Journal of the Korean Association of Crystal Growth
Vol. 10, No. 5 (2000) 350-355

GaN epitaxial growths on chemically and mechanically polished sapphire wafers grown by Bridgeman method

Keunjoo Kim and Jae-Cheon Koh*

Department of Semiconductor Technology, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea
**Chemical Process and Engineering Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Taejon 305-600, Korea*
(Received August 8, 2000)

Abstract The fabrication of sapphire wafer in C plane has been developed by horizontal Bridgeman method and GaN based semiconductor epitaxial growth has been carried out in metal organic chemical vapour deposition. The single crystalline ingot of sapphire has been utilized for 2 inch sapphire wafers and wafer slicing and lapping machines were designed. These several steps of lapping processes provided the mirror-like surface of sapphire wafer. The measurements of the surface flatness and the roughness were carried out by the atomic force microscope. The GaN thin film growth on the developed wafer was confirmed the wafer quality and applicability to blue light emitting devices.

수평 Bridgeman법으로 성장된 사파이어기판 가공 및 GaN 박막성장

김근주, 고재천*

울산과학대학 반도체응용과, 울산, 680-749
*한국화학연구소 화학공정연구센터, 대전, 305-600
(2000년 8월 8일 접수)

요 약 수평 Bridgeman방식으로 성장된 C축 방향의 사파이어 결정기판을 연마 가공하였으며, 또한 유기금속 기상화학 증착 방법으로 사파이어 기판 위에 GaN 박막을 증착하였다. 사파이어 인고트를 성장하여 2인치 사파이어 기판으로 이용하였으며 웨이퍼 절편장치 및 연마장치를 개발하였다. 이러한 다단계의 연마 가공은 기판 표면을 경면화하였다. 표면 평탄도 및 조도는 원자힘현미경으로 측정하였다. 개발된 사파이어 기판위에 성장된 GaN 박막의 특성 및 청색광소자로의 응용 가능성을 확인하였다.

1. 서 론

Mohs경도가 9인 사파이어결정(Al_2O_3)은 내열성과 경도가 GaN 결정과 비슷한 강옥(corundum)이며, GaN계 반도체 박막은 Mohs 경도가 10 정도로 매우 높고, 용융점(melting point)가 매우 높아 알려지지 않았으며, 60 kbar의 고압에서 2573 K의 고온에서도 녹지 않는다[1]. 이러한 GaN 반도체 단결정화의 어려움으로 인해, 광소자에 필요한 다층구조의 박막을 적층 할 수 있는 이용 가능한 양질의 GaN 단결정 자체 기판이 존재하지 않아 사파이어 기판이 대용되고 있다. 두 결정의 격자상수차이는 대략 13.6 %이며, 계면(interface)에서 기하학적인 격자 부정합 (geometrical lattice-mismatch) 상태를 잘 나타낸다[2]. 결국 이러한 부정합은 계면에서 GaN 결정성장시 스트레스(stress)를 야기하고 변형에너지를 수반함으로써 전위(dislocation)가 박막 표면에 까지 진행하여 결정질을 악화시키게 된다. 또한 이러한 계면특성은 사파이어기판의 표면광택처리의 거칠기에 매우 민감하게 의존하며, 그 정도에 따라서는 전혀 박막성장이 불가능하게 되기도 한다. 이러한 사파이어 기판의 표면조도와 함께 사파이어 결정질은 고온에서 GaN 결정성장시 열변형 및 전위에 의한 크랙(crack)의 진행을 야기하기도 한다.

기존의 경우 사파이어결정은 시계유리판이나 적외선 window 등에 공업용으로 사용되었다. 대부분 이러한 용도에 사용되는 사파이어는 사파이어결정 종정(seed)를 가열하여 상부에서 알루미나 분말을 분사시킴으로써 종유석처럼 성장시키는 Verneuil법으로 제조되고 있다[3]. 하지만 최근의 청색 광소자용이나 고주파 전자소자용(SOS : silicon on sapphire)용으로 사용하기 위해서는 분말을 완전히 녹여 용융상태로부터 종정 부위를 식혀가면서 성장하는 Czochralski

