GaN 단결정 기판 관련 기술의 국내외 현황과 진보

김선태
대전산업대학교 신소재 공학부 및 반도체기술연구소 교수
E-mail : stkim@hyunam.tnut.ac.kr

1. 서 론

질화물반도체는 자외·가시광 영역에서 동작하는 광소자 및 내환경 전자소자 제조용 소재로서 주목을 받고 있으며, 지난 수 년동안 청색과 녹색 발광소자, 자외선 수광소자 및 각종 전자소자 제조기술이 급격하게 발전하였다. 특히 질화물반도체의 박막결정성장기술과 소자제조공정기술의 진보적 발전에 의해 실온에서 10000시간 연속 발진하는 청자색 반도체 레이저 다이오드와 750 ℃의 고온에서 동작하는 고출력트랜지스터가 실현됨으로써 다양한 전자시스템 구현이 예측되고 있다[1, 2]. 그러나 질화물반도체와 관련된 연구·개발 및 부품의 산업화에 있어 아직까지 해결되지 않고 있는 원천기술은 질화물 단결정 성장과 homoepitaxy를 위한 단결정 기판의 제조와 관련된 것이다.

최근 들어 전세계적으로 질화물반도체 단결정 성장에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있지만 질화물반도체가 갖는 특이성, 즉 높은 융점과 질소의 분해압 때문에 화학양론적 상태에서 Czochralski법 또는 Bridgman법으로 덩어리 형태의 단결정을 성장할 수 없다는 것이 관련 기술의 진전에 걸림돌로 작용하고 있다. 질화물반도체에 대하여 추정되는 융점과 이에 대응하는 질소 압력을 표 1에 나타내었다[3]. 질화물반도체를 대표하는 GaN의 경우 융점이 2800 K 이상이고, 융점에서 질소 분해압이 약 4만기압 이상으로서 이와 같은 조건에서 양질의 단결정을 성장한다는 것은 실질적으로 불가능하다.

표 1. 질화물반도체의 융점과 융점에서의 분해압

Nitrides	T_M (K)	p_{N2} (kbar)	p_{N2} (kbar)$^{exp.}$
AlN	~ 3500	0.2	〉0.1
GaN	~ 2800	45	〉40
InN	~ 2200	60	〉35

현재 덩어리 형태의 GaN 단결정 성장을 위하여 고온·고압용융법, 승화법 및 flux법 등이 시도되고 있으며, quasi-bulk GaN 기판을 제조하기 위한 후막 에피텍시법이 적용되고 있다. 이와 같은 방법 중 GaN 단결정 기판 제조를 목적으로 연구되고 있는 고온·고압용융법, hydride vapor phase epitaxy(HVPE)법 및 승화법의 장점과 단점을 비교하

여 표 2에 나타내었다[4]. 본 원고에서는 GaN 단결정 기판 제조와 관련된 결정성장기술의 국내·외 현황을 소개하고, homoepitaxy 기술에 의하여 각종 전자소자를 구현할 수 있는 대면적 GaN 기판 제조 방법을 모색하고자 한다.

표 2. GaN 성장 방법의 장단점 비교

Growth Technology	Strengths	Weaknesses	Frontiers for 21st century
High Pressure Growth	• Bulk GaN single crystals	• Only for GaN single crystals • Small size crystals • Extreme temperature & pressure conditions	• Bulk GaN single crystals for substrate use
Vapor Phase Epitaxy (VPE, HVPE)	• Simple growth Technique • Very high growth rate (<100 μm) • Reasonably good quality films	• No sharp interfaces • Long Run cycle (heat+growth+cool) • Small area growth • Better films are obtained for lower growth rate	• Thick GaN films for substrates
Sublimation Sandwich Method	• Very simple growth technique • Extreamly high growth rate (300 μm/hr)	• Poor quality of films • Need a GaN powder source • Small area growth	• Bulk AlN single crystals for substrate use

2. GaN 단결정 성장기술의 현황과 진보

덩어리 형태의 GaN 단결정을 성장하기 위한 연구는 1960년대부터 이루어졌지만 결정의 크기와 품질 면에서 아직까지 만족스러운 결과가 얻어지지 않고 있다. GaN는 다른 반도체에 비하여 상대적으로 융점과 질소의 증기압이 높기 때문에 통상적인 결정성장방법으로 덩어리 형태의 단결정을 성장하는 것이 곤란하다. GaN의 증기압과 온도의 관계를 그림 1에 나타내었다[5].

