

GaN(Gallium Nitride) 기반 전력소자 제작 기술개발 현황

I. 서론

본 고에서 GaAs 더불어 차세대 화합물 반도체 플랫폼으로 각광을 받고 있는 GaN 전자소자 글로벌 연구개발 동향에 관하여 기술하고자 한다. GaN 전자소자는 와이드 밴드갭($E_g=3.4\text{eV}$)과 고온 안정성 (700°C) 등 재료적인 특징으로 인하여 고출력 RF 전력증폭기와 고전력용 전력반도체 응용에 큰 장점을 가진다. GaN 전자소자 기술동향에서는 먼저 미국, 유럽, 일본을 중심으로 한 대형 국책 연구프로젝트 분석을 통한 RF 전력증폭기 연구개발 방향을 살펴보고, 후반부에서는 이동통신 기지국, 선박 및 군용 레이더 트랜시버용 고출력 RF 전력증폭기의 응용 분야에 관하여 알아본다. 이러한 총체적인 동향분석을 통하여 차세대 반도체의 신시장 개척과 선진입을 위한 GaN 전자소자의 연구개발 방향과 조기상용화의 중요성을 함께 생각해보고자 한다.

II. 본론

1. 파워디바이스 개요

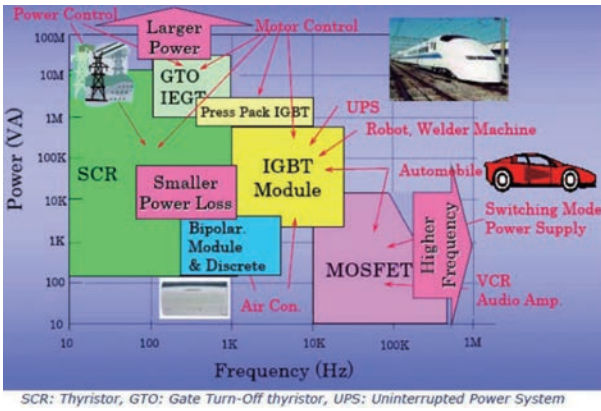
우리나라는 물론이고 전 세계적으로 에너지 부족 및 환경오염에 대한 두려움이 커지고 있는 가운데 반도체 소자 영역에서 전기를 절약하기 위하여 고효율, 친환경의 파워디바이스에 대한 관심이 점점 증가하고 있다. 파워디바이스는 신호 및 정보를 처리, 저장하는 시스템 반도체나 메모리 반도체와 달리 전기에너지의 변환/제어처리를 수행하는 반도체 소자로서 전기를 처리하는 모든 전기전자기기 (스마트 그리드, 가전, 휴대폰, 자동차 등)에 사용되는데, 주로 전력변환 (AC→DC, DC→AC), 전력변압 (감압, 승압), 전력안정, 전력효율 최적화 (분배, 제어) 등에 사용된다. 전력에너지반도체는 응용분야와 내압 특성에 따라 개별소자



이병철
제이엘 연구소



성홍석
부천대학교



(그림 1) 전력 범위와 스위칭 주파수에 대한 다양한 파워디바이스 기술의 적용분야

(discrete), 집적회로 및 다중 소자를 패키지로 집적한 모듈 (module) 형태로 존재하며 산업분야에 따라 전력레벨이 다른 반도체 소자가 사용되는데, GaN 파워디바이스는 그린 IT의 핵심기술 중 하나로써 전력을 시스템에 배분하는 제어와 변환기능을 가진소자로 에너지를 절약하고 제품의 크기를 축소하여 전력공급 장치나 전력변환 장치에 사용되고, 다양한 응용제품을 구성하는 핵심 반도체로 고효율/저손실 에너지절감 전력반도체 기술 및 산업의 선진화에 크게 기여할 것으로 예상하여 미국과 일본을 중심으로 여러 나라에서 활발히 연구 개발을 진행 중이다. 그림 1은 전력 범위와 스위칭 주파수에 대한 다양한 파워디바이스 기술의 적용분야를 도식화하여 표현한 것으로 주로 실리콘 (Silicon) 파워디바이스인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 등이 사용되며, 기존의 파워디바이스인 IGBT의 경우 실리콘 소재로 인한 고효율 및 초소형 전력 반도체 소자 제작에 기술적인 한계점에 이르렀으며, 이러한 한계점을 극복하기 위해 차세대 가전제품에 탑재 가능한 고효율·초소형 파워디바이스의 필요성이 증대되고 있는 가운데 밴드갭이 넓은 (wide bandgap) 화합물 반도체기반의 소자가 활발히 연구 개발 중에 있다.

밴드 갭(band gap)은 전도대와 가전자대 사이의 에너지 폭을 말한다. 화합물 반도체의 장점이 이 밴드갭을 자유자재로 조정할 수 있는 장점이 있으나 제작에 어려움이 많다.

