 반면 계면에 분포하는 비정질 층은 고온에서 쉽게 변형되므로 격자부정합에 의한 응력을 완화시켜주고 이 결과로 부정합 전위의 생성이 억제되어 전위밀도의 감소를 얻을 수 있다. 비정질 층의 전위밀도 감소효과 이외의 또 한가지 역할은 열응력을 감소시켜 주는 것으로 성장이 완료된 GaN이 상온으로 냉각되는 도중 사파이어 기판과 GaN의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 열응력을 비정질 상의 변형으로 흡수하여 GaN 내의 잔류응력을 줄여줄 수 있다. 활성화 이온빔 처리에 의한 잔류응력 감소효과를 검증하는 방법으로 GaN 박막의 격

자상수를 측정하여 격자변형량을 비교함으로써 GaN 내에 존재하는 열응력의 크기를 직접 확인할 수 있다.

수렴성 빔 전자회절도형의 투과원반에서 관찰되는 HOLZ선은 시료의 격자상수 변화에 민감하게 변화하므로 정확한 격자변형량의 측정이 가능하다. GaN 박막의 열응력 분포를 측정하기 위해서 선택된 정대축은 $[\bar{2}201]$ 이며 Fig. 2는 $[\bar{2}201]$ 정대축에서 얻어지는 수렴성 빔 전자회절도형과 투과원반 내에 존재하는 HOLZ선 들을 보여준다. Fig. 3은 실험적으로 얻어진 HOLZ 도형의 사진으로서 도형의 수직 이동분선을 따라 중앙에 거울대칭면이 존재함을 보여준다. 이 정대축 도형은 비교적 측정하기가 쉬운 HOLZ선 들의 교차점을 많이 가지고 있으며 200 kV의 가속전압 하에서도 선명한 HOLZ선 들을 보여준다. Fig. 4(a)는 실험적으로 얻어진 HOLZ 도형을 구성하는 각각 HOLZ선 들의 지수를 보여주며 두 종류의 HOLZ선 들로서 도형이 구성되어 있음을 알 수 있다. 즉 $(538\bar{3})$, $(358\bar{3})$, $(505\bar{9})$ 그리고 $(055\bar{9})$ 는 1차 Laue zone에서 얻어지며 $(hu + kv + it + lw = 1)$, $(\bar{3}85\bar{1}9)$ 와 $(\bar{8}35\bar{1}9)$ 선은 3차 Laue zone에서 $(hu + kv + it + lw = 3)$ 얻어지고 있다. 위에 열거한 6개의 HOLZ선들은 Fig. 4(a)의

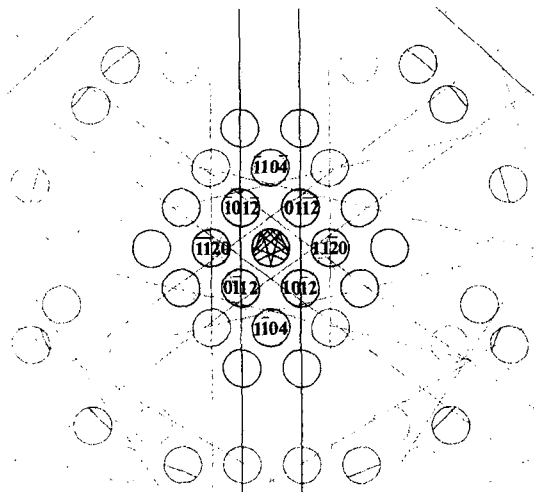


Fig. 2. Simulated CBED and HOLZ pattern observed at $[\bar{2}201]$ zone axis.