GaN의 증기압은 1000 K에서 1기압 이상이고, 1800 K에서 10000기압에 이르기 때문에 용액으로부터 결정을 성장하기 위해서는 Ga 내에 질소를 충분하게 용해시키는 것이 중요하다. 그러나 Ga용액에 용해되는 질소의 분량과 온도의 관계는 그림 2에 나타내었듯이 1500 K 이하의 온도에서는 0에 가깝고, 1700 K의 온도에서 약 0.001 % 정도이다[5]. 따라서 Ga중에 질소를 용해시켜 GaN 결정을 성장하기 위해서는 적어도 1700 K 이상의 온도가 필요하며, 1700 K의 온도에서 GaN의 분해를 억제하기 위해서는 5000기압 이상의 질소압력을 필요로 한다. 이하에서는 이와 같은 성질을 갖고 있는 GaN 단결정 성장을 목적으로 연구되고 있는 고온·고압용융법, 분말승화법 및 flux법에 대하여 현재까지 이루어진 연구 결과를 중심으로 살펴보고자 한다.

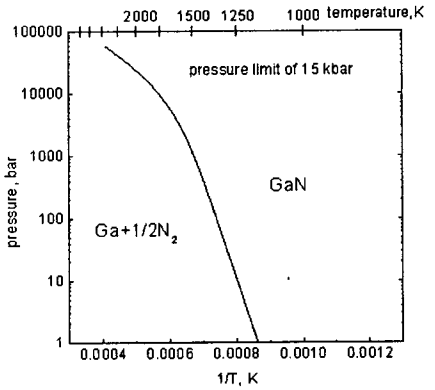

그림 1. GaN의 증기압과 온도 사이의 관계

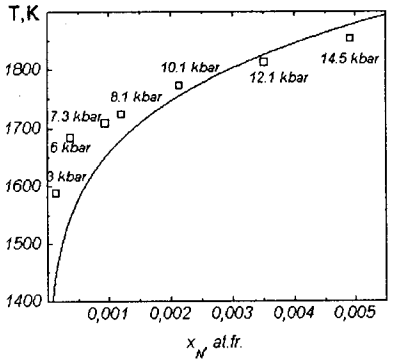

그림 2. Ga중에 용해되는 질소농도와 온도사이의 관계

a. 고온·고압용융법

고온·고압용융법에 의한 GaN 단결정 성장은 전세

계적으로 오직 한 그룹(Poland의 High Pressure Research Center)에 의하여 지속적으로 이루어지고 있으며, 이들의 연구결과를 통하여 벌크 GaN 단결정 성장이 얼마나 어려운지를 알 수 있다. 이들은 1700~2000 K의 온도에서 질소가스를 12000~20000 기압으로 가압함으로써 Ga중에 질소를 용해시켜 덩어리 형태의 GaN 단결정을 성장하고 있다[6]. 2000 K의 온도에서 2만 기압을 유지하였을 때, Ga 내에서 질소의 용해도는 2 at.% 정도까지 유지된다.

이와 같이 낮은 용해도 상태에서 결정성장을 위한 구동력은 온도구배로서 Ga 용기내에 30~100 ℃/㎝의 온도구배를 갖게 함으로써 과포화상태로부터 결정이 성장된다. 그러나 용액 상태의 Ga 내에서 질소의 용해도가 낮기 때문에 질소를 성장영역에 계속적으로 공급하기 위해서는 많은 시간을 필요로 한다. 통상적으로 seed를 사용하지 않고 성장시켰을 때 결정의 성장률은 ≤ 0.1 ㎜/h 정도로서 판상 또는 프리즘 형태의 안정된 morphology를 갖는 단결정이 성장된다. 그림 3은 고온·고압용융법으로 성장된 GaN 단결정의 크기를 연도별로 비교하여 나타낸 것으로서 현재 최대 크기는 약 10 ㎜ × 10 ㎜ × 0.1 ㎜ 정도이다[6].