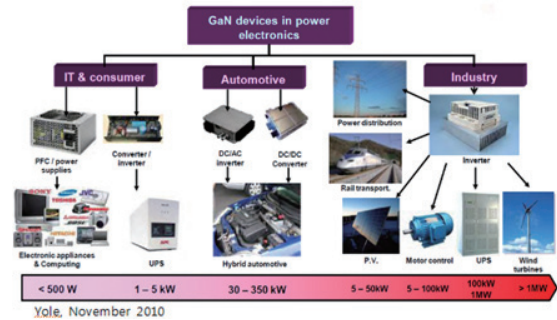
2. GaN 파워디바이스 필요성

파워디바이스는 전자기기의 효율적 에너지 사용, 안전성 및 신뢰성을 좌우하는 핵심부품으로 에너지 절감을 통한 친환경적인 반도체 소자이며, 특히 수출 주도형의 국내 전자기기 산업의 구조상 핵심부품인 파워디바이스의 내재화는 제품 경쟁력을 좌우하는 핵심요소이다. 현재까지 대부분의 파워디바이스는 실리콘 반도체를 기반으로 제작되고 있으나, 실리콘의 물성적 한계로 인하여 IT 기반의 모바일 기기에서 필요로 하는 저전력, 고효율 특성과 충전기기, 발전, 자동차 등에서 필요로 하는 고전압, 고전류 및 경량화 등의 다양한 특성을 만족하고 있지 못한 실정이다. 이와 비교하여 밴드갭이 넓은 (wide bandgap) 화합물 반도체 소재인 GaN (Gallium Nitride)는 실리콘 소재 대비 우수한 물성으로 인하여 차세대 파워디바이스에서 요구되는 고내압 및 고전류 구동이 가능하며, 현재 사용 중인 실리콘 소재의 물성적 한계를 극복할 수 있는 차세대 반도체 재료이다. 표 1은 반도체 종류별 특성 비교 및 GaN 반도체 소재의 고전력/내환경 반도체로의 응용 가능성을 나타낸 것으로, GaN 반도체는 실리콘이나 갈륨비소와 비교하면 밴드갭 ($E_g=3.4\text{eV}$)이 넓은 특성과 고온 (700°C) 안정성에 장점이 있다. GaN 파워디바이스는 실리콘 파워디바이스에 비하여 낮은 온-저항 특성을 가지고 있으며, 이는 파워디바이스 동작에 따른 스위칭 손실 최소화 및 시스템 소비전력 최소화의 장점이 있고, GaN의 넓은 밴드갭 특성 ($\text{Si}=1.1\text{eV}$, $\text{GaN}=3.2\text{eV}$)은 파워디바이스의 고온·고출력 동작을 가능하게 하며, 고출력 기반의 전력 시스템에 사용되는 인버터, 컨버터 등의 전력 모듈에 필요한 냉각장치를 최소화 할 수 있다. 이는 시스템의 소형화 및 경량화를 가능하게 하여 기존 실리콘 기반 IGBT에 비해 30% 이상의 에너지 절감이 가능하여 HEV나 전기자동차에 적용하면 경량화, 전력변환효율 향상, 전용 냉각시스템을 제거 또는 간소화 할 수 있어 연료 소모를 10% 이상 줄일 수 있다.

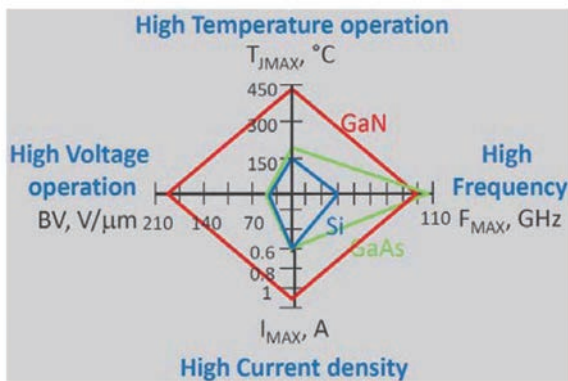
(그림 2)는 고전압/고전류/고주파수/고온 동작에 대한

〈표 1〉 반도체 종류별 특성 비교 및 GaN 소재의 고전력, 내환경 반도체로의 응용 가능성

재료	Si	GaAs	GaN	응용
포화전자속도(10 ⁷ cm/s)	1	2	2.5	초고주파 응용 고스위칭 응용
절연파괴 전계(MV/cm)	0.3	0.4	3.3	고전력 응용 내전압 응용
밴드갭(eV)	1.12	1.42	3.4	
열전도율(W/cm-K)	1.5	0.5	2.1	고온환경 응용
Tmax(°C)	1	15	957	냉각개선 응용



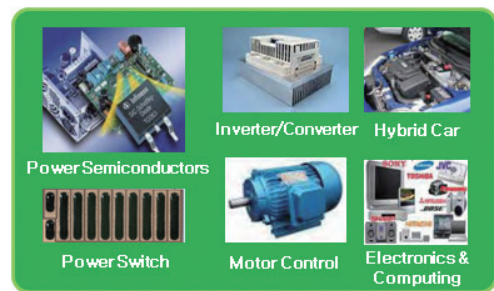
〈그림 4〉 GaN Power device 시장(출처: Yole 2010)



〈그림 2〉 고전압/고전류/고주파수/고온 동작에 대한 GaN 반도체의 특성을 실리콘 반도체, 갈륨비소(GaAs, Gallium Arsenide) 반도체와 비교

GaN 반도체의 특성을 실리콘 반도체, 갈륨비소(GaAs, Gallium Arsenide) 반도체와 비교하여 나타낸 것이다.

