

GaN 전력반도체 글로벌 연구개발 현황 및 미래 발전방향

GaN Power Devices—global R&D status and forecasts

문재경 (J.K. Mun) GaN 전력소자연구실 책임연구원/실장
배성범 (S.B. Bae) GaN 전력소자연구실 책임연구원
이형석 (H.S. Lee) GaN 전력소자연구실 선임연구원
정동윤 (D.Y. Jung) GaN 전력소자연구실 선임연구원

ICT 미래 핵심 소재부품
기술특집

I. 서론
II. 본론
III. 결론

GaN 전력반도체는 와이드 밴드갭($E_g=3.4\text{eV}$)과 높은 이동도 및 낮은 온-저항 특성으로 인하여 차세대 고속/저손실 고효율 전력반도체 소자로서 각광을 받고 있다. 그럼에도 불구하고 글로벌 GaN 전력반도체 기술개발과 상용화는 초기단계로 선진업체 캐치업과 추월이 가능한 분야이다. GaN 반도체의 재료적 장점과 현재 상용화된 200V 이하급과 650V급 GaN 전력반도체 소자의 글로벌 시장동향으로 볼 때 고속 스위칭과 전력모듈 소형화 및 시스템의 고효율화를 요구하는 제품응用に 특화해야 할 것으로 판단된다. 특히 기존 Si 전력반도체 대비 고성능 GaN 제품의 저가격화 뿐만 아니라 선진기업과의 경쟁력 확보를 위하여 6인치 기반 Au-free CMOS 호환 공정 개발을 통한 GaN 전력반도체 기술의 국산화와 신시장 선점을 위한 조기 상용화의 중요성을 강조하고자 한다.

I. 서론

전력반도체란 정보나 신호를 처리하고 저장하는 시스템 반도체나 메모리와 달리 전자기기에 들어오는 전력을 변환, 저장, 분배 및 제어하는 핵심부품으로, 컴퓨터, 가전, 자동차, 태양광, 스마트그리드 등의 인버터나 컨버터등에 주로 사용된다[그림 1] 참조].

차세대 화합물반도체 소재인 GaN는 실리콘의 물리적 한계극복과 높은 전자이동도($>1500\text{cm}^2/\text{Vs}$) 및 높은 채널 2DEG 농도($\sim 1\text{e}^{13}/\text{cm}^2$) 특성으로 인하여 시스템의 고속 스위칭과 전력절감을 극대화할 수 있어 고속, 저손실 및 고효율화에 최적인 전력반도체이다.

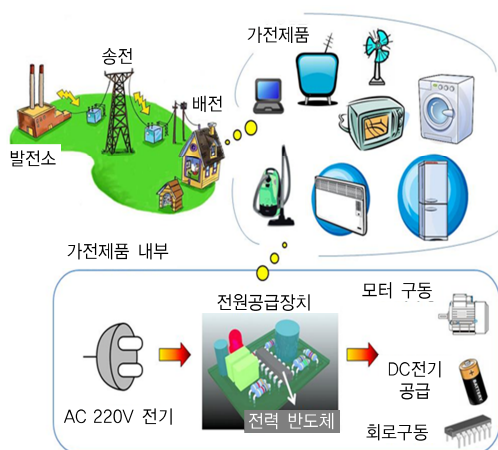
GaN 전력반도체 소자는 실리콘 전력모듈의 큰 부피와 효율 낭비요소를 혁신적으로 해결할 수 있는 새로운 기술의 차세대 소자로, 21세기 기후변동방지협약으로 인한 탄소배출 가스 절감과 에너지 절감은 국가산업보전의 차원에서 필수적인 부분이다. 특히 GaN 전력반도체 분야는 메모리 시장과 달리 IT, 자동차, 가전, 신재생에너지 등의 다양한 응용분야에서 활용도가 높은 블루오션이지만 현재 글로벌 기술개발과 상용화가 초기단계로 선진업체 캐치업과 추월이 가능한 분야이다.

미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 정부주도의 국가단위 프로젝트를 통하여 15년 전부터 고속/저손실 고효율

GaN 전력반도체를 개발해 오고 있다. 미국의 경우 방위고등연구계획국(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA)을 중심으로 2014년 차세대전력혁신연구소(Next Generation Power Innovation Institute: NPII)를 설립, 5년 간 140만달러의 연구비 투자와 제조업 육성을 지원하고 있으며, 일본도 2014년 NEDO를 중심으로 차세대(Wideband gap: WBG, SiC와 GaN) 프로젝트에 5년간 22억엔의 연구비 투자와 2020년 도쿄 하계올림픽에서 전력변환 시스템 시연을 계획하고 있다. 반면 유럽은 2003년 유럽전력전자센터(European Center for Power Electronics: ECPE)를 설립하여 자동차, 산업용, 신재생에너지 적용을 위한 초저손실의 고효율 GaN 전력반도체개발을 프로젝트 베이스로 진행하고 있다.