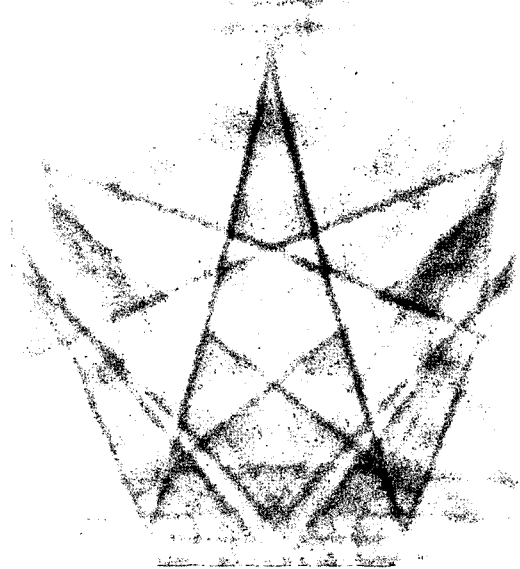


Fig. 3. $[\bar{2}201]$ zone axis HOLZ pattern obtained from GaN at 200 kV.

①-⑦로 표시된 7개의 위치에서 교차하고 있다. 일반적으로 교차점간의 비를 측정하여 비교함으로써 측정 시 발생하는 오차를 줄일 수 있어 본 연구에서도 교차점간의 비를 측정하는 방법을 사용하였다. 즉 Fig.4(a)의 점 ①은 $(\bar{5}38\bar{3})$ 과 $(358\bar{3})$, 점 ②는 $(\bar{3}85\bar{1}9)$

와 $(835\bar{1}9)$, 점 ③은 $(\bar{5}05\bar{9})$ 와 $(055\bar{9})$, 점 ④는 $(\bar{3}85\bar{1}9)$ 와 $(\bar{5}38\bar{3})$, 점 ⑤는 $(358\bar{3})$ 과 $(835\bar{1}9)$, 점 ⑥은 $(\bar{5}38\bar{3})$ 과 $(055\bar{9})$, 그리고 점 ⑦은 $(358\bar{3})$ 과 $(\bar{5}05\bar{9})$ 선이 교차하는 점으로서 정의된다. 또한 교차점 ①과 ②의 거리를 a, ①과 ③의 거리를 b로 놓아 a/b의 비

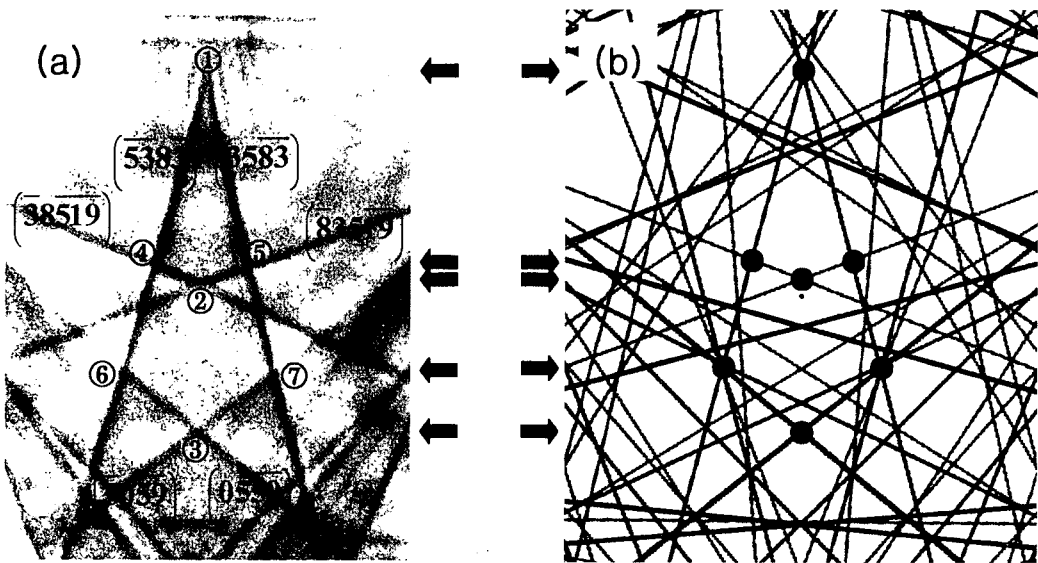


Fig. 4. Comparison of GaN $[\bar{2}201]$ HOLZ patterns, (a) Experimental pattern with indexed HOLZ lines, (b) Simulated HOLZ pattern from dynamic simulation method.

