

질화갈륨 단결정 성장 기술 개발 현황

글 _ 이해웅
(주)루미지엔테크

1. 서론

오늘날, 실리콘 반도체 소자는 퍼스날컴퓨터, 텔레비전 등의 여러 형태의 가전기기를 포함하여 핸드폰, 자동차 등에서 부터 기차, 공장자동화 기기 등의 산업용 분야까지 실질적으로 모든 전자기기에 사용된다. 실리콘 반도체는 MOS형의 트랜지스터 및 Bipolar 트랜지스터의 형태로 메모리와 CPU 등의 전자 기기에 주로 사용된다.

한편, 갈륨비소(GaAs)와 인화인듐(InP) 등으로 대변되는 직접천이형 반도체인 화합물반도체는 발광소자로 이 용에 적합하며, 레이저다이오드 및 발광다이오드로 광학

기기에 적용된다. 레이저다이오드는 광통신과 CD, DVD 와 같은 광학기기에 사용되고, 발광다이오드는 가정용 전자기기의 리모콘과 같은 친숙한 제품에 사용된다. 화 합물반도체의 다른 특징으로는 높은 캐리어 이동도와 낮 은 누설전류/낮은 유전율을 갖는 화합물반도체는 휴대전 화 및 위성방송수신기 등의 고주파 트랜지스터에 적용된 다. 탄화규소(SiC)도 고출력 소자에 적용된다.

화합물반도체 중에서 질화갈륨의 중심으로 하는 질화 갈륨 기반의 반도체 재료는 직접 천이형의 넓은 밴드 갭 반도체로, 고속, 고출력 트랜지스터와 실리콘(Si) 이나 갈 륬비소(GaAs)로 구현할 수 없는 자외선에서 녹색 범위

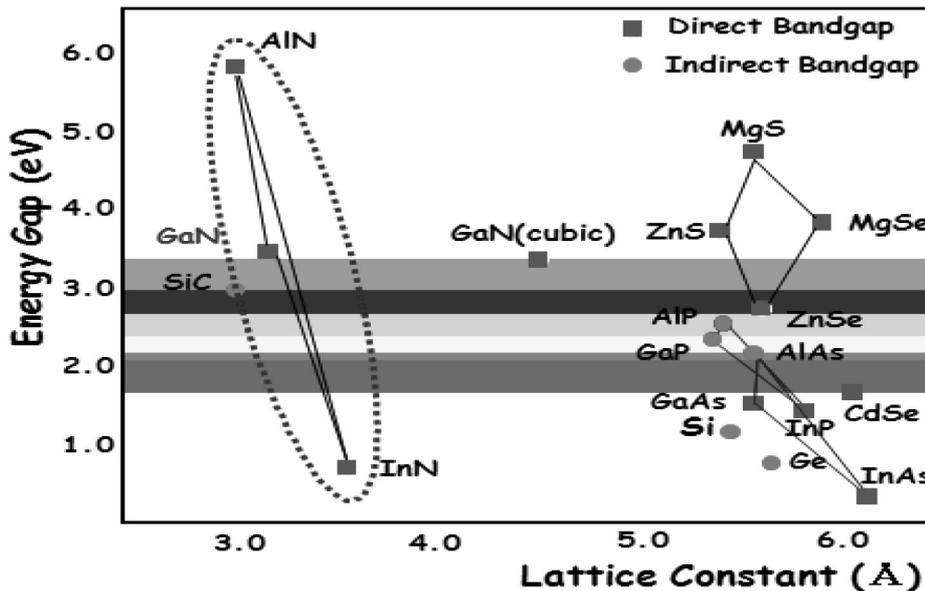


Fig. 1. 질화물계 반도체의 격자상수 및 에너지갭.

의 발광다이오드로 적합하다.

2. 질화갈륨계 반도체의 응용 범위

질화물계 반도체 재료의 연구 개발은 긴 역사를 가지고 있다. 갈륨비소 및 다른 화합물반도체와 같이 결정성장에 대한 연구개발은 1960년 초반부터 기상증착법으로 시작되었다. 1986년 저온 버퍼층을 이용한 결정질의 향상¹⁾과 1989년 p-형 전도의 발견²⁾은 이 분야에서의 두가지의 중요한 과학적 Breakthrough이며, 1993년 청색 발광다이오드의 상업화를 이끌었다. 이 두가지 과학적 개발은 나고야 대학의 Isamu Akasaki 교수에 의해 이루어졌다. 결과적으로 기상 증착법을 이용한 결정성장 기술의 개발에 많은 진전이 있었고, 레이저다이오드 및 발광다이오드 분야에 실질적 응용이 현실화 되었다. 질화물계 반도체와 다른 반도체의 물리적 특성과 이들 특성을 이용한 소자의 비교를 Table 1에 나타내었다.