WBG 일종인 SiC와 GaN 전력반도체는 시스템의 사용 전압영역(GaN은 중저전압, SiC는 고전압)과 스위칭속도(GaN은 고속, SiC는 상대적 저속) 측면에서 응용분야가 서로 차별화될 것으로 판단된다. 즉, SiC 전력반도체는 전기자동차, 풍력, 대형 운송수단, 경전철 등 1200V와 1700V급 고전압 응용 분야에서 핵심적인 역할을 할 것으로 보인다. 반면 GaN 전력반도체의 경우 200V급 이하 저전압 소자는 통신기기, DC-DC 컨버터, 무선전력전송 및 무선충전, D-급 오디오 적용을 위하여 개발되고 있는 반면 650V급은 태양광 인버터(PV inverter), Energy Storage System(ESS), 연료전지 인버터등 신재생에너지 시스템의 효율극대화에 특화되어 신시장 영역을 확대해 나갈 것으로 예측된다.

이처럼 현재 상용화가 진행되고 있는 GaN 전력반도체는 Si 이중기판상 헤테로 에피(hetero-epitaxy) 채널 구조를 이용한 수평형(lateral) 소자로, 650V 이하에 시스템 적용에 주력하고 있으며, 그 이상의 내압특성을 위해서는 고품질의 벌크 GaN 기판을 이용한 호모 에피(homo-epitaxy) 웨이퍼와 수직형(vertical)구조의 소자 개발과 상용화를 기다리고 있다.



(그림 1) 발전소에서 가전제품까지 전력 흐름속 전력반도체[1]

II. 본론

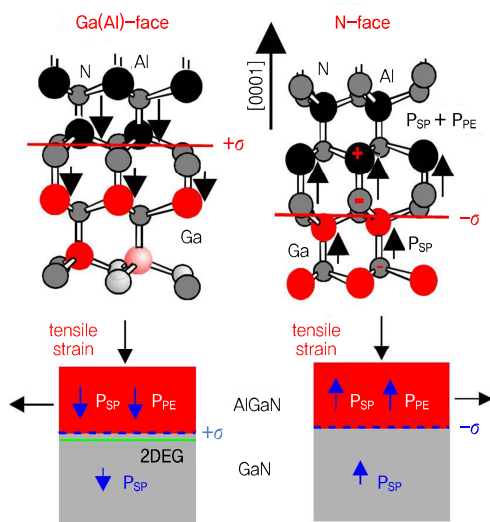
1. GaN 전력반도체용 에피소재 기술

GaN 반도체 소재는 기존의 Si 및 GaAs와 비교하여 재료적인 장점(고온동작, 높은 전자밀도 및 항복전압)으로 고출력 RF증폭기 및 고전력용 반도체 소자응용에 유리하다. <표 1>은 GaN 반도체를 성장할 때 사용되는 다양한 기판에 대한 물질 특성을 나타낸다[2].

GaN 반도체 에피소재 기술은 격자 정합된 동종기판의 부재로 인하여 이종기판을 사용하는 기술적인 제약 점을 S. Nakamura에 의해 도입된 저온 완충층(buffer

<표 1> GaN 반도체 및 기판재료의 물성[2]

Property	GaN	Al ₂ O ₃	SiC	ZnO	Si
Bandgap(eV)	3.425	9.5	3.03	3.3	1.12
Wave(nm) =1239.8/eV	362	130	409	376	1107
Lattice const(Å)	3.191(a) 5.185(c)	4.785(a) 12.99(c)	3.073(a)	3.25(a) 5.2(c)	3.84(111) 5.43(001)
Lattice mismatch(%)	0	-14%	-3.5%	+2%	+17%
CTE(ppm/K)	5.4(a) 7.2(c)	7.7	4.0	4.31(a) 2.49(c)	2.6 (2.5~3.2)
CTE mis(%)	0	+35%	-18%	-20%	-50%
Th. Cond.(W/m,k)	50~230	39	350	21	149
Resist(Ω*cm)		10 ¹⁶	10 ^{2~6}		1~10 ³
e-mobil(cm ² /V.s)	1500			~200	1500
h-mobil(cm ² /V.s)	30			5~50	450



(그림 2) AlGaIn/GaN 이종접합의 분극특성

layer) 기술로 극복하고, 고품위 에피특성을 얻을 수 있었다.