GaN 반도체는 실리콘에 비해 10배 이상의 높은 항복 전압 특성을 얻을 수 있어서 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 고 내압 소자 제작 시 실리콘 소재 기반의 전력반도체에 비하여 소자 크기를 소형화 할 수 있는 장점이 있다. 또한 GaN 반도체는 높은 전자포화속도를 가지며 소자의 스위칭 시간이 수 ns 이하로 기존의 실리콘 전력반도체에 비해 1/5 수준까지 낮아 스위칭 방식의 전력 공급 장치의



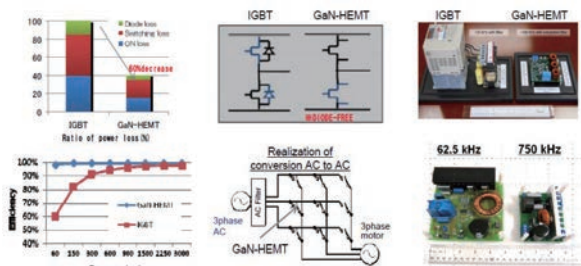
〈그림 5〉 GaN 파워디바이스 응용 부분

소형화 및 고효율화가 가능하다.

GaN 파워디바이스를 이용한 응용분야는 〈그림 4〉와 〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 IT, 가전, 자동차, 산업용으로 크게 구분되며, 전력용량에 따라 다양한 응용분야에 적용된다. 특히 절전 기능이 강조되는 가전용 제품의 시장 요구로 인하여 고효율 인버터 모듈의 적용 및 시장 규모가 커지고 있고 글로벌 에너지 위기 이후 정부 주도의 절전 규제 강화와 소비자의 절전 제품의 우선적 선택으로 인하여 가전제품의 주요 구매 성능 지수가 되었다.

3. GaN-based Electronics의 역사

최초의 GaN 반도체 재료는 1969년 Maruska와 Tietjen이 HVPE 방법에 의한 결정성장으로 거슬러 올라간다. 1971년에는 MOCVD 방법으로, 1983년에는 Akasaki 그룹에서 MBE 방법으로 GaN 결정을 성장하였다. Mg 도핑과 급속열처리를 통한 p-형 GaN 반도체형성 기술은 1992년 Nakamura 그룹에서 소개되었다. AlGaIn/GaN HEMT 소자는 1993년 미국 SouthCarolina 대학의 Asif Khan 교수 그룹에서 처음으로 보고를 하였으며, 1997년 AlGaIn/GaN HEMT on



〈그림 3〉 IGBT와 GaN 전력 반도체의 주요 성능 비교



SiC 소자를 이용한 RF 전력특성은 4 GHz S-band에서 1.4 W, 10 GHz X-band에서 0.85 W 수준이었다.

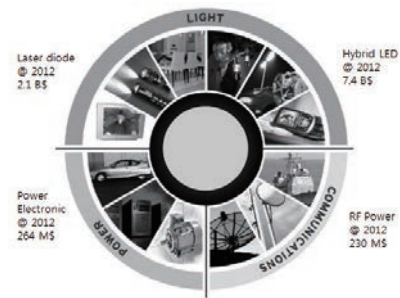
최초의 AlGaIn/GaN HBT 소자와 GaN MOSFET 소자는 1998년에 보고가 되었으며, Zhang 그룹에서는 2000년 p-n-p GaN BJT 소자를 개발하였다. 2011년 12월 현재 상용화되어 있는 AlGaIn/GaN HEMT 소자는 전력 밀도가 4~8 W/mm 수준이며, 단일칩바 최대 출력전력은 TriQuint사 TGF2023-20의 경우 3GHz에서 90W 정도이다. 상용 파운드리에는 Cree, RFMD, TriQuint, UMS 등에서 활용이 가능하며, Cree와 TriQuint는 4인치 X-band MMIC 제작도 가능하다. 그러나 비용이 워낙 고가(15~25만달러)이며, 25 W 이상의 고출력 소자는 대량 주문 제작의 제약을 받고 있어 국내에서 GaN 고부가가치 산업을 활성화하기 위해서는 고출력 소자 제작용 공정개발과 이를 통한 안정적인 파운드리 환경구축이 시급한 실정이다.

4. GaN 반도체의 이슈

GaN 반도체는 위와 같은 수많은 장점에도 불구하고 AlGaIn과 GaN 에피의 격자부정합(lattice mismatch)에 의한 특성 열화, 결정결함(crystal defects)감소, 단결정 성장(ingot or bulk), 표면특성 제어기술 개발 등 아직도 해결해야 할 여러 가지의 이슈를 가지고 있다. AlGaIn/GaN 격자부정합에 의한 스트레인 문제는 유럽 Alcatel-Thales III-V Labs를 중심으로 AlInN/GaN 격자정합(lattice matched) 에피 구조 및 소자의 개발과 대체가 활발히 진행되고 있으며, 결정 결함, 특히 전위밀도(dislocation density)가 현재 109/cm² 수준에 머물고 있어 고품위/고수명 소자를 위해서는 105/cm² 이하로 결함 농도를 낮춰야 할 필요가 있다. 이를 위하여 미국 Kyma Tech., 일본 Mitsubishi Chemical 등에서는 bulk GaN 성장에 관한 연구가 한창이지만, 아직 2인치 이상의 대면적 웨이퍼는 구하기 어려운 상황이다.

5. GaN 반도체의 다양한 응용 분야

〈그림 6〉은 GaN 반도체의 주요 응용 분야를 보여준다. GaN 반도체 소자는 크게 광소자와 전자소자로 분류할



〈그림 6〉 GaN 반도체의 주요 응용 분야 (자료: Yole Dev; ABI Res, 2009.)

수 있으며, 전자소자는 다시 통신용 마이크로웨이브 소자와 전력전자용 스위칭 소자로 나눌 수 있다.