발광소자 분야에서 질화물계 반도체가 직접천이형 반도체이며 넓은 밴드갭을 갖는 장점을 이용하여 자외선에서 가시광선 영역까지 발광소자를 현실화시켰다. GaN, AlN 그리고 InN의 혼합 반도체 (Mixed Crystal Semiconductors)를 혼합하여 자외선에서 적외선 영역의 발광소자를 현실화 하는 것이 가능하다. (Fig. 1 참조)

발광소자로서의 질화물계 반도체의 잠재력은 200nm의 자외선영역에서부터 광통신에 사용되는 1500nm의 적외선영역까지 가능하다는 것이다. 현재 발광다이오드는 210-550nm 영역까지 레이저다이오드는 342-488nm 영역

에서 연구개발 수준까지 도달하였다. 발광다이오드의 경우 365-520nm, 레이저다이오드의 경우 400-450nm 범위에서 상용화되었다. 하지만 남아있는 파장 범위의 잠재력에도 불구하고, 이 범위는 실질적 측면에서는 미개발 영역이다. 남아있는 파장 범위를 활용하기 위해서 미래의 기술 혁신이 필요하다.

다른 한편, Table 1에서 볼 수 있듯이 질화물계 반도체는 우수한 전자이동도, 절연파괴전압, 포화전자속도, 및 열전도도를 나타내고, 이에 따라 고주파, 고출력트랜지스터 재료로도 많은 가능성을 갖고 있다. Fig. 2는 전자소자에서 여러 종류의 반도체 재료의 응용 범위를 나타낸다. 질화물계 반도체는 다른 반도체재료로 실현할 수 없는 고주파 및 고출력 영역에서 가능성을 갖고 있다.

질화물계 반도체는 갈륨비소의 비소와 같은 유해한 물질을 포함하고 있지 않기에 친환경성을 나타낸다. 원재료인 Ga 및 N의 자원 고갈도 염려할 필요가 없기에 미래의 재료로 촉망되는 장점이 있다.

3. 이종성장법의 응용 및 그의 한계

Si, SiC, GaAs, 그리고 InP는 모두 벌크 단결정 형태로 존재하기에 Si, SiC, GaAs, InP의 기판이 이들 결정의 에피택셜 성장에 각기 사용된다. 동일한 소재의 단결정 기판을 사용하여 결정성장을 하는 것을 동종결정성장 (Homoeptaxial growth)라고 한다. 하지만 GaN 벌크 단결정을 얻는 것이 불가능하기에 소자 생산을 위해 결정을 성장시킬 때, 다른 소재의 기판이 GaN계 반도체와 함

Table 1. 반도체 재료의 물리적 특성과 질화물계반도체의 특성

반도체재료	Si	SiC-4H	Diamond	GaAs	질화물반도체		
					GaN	AlN	InN
천이형태	간접천이형			직접천이형			
밴드갭(eV)	1.0	3.3	5.5	1.4	3.4	6.2	0.6-0.7
전자이동도 (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	1500	1000	1800	8500	1200	-	4000
절연파괴전압 (MVcm ⁻¹)	0.3	3.0	4.0	0.4	3.3	-	2.0
포화전자속도 (10 ⁷ cm s ⁻¹)	1.0	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0	4.2
열전도도 (Wcm ⁻¹ K ⁻¹)	1.5	4.9	20.9	0.5	2.1	2.9	0.8

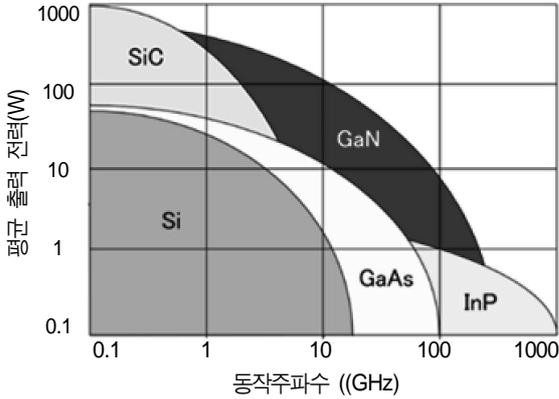


Fig. 2. 고주파/고출력 전자소자의 응용 영역.

게 사용된다.