(CZ)법, heat exchange method(HEM)법, horizontal Bridgeman(HB)법 등이 애용되고 있다[4]. 종정을 회전시키면서 끌어당기면서 결정을 성장시키는 CZ법이 가장 보편화되어 있으나, 최근에는 HEM법으로 결정을 많이 얻고 있다. 이 방법은 정지상태에서 성장하기 때문에 기계적인 운동이 없어 비교적 좋은 결정질을 확보할 수 있으나, 기술적으로 seed와 융액 계면에서 온도조절과 seed가 모두 녹지 않도록 국소적인 냉각문제가 어려운 편이다. 한편 HB 방법은 국소 대역 용융(zone melting)과 수평방향의 결정화를 결합한 형태로서 비교적 결정성장이 용이하고, 용융액 표면에서의 불순물 증발로 우수한 결정질을 확보할 수 있으며, 대면적화가 가능하다[4].

본 연구에서는 비교적 성장이 용이한 HB법으로 인고트를 성장하고 방향키(orientational flat zone)를 결정방향에 일치시키도록 Laue X-ray 회절법으로 결정한 후. ID(inner diameter) saw로 slicing하여 기판 모재를 가공하였다. 표면가공으로 양면연마와 단면 경면연마 공정을 수행하였으며, 개발한 사파이어 웨이퍼위에 유기금속 기상 증착방법(MOCVD)으로 질화물반도체 박막을 증착하여 분석함으로써 웨이퍼의 응용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. HB법에 의한 사파이어 단결정 인고트 성장

사파이어와 같은 고 경도의 강옥(corundum)물질을 성장하기 위해서는 고온 내화성의 용기(crucible)로 이리듐, 텅스텐, 몰리브덴 등의 금속이 필요하다. 이중에 몰리브덴은 용융된 알루미나와 접촉각이 적어 결정성장에 나쁜 영향을 주지않고 가격이 저렴할 뿐만 아니라 가공이 쉬운 장점이 있어 결정성장용 용기(boat 혹은 container)와 온도구배를 유지하는 방열판 등으로도 사용된다. 따라서 결정성장을 위한 용기는 몰리브덴(두께 0.5 mm의 판재)을 열간 성형하고 산성용액으로 세척하여 산화 몰리브덴을 제거한 후 사용하였다. 저항 발열체 재료는 알루미나 용융 온도인 2053°C 이상의 온도에서 사용이 가능한 흑연이나 텅스텐 등이 있지만 본 실험에서는 10 mmϕ Rod형 텅스텐을 가공하여 발열체로 이용하였다.

Fig. 1은 간단한 HB법의 반응로를 도시한 것으로 특별히 고안된 결정성장용 용기에 사파이어 종정을 삽입하고 알루미나 또는 사파이어 다결정질을 용융시켜 도가니를 끌어당김으로써 냉각존을 통과시켜 결정화시키는 방법이다. 알루미나(순도 : 99,995 % 일본 showa denko사)분말 원료는 오염되지 않도록 주의하면서 먼저 압축 성형하여 하소한 후 종자결정을 장착한 몰리브덴 결정육성 용기에 치밀하게

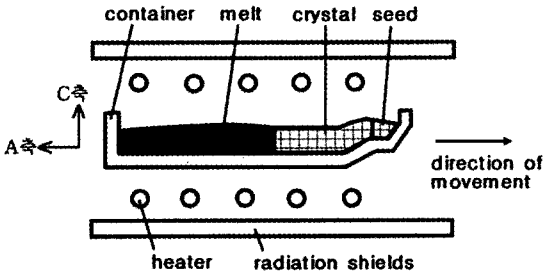

Fig. 1. Schematic diagram of horizontal reactor for sapphire single crystal.

채우고 종자결정과 성장 경계면이 용융점(2053°C) 보다 약 5~20°C 높은 온도가 되도록 유지하여 녹인다. 이때 종자결정의 육성계면 반대쪽이 완전히 녹아 내리지 않도록 주의한다. 종자결정면과 성장 경계면이 완전히 용융된 것을 확인한 후, 최대 결정성장속도 보다 적은 2~3 mm/hr의 속도로 발열체 밖으로 결정육성 용기를 끌어 당겨 완만한 온도구배를 가진 냉각온도 영역에서 결정화와 스트레스를 완화시켜 균열을 방지한다. 결정성장이 완료되면 다시 결정성장의 내부온도를 1700~1800°C 부근에서 annealing을 6-8시간 행하고, 12~24시간에 걸쳐 냉각시켜 종자결정과 같은 단결정을 성장하였다.