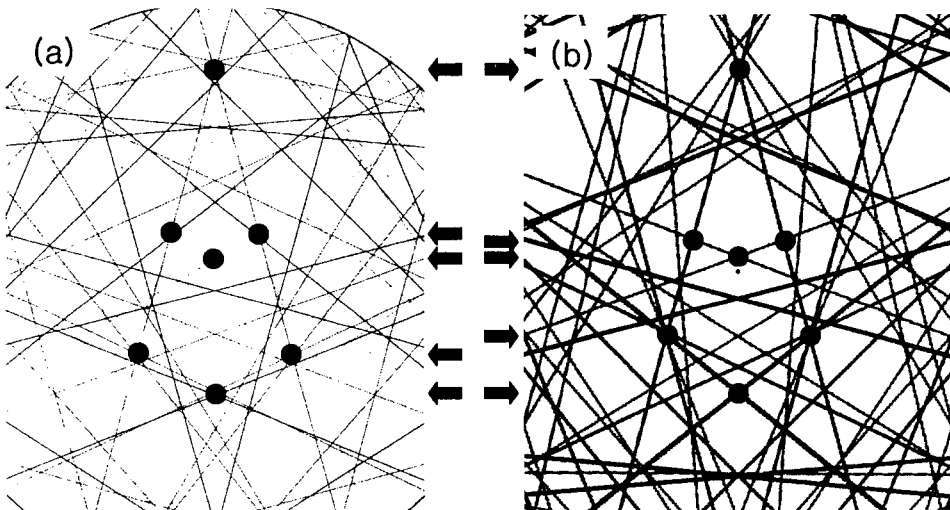


Fig. 5. Comparison of simulated GaN $[\bar{2}201]$ HOLZ patterns, (a) HOLZ pattern generated from kinematic simulation, and (b) HOLZ pattern from dynamic simulation.

를 구했고 유사한 방법으로 교차점 ④와 ⑤의 거리를 c , ⑥과 ⑦의 거리를 d 로 하여 c/d 의 값을 계산하였다. Fig. 4(b)는 동역학적 계산을 통해 얻어진 전산모사 도형으로서 Fig. 4(a)와 교차점의 위치를 화살표의 위치로 비교하면 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 반면 운동학적 전산모사법을 이용하면 그 결과는 동역학적 전산모사 결과와 큰 차이를 보인다. 즉 운동학적 전산모사 도형인 Fig. 5(a)와 동역학적 전산모사 도형인 Fig. 5(b)에서 교차점의 위치를 화살표로 비교하면 교차점 ④, ⑤ 그리고 ⑥과 ⑦의 위치가 다른 것을 알 수 있다. 운동학적 전산모사에서 발생하는 이런 오차는 HOLZ선의 차수가 다를 경우 특히 커지는 것으로 알려져 있으며 앞에서 언급한 것과 같이 GaN의 $[2\bar{2}01]$ HOLZ 도형은 1차 Laue zone으로부터 회절선과 3차 Laue zone의 회절선이 혼합되어 구성되어 있으므로 운동학적 전산모사의 오차를 줄일 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 동역학적 전산모사법을 이용하여 GaN 박막 내의 격자변형량을 측정하였다.

육방정계에 속하는 GaN은 두 개의 독립적인 격자상수인 a_0 와 c_0 가 있으므로 격자상수 변화에 따른 HOLZ 도형의 전산모사를 위해서는 a_0 와 c_0 의 변화가 서로 의존적으로 변화한다는 가정을 도입하여야 한다. 이것은 만일 a_0 와 c_0 값이 독립적으로 변화할 수 있다면 측정된 격자변형량을 만족시키는 a_0 와 c_0 격