광소자의 응용 분야는 휴대전화기, 자동차, 조명용 하이브리드 LED나 레이저 다이오드 등이 있으며, 전자소자의 응용 분야는 먼저 통신용으로 고출력, 고효율 GaN 전력증폭기는 이동통신 기지국, 위성통신, 선박 및 군수 레이더용 송수신 모듈의 핵심소자이다. 그리고, 고속 및 저손실 전력전자 분야에서는 가전제품, 산업체, 자동차, 그린에너지 시스템에 필요한 인버터 또는 컨버터를 구성하는 트랜지스터나 다이오드로 사용된다. 이러한 거대 시장 응용 분야 이외에도 프랑스 Alcatel-Thales III-V Labs를 중심으로 고온, 고압에서 안정적인 GaN 반도체 특성을 이용하여 극한환경(harsh environment)에서 동작하는 센서 소자로도 활용분야를 점점 넓혀가고 있으며, 미국 플로리다 대학 J. S. Pearton 교수 그룹에서는 수소 가스 센서와 바이오 센서 응용을 위한 연구도 진행 중이다.

6. GaN 결정구조 및 기본 특성

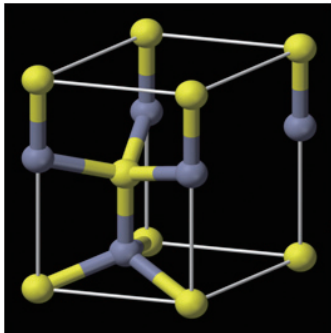
GaN 결정구조는 Zinc-blend 구조와 Wurzite 구조로 양분된다. 결정 구조의 기본 변수가 〈표 2〉에 나타나 있다.

Wurzite 구조는 기본적으로 Hexagonal 결정 구조가 기반을 이루고 있으며 Hexagonal diamond에 가깝다. 그 구조가 〈그림 7〉에 나타나 있으며 〈그림 8〉에 Zinc-blend 구조가 도시되어 있다.

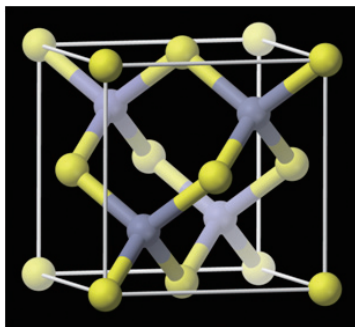


〈표 2〉 GaN 결정 구조 인자

PROPERTY/MATERIAL	Cubic (Beta) GaN	Hexagonal (Alpha) GaN
Structure	Zinc Blende	Wurzite
Stability	Meta-stable	Stable
Lattice Parameter(s) at 300K	0,450 nm	a0 = 0,3189 nm c0 = 0,5185 nm
Density at 300K	6,10 g.cm-3	6,095 g.cm-3
Nature of Energy Gap Eg	Direct	Direct
Energy Gap Eg at 293-1237 K	-	3,556-9,9x10-4T2/ (T+600) eV Ching-Hua Su et al, 2002



〈그림 7〉 Wurzite 결정구조 (자료: <http://en.wikipedia.org>)



〈그림 8〉 Zinc-blende 결정구조(자료: <http://en.wikipedia.org>)

7. GaN 결정 성장

GaN는 청색과 자외선 영역에서의 레이저 다이오드와 발광다이오드 같은 광디바이스에 응용되고 있는 wide band gap 재료 중 가장 매력 있는 재료중 하나이다. 최근, GaN epilayer는 보통 사파이어나 실리콘카바이드에서 성장하고 있지만, 기판과 GaN와의 격자부정합으로 인해 고품질의 GaN 결정을 성장하기에는 어렵다. 결국, 고품질 GaN epilayer을 얻기 위해서는 격자정합을 이루는 이상적인 기판을 개발해야한다. GaN 기판(substrate)

은 고품질의 GaN epilayer을 얻을 수 있는 최적의 성장용 기판이다. 이러한 기판을 얻기 위해서는 적절한 크기의 두께를 가진 GaN 결정이 필수이다. 두꺼운 GaN 결정을 얻을 수 있는 대표적인 성장법으로 유망한 세 가지 기술을 고려할 수 있다. 고압결정성장, 수소화물증기상에피탁시, 승화샌드위치기술이다.

승화법을 개조하여 두꺼운 GaN를 사파이어위에 성장 연구되고 있다. 고품질 GaN 에피층에 대한 격자정합을 이루는 기판의 개발인, 이 연구는 전형적인 RF 유도가열 화학기상증착반응기에서 금속갈륨과 활성화된 암모니아의 직접반응에 의해 사파이어위에 두꺼운 GaN의 성장에 중점을 두고 있다. 이 성장방법은 단일 반응단계를 포함하는 전형적인 화학기상증착의 모든 특성을 가지고 있다. 이 공정은 전형적인 수소화물증기상 에피탁시성장법이나 승화법과 비교하여 갈륨과 암모니아의 손실을 막을 수 있을 것이다. 사파이어 기판과 갈륨소스 사이의 거리를 증가시키면서 두꺼운 GaN의 결정성과 광 특성이 개선되었다는 주목할만한 사실이 관찰되었다고 보고되었다. 이 연구에서 지금까지 얻어진 가장 좋은 성장조건에서, 두꺼운 GaN로부터 X선 회절 분석기 곡선의 (0002) peak의 반폭치가 대략 684 arcsec이고, 실온에서 광루미네선스(PL)로 3.414 meV에서 130 meV의 반폭치를 가진 강한 밴드 가장자리 발광이 관찰되었다. 두꺼운 GaN막에 대한 5 K에서의 PL 측정은 반폭치가 각각 8 meV 그리고 32 meV인 3.470 eV, 3.414 eV에서 엑시톤(excitation)이 donors 그리고 acceptors에 구속되므로 강한 peak들이 관찰됨을 보여 주었다. 32 μm/hr의 성장속도를 가진 두꺼운 GaN의 고품질의 성장 가능성이 제시되고 있다.