성장된 사파이어 인고트는 Hexa-Rhombo R3c 대칭성을 갖는 결정체로서 C축 방향의 격자상수가 13.001 Å을 갖으며, A_1, A_2, A_3축 방향으로는 각각 4.765 Å의 격자간 거리를 갖는다. 사파이어 성장방향(growth direction)에는 C(0001)면, A(11$\bar{2}$0)면, R(1$\bar{1}$02)면 등이 있다. 본 실험에서 결정 성장방향은 A(11$\bar{2}$0)면에 수직한 방향이며, 수직표면이 C[0001]축 방향으로 2인치 형태로 웨이퍼를 가공절삭하기 용이하다. 청색광소자용 사파이어기판으로는 C면을 이용하며, 비교적 GaN 박막 성장이 용이하여 선호되고 있다. 하지만, 결정성장시 격자 부정합으로 인해 서로 30° 회전된 채로 성장되어진다[5].

2.2. MOCVD법에 의한 GaN 박막 증착

MOCVD의 반응로에 있어서의 열 화학 반응은 TMGa/NH_3/H_2의 혼합가스를 기판표면에서의 경계층의 열 유체 흐름으로부터 결정박막을 성장한다[6]. 제작된 사파이어 기판과 Union-Carbide사의 기판을 H_3PO_4와 H_2SO_4의 혼합용액으로 표면 식각을 수행한 다음 아세톤용액으로 세정처리한다. 사파이어기판을 반응로에 장착한 후 고온에서 열적으로 수소가스분위기에서 식각하게 된다. 먼저 사파이어기판을 1150°C 고온에서 10분 동안 표면 크리닝한 후 온도를 하강시키면서 암모니아 가스라인을 열어 흐름을 조절하면서 520°C 정도의 저온영역에서 GaN 완충층을 300 Å

두께로 성장한 다음, 다시 온도를 상승하여 1100°C 영역에서 GaN 단결정 박막을 성장한다. 완충층 및 단결정 박막을 성장할 때의 수소와 암모니아 유량은 각각 6 slm 4 slm 였으며, TMGa 유량은 완충층 및 증착 박막층에 대해 각각 9 sccm, 40 sccm을 사용하였다. 성장압력은 도핑 하지 않은 GaN 박막의 전기적 특성을 고려하여 전자 이동도가 최대가 되는 400 Torr로 일정하게 유지하였다.

화학반응에 있어서는, 고온으로 가열할수록 메틸기의 분해가 증가되고, 갈륨금속 증기상태에서 GaN 분자를 형성하면서 확산되어 표면에 닿게 되고 표면흡착반응을 일으키는 열-유체적인 표면반응 특성을 갖는다. 박막이 증착될 때에는 웨이퍼의 표면가공 정도에 매우 민감한 반응을 보이며, 또한 암모니아가 분해되어 갈륨증기와 dimmer를 형성할 때에 암모니아의 수소가 분해되는 데 필요한 해리 에너지(엔탈피)가 4.8 eV의 높은 에너지를 필요로 하고 온도로 환산하면 1100°C의 고온에 해당한다. 이러한 연유로 하여 질화물계 반도체 박막성장의 온도를 1100°C를 유지하였으며, 또한 암모니아가스의 분자량이 가벼워 고온에서의 열적인 부력을 많이 받게되고 표면화학반응에 참여하는 율을 증가시키기 위하여 암모니아가스를 예열하는 배향식(counter-flow)의 반응로에서 수행하였다[6].