자상수의 조합이 한 개 이상이 될 수 있기 때문이다. 따라서 GaN의 단위포의 체적이 일정한 값을 유지하면서 a_0 와 c_0 가 변화한다는 가정이 필요하며 이 가정 하에서 a-축 격자상수인 a_0 만을 변화시키며 전산모사를 통한 격자변형량의 측정이 가능하다. 이와 같은 가정은 사파이어 기판 위에 성장시킨 GaN의 경우에 정당성을 가지며 그 이유는 a-축 방향의 격자부정합이나 열팽창계수의 차이로서 격자결합이나 열응력이 발생되며 c-축은 단지 GaN의 Poisson 상수에 의해 a-축의 변화에 상응하는 값으로 변화되기 때문이다. GaN 박막의 격자상수 값은 성장조건에 따라 변화하는 것으로 알려져 있으며 Kicielowski (1996) 등은 $a_0 = 0.31878 \pm 0.00003$ nm, $c_0 = 0.51850 \pm 0.00002$ nm로, Morkoc (1994) 등은 $a_0 = 0.3189$ nm, $c_0 = 0.5185$ nm로 그리고 Leszczynski (1996) 등은 $a_0 = 0.31878$ nm, $c_0 = 0.5185$ nm로 보고하고 있다. 격자상수 값의 차이는 GaN의 성장 도중 도입된 불순물, 특히 침입형 원소인 H, C와 O에 의해 최대 1%까지 격자상수가 변화할 수 있기 때문이다 (Kicielowski, 1999). 본 연구에서는 GaN의 격자상수를 $a_0 = 0.31880$ nm, $c_0 = 0.5185$ nm로 놓고 이로부터 단위포의 체적을 0.0456356 nm³로 고정시킨 후 전산모사 도형을 $a_0 = 0.31842 - 0.31902$ nm (또는 $c_0 = 0.51974 - 0.51778$ nm)로 변화시키면서 얻었다. 전산모사 도형으로부터 교차점 간의 거리비인 a/b 와 c/d 를 구하여 a_0 의 함수로서 표시하였

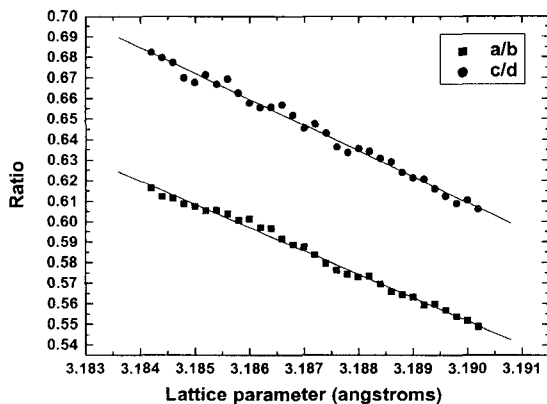


Fig. 6. Relationship between the distance ratios (a/b and c/d) of the intersection points in the simulated HOLZ patterns and the lattice parameter (a_0) of GaN.

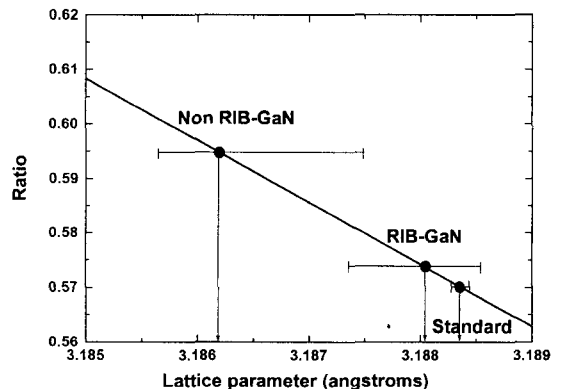


Fig. 7. Distance ratios measured from the HOLZ patterns and corresponding lattice parameters (a_0) of GaN from the standard sample, RIB-treated GaN and GaN grown on sapphire without RIB treatment.