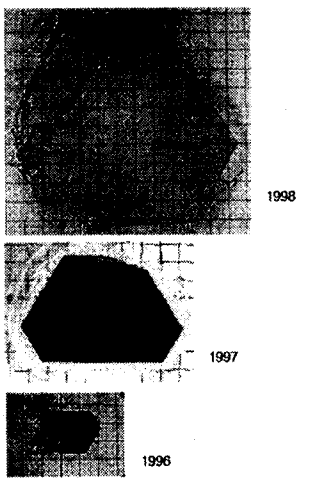

그림 3. 고온·고압용융법에 의한 GaN 단결정의 최근 3년간 진보

이와 같이 고온·고압용융법으로 성장된 벌크 GaN 단결정의 결정학적 품질은 (0004)회절선의 double crystal X-ray diffraction(DCXRD) 반치폭이 1 ㎜ 이하 크기의 결정에서는 20~30 arcsec이고, 3 ㎜ 이상에서는 30~40 arcsec이며, 그 이상에서는 1~2 arcmin으로 결정의 크기가 증가함에 따라 급격하게 품질이 저하된다. 전기적 특성은 전자밀도가 10^{19}~10^{20} cm^{-3}이고, 이동도는 30~90 cm^2/Vs 정도이며, EPD(etch pit density)는 약 10^4 cm^{-2}로서 비교적 우수하다[7]. 그러나 고온, 고압법으로 성장된 GaN 단결정의 품질은 우수하지만 가용면적이 큰 기판을 제조하는데는 기술적으로 많은 어려움이 따르기 때문에 널리 보급되지 않고 있다.

한편, 최근 개최된 MRS fall meeting에서 TDI사는 탄소봉을 seed로 사용하여 Czochralski법에 의한 GaN 단결정 성장의 가능성을 처음으로 제시하였다[8]. 이들은 질소 압력을 2기압, Ga 용액온도 800~950 ℃의 조건에서 직경이 20 ㎜이고 높이가 15 ㎜인 벌크 GaN 결정을 2 ㎜/hr의 속도로 성장시켰다. 이 방법으로 성장된 GaN 결정은 아직은 다결정상태이고, 품질면에서도 고온·고압용융법으로 성장한 단결정에 비하여 우수하지는 않다. 그러나 이들의 연구 결과는 GaN 단결정 성장에 있어 또 다른 가능성을 제시한 것으로 평가된다.

b. 분말승화법

GaN의 결정성장 방법중 역사가 가장 오래된 것으로서 고온에서 금속 Ga과 NH_3 가스를 직접 반응시키거나 GaN 분말을 높은 온도에서 승화시켜 분해한 후 온도가 낮은 곳에 응축시키면 직경이 수~수십 ㎛의 크기를 갖는 침상형(needle-type) 혹은 판상의 GaN 단결정이 성장된다[9]. 그러나 이 방법으로 성장되는 GaN의 크기가 제한적인 관계로 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 주로 1970년대 초반에 GaN의 광학적 성질과 결정구조를 파악하는데 사용되었다. 최근 들어 승화법에 의한 SiC 단결정 성장의 경우와 같이 GaN 분말을 고온에서 승화시켜 대구경화하기 위한 연구가 시도되고 있지만, 아직까지 대구경의 GaN를 성장시킨 결과는 보고되지 않고 있다. Zetterstrom은 [10] GaN 분말을 1150~1200 ℃의 온도에서 승화시켜 지름이 10~30 ㎛이고 길이가 5 ㎜ 정도인 결정을 성장시켰다. 최근 Tokushima 대학의 Sakai교수가 GaN 분말승화에 의한 GaN 성장을 중점적으로 연구하고 있다[11]. 이들은 GaN 분말을 승화시켜 사파이어 기판 위에 10~30 ㎛ 두께의 후막 GaN 또는 직경이 0.2 ㎜인 육각기둥 모양의 GaN을 성장하고 MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition) 법에 의한 homoepitaxy를 연구하고 있다.