3. 결과 및 고찰

3.1. 사파이어기판 특성

HB법으로 성장한 사파이어 결정 인고트는 Fig. 2에서 크기가 235L×105W×45D mm로 최대직경 4인치 웨이퍼까지 가능하지만 국내에서 가장 많이 사용되는 2인치 웨이퍼를 결정질에 따라 제작하였다. 그림에서 보인 사파이어 단결정은 본 연구의 HB 결정 성장로에서 만들어진 일부로서 표면 위가 A축 방향이고 성장된 길이 방향이 A(1120)

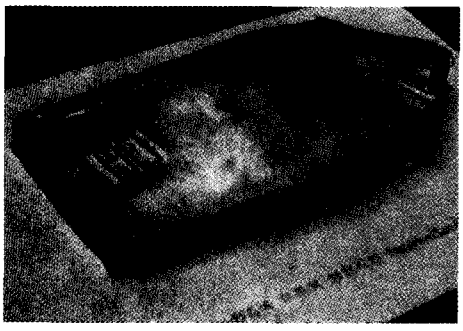

Fig. 2. Sapphire crystalline ingot grown by horizontal Bridgeman method.

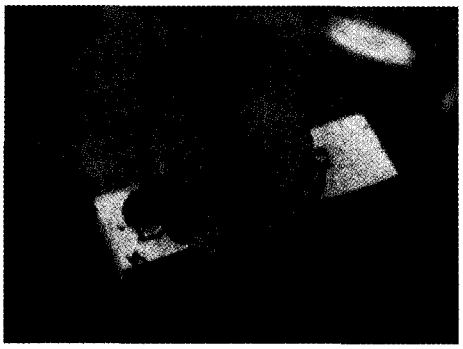

Fig. 3. Sapphire rod after edge grinding.

면에 수직 방향이다.

GaN을 위한 사파이어 웨이퍼는 C면을 기판 표면으로 성장방향이 A면으로 seed를 장착하고 성장한 단결정으로 만든다. C면이 상부로 향하도록 웨이퍼를 가공하기 위해 정사각형 형태로 sawing한 다음, 테두리를 회전 가공함으로써 Fig. 3과 같은 형상을 얻을 수 있다. 방향키(flat zone)를 결정하기 위해 C면의 반사 Laue X-선 회절사진을 얻고 Laue반점이 찍힌 사진을 scanner로 영상을 읽어들여 Laue분석 software[7]로써 C면에 수직한 A(1120)면을 찾아내어 방향키를 가공한 다음, 가공된 A면 중심에 기준선을 정하고 이 기준선과 Laue X-선과 일치하도록 하여 Laue사진을 다시 얻고 C면이 X-선의 입사선과 수직이 되도록 X축과 Y축의 각도를 계산한다. 이러한 단결정은 slicing하기 위하여 Fig. 3과 같이 기준선과 work piece의 종축 중심선이 일치하도록 정밀하게 단단히 왁스로서 부착하고 ID saw(S-LM-50E : 일본 동경정밀)의 절단면이 C축과 평행하도록 위에서 계산된 X, Y축을 보정하여 절단하였다. ID saw blade는 0.24 mm 두께의 동심원판(246 mmOD-91 mmID) 내부 원주 주위에 75~125 μm 입도의 diamond가 니켈전기 도금에 의하여 0.24 mm 두께로 전착 되어 있어 최외각 주변에서 이 날을 고정하고 고속회전시켜 절단할 물질을 이 날의 중심에 넣어 외각으로 밀며 절단한다. 사파이어 단결정의 절단속도는 1 mm/min로 유지하였고, 절단 날에 의한 kerf loss는 0.3~0.4 mm 였으며 1.2 mm로 feeding하여 slicing하여 얻어진 사파이어 웨이퍼의 평균두께는 약 1.05 mm였다.

ID saw blade로 절단된 웨이퍼의 두께는 과도한 절단응력에 의하여 더 얇게 slicing 할 수 없는 최소한의 두께가 약 1 mm이고 kerf loss가 많아 단위생산효율은 매우 낮은 편이며, 또한 절단된 두꺼운 웨이퍼를 규격에 맞게 조절하기 위하여 많은 양을 연마해야하므로 연삭가공 공정에 장시간을 요한다. 절편된 웨이퍼는 600 m/s 다이아몬드 비트리스 타일이 부착된 양면 연삭기에서 0.35~0.37 mm