이것이 GaN계 반도체가 뛰어난 잠재력을 나타내는 것을 불가능하게 만드는 주요 장벽이다. 현재 GaN계 반도체는 사파이어 또는 SiC 기판 위에 GaN계 반도체 박막을 결정 성장시켜 생산되고 있다. 이런 형태의 결정성장 즉 이종 재료의 기판 위에서 에피택셜 성장이 수행되는 것을 이종성장(Heteroepitaxial growth)라고 한다. Table 2에 GaN계 반도체 결정을 형성하는 방법에서 이종성장 및 동종성장의 여러 형태의 차이점을 정리하였다.

이종성장에 의해 얻어지는 결정에는 결정학적 결함(전위)과 극성 면에 관련된 문제들이 있다. 첫째 성장되는 물질과 기판 물질이 다르기에 수 많은 전위결함이 열팽창계수의 차이와 격자상수의 차이에 의해 생긴다³⁾. 이것이 소자의 특성, 특히 출력과 수명에 역효과를 나타낸다^{4,5)}. 또한 이종기판과 결정면 방향의 관계에서 생기는 자발 분극은 발광효율 증가를 어렵게 한다.

발광소자에 실질적으로 사용되는 GaN 단결정 성장에 있어 수 마이크로미터 두께의 GaN 계 박막은 사파이어 또는 실리콘카바이드 상에 1000°C 이상에서 유기금속 화학증착법으로 성장된다. 하지만 기판물질과 GaN계 물질의 격자상수와 열팽창계수의 차이로 10⁹개/cm² 이상의 높은 밀도의 전위결함의 생성을 피할 수 없다. 이 Type A 형태의 결정개발로는 UV 영역 및 고출력 LED, 그리고 레이저다이오드 분야의 응용이 불가능하다는 것을 의미한다. 따라서 결함밀도를 감소시키기 위한 연구 개발

Table 2. GaN의 에피택시얼 성장 및 그 응용

	Heteroepitaxial			Homoepitaxial
	Type A	Type B	Type C	Type D
장점	대면적 가능	대면적 가능	대면적 가능	고품질 Polar/Non-polar/ Semi-polar 가능
단점	결함밀도~10 ⁹ /cm ² 극성: c축자발분극	결함밀도~10E ⁹ /cm ² 극성: c축자발분극	극성:c축자발분극 High Price	High Price
응용	UV~Green	Blue-LD: 저출력	Blue LD: 고출력	개발중

이 진행되었고 Epitaxial Lateral Overgrowth(ELO)법을 이용하여 사파이어 기판 위에 10⁷개/cm² 수준의 결함밀도 까지 감소시키는 것이 가능하게 되었다⁶⁾. (Table 2의 Type 2) Type B 방법의 지속된 개발로 GaAs 기판 위에 수백 마이크로미터 두께의 GaN 후막을 성장한 후 GaN 결정을 분리함으로써 10⁵개/cm² 수준의 결함밀도를 갖는 GaN 후막 기판의 성장이 가능하게 되었다^{7,8)}. (Table 2의 Type C). Type C 방법에 의한 GaN 기판에서 10⁵개/cm² 수준의 저결함밀도 영역이 500μm 정도의 간격으로 제한 되는 단점이 있으나, Blu-ray Disk에 이용되는 청자색(405 nm) 레이저다이오드의 생산에는 아무 문제없이 적용되고 있다⁹⁾. 하지만 Type C 형태의 GaN 기판은 균일한 품질을 요구하는 고출력 LED 및 전자소자용으로 사용하기에는 곤란하다.

격자상수의 차이에 의해 일반적인 헤테로 에피택시 성장 면은 C면이다. C면은 극성을 갖는 결정면으로 자발 분극이 생기는 면이다. 자발 분극이 생기면 소자에서 전하 주입이 발광 또는 트랜지스터 작동에 효율적으로 기여하지 못하는 문제가 있다. 이런 측면에서 이종 성장에 의한 결정의 성능 향상에는 근본적인 한계가 있다.