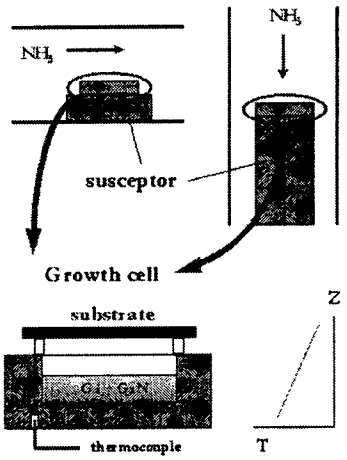

그림 4. SSM 장치의 개략도

그림 5. 분말승화법으로 성장된 GaN 단결정

한편, Vodakov 등은[12] 그림 4에 보인 것과 같이 암모니아가스 분위기 중에서 금속 Ga과 GaN 분말을 혼합하여 1100~1250 ℃의 온도범위에서 승화시키는 sublimation sandwich method (SSM)으로 15 ㎜ × 15 ㎜ 크기의 SiC 기판위에 0.25~0.35 ㎜/h의 속도로 두께가 0.5 ㎜인 후막 GaN 결정을 성장하였다. GaN 분말을 승화시켜 성장한 후막 GaN의 품질은 고온·고압용융법으로 성장된 GaN 보다 우수하지는 않지만, 대면적 후막 GaN 또는 덩어리 형태의 결정을 비교적 용이하게 성장할 수 있을 것으로 기대된다.

국내에서 Ga과 NH_3의 반응에 의한 GaN 분말 합성과 분말승화에 의한 GaN 결정성장을 연구하고 있는 그룹은 한국과학기술연구원(KIST), 고려대학교 및 대전산업대학교 등이다. KIST와 고려대학교에서는 Ga과 NH_3가스를 반응시켜 수 ㎛ 크기의 GaN 결정을 성장하였으며[13], 대전산업대학교에서는 합성된 GaN 분말을 1150 ℃의 온도에서 승화시켜 재결정화하는 방법으로 그림 5에 보인 것과 같이 최대 크기가 직경 1 ㎜, 길이 5 ㎜ 정도의 침상형 GaN 결정을 성장하고 실온에서 고밀도 광여기에 의한 실온 자극방출을 보고한바 있다[14].

c. Flux 법

비교적 최근에 시도된 방법으로서 다른 방법에 비해 상대적으로 낮은 온도에서 벌크 GaN 결정을 성장할 수 있는 장점이 있다. Yamane 등은[15] NaN_3와 Ga을 스테인레스 스틸 용기 안에 장입한 후 질소분위기에서 750 ℃의 온도에서 100시간 동안 반응시켜 크기가 0.5 ㎜ × 0.5 ㎜ × 0.3 ㎜ 정도인 판상형 또는 0.5 ㎜ × 1 ㎜ 정도의 침상형 결정을 성장하였다.

이외에도 낮은 온도와 압력상태에서 Ga과 질소 가스를 직접 반응시켜 벌크 GaN 결정을 성장시키는 연구가 진행되고 있다[16]. 현재 이 방법에 의한 벌크 GaN 결정은 sub-micron 크기를 갖는 GaN 들이 응집된 다결정상으로 성장되지만, 성장온도를 상승시킴으로써 보다 양질의 결정을 성장할 수 있을 것으로 기대된다.

3. Quasi-bulk GaN 기판 제조기술 현황

질화물반도체 단결정 기판을 이용하여 광소자와 전자소자를 생산하기 위해서는 GaAs 또는 InP 등과 같은 Ⅲ-V족 화합물반도체와 마찬가지로 대면적의 단결정 기판을 필요로 한다. 그러나 GaN의 경우 앞에서 살펴본 바와 같이 현재까지 보고된 벌크 GaN 단결정은 최대 크기가 10 ㎜ × 10 ㎜ 정도로 제한되고 있다. 따라서 최근에는 결정성장속도가 시간당 수십 ㎛인 HVPE법으로 보다 넓은 면적을 갖는 quasi-bulk GaN 기판을 제조하고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있다. Quasi-bulk GaN를 제조하기 위해서 우선 사파이어 또는 SiC 기판위에 HVPE법으로 수백 ㎛ 두께의 후막 GaN를 직접 성장하거나 사파이어 기판위에 MOCVD법으로 성장된 수 ㎛ 두께의 GaN 위에 SiO_2 stripe pattern을 형성한