일부 연구진은 촉매를 이용하여 GaN powder를 합성하는 방법의 연구도 진행되고 있다. GaN powder는 현재 발광소자 그리고 고파워, 고온의 전자소자에 혁신적인 역할을 할 것으로 기대되어지는 GaN 기판을 성장시키는 위한 원료나 단결정 기판으로 사용되어 질것으로 기대어진다. 그러나 기판과 결정성장의 격자구조 때문에 생기는 격자 불일치를 줄이기 위해 후막 GaN결정의 성장이 필요하게 되었다.

후막단결정 GaN의 부분적인 성공이 있었지만 높은 온



도와 압력 그리고 어려운 공정 때문에 후막성장이 어려움을 겪고 있어 이를 보완하기 위해 Seed를 이용한 용매 속에서의 GaN powder를 성장을 시도하고 있다. 촉매의 전처리 과정을 거친 후 금속 Ga를 촉매(Ni, Co, Pt.)와 함께 넣고 가열하면서 N을 포함하는 기체를 공급하여 열에 의해 분해된 기체와 금속 Ga이 용액 속에서 반응하여 GaN powder를 합성하게 된다. 반응은 bubbling방법을 사용하여 공급기체를 용액 속으로 공급하고 촉매작용에 의해 GaN seed가 생성되고 성장함으로써 GaN powder를 얻을 수 있다.

촉매를 사용함으로써 활성화 에너지가 낮은 반응경로로 따라 화학 반응의 속도를 높여줄 수 있어서 반응시간을 줄일 수 있으며 원하는 생성물의 선택성을 향상시킬 수 있다. 촉매작용에 의해 seed의 생성과 성장속도가 빨라지고 powder의 크기가 증가하게 된다. 이와 같은 결정 성장 방법은 GaN의 단결정기판을 성장하고 보다 높은 수율의 GaN powder의 생산을 할 수 있을 것으로 기대된다.

III-nitride 화합물 반도체가 전 세계적으로 주목을 받고 있다. 이것은 Wurtzite 구조를 가지는 III-V족 질화물 반도체가 1.9 eV(InN)에서 3.4 eV(GaN), 6.2 eV(AlN)에 이르는 직접 천이형 금지대 폭을 가지고 있어 질화물의 조성에 따라 가시광선에서 자외선의 전 파장 영역에서의 밴드갭 엔지니어링이 가능하기 때문이다. 또한 ZnS, InP, GaAs 등 기존의 화합물 반도체에 비해 고온에서 구조적 안정성이 매우 우수하고 높은 경도와 열전도, 화학적 안정성 등과 같은 특성을 가졌기 때문에 고온 고출력 전자소자로도 각광을 받고 있다. 이러한 이점들 때문에 전 세계의 거의 모든 기업체 또는 학교 연구소에서 활발한 연구를 하고 있다. 하지만 현재까지 GaN을 기조로 한 고휘도의 청,녹색 LED와 연속 발진하는 청자색 LD를 개발한 연구소는 전 세계적으로 그리 많지 않다. 이는 고품질의 III-nitride의 성장이 매우 어렵다는 것을 말하는 것으로 아직도 개발의 여지가 많다는 것을 의미한다.^[1-2]

초기의 성장은 HVPE(Hydride Vapor Phase

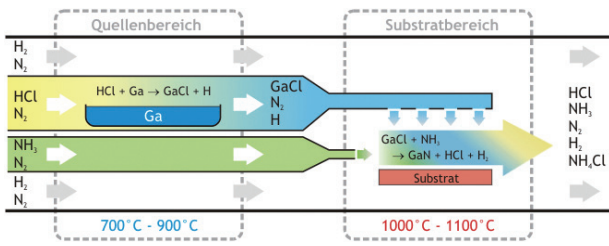
Epitaxy), MBE(Molecular Beam Epitaxy), OMVPE(Organo-Metallic Vapor Phase Epitaxy) 등 여러 방법이 시도되었지만, 지난 수년간 GaN 박막은 사파이어 기판 위에 유기금속 기상화학 증착법(OMVPE)에 의해 가장 많이 증착되어 왔다. GaN 박막증착과 관련하여, 가장 큰 문제점은 호모에피택시(homoepitaxy)성장을 위한 양질의 단결정 기판의 부재로 이로 인한 박막내 결함(defect)이 소자특성과 직결되는 LD 등의 소자 개발에 큰 장애가 되고 있다. 현재 상업적으로 주로 사용하고 있는 사파이어 기판은 GaN와의 격자 불일치(약 14%)와 열팽창 계수 불일치(약 25%)가 매우 커서 성장되는 에피층 내에 많은 격자결함을 발생시켜 양질의 GaN 성장을 어렵게 만들고 있으며, 이렇게 생성된 격자결함은 궁극적으로 소자의 성능을 저하시키고 있다.^[3] 따라서 이와 같은 문제점들을 근본적으로 해결하기 위한 방편으로서 호