전자소자에 있어서, 수평소자인 HFET(Hetero-Junction Field Effect Transistor)는 현재 Type A를 이용하여 제조되고 있고, GHz 영역 이상에서 작동하는 고주파 기기 로 휴대폰 같은 이동통신용 기지국에 실제 적용되고 있다. 하지만, 이동통신의 고속화 및 고용량화를 달성하기 위해 밀리미터파 영역(30-100GHz)에서 작동하는 고출력 트랜지스터가 필요하게 될 경우에는 질화물반도체가

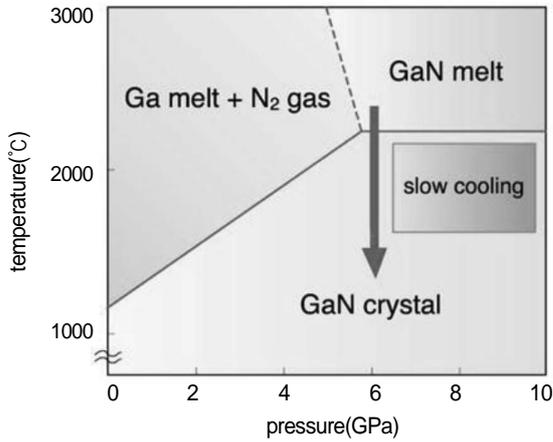


Fig. 3. 온도-압력에 따른 GaN 상태 변화.

물질특성 측면에서 가장 적합한 물질이 되며, 시스템의 소형화와 소비전력 측면에서도 장점을 갖는다.

또한 현재 가전 및 산업분야와 하이브리드 자동차 등에 사용되는 인버터는 Si 반도체를 이용하여 생산/적용되고 있으나, Si 소자를 질화물계 소자로 전환할 경우에는 높은 시스템 효율을 얻을 수 있어 에너지절감 및 저탄소화에 기여할 수 있다.

4. 해외의 GaN 단결정 개발 동향

Fig. 3 및 Table 3에서 알 수 있듯이 GaN의 높은 질소 분해압력으로 Si 등과 같은 용액(melt)로부터의 GaN 단결정 성장은 2200°C 이상의 고온과 60,000기압 이상의 고압을 요구하기에 GaN 단결정 성장이 어려우며, 일반적으로 기상법 또는 액상법(Liquid phase growth를 의미하며 Melt로부터의 성장이 아님)으로 성장하고 있다. GaN 성장법은 Table 4와 같이 에피-벌크와 벌크법으로 구분할 수 있다.

2011년 현재 청색 레이저다이오드의 생산용으로 공급되는 GaN 웨이퍼는 기상증착법으로 성장된 에피-벌크 형태이다. 사파이어기판 또는 GaAs 등의 기판 상에 GaCl과 NH₃의 반응을 이용하여 후막 GaN기판을 성장시켜 10⁵⁻⁶ 개/cm² 수준의 GaN 웨이퍼를 생산하는 제조공정이 스미토모전공, 히타치케이בל, 후루카와기계금속, 미쯔비

Table 3. Melting Temperatures and Pressures of Most Typical Semiconductor Materials

재료	Melting Temperature (°C)	Pressure (atm)
Si	1400	<1
GaAs	1240	2
GaP	1465	30
GaN	2225	60,000
AlN	3200	>100
InN	1900	60000

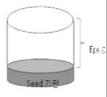
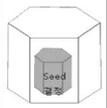
스케미컬 등의 일본계 업체에 의해 개발되어 일부 양산에 적용되고 있다.

또한 c-축 방향으로 두껍게 성장한 후, 두께 방향으로 절단 가공하여 m면 및 a면 기판도 연구용으로 사용되고 있다¹¹⁾.

기상법에 의한 GaN 웨이퍼 개발을 상세히 살펴보면 (Table 5), 1999년 미국의 Advanced Technology Materials Inc(ATMI사)가 HVPE법으로 후막 GaN를 사파이어 기판 상에 성장한 후 Laser 분리법으로 GaN 웨이퍼의 제조가 가능성을 발표한 이후, 2000년 삼성종합기술원이 Laser 분리법에 의한 2인치 GaN 웨이퍼의 개발을 발표하였다. GaN 웨이퍼의 상용화 즉 청자색 레이저다이오드 생산으로의 적용은 2003년 일본의 스미토모전공에 의해 시작되었는데, 이 때 스미토모전공은 초기에 기판으로 이용한 GaAs를 화학에칭으로 제거하여 GaN 웨이퍼를 제조하였었다. 그 이후 일본의 히타치케이בל은 Ti-메탈 코팅을 적용한 Void Assited Separation(VAS)공법을 개발하여 양산에 적용하였으며, 그 이후 스미토모전공도 ELO 공정을 두번 적용한 Self-Separation 공법을 개발하였다. 2007년 일본 동북대의 Yao 교수팀에서는 기존의 self-separation 공정이 Ex-situ 공정으로 개발된 것에 대비하여 단순한 In-situ 공정에 의한 self-separation 공정 개발을 발표하였다. Yao 교수팀의 개발 내용은 HVPE 공정에서 생기는 부산물인 NH₄Cl을 저온 공정을 도입하여 의도적으로 성장층에 포함시킨 후, 고온 공정에서 휘발시켜 사파이어와 GaN 성장층 사이에 임의의 공공(Void)를 형성하여 이를 자동 분리에 응용하는 것이다. 스미토모전공, 히타치케이בל, 동북대의 자동 분리를 위한 GaN/Sapphire계면 사진을 Fig. 4에 나타내었다.