다. Fig. 6은 그 결과로서 a_0 의 증가에 따라 a/b 와 c/d 모두 감소하는 경향을 보였다. 최소자승법으로 직선의 식을 구하면 $a/b = 36.85856 - 11.38153 \cdot a_0$ (angstroms), 그리고 $c/d = 40.69601 - 12.56639 \cdot a_0$ (angstroms)의 관계식을 얻을 수 있다. 이 직선 식은 실험적으로 측정된 HOLZ 도형의 a/b 와 c/d 로부터 시료의 격자상수를 역으로 계산하는데 사용된다. 시료로부터 얻어진 HOLZ 도형의 c/d 측정치는 a/b 의 측정값과 비교하여 비교적 큰 편차를 가지고 있었으며 따라서 격자상수 계산에는 a/b 의 값을 사용하였다.

HVPE로 성장시킨 GaN 표준시료는 약 200 μm 두께로 성장된 GaN으로서 성장 후 기판에서 제거된 상태이므로 기판에 의한 영향이 무시될 수 있고 따라서 표준시료로서 사용이 가능하다. 표준시료에서 얻어진 a/b 의 평균값은 0.56988로서 이 수치는 $a_0 = 0.31884 \text{ nm}$ 에 해당되고 전산모사의 표준 격자상수로서 사용된 $a_0 = 0.31880 \text{ nm}$ 에 비해 0.01% 큰 값으로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 활성화 이온빔 처리된 사파이어 기판에 성장시킨 GaN의 경우 평균 a/b 값은 0.5741로서 격자상수로 환산하면 $a_0 = 0.31880 \text{ nm}$ 로서 표준시료에 비해 0.013%의 압축변형률을 가지고 있다. 또한 활성화 이온빔 처리를 하지 않은 경우 $a/b = 0.59499$ 또는 $a_0 = 0.3186 \text{ nm}$ 로서 표준시료와 비교하면 0.075%의 압축변형률을 가진다. 측정값의 편차는 표준시료에서 가장 작았으며 활성화 이온빔 시편과 처리되지 않은 시편의 측정값 편차는 표준시료의 약 10배에 달하고 있다. 이것은 GaN 박막 내의 격자결합의 밀도와 관련이 있으며 전위밀도를 비교하면 표준시료에 비해 100배가 높은 $1 \times 10^8/\text{cm}^2$ 수준의 값을 가지기 때문이다. 이런 경우 전위 주위의 격자변형이 측정값에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

사파이어 기판 위에 성장된 GaN 박막의 경우 계면에서 정합을 이루는 GaN의 $(\bar{1}100)$ 면간거리는 0.2761 nm이며 사파이어의 $(11\bar{2}0)$ 면간거리는 0.2379 nm이므로 상온에서의 격자부정합은 16.1%에 이른다. 성장온도인 1,050°C에서는 열팽창을 고려하면 15.8%의 격자부정합을 가지며 이것을 흡수하기 위하여 GaN은 수축을 그리고 사파이어는 팽창을 하여야 하고 또한 부정합 전위의 생성을 통해 응력을 감소시킨다. 만일 고온에서 쉽게 변형을 일으킬 수 있는 비정질 층이

계면에 존재한다면 위에서 제시한 부정합 변형률은 비정질 상의 소성변형을 통해 쉽게 완화가 될 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 측정된 GaN의 격자변형률은 사파이어 기판의 활성화 이온빔 처리를 통해 -0.075%에서 -0.013%로 변화하였고 이는 약 1/6의 수준으로 격자변형률 또는 잔류응력이 감소하였음을 의미한다. 이와 같은 잔류응력의 완화는 활성화 이온빔 처리로서 생성된 비정질 층이 사파이어와 GaN 박막의 계면에 분포하여 격자부정합과 열팽창계수의 차이에 의해 발생하는 응력을 비정질 층의 변형을 통해 흡수하였다고 판단된다.