후 그 위에 수평방향으로의 성장을 촉진시키는 선택성장(selective area growth : SAG)을 한 후 모기판을 제거하는 방법이 적용되고 있다. 이와 같은 방법으로 quasi-bulk GaN 기판을 제조하는데 있어 제기되고 있는 문제점은 사파이어 기판과 GaN 사이의 물리적 성질 차이, 즉 열팽창계수와 격자부정합에 의하여 발생하는 균열과 크랙이 기판에 존재하는 것이다. 또한 DCXRD 반치폭이 150~300 arcsec정도이고 결함밀도가 $10^{7\sim8}$ cm^{-2}로서 고온·고압용융법으로 성장한 벌크 GaN 단결정에 비하여 품질이 떨어진다는 것이다. 그러나 quasi-bulk GaN 기판 제조방법은 고온·고압용융법에 비해 장치가 간단하고 비교적 저렴하게 넓은 면적의 기판을 쉽게 제조할 수 있는 장점이 있다. 현재 quasi-bulk GaN의 경우 최대 10 ㎠ 크기까지 크랙이 없는 상태로 제조되었으며[17], 제조된 "pure GaN" 기판을 이용하여 실온 연속발진 장수명 LD와 top-bottom 전극 구조의 LD가 발표되었다[18]. 따라서 현재로서는 quasi-bulk GaN 기판 제조기술이 대면적 GaN 기판을 상품화할 수 있는 최적의 기술로 부각되고 있다.

그림 6은 HVPE법으로 GaN를 성장하기 위한 수평형 반응장치의 개략도를 나타낸 것이다. 전기로는 통상적으로 2단의 온도구배를 갖으며, 850~900 ℃의 온도영역에는 Ga을 위치시키고 900~1100 ℃의 온도영역에는 기판을 위치시킨다. 석영용기에 담긴 Ga과 HCl 가스와 반응시켜 합성된 GaCl를 캐리어 가스와 함께 기판 영역에 공급하고 별도의 석영관을 통하여 NH_3 가스를 기판이 있는 영역에 공급하면 $GaCl+NH_3 \leftrightarrow GaN+HCl+H_2$의 반응과정으로 GaN가 기판위에 성장된다. HVPE법에 의해 수십~수백 ㎛ 두께의 후막 GaN을 비교적 빠른 속도로 성장할 수 있으며, 결정의 품질이 MOCVD법으로 성장된 GaN와 비교할 수 있을 정도로 우수하기 때문에 최근에는 quasi-bulk GaN 기판제조는 물론 소자제조를 위해 널리 보급되고 있다.

HVPE법을 이용한 quasi-bulk GaN 기판제조에 관한 연구는 Akasaki그룹에 의해 처음으로 시도되었다[19]. 이들은 사파이어 기판과 GaN 사이의 물리적 성질 차이를 완화시키기 위한 완충층으로 ZnO 박막을 사파이어 기판위에 스퍼터링한 후 HVPE법으로 400~800 ㎛ 두께의 GaN를 성장하고 ZnO 완충층을 에칭시켜 제거하는 방법으로 기판으로부터 후막 GaN를 격리시키고자 하였다. 그러나, ZnO 완충층의 에칭이 불완전하여 4 ㎜ × 4 ㎜ 크기의 GaN를 얻는데 그쳤다. 한편 Ioffe 연구소의 Melnik등은[20] SiC 기판위에 후막 GaN를 성장한 후 반응성 이온에칭법으로 SiC를 제거하여 직경이 30 ㎜이고 두께가 350 ㎛인 GaN 기판을 제조하였다.