하지만 이를 진정한 GaN 단결정이라고 하기에는 아직

Table 4. Bulk GaN 기판 개발 동향

방식	성장법	특징	
에피-벌크법 	기상	기상증착법 - 사파이어 등의 기판 상에 결함밀도 $10^{5,6}/\text{cm}^2$ 수준의 GaN 후막 성장하여 이를 Seed 기판으로 성장 - C축성장기 기본이며, 성장방향에 직각으로 잘단하여 non-polar (m면, a면) 기판(5mmx10mm) 실현	
	액상용액 성장	고압용액법	1~2만기압, ~1500°C의 고온, 고압 하에서 금속Ga에 질소를 용해시켜 기판 위에 에피택셜 성장
		Ammonothermal	1~2천기압, 4~600°C의 초임계 암모니아(NH ₃)에 GaN을 용해, 재결정화하여성장
벌크법 	기상	기상합성	1200°C 이상의 고온에서 Ga 증기와 NH ₃ 를 반응시켜 GaN 성장 크기에 한계 (< 1mm)
		승화법	GaN분말을 1500°C 정도에서 승화시킨 후, 저온 영역에서 재성장
	액상용액 성장	용액성장	6만기압, 2200 이상의 고온 고압하에서 서냉하여 GaN 성장
		고압용액법	1~2만기압, ~1500°C의 고온, 고압 하에서 금속Ga에 질소를 용해시켜 자발핵 생성으로 GaN 성장
		Ammonothermal	1~2천기압, 4~600°C의 초임계 암모니아(NH ₃)에 GaN을 용해, 재결정화하여성장 자발핵 생성된 Seed를 사용
Flux법	알카리계 금속(Na, K 등)과 Ga 금속의 용액에 기상으로부터 질소를 용해시켜(-100기압, ~800°C) GaN를 성장 자발핵생성을 이용		

기상증착법 : Vapor Phase Epitaxy
 고압용액법: High Pressure Solution Method
 플럭스법 : Flux Method

부족하다. 진정한 GaN 단결정이란 전위결함밀도가 없거나 이중성장에 의해 도달할 수 없는 수준(10^3 개/cm²의 전위결함밀도를 갖고, polar, non-polar, semi-polar 등 임의의 결정면으로 웨이퍼를 만들수 있는 것을 말한다.

현재 고품질의 GaN 웨이퍼는 Ammonothermal 법에 의해 개발되고 있다. Ammonothermal 법에서는 400~600°C, 1000~2,500 기압의 조건을 만들어 초임계암모니아(super critical ammonia)에서의 GaN 분말의 용해 및 석출을 이용하여 GaN을 성장시킨다¹⁸⁾. 폴란드의 Ammonothermal 사가 2인치 GaN 웨이퍼의 개발을 발표하였으며, 미국의 UCSB 및 일본의 동북대에서도 본 방법을 이용한 GaN 웨이퍼 개발이 진행 중에 있다. 본 방법에 의한 GaN 기판은 에피-벌크법으로는 달성하기 어려운 수준의 곡률반경을 갖고 있으며 결함밀도도 10^3 개/cm² 수준까지 도달하여 있다.

일본의 경우에는 독자적인 특허를 갖고 있는 플럭스법을 지속적으로 개발하고 있는데, 플럭스법은 ~800°C 이상의 온도와 수십기압의 질소 압력하에서 금속 Ga의 용액에 Na, K, Li 등의 알카리 메탈을 추가하여 질소의 용해도를 높여 혼합용액 하에서 GaN를 성장시키는 방법이다^{19,20)}. 본 방법에 의해 2인치 GaN 웨이퍼까지 개발이 보고되고 있으며²¹⁾, 현재는 4인치까지 개발된 것으로 사료된다.