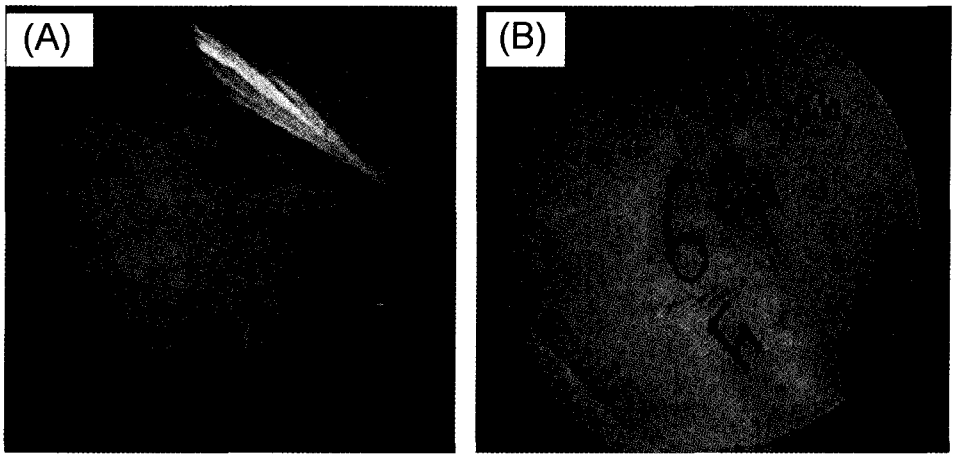

Fig. 4. Polarized photographs of fabricated sapphire wafers from (A) the edge position and (B) the center position of ingot

의 일정두께로 연삭 하였으며, 계속적으로 단면 경면 연마 공정을 단계별로 수행하였다. 단면 경면연마는 특수제작된 Cu 및 Sn 금속의 연마 정반과 다이어몬드 슬러리를 이용하여 3단계의 연마공정을 거쳐 최종적으로 실리카졸 현탁액으로 폴리싱 공정을 수행하였다[8-10]. 본 연구에서 구현한 광소자용 표준 사파이어기판의 직경치수는 널리 보급된 2"±0.010", 두께는 0.013"±0.002"이며, 최근에는 0.017"±0.002"의 비교적 두꺼운 기판을 선호되고 있다.

Fig. 4는 제작된 사파이어 웨이퍼의 예를 보인다. 이 웨이퍼는 상기 규격에 적합한 사양으로 만들어진 것이다. 표면 거칠기(rms roughness)는 경면 연마된 표면의 경우 R_{rms} < 10 Å이고, 이면의 경우 R_{rms} < 60 μinch 이하가 된다. Fig. 4(a)에서 보면, 화살표방향으로 A(11$\bar{2}$0) 면과 30°의 경사각도를 이루는 A_3축 방향으로 쌍정(twin)의 grain boundary를 보임을 알 수 있다. 이러한 쌍정은 인고트의 가장자리에 비교적 잘 나타나며, 결정성장 과정 중에 갑작스런 열적 불안정, 이물질의 낙하 등이나, 특히 결정성장 용기표면의 불순물 혹은 용융액의 갑작스런 유동 등에 기인되는 것으로 추정된다. 일단 만들어진 쌍정은 같은 형태로 계속 결정성장방향으로 발전하여 생성되므로 이러한 쌍정이 발생되지 않도록 주의하여 결정을 성장하도록 하여야 한다. 웨이퍼 제조시 편광사진에 의하여 검사를 철저히 한 후 이러한 쌍정이 없는 곳을 선택하여 2" 원주를 발췌하여 사용하였다.

HB법으로 성장시킨 사파이어 단결정의 구조적 특성을 파악하기 위해, X-선 삼중결정 회절(triple crystal x-ray diffraction : TCXD)실험을 수행하였으며, Fig. 5는 C면(0002)에서의 회절스펙트럼을 나타낸다. 회절세기의 반치폭(Full width at half maximum : FWHM) 이 Table 1에서와 같이 시료 HB4의 경우에 10.1 arcsec 정도이며,

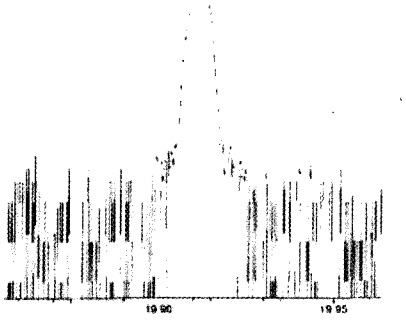

Fig. 5. TCXD rocking curve on C plane (0002) sapphire wafer (sample HB4).