모에피택시 성장에 적합한 GaN 기판을 제작하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[4-5] 현재 연구되고 있는 여러 가지 증착기술 중 GaAs와 같은 III-V족 반도체 증착에 널리 사용되어 온 HVPE법은 결정성장 속도가 시간당 수십 μm 인 이점이 있기 때문에 넓은 면적을 갖는 준벌크(quasi-bulk) GaN

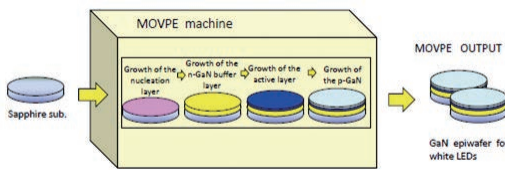
기판제조와 실현 가능성이 높은 기술로 알려져 있다.^[6-7]

HVPE 반응 장치는 III족과 V족 전구체로서 TMGa(Trimethyl gallium)과 NH₃를 각각 사용하는 장치로서, TMGa과 HCl을 반응시켜 chlorinated gallium을 생성시킨 후 이를 NH₃와 함께 열분해시켜 양질의 GaN 박막을 성장시키는 장치이다. 먼저 TMGa과 HCl을 source zone에서 반응시킨 후 별도의 석영관으로 NH₃를 주입하여 사파이어 기판위에 GaN을 성장시키는 방법이다. 이 방법은 기존의 HVPE법에 의한 높은 성장 속도를 유지하면서도 빠른 반응물의 교환, HCl 반응 후의 불순물 유입 및 HVPE법의 source 문제와 NH₃의 분해 문제를 개선한 장점을 가지고 있다. 반응기와 반응가스 도입부는 모두 석영관으로 구성된다. 각각 독립적으로 조정되는 온도영역들을 가진 전기로에 의해 가열된다. 특히 TMGa

III-Nitride 화합물 반도체는 주기율표 상의 3족의 원소와 Nitride가 결합된 화합물반도체이다. 흔히 질화물 반도체로 명명되고 있고, 일반적인 표기법으로 사용하고 있다.



〈그림 9〉 일반적인 HVPE 반응로의 개략도
(자료: <http://hvpe.egloos.com>)



〈그림 10〉 반응로 안에서의 공정 흐름도(자료: hitachi-cable.com)

의 도입부인 중앙의 tube는 TMGa가 적정 온도영역에 정확히 주입될 수 있도록 이동 가능한 형태로 제작하는 방법을 취하고 있다. Source zone에서 생성된 chlorinated gallium과 반응할 NH3도 별도의 석영관을 통해 주입된 후 반응시켜 최적의 증착조건을 이룰 수 있도록 제작되고 있다. 반응기의 개략도가 〈그림 9〉에 나타내었다. 반응로 안에서의 공정도가 〈그림 10〉에 도시되었다.

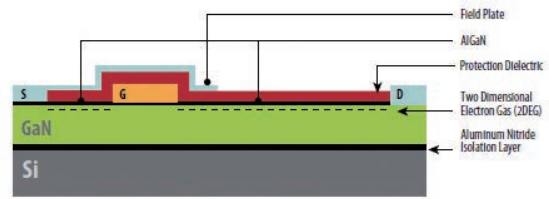
8. GaN 기반 파워소자

GaN 기반 파워소자는 고속 스위칭 FET가 주류를 이루고 있다. 〈그림 11〉에 기본적 구조를 나타내었다.

구조를 보면 기판으로 Si를 사용하여 그 위에 절연을 위해 AlN층을 형성하고 2차원(2DEG) 전자개스의 형성을 위한 GaN층을 형성 시킨다. 3극 분리를 위하여 AlGaN층을 형성하고 게이트(G)와 소오스(S)/드레인 전극과 분리시키는 전형적인 FET 구조를 갖는다. 일반적 FET와 다른 점은 3차원 벌크 특성이 아닌 2차원 전



〈그림 11〉 전형적인 source, gate and drain, 3극의 메탈-반도체 컨택을 갖는 AlGaN/GaN HFET 구조(자료: WWW.EPC-CO.COM)

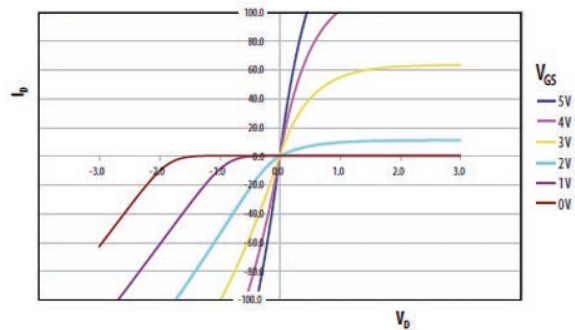


〈그림 12〉 Enhancement mode FET 구조(자료: WWW.EPC-CO.COM)

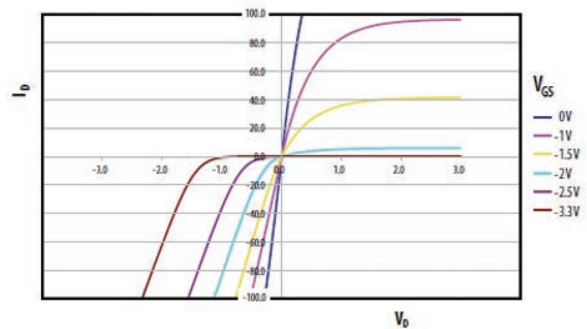
자개스층을 이용한다는 것이다. 위 구조는 동작이 공핍(depletion mode)이다. 반면 증가(enhancement mode)도 연구가 활발한데 전형적인 구조가 〈그림 12〉에 나타나 있다.