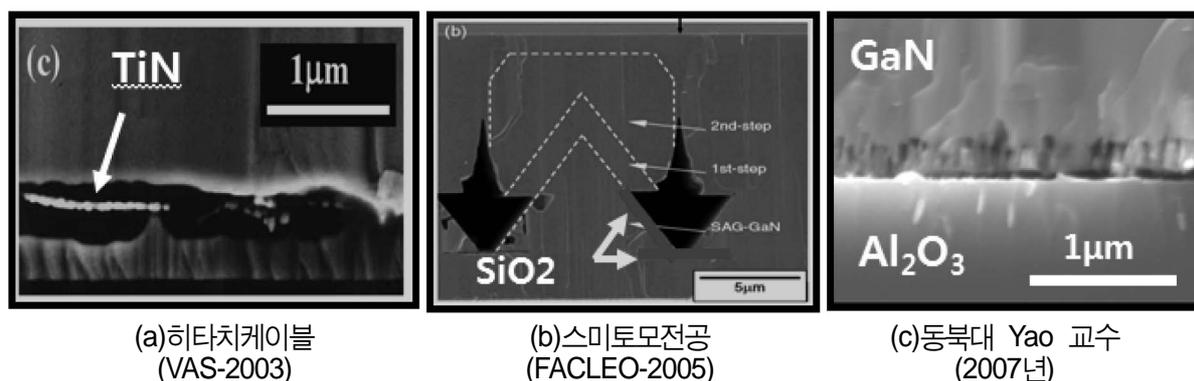


Fig. 4. 자동 분리를 위한 GaN/Sapphire 계면 형성의 예. (a)히타치케이블 VAS(Void Assisted Separation), (b)스미토모전공 FACE-LO(Facet-Controlled Epitaxial Lateral Overgrwth), and (c)동북대, Yoa교수, NH₃Cl을 이용한 void 형성.

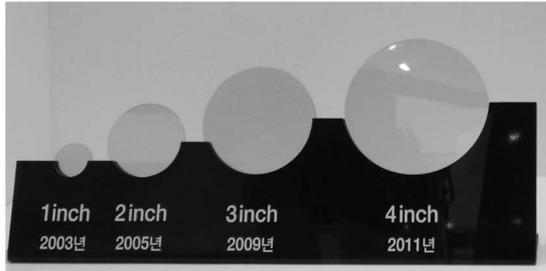


Fig. 5. 국내 삼성코닝정밀 소재의 GaN 기판 전시 사진. (한국전자전 2011년 10월 12일~15일, 일산 킨텍스)

5. 국내 GaN 단결정 기술 개발 현황

국내의 GaN 단결정 개발은 2009년 한국화학연구원에서 Ammonothermal법을 채용하여 GaN 개발을 착수한 것을 제외하고는 주로 기상증착법을 이용하여 진행되고 있다.

국내 산업계의 HVPE법을 이용한 GaN 기판 개발은 이력을 Table 6에 정리하였다. 1998년 삼성종합기술원에서 시작되었다. 삼성종합기술원은 러시아 Ioffe 연구소로부터 HVPE 시스템과 기본 성장 공정 기술을 기술 이전 받음으로써 HVPE 관련 기술의 기반을 확보하였고, 이를 바탕으로 2000년에는 세계 최고 수준의 GaN 웨이퍼 기술을 확보하게 되었다. 삼성종합기술원은 2002년 HVPE에 의한 GaN 성장 기술 전반을 삼성코닝(주)(현재는 삼성코닝정밀소재)에 기술 이전하였다. 삼성코닝은 삼성종합기술원에서 이전 받은 기술을 바탕으로 소규모 양산 체제를 구축하고 2003년 1인치 GaN기판 개발에 2005년에 2인치 GaN 기판 개발에 성공하였으며, 2009년에 3인치, 2011년에 4인치 GaN 웨이퍼 개발을 발표하고 있다(Fig. 5).

LG전자기술원은 2000년에 GaN 기판 개발에 착수하였으나, 2003년에 GaN 기판 개발을 중단하였고, LG전자 기술원의 HVPE 관련 기술은 옵토웨이퍼테크에서 추가 개발을 추진하였으나, 2004년에 중단되었다.

한편 LG실트론, 삼성전기, 산플러스, GaN tech 등에서 관련 연구 개발을 시도하였으나, 현재는 중단된 것으로 알려져 있으며, 산플러스의 HVPE 기술은 현재 그

Table 5. HVPE에 의한 GaN 웨이퍼 개발 경과

Year	Inventor	Growth process	Separation technique	Ref.
1999	Advanced Technology Materials	HVPE-GaN	Laser lift-off	12
2000	Samsung	HVPE-GaN		13
2001	Sumitomo	SiO ₂ (0.1μm)→Photo-lithography→HVPE-GaN	GaAs wet-etching	7
2003	Hitachi	MOVPE-GaN growth→Ti metal deposition→HVPE-GaN	Self-separation	14
2005	Sumitomo	MOVPE-GaN→SiO ₂ Deposition→Photo-lithography→MOVPE-GaN→SiO ₂ deposition→Photo-lithography→MOVPE-GaN→HVPE-GaN growth		15
2007	Tohoku Univ.	HVPE-GaN		16
2009	Industrial Technology Institute	MOCVD-GaN→SiO ₂ deposition→Ni-layer deposition→Annealing of Ni-layer→Dry etching (RIE)→Ni, SiO ₂ etching→SiO ₂ deposition→SiO ₂ Dry etching (RIE)→HVPE-GaN		17

랜드텍(주)에 연계되어 지속적으로 개발되고 있다.