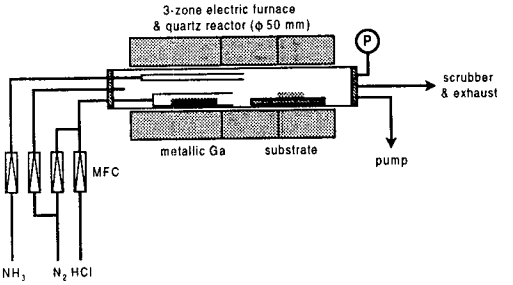

그림 6. HVPE 장치의 개략도

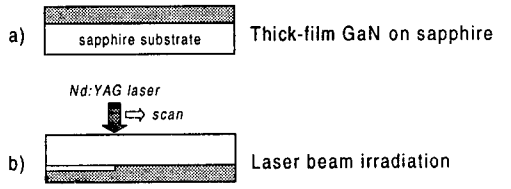

그림 7. Laser lift-off 방법의 개념도

최근 Kelly 등은[21] 사파이어 기판위에 HVPE법으로 GaN를 직접 성장한 후 Nd:YAG 레이저를 이용하여 사파이어를 lift-off시켜 두께가 250~300 ㎛이고 면적이 10 ㎠인 GaN 기판을 제조하였다.

사파이어 기판으로부터 GaN를 분리시키는데 있어 종래에는 기계적 연마방법이 주로 사용되었는데 이 방법으로 사파이어 기판을 제거하면 GaN 내에 크랙이 발생되는 문제가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 제시된 laser lift-off 방법의 개념을 그림 7에 나타내었다. 우선 사파이어 기판 위에 후막 GaN을 성장한 후 그림 7-b)와 같이 사파이어 기판 쪽에서 GaN의 에너지 갭보다 에너지가 큰 고출력 레이저빔을 조사하면 GaN와 기판의 경계부근에서 GaN가 부분적으로 열분해되어 기판으로부터 GaN가 분리된다.

한편, quasi-bulk GaN 기판을 제조하기 위한 방법으로 선택성장법이 이용되고 있는데, 원래 이 방법은 MOCVD법으로 사파이어 기판위에 GaN를 성장하는데 있어 기판과 GaN 사이의 격자부정합과 열팽창계수 차이에 의하여 계면에서 발생되는 전파전위(threading dislocation)의 밀도를 감소시킬 목적으로 사용되었다. 그림 8은 선택성장법의 개념을 도

식화 한 것이다. 우선 사파이어 또는 SiC 기판위에 MOCVD법으로 수 μm 두께의 GaN를 성장한 후 stripe 형태로 SiO_2를 패턴을 형성하고, 그 위에 다시 GaN을 성장시키면 SiO_2 패턴 위에서 GaN가 수평방향으로 성장이 이루어져 합체(coalescence)됨으로써 SiO_2 위에는 전파전위가 적은 양질의 GaN가 성장된다. 그림 9는 MOCVD법으로 성장된 1.2 μm 두께의 GaN 위에 두께가 2000 Å인 SiO_2 패턴을 형성하고 그 위에 다시 HVPE법으로 성장된 GaN의 단면에 대한 TEM image를 나타낸 것이다.