Depletion mode와 다른 점은 게이트를 통한 전류 제어를 위해 게이트 전극 형성 후 절연체를 성장시켜 소오스와 드레인과 분리시키는 구조를 갖는다는 것이다.

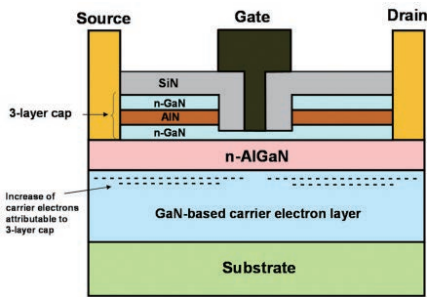
〈그림 13〉에 Depletion mode, 〈그림 14〉에 Enhancement mode의 드레인 전압(VD)과 전류(ID)의 특성이 나타나 있다.



〈그림 13〉 Depletion mode의 드레인 전압(VD)과 전류(ID)의 특성
(자료: WWW.EPC-CO.COM)



〈그림 14〉 Enhancement mode의 드레인 전압(VD)과 전류(ID)의 특성(자료: WWW.EPC-CO.COM)



〈그림 15〉 후지쯔사의 GaN 기반 FET 구조

Ⅲ. GaN 기반 파워 소자의 연구개발 및 생산의 파급 효과

기술적 측면에서 보면 실리콘 기판 위에 GaN 에피를 성장하여 공정 제작하는 GaN-on-Si 파워디바이스의 경우 실리콘 표준CMOS 기반 반도체 유휴 공정설비 (8인치 이하) 활용이 가능하므로 자원 재활용에 기여할 수 있으며, Si-소자 대비 WBG(GaN, SiC) 소자의 전력변환 효율 측면에서 비교해보면 DC-DC 전력변환의 경우는 3% 포인트, AC-DC 전력변환의 경우는 1.5-2% 포인트, DC-AC 전력변환의 경우는 2-3% 정도 우수한 특성으로 나타나며, 이와 같은 WBG 소자와 같은 고효율 전력반도체를 통한 전기에너지 변환효율 절감을 통한 전력설비 투자비용을 감소할 수 있다.

국제적 환경문제인 온실가스 저감을 통한 환경개선이 가능하며, 향후 급격한 시장성장이 예측되는 가전제품 및 주거시스템용 PV 인버터, 자동차 (HEV/EV/PHEV) 모터 드라이브 및 멀티 에어컨 시스템 시장에도 사용될 수 있어서 관련 응용산업을 동반성장을 유도할 수 있을 뿐만 아니라 GaN 파워디바이스는 모듈화 및 집적화를 통해 더 높은 부가가치를 창출할 수 있기 때문에 관련한 소재산업의 동반 성장도 유도할 수 있다.

경제적·산업적 측면에서는 현재 전력반도체의 대부분은 미국, 유럽, 일본 등 해외로부터의 수입에 대다수 의존하고 있기 때문에 전력반도체의 수입 대체 및 시스템 반도체의 무역적자 해소가 절실히 필요하며, 비메모리 반도체의 대일 및 대미 무역적자의 원인을 제공하고 있다. 따라서 세계 최고수준의 공정기술을 바탕으로 미래시장 선점을 위한 차세대 디바이스로 친환경 절전형 GaN 파워디바이스를 개발함으로써 국내 비메모리 반도체 산업의 국가경쟁력을 제고할 수 있다.

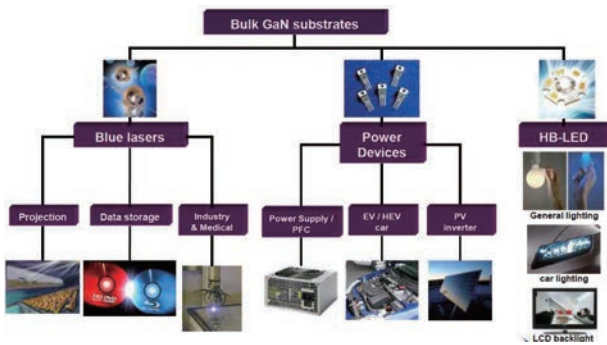
발전 전망은 현재 GaN 전력반도체 (FET/SBD) 소자 기술은 Si, Sapphire, SiC 기판상에 에피성장된 웨이퍼를 사용하고 있다. 이와 같이 양질의 벌크 GaN 웨이퍼가 없어 수평형(lateral) 구조의 트랜지스터와 다이오드를 연구개발 하고 있는 실정이다. 따라서 소자의 누설전류 감소 및 전류량 증가에 제약이 따른다. 이를 해결하기 위

Device	LGA Package	Equivalent MOSFET Packages		
40V 4mΩ max	4.1 x 1.6 mm	5 x 6mm PQFN	6.3 x 5 mm DirectFET*	5 x 6 mm PolarPAK*
40V 16mΩ max	1.7 x 1.1 mm	3 x 3mm PQFN	4.8 x 3.9 mm DirectFET	
100V 7mΩ max	4.1 x 1.6 mm	5 x 6mm PQFN	6.3 x 5 mm DirectFET*	
100V 30mΩ max	1.7 x 1.1 mm	3 x 3mm PQFN	4.8 x 3.9 mm DirectFET	
200V 25mΩ max	3.6 x 1.6 mm	5 x 6mm PQFN	10 x 15mm D ² Pak (not to scale)	
200V 100mΩ max	1.7 x 0.9 mm	3 x 3mm PQFN	6.3 x 5 mm DirectFET	5 x 6 mm PolarPAK

〈그림 16〉 일반 파워 MOSFETs 과 Enhancement mode GaN FETs 비교도(자료: WWW.EPC-CO.COM)

현재에도 여러 가지 구조 변화를 통해 보다 안정적이고, 초 고속 소자 제작을 위해 해외와 국내 연구진에 의해 활발한 기술개발이 이루어지고 있다. 〈그림 15〉에 일본의 후지쯔사에 개발구조가 도시되어 있다.