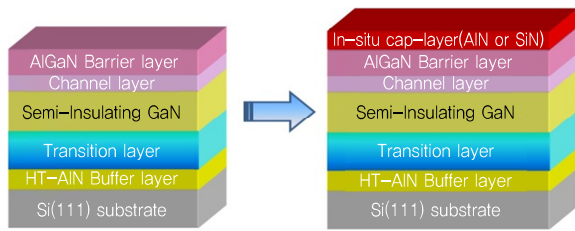
GaN 전력반도체에 적용되는 AlGaIn/GaN 이종접합 구조는 계면에서 이차원 전자가스(2-DEG)층을 형성하는데, 아래의 (그림 2)에서와 같이 Ga-face를 가지는 AlGaIn/GaN 이종접합의 경우 격자상수 차이에 의한 strain 및 분극현상(polarization)으로 인하여 높은 전자 밀도 및 이동도를 나타낸다. 이러한 2-DEG 특성은 GaN 반도체 소재 기반의 고주파 및 고전력용 반도체의 성능을 좌우하는 중요한 성능지수이다.

전력반도체 개발을 위한 GaN 에피소재 기술에서는 대면적 기판을 위한 에피웨이퍼 성장 기술, 누설전류 방지를 위한 반절연성(semi-insulating) 기판기술, 그리고 고전류 구동 및 고내압 소자 특성을 위한 에피구조 설계기술이 핵심사항이다. 본 기술동향에서는 다양한 기판(Sapphire, Si, SiC, GaN)을 이용한 GaN 전력반도체 에피소재 기술동향에 대하여 언급하고자 한다.

GaN-on-Sapphire 에피소재 기술은 2000년 초반부터 미국의 UCSB 대학 및 일본의 나고야 대학을 중심으로 연구 개발되었으며, NTT 및 Furukawa 등의 기업을 중심으로 양산기술이 개발되었다. 국내에서는 2000년 초반부터 경북대에서 AlGaIn/GaN 에피 기반기술을 연구하였으며, ETRI는 2011년 GaN-on-Sapphire를 이용한 전력반도체 에피 기술을 개발하였다. 낮은 방열특성으로 인하여 전력반도체 보다는 대면적 광소자에 적용되고 있다.

GaN-on-SiC 에피소재 기술은 2005년부터 미국의 UCSB대학 및 Cree사를 중심으로 국방프로젝트를 통하여 집중적으로 개발되었으며, 2008년 RF용 전력소자와 GaN-on-SiC 기반의 LED 수요 및 투자 증가에 따라 현재 세계적으로 6인치 에피소재가 상용화되어 있다.

국내에서는 2000년 중반 이후 경북대에서 GaN-on-SiC 에피소재 기술개발이 진행 중이며, World Premium Material(WPM) 다양한 국책과제를 통하여 6인치급



(그림 3) CMOS 공정 호환용 에피 구조도

SiC 기반개발 연구가 진행 중이다.

GaN-on-Si 에피소재 기술은 기판의 대구경화, 저가격화 및 기존 실리콘 CMOS 호환 공정 기술을 활용할 수 있는 장점을 가지고 있어 기존 실리콘 전력반도체의 대체기술로 각광을 받고 있다. 현재 상용화된 GaN 전력반도체 소자는 6인치 GaN-on-Si 기반 Au-free CMOS 호환 공정 라인에서 파운드리를 통하여 생산되고 있다. 이를 위한 에피 구조는 (그림 3)과 같이 고온공정에서 발생할 수 있는 Ga 원자들의 out-diffusion 방지와 AlGaN barrier 보호를 위한 in-situ cap layer가 필요하며, 일반적으로 AlN 또는 SiNx 층이 사용된다.

GaN-on-Si 에피소재의 고내압 특성을 확보하기 위하여 <표 2>와 같은 다양한 에피소재 성장기술들이 연구되고 있다. 버퍼층(buffer layer)의 두께 증가 및 c-doping을 통하여 에피구조 수직방향의 내압을 증가시키는 방법과 2-DEG에 형성된 전류의 누설을 방지하는 back-barrier 에피구조등이 주로 사용된다.

특히 c-doping 기술은 누설전류를 줄여주고 고내압을 얻는 장점이 있는 반면에 전자포획(electron trapping)으

로 인하여 발생하는 채널층 두께 감소현상으로 전류붕괴(current collapse) 및 온-저항 증가를 일으키는 주요 원인이 되고 있다. 따라서 GaN 전력반도체의 소자 신뢰성을 향상시키기 위해서는 c-doping의 최적화와 채널층 에피구조 설계가 필수적이다.