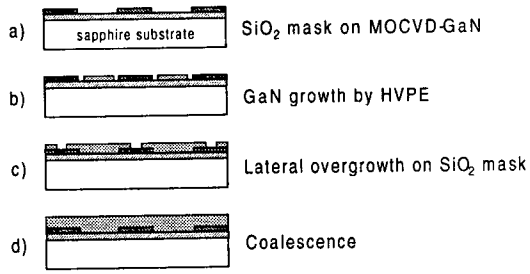

그림 8. 선택성장법의 개념도

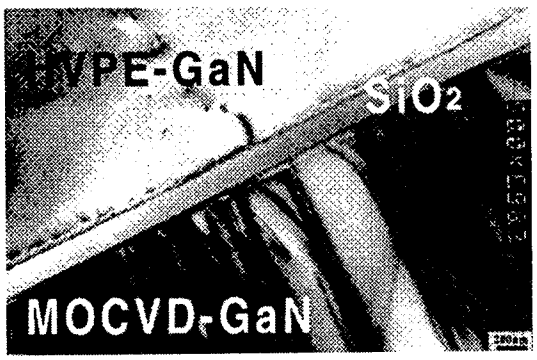

그림 9. 선택성장법으로 성장된 HVPE-GaN/SiO_2/MOCVD-GaN의 단면 TEM image

SiO_2 박막 아래의 영역 즉, MOCVD법으로 성장된 GaN에는 전파전위의 밀도가 높지만 SiO_2 위에 HVPE법으로 성장된 GaN에는 전파전위 밀도가 현저하게 감소되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 NEC사에서는 직경이 18 ㎜이고 두께가 350 μm인 GaN 기판을 제조하였고, 이를 이용하여 top-bottom 전극구조를 갖는 LD를 제작하여 상온에서 연속 발진하는데 성공하였다[17, 18]. 그러나, 이 방법으로 제조된 GaN 기판의 경우 SiO_2 패턴 위에는 결정결함 밀도가 작지만, 패턴과 패턴 사이의 영역에는 결정결함 밀도가 높기 때문에 소자 제조에 있어 세심한 주의를 필요로 한다.

한편, 국내에서 HVPE법을 이용한 quasi-bulk GaN 기판 제조에 관한 연구는 주로 삼성종합기술원, 대전산업대학교, 성균관대학교 및 한국화학연구소 등에서 이루어지고 있다. 최근 삼성종합기술원에서는 laser lift-off 기술을 이용하여 크기가 20 ㎜ × 20 ㎜이고 두께가 250 μm인 GaN 기판을 제조하는데 성공하였다. 또한 대전산업대학교에서는 그림 10에 보인 것과 같이 크기가 18 ㎜ × 18 ㎜ × 0.35 ㎜인 GaN 단결정 기판과 최대 크기가 1-인치인 highly c-axis oriented GaN 기판을 제조하는데 성공하였다[22, 23]. 이와 같은 quasi-bulk GaN 기판은 현재 homoepitaxy기술에 의한 청색 반도체 레이저 다이오드 제조에 이용되고 있다. 또한, 선택성장에 의한 GaN 기판 제조에 대하여 몇몇 연구그룹이 시도하고 있지만 아직까지 뚜렷한 결과가 없는 실정이며, 이외에도 동국대학교, 한양대학교 및 영남대학교 등에서도 HVPE법에 의한 후막 GaN 성장을 계획하거나 연구중인 것으로 알려져 있으나 뚜렷한 연구결과는 보고되지 않고 있다.

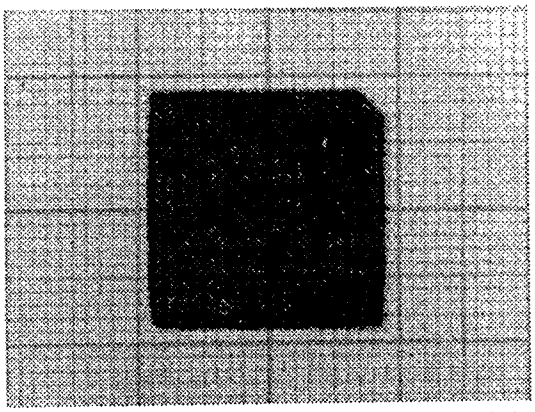

그림 10. HVPE법으로 제조한 GaN 단결정 기판

4. 맺음말

이상에서는 주로 GaN 기판과 관련된 결정성장기술을 중심으로 국내외 현황과 주된 연구결과를 살펴보았다. GaN 단결정 기판과 관련하여 우선적으로 해결해야 할 것은 실제적으로 질화물반도체 소자제조공정에 사용할

수 있을 정도의 크기를 갖는 결정을 성장하는 것이다. 현재까지 대면적의 GaN 기판을 제조하기 위하여 다양한 방법이 시도되었지만 아직까지 적합한 방법이 개발된 것은 아니다. 특히 HVPE법으로 대면적 quasi-bulk GaN 기판을 제조하기 위하여 많은 연구그룹이 시도하고 있지만, 이 방법은 덩어리 결정을 성장하여 기판으로 가공하는 GaAs, InP 및 GaP 등과 같은 Ⅲ-V 화합물반도체에 비해 비생산적이고 비경제적인 것으로 여겨진다. 또한 후막 GaN의 성장에 있어 기판과의 물리적 성질 차이에 의해 발생된 미소 크랙과 응력을 완전히 제거하는 것이 곤란하기 때문에 소자의 동작 특성향상과 소자수명에 장애요인으로 작용하게 될 것이다. 따라서 GaN 기판과 homoepitaxy 기술의 결합에 의해 고품위 질화물 반도체 소자를 상업적으로 제조하기 위해서는 양질의 덩어리 결정을 성장시킬 수 있는 방법이 필연적으로 개발되어야 한다. 이러한 측면에서 최근 Czochralski법으로 일정형태의 덩어리 결정을 성공적으로 성장하였다는 보고는 향후 GaN 기판과 관련된 결정성장기술의 발전을 위하여 매우 고무적인 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