위 구조들은 일반 파워 MOSFET와 다른 패키지 모습을 갖는데 여러 가지 패키지 모습이 〈그림 16〉에 나타나 있다.



〈그림 17〉 GaN 기반 산업 응용의 다양성

해서는 향후 양질의 대면적 벌크 GaN 결정성장 및 에피성장 기술의 개발과 함께 수직형 (vertical) 소자의 연구 개발이 반드시 필요할 것으로 생각된다. 〈그림 17〉의 응용 다양성을 볼 수 있다.

일례로 미국 Avogy사는 2013년 10월에 WiPDA 2013 워크샵에서 1700 V/5 A급 GaN-on-GaN SBD 소자결과를 발표하였으며,^[8] 3700 V급 고 내압 소자도 소개하여 그 가능성을 보였다.

IV. 맺음말

본 고에서 GaN의 기본적 물리적 특성, 결정성장 방법, 소자구조, 패키지, 사회전반 파급효과에 대하여 간략하게 알아보았다. 전 세계적으로 차세대 에너지 절감형 반도체인 넓은 밴드갭 반도체, 특히 GaN 전력반도체는 현재 기술인 실리콘 전력반도체의 대체 기술로 활발한 연구개발이 진행 중이다. 청색 레이저 다이오드의 응용에서 시작한 질화갈륨 단결정 기판은 레이저 다이오드 시장에서 쓰임새가 더욱더 확대되고 있고, 고효율 고풍력 LED 분야에서는 레이저 다이오드에서처럼 결국 채택되어 수직형 LED용으로서 그 시장이 확대될 것이다. 자동차 및 산업기기에서의 전력소자로서 응용은 가격과 품질이 확보되어야 그 성능을 발휘할 것이다. 이는 질화갈륨 그 자체의 뛰어난 물질 특성에 기인하며 단지 저렴하고 품질이 좋은 단결정 기판을 만드는 일이 과제로 남아 있다.

따라서 기술선점과 새로운 시장 창출 및 선점을 위하여 정부 주도적인 지원을 바탕으로 GaN 전력반도체 기술의

국산화기 시급한 실정이다. 현재 국내 대학, 연구소, 기업 등에서 산발적이고 비체계적으로 수행 중인 GaN 전력반도체기술 개발 형태에서 벗어나 정부가 주도적으로 예비타당성 등을 통하여 산업체와 함께 체계적으로 고효율·전력에너지반도체 기술개발 및 산업화를 견인해 나가야 할 것으로 생각 된다.

참고문헌

- [1] S. Nakamura, The Blue Laser Diode, Springer-Verlag, Berlin, (1997).
- [2] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, Appl. Phys. Lett. 64, 1687 (1994)
- [3] S. Chadda, M. Pelczynski, K. Malloy and S. Hersee, Mat. Res. Pro. 326, 353 (1994).
- [4] Compound Semiconductors, 3, 10 (1997).
- [5] C. Sasaoka, H. Sunakawa, A. Kimura, M. Nido and A. Usui, ICNS' 97, Tokushima Japan, S-4 (1997).
- [6] T. Detchprom, T. Kuroda, K. Hiramatsu, N. Sawaki and H. Goto, Inst. Phys. Conf Ser. 142, 859-862 (1996).
- [7] T. Detchprom, K. Hiramatsu, K. Itoh and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 31, L1454 (1992).
- [8] D. Disney, "Very-High Performance GaN-on-GaN Diodes," 1st IEEE Workshop on Wide bandgap Devices and Applications 2013 Proceeding.



이병철

- 1986년 2월 전북대학교 물리학과 학사
- 1988년 8월 전북대학교 물리학과 석사
- 1996년 8월 전북대학교 물리학과 이학박사
- 1996년 11월~2004년 3월 (주)동부하이텍
- 2004년 4월~2005년 7월 옵토팩(주)
- 2005년 10월~2008년 8월 광전자(주)
- 2008년 9월~2010년 9월 (주)에이스프라임 연구소장
- 2010년 10월~2012년 2월 포엔사 연구소장
- 2012년 3월~2012년 8월 (주)씨에스이 연구소장
- 2012년 9월~2013년 8월 (주)제이하라 부사장
- 2013년 9월~현재 제이엘 연구소장

〈관심분야〉

디스플레이, 전력소자, PKG



성흥석

- 1986년 2월 서강대학교 전자공학과 학사
- 1988년 2월 서강대학교 전자공학과 석사
- 1997년 2월 서강대학교 전자공학과 박사
- 1988년 2월~2000년 2월 한국전자통신연구원
선임연구원
- 2000년 3월~현재 부천대학교 부교수

〈관심분야〉

반도체 장비, 자동화 설비 제어