1998년부터 지금까지 HVPE법에 의한 GaN 기판 개발 업체를 Table 6에 정리하였으며 현재 지속적으로 개발하고 있는 업체는 삼성코닝정밀소재(주) 유니모포트론, 루미지엔테크, 그랜드텍, 루미스탈, 판크리스탈로 파악되고 있다.

국내 학계의 HVPE 제조기술을 이용한 GaN 성장 기술 개발은 1990년 중반 한밭대 김선태 교수의 개발이 시

Table 6. 국내 산업체의 HVPE법에 의한 GaN 웨이퍼 개발 경과

업체명	내용
삼성종합기술원	1998년 개발착수, 2002년 삼성코닝에 기술 이전, 2009년 중단
삼성코닝정밀소재	2002년 삼성종합기술원에서 기술이전, 2003년 1인치 개발, 2005년 2인치 개발, 2011년 4인치 개발
LG종합기술원	2000년 개발 착수, 2003년 중단, 옵토웨이퍼테크에서 추가 개발(2004년 중단)
LG실트론	2004년 개발 착수, 2006년 개발 중단 (GaN on Si by MOCVD에 집중)
산플러스	2004년 개발 착수, 2007년 중단
그랜드텍	2008년 개발 착수
GaN Tech	2008년 개발 착수, 2010년 중단
유니모포트론	2008년 개발 착수 현재 진행 중
루미지엔테크	2007년 개발 착수 현재 진행 중
루미스탈	2009년 개발 착수 현재 진행 중
판크리스탈	2011년 개발 착수 현재 진행 중

작점으로 파악되며, 2000년대 초 LG 및 삼성의 개발에도 많은 도움을 준 것으로 생각된다. 한밭대학교 김선태 교수의 개발 이후에 한양대 오재응 교수(2000년), 동국대학교 강태원 교수(2001년), 한국해양대학교 양민, 안형수, 이삼녕 교수팀(2002년), 경희대학교 김진교 교수(2004년), 한양대학교 심광보 교수(2005년), 성균관대학교 윤대호 교수(2006년), 동의대학교 이원재 교수(2008년), 전남대학교 하준석 교수(2011년) 등이 개발을 착수하여 지금까지 개발이 진행되고 있다. 국내의 학계에서는 GaN 웨이퍼 제품 개발을 위한 연구보다는 HVPE 공정을 이용한 LED향 응용 및 기초 성장 특성 등 기초 연구에 집중하고 있다. 최근 한국세라믹기술원 황중희 박사팀에서는 UV 영역의 발광 및 수광 소자 적용을 목표로 HVPE 법에 의한 AlN 및 AlGaIn 성장 특성에 대한 연구를 시작하였다.

6 결론

질화물반도체의 성능 향상을 위한 질화물단결정 웨이퍼 개발에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있는데, 국내의 연구개발은 기상증착법에 편중되어 있는 상황이다. 단기적으로 기상증착법에 의한 GaN 기판 기술 개발이 조속히 필요하며, 중/장기적 관점에서 일부 진행되고 있는 ammonothermal법에 의한 개발 및 다른 형태의 액상법에 대한 연구도 꾸준히 진행되어야 향후 LED분야 및 전자소자 분야에서의 기술 경쟁력을 확보하는데 큰 도움이 될 것이다.