Table 1
FWHMs and roughnesses for various samples of sapphire wafers

Samples	TCXD		AFM		
	Peak position (deg)	FWHM (arcsec)	R_{p-v} (Å)	R_{rms} (Å)	R_{ave} (Å)
HB1	20.46071	247	23.8	2.8	1.6
HB2	20.87368	257	33.9	2.9	2.1
HB3	19.81215	15.5	98.1	6.5	3.4
HB4	21.15957	10.1	198.0	6.9	3.5
HB5	21.07130	65.7	55.1	8.3	6.5
HB6	20.68861	15.1	15.8	1.4	0.9
HB7	20.31239	11.2	166	3.2	2.3
HB8	20.60610	19.8	79.8	8.6	6.2
HB9	20.69638	10.4	51.6	2.5	1.1
HB11	20.48117	11.5	32.4	2.8	1.8
HB12	20.35537	15.8	20.0	0.8	0.5
HB13	20.65370	16.2	25.0	0.8	0.5
HB14	19.90748	8.3	9.15	1.0	0.7
Shinkosha	20.40698	13.7	33.0	1.3	0.8
Union-Carbide	20.78124	10.1	9.0	2.1	1.6

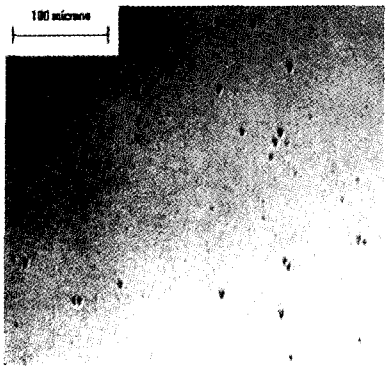

Fig. 6. AFM image on the etch-pits of sapphire wafer (sample HB4).

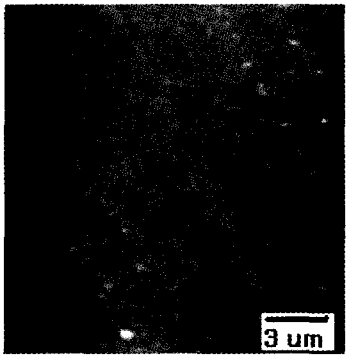

Fig. 7. AFM image on the surface of sapphire wafer (sample HB1).

이는 결정내의 전위결함이 이 반치폭이 비례하며 전위밀도는 다음 식으로 표현된다[2].

$$\rho_D = \frac{\Delta^2}{9b^2} \quad (1)$$

여기서 $\rho_D(cm^{-2})$는 전위밀도이고, Δ는 반치폭(radian), b (A[1120] = 4.765 Å)는 선단형 전위(edge-type dislocation)의 Burgers 벡터이다. TCXD에 의한 Wafer 내의 전위밀도는 $1.17\times10^5/cm^2$을 나타낸다. 이는 Fig. 6은 경면연마된 사파이어 표면을 황산/인산 50 % 혼합용액으로 285~325°C에서 15분간 부식시켜 200배의 광학 현미경으로 관찰한 표면식각에 의한 etch-pit 밀도를 계산한 것으로 $2.77\times10^6/cm^2$ 보다 다소 적은 전위밀도를 보이며, 이러한 전위밀도의 차이는 결정의 결함분포의 국소화 뿐만 아니라 기계적인 연마공정에 의한 표면응력 변형에서 오는 결함의 진행에 기인될 수 있음을 의미한다.