[1] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, and F. Ren, J. Appl. Phys. 86, 1 (1999).

[2] O. Ambacher, J. Phys. D : Appl. Phys. 31, 2653 (1999).

[3] S. Porowski and I. Grzegory, *GaN and Related Materials* (edited by S. J. Pearton), Gordon and Breach Science, Amsterdam, Ch.9 (1997).

[4] Y. S. Park, J. Korean Phys. Soc. 34, S199 (1999).

[5] I. Grzegory, M. Bockowski, B. Lucznik, S. Krukowski, M. Wroblewski, and S. Porowski, MRS Internet J. Nitride Semicond. 1, 20 (1996).

[6] S. Porowski, MRS Internet J. Nitride Semicond. 4S1, 3 (1999).

[7] I. Grzegory, J. Jun, M. Bockowski, S. Krukowski, M. Wroblewski, B. Lucznik, and S. Porowski, J. Phys. Chem. Solids 56, 639 (1995).

[8] V. Sukhoveev, V. Ivantsov, I. Nikitina, A. Babanin, V. Dmitriev, MRS Fall Meeting, SYMPOSIUM W, GaN and Related Alloys (November 28-December 3, Boston) W6.6 (1999).

[9] D. Elwell and M. M. Elwell, Prog. Crystal Growth and Charact. 17, 53 (1988).

[10] R. B. Zetterstrom, J. Mat. Sci. 5, 1102 (1970).

[11] S. Kurai, T. Abe, Y. Naoi, and S. Sakai, Jpn. J. Appl. Phys. 35, 1637 (1996).

[12] Y. A. Vodakov, E. N. Mokhov, A. D. Roenkov, M. E. Boiko, and P. G. Baranov, J. Crystal Growth 183, 10 (1998).

[13] Y. J. Park, M. H. Son, E. K. Kim, and S. K. Min, J. Korean Phys. Soc. 32, 621 (1998).

[14] 박기연, 이명희, 김선태, 응용물리, 12, 549 (1999).

[15] H. Yamane, M. Shimada, T. Sekiguchi, and F. J. DiSalvo, J. Crystal Growth, 186, 8 (1998).

[16] A. Argoitia, C. C. Hayman, J. C. Angus, L. Wang, J. S. Dyck, and K. Kash, Appl. Phys. Lett. 70, 179 (1997).

[17] A. Usui, Proc. LEOS '98 Conf. 362 (1998).

[18] M. Kuramoto, C. Sasaoka, Y. Hisanaga, A. Kimura, A. A. Yamaguchi, H. Sunakawa, N. Kuroda, M. Nido, A. Usui, and M. Mizuda, Jpn. J. Appl. Phys. 38, L184 (1999).

[19] T. Detchprhom, H. Amano, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, J. Crystal Growth, 128, 384 (1993).

[20] Y. V. Melnik, K. V. Vassilevski, I. P. Nikitina, A. I. Babanin, V. Y. Davydov, and V. A. Dmitriev, MRS-Internt J. Nitride Semicond. 2, 39 (1997).

[21] M. K. Kelly, R. P. Vaudo, V. M. Phanse, L. Gorgens, O. Ambacher, and M. Stuzmann, Jpn. J. Appl. Phys, 38, L217 (1999).

[22] S. T. Kim, Y. J. Lee, D. C. Moon, C. H. Hong, and T. K. Yoo, J. Crystal Growth 194, 37 (1998).

[23] M. H. Lee, S. T. Kim, S. H. Chung, and D. C. Moon, J. Korean Phys. Soc. 34, L101 (1999).