또한 본 논문에서는 서술하지 않았지만, 비극성 및 반극성 기판 개발에 대한 연구도 동시에 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, "Metalorganic Vapor Phase Epitaxial Growth of a High Quality GaN Film Using an AlN Buffer Layer," *Appl. Phys. Lett.*, **48** 353-5 (1986).
2. H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, "P-

- Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** L2112-4 (1989).
3. S. D. Lester, F. A. Fonce, M.G. Craford, and D.A. "Steigerwald, High Dislocation Densities in High Efficiency GaN Based Light-emitting Diode," *Appl. Phys. Lett.*, **66** 1249-51 (1995).
4. H. Amano, "Development of Short Wavelength Visible/Ultraviolet Light-Emitting Devices and Semiconductor Heteroepitaxy," *Oyo Butsuri*, **71** 1329-34 (2002).
5. M. Takeya, et al., "Relationship between Dislocation Density and Reliability in GaN-based Semiconductor Lasers," *Proceedings of the 63rd Autumn Joint Meeting of the Japan Society of Applied Physics*, 27a-YH-11(2002).
6. A.Usui, H. Sunakawa, A. Sakai, and A.A. Yamaguchi, "Thick GaN Epitaxial Growth with Low Dislocation Density by Hydride Vapor Phase Epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** L899-92 (1997).
7. K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushita, H. Kumura, H. Kasai, Y. Kumagai, and A. Koukisu, "Preparation of Large Freestanding GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy Using GaAs as a Starting Substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** L140-143 (2001).
8. Y.Oshima, T.Eri, M.Shibata, H.Sunakawa, K.Kobayashi, T.Ichihashi, and A.Usui, "Preparation of Freestanding GaN Wafers by Hydride Vapor Phase Epitaxy with Void-Assisted Separation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** L1 (2003).
9. Motoki et al., "Low Dislocation GaN Crystal by Advanced-DEEP Method," *Japan Society for the Promotion of Science, No. 161 Committee, Materials of the 54th Workshop 5*(2007). (Japanese)
10. J. Karpinski J. Jun and S. Porowski, "Equilibrium Pressure of N₂ Over GaN and High Pressure Solution Growth of GaN," *J. Cryst. Growth.*, **66** 1 (1984).

11. K. Fujito, K. Kiyomi, T. Mochizuki, H. Oota, H. Namita, S. Nagao, and I. Fujimura, "High-Quality Nonpolar m-Plane GaN Substrate Grown by HVPE," *Physica Status Solidi (a)*, **25** [5] 1056-9 (2008).
12. MK Kelly, R. P. Vaudo, V. M. Phanse, L. Görgens, O. Ambacher, and M. Stutzmann, "Large free-standing GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy and Laser-induced Liftoff," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 **38** L217 (1999).
13. Sung S. Park, Il-W. Park, and S. H. Choh, "Free-Standing GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** L1141-2 (2000).
14. Y. Oshima, T. Eri, M. Shibata, H. Sunakawa, K. Obayashi, T. Ichihashi, and A. Usui, "Preparation of Freestanding GaN Wafers by Hydride Vapor Phase Epitaxy with Void-assisted Separation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** L1 -3 (2003).
15. S. Bohyama, H. Miyake, K. Kiramatsu, Y. Tsuchida, and T. Maeda, "Freestanding GaN Substrate by Advanced Facet-controlled Epitaxial Lateral Overgrowth Technique with Masking Side Facets," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** L24-26 (2005).
16. Hyun-Jae Lee, S.W. Le, H. Got, S. H. Lee, H. J. Lee, J. S. Ha, T. Goto, M. W. choi, T. Yao, and S. K Hong, "Self-separated Freestanding GaN using a NH_4Cl Interlayer," *Appl. Phys. Lett.*, **91** 192108 (2007).
17. C. L. Chao, C. H. Chiu, Y. J. Lee, H. C. Kuo, P. C. Liu, J. D. Tsay, S. J. Cheng, "Freestanding High Quality GaN Substrate by Associated GaN Nanorods Self-separated Hydride Vapor-phase Epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, **95** 051905-3 (2009).
18. D. R. Ketchum and J. W. Kolis "Crystal Growth of Gallium Nitride in Supercritical Ammonia," *J. Cryst. Growth.*, **222** 431 (2001).
19. H. Yamane, M. Shimada, S. J. Clarke, and F. J. DiSalvo, "Preparation of GaN Single Crystals Using a Na Flux," *Chem. Mater.*, **9** 413-6 (1997).
20. S. Sarayama and H. Iwata, "High Quality Crystal Growth of Gallium Nitride by Flux Method," *Ricoh TechnicalReport.*, **30** 9(2004).
21. F. kawaura, K. Umeda, M. Morishita, M. Kawahara, M. Yohsimura, Y. Mori, T. Sasaki, and Y. Kitaoka, "Growth of a Two-Inch GaN Single Crystal Substrate Using the Na Flux Method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** L1136-8 (2006).

이혜용



- 1993년 한국과학기술원 재료공학과 박사
- 1993년 삼성코닝(주) 선임연구원
- 2007년 (주)루미지엔테크 대표