표면 평탄조도 즉 roughness를 확인하기 위하여 AFM을 이용하였다. Sample HB1의 경우의 image를 Fig. 7에 나타내었으며 Table 1에서와 같이 HB1은 조도의 최대-최소 높이차의 최대치(R_{max})가 23.8 Å, 실효치(R_{rms})가 2.8 Å, 평균치(Rave)가 1.6 Å이다. Table 1로부터 HB방법으로 성장시킨 시료에서는, AFM으로 관찰한 표면조도의 최대-최소 높이차가 커짐에 따라 TCXD 실험에서의 반치폭과 상관관계에 영향이 있음을 알 수 있다. 웨이퍼의 단결정 모폴로지가 좋지 않을 경우 TCXD의 값은 높아지고 또한 경면연마가 좋지 못할 경우에도 높아지는 경향을 나타내었다. 그러나 단결정의 모폴로지가 좋지 않은 웨이퍼도 경면연마로서 충분히 평탄조도를 규격이하로 낮출 수 있으나 GaN 성장에 악영향을 미치므로 TCXD의 측정은 필수적이다. 참고로 CZ 방법으로 성장하여 가공한 제품시료의 Shinkosha, Union-Carbide 기판의 경우는 이러한 표면조도와 결정성간의 상관성이 많지 않음을 알 수 있다. 이는 기계적인 표면가공에 의한 결정성의 손상을 회복시키는 표면 가공후의 열처리공정의 효과를 필요로 함을 암시한다.

3.2. GaN 박막특성

제작된 사파이어 기판(HB1)과 Union-Carbide사의 기판

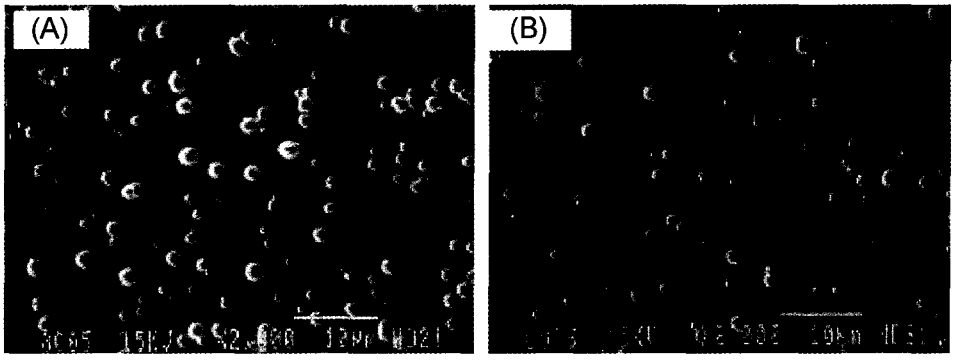

Fig. 8. SEM images on GaN epitaxial surfaces grown on (A) the purchased (Union-Carbide) and (B) the fabricated wafers.

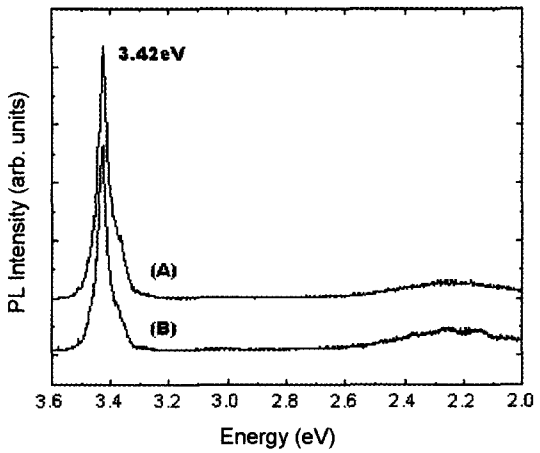

Fig. 9. PL spectra on GaN epilayers grown on (A) the fabricated and (B) the purchased (Union-Carbide) wafers.

위에 MOCVD 장치에서 1 μm 두께로 동시에 성장시킨 GaN 박막 표면은 육안식별에서 경면 상태로 양호하였으며, Fig. 8은 SEM 사진이다. Fig. 8(A)는 Union-Carbide 사 제품으로 성장한 경우이고 Fig. 8(B)는 개발한 웨이퍼 위에 성장한 경우로서 비슷한 형상을 보이고 있다. 표면은 sub-micron 크기의 파이프 구멍이 형성되어 있으며, 선단형 전위가 표면에까지 이어져 형성된 경우이다. 사파이어와 GaN 반도체의 격자 부정합이 13.6 %로 계면에서 올라온 선단형 전위로서 표면전위밀도가 시료 A, B 각각에 대해 $5\times10^6/cm^2$, $4.5\times10^6/cm^2$으로 비슷한 결과를 보였다.

박막의 광학적 특성을 확인하기 위해 상온에서 발광스펙트럼(photoluminescence : PL)을 관측하였다. Fig. 9는 도핑하지 않은 GaN 시료에서 중성 도너(neutral donor)에 결합된 엑시톤 발광(excitonic emission) 이 3.42 eV의 에너지에서 관측되었다.