참고 문헌

- Akasaki I, Amano H: Progress and prospect of Group-III Nitride Semiconductors. *J. Cryst. Growth* 175/176: 29-36, 1997.
- Amano H, Sawaki N, Akasaki I, Toyoda Y: Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using and AlN buffer layer. *Appl Phys Lett* 48: 353-355, 1986.
- Byun D, Jeong J, Kim HJ, Koh SK, Choi WK, Park D, Kum DW: Reactive ion (N_2^+) beam pretreatment of sapphire for GaN growth. *Thin Solid Film* 326: 151-153, 1998.
- Byun D, Kim G, Lim D, Lee D, Choi IH, Park D, Kum DW: Optimization of the GaN-buffer growth on 6H-SiC. *Thin Solid Films* 283: 256-260, 1996.
- Hashimoto T, Terakoshi Y, Ishida M, Yuri M, Imafuji O, Sugino T, Yoshikawa A Itoh K: Structural Investigation of sapphire surface after nitridation. *J Cryst Growth* 189/190: 254-258, 1998.
- Kisielowski C: Strains in GaN thin films and heterostructures. In: Pankove JJ, Moustakas TD, ed, *Semiconductors and Semimetals* 57, pp. 275-317, Academic Press, New York, 1999.
- Kisielowski C, Kruger J, Suski T, Ager JW, Jones E, Liliental-Weber Z, Rubin M, Weber ER, Bremser MD, Davis RF: Strain related phenomena in GaN thin films. *Physical Review B* 54: 17745-17753, 1996.
- Leszczynski M, Teisseyre H, Suski T, Grzegory I, Bockowski M, Jun J, Porowski S, Pakula K, Baranowski JM, Foxton CT, Cheng TS: Lattice parameters of gallium nitride. *Appl*

- Phys Lett 69 : 73-75, 1996.
- Mahajan S: Large Lattice Mismatch Epitaxy, MRS sym. Proc. 410 : 3-15 1996.
- Morkoc H, Strite S, Gao GB, Lin ME, Sverdlov B, Burns M: Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies. J Appl Phys 76 : 1363-1398, 1994.
- Nakamura S: GaN growth using GaN buffer layer. Jpn J Appl Phys 30 : L1705-L1708, 1991.
- Nakamura S, Mukai T, Senoh M: Candela-class High-brightness InGaN/AlGaIn Double-heterostructure Blue-light-emitting Diodes. Appl Phys Lett 64 : 1687-1689, 1994.
- Strite S, Morkoc H: GaN, AlN, and InN: A review. J Vac Sci Tech B10 : 1237-1266, 1992.
- Uchida K, Watanabe A, Yano F, Kouguchi M, Tanaka T, and Minigawa S: Characterization of nitrided layers and their effect on the growth and quality of GaN. Solid-state Electronics 41 : 135-139, 1997.
- Wu XH, Fini P, Keller S, Tarsa EJ, Heying B, Mishra UK, Denbaars SP, Speck JS: Morphological and Structural Transmissions in GaN films Grown on Sapphire by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition. Jpn J Appl Phys 35 : L1648-L1651. 1996.

< 국문 초록 >

사파이어 기판을 이용한 GaN 박막성장에서 완충층의 사용과 기판의 질화처리는 GaN 박막 내의 격자결함을 줄이는 가장 보편적인 방법이다. GaN 박막의 초기 핵생성과 성장 거동을 향상시키기 위한 새로운 방법으로 사파이어 표면을 질소 활성화 이온빔으로 처리하는 방법이 시도되었다. 활성화 이온빔 처리의 결과 약 10 nm 두께의 비정질 AlO_xN_y 층이 형성되었으며 GaN의 성장온도에서 부분적으로 결정화되어 계면 부위에 고립된 비정질 영역으로 존재하였다. 계면에 존재하는 비정질 층은 기판과 박막사이에서 발생하는 열응력을 효과적으로 감소시키는 역할이 가능하며 이를 확인하기 위하여 활성화 이온빔 처리에 의한 GaN 박막 내의 격자변형량 차이를 비교하였다. GaN 박막에서 얻어진 [2201] 정대축 고차 Laue 도형을 전산모사 도형과 비교하여 격자변형량을 측정하였다. 본 연구의 결과 활성화 이온빔 처리를 하지 않은 기판 위에 성장시킨 GaN 박막의 격자변형량은 처리한 경우에 비해 6배 이상 높은 값을 가졌으며 따라서 활성화 이온빔 처리에 의해 GaN 박막의 열응력은 크게 감소함을 확인하였다.