또한 전위센터에 관련된 미소발광이 560 nm(2.2 eV) 파장영역에서 존재하였다. 곡선 (A)는 개발 제작된 시료에서의 발광스펙트럼이고 곡선 (B)는 기존의 제품의 경우이다. 반폭치가 (A), (B) 각각 30, 34 meV로 비슷함을 알 수 있으며 상대적으로 개발된 제품의 발광세기 및 반폭치의 광학특성이 양호함을 확인하였다.

또한 도핑을 하지 않은 시료에 대한 상온에서의 Hall effect 측정을 하였으며, 운반자 농도 및 운반자의 이동도를 얻을 수 있었다. 개발 제작된 사파이어 기판 위에 성장시킨 GaN 박막 시료의 전자 운반자 농도와 이동도는 각각 $4.4\times10^{17}/cm^3$, 170 $cm^2/V\cdot sec$ 이었으며, 기존의 제품의 경우에는 $6.5\times10^{18}/cm^3$, 113 $cm^2/V\cdot sec$로 다소 차이가 났지만 모두 보고된 영역의 수치를 보이고 있으며[11], 기존제품의 경우의 전자이동도가 상대적으로 높았으며 따라서 제작된 시료의 이동도는 낮은 값을 보임을 알 수 있었다.

4. 결 론

청색광소자용 기판으로 사용하기 위한 사파이어기판을 개발하였다. 수평 Bridgeman 방식으로 성장된 C축 방향의 사파이어 결정기판을 연마 가공하였다. 2인치 사파이어 기판을 경면화하여 표면의 평탄조도를 측정하였다. 제작된 시작품을 이용하여 사파이어 기판 위에 유기금속 기상화학증착 방법으로 GaN 박막을 증착하였다. 또한 평균조도가 우수한 기존제품의 시료와 특성을 비교하였으며, 수평 Bridgeman 방법으로 성장하여 가공한 기판의 경우 결정성이 표면조도에 상관됨을 알 수 있으며 차후 연구에서는 후속 열처리 공정을 도입하여 확인할 필요가 있음을 알 수 있었다. 하지만 GaN 박막특성이 기존의 제품과 비슷한 사양을 보임으로써 수평 bridgeman 방법으로 성장된 시료의 경우, 광소자용 사파이어 웨이퍼의 활용가능성을 확인하였다. 끝으로, 결정성장 및 정밀 연마가공 특성등의 구체적인 실험결과에 대해 차후의 지속적인 연구발표가 필요하겠다.

후 기

본 연구는 ABC전자(주)의 장재혁주임, 한국화학연구소의 정석종 선임, 한국표준과학연구원의 김창수 박사, 그리고 PSIA(주)의 정창영과장의 적극적인 도움으로 이루어졌으며, 과학기술부와 ABC전자(주)의 연구비지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] J. Karpinski, J. Jun and S. Porowski, J. Cryst. Growth 66 (1984) 1.
[2] K. Kim and C.B. Park, Thin Solid Films 330 (1998) 139.
[3] E. Fremy and A. Verneuil, C. r. Acad. Sci. 104 (1887) 738.
[4] Kr. S. Bagdasarov, Ruby and sapphire, L. M. Belyaev Ed. (Nauka Pub., Moscow, 1974) pp. 15-35.
[5] S. Nakamura and G. Fasol, The Blue Laser Diode (Springer, Berlin, 1997) p. 23.
[6] 김근주, 황영훈, 한국결정성장학회지 9 (1999) 574.
[7] MWL400 ScanORIENT software package (Multiwire Laboratories, Ltd, Ithaca, 1999).
[8] J.D. Filby, J. Electrochem. Soc. 113 (1966) 1085.
[9] H.W. Gutsche and J.W. Moody, J. Electrochem. Soc. 125 (1978) 136.
[10] 월간 반도체-CMP Slurry, 제138호 (전자재료사(주) 1999) pp. 49-64.
[11] C.-R. Lee, S.-J. Son, I.-H. Lee, J.-Y. Leem and S.K. Noh, J. Cryst. Growth 182 (1997) 11.