마지막으로 GaN-on-GaN 에피소재 기술은 동종기판 사용에 따른 저결함 에피 특성을 얻을 수 있지만 대면적 고품위 기판 성장이 어렵고 고가인 관계로 제한적으로 사용된다. 수직형 소자구조는 고내압(>600V), 저손실 및 고신뢰성이 요구되는 전기자동차(EV)에 적용하기 위하여 Toyota, Avogy 등에서 주로 연구되고 있다.

2. GaN 전력반도체 소자기술

가. 수평형과 수직형 GaN 전력반도체 소자기술

<표 3>은 GaN 전력반도체 소자의 수평형과 수직형 구조에 대한 특징을 나타내었다[3]. 수직형 구조는 Si 혹은 SiC 전력반도체와 유사한 구조적 특징을 가지고 있다. 수직형 GaN 전력소자는 벌크 GaN 기판상에 에피 성장을 통해 제작을 하기 때문에 결정 결함이 낮아서 높은 항복 전압에 유리하며, 소자의 크기가 수평형 소자에 비해 상대적으로 작은 점이 장점이다.

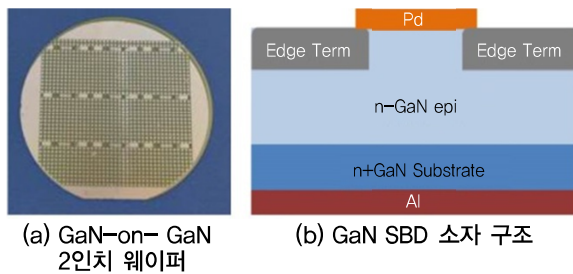
미국의 Avogy사는 GaN 벌크 기판 위에 에피를 성장하는 방식의 GaN-on-GaN 기판을 사용하여 항복 전압 4000 V, 온-저항 $2.8 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ 의 GaN 다이오드를 개발하였다[그림 4] 참조]. 또한, Avogy사는 p-형 에피

<표 2> 고내압 GaN-on-Si 에피소재 성장기술

기술	Buffer thickness	C-doped buffer	Back-barrier
소자 단면도			
Issues	Bowing 증가	<ul style="list-style-type: none"> • Surface degradation • Multi-buffer layer 	<ul style="list-style-type: none"> • 2-DEG density 감소 • Bulk leakage 감소

〈표 3〉 수평형과 수직형 소자구조와 장단점[3]

	Lateral Design	Vertical Design
Structure		
Pros	<ul style="list-style-type: none"> • Very high BV capability • Smaller foot-print 	<ul style="list-style-type: none"> • Low-cost substrate • Low Ron • Low parasitic capacitance • Bi-Directional operation • Simple Fabrication process
Cons	<ul style="list-style-type: none"> • GaN substrate cost and small diameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Large BV → increase chip size • Resistance and current capability of source and drain electrode • Current collapse



(그림 4) Avogy사의 수직형 GaN SBD

〈출처〉: 25th ISPSPD, 2013.

성장 및 결정 재성장(Epi-regrowth)방법의 수직형 JFET 소자를 사용하여 항복 전압 1200V, 온-저항 290mΩ의 결과를 발표하였다[4]. 그러나, 수직형 구조의 GaN 파워 소자가 아직 상용화까지는 이르지 못하고 있다.

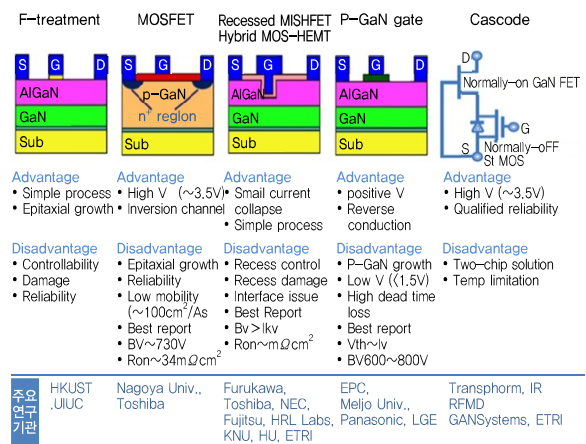
한편, 수평형 소자는 이미 상용화가 진행되어 650V 급의 소자 구입이 가능하다. HEMT 혹은 HFET구조를 기반으로 소자 제작이 이루어지고 있으며, 수직형 소자에 비해 낮은 온-저항과 낮은 기판 가격 및 상대적으로 간단한 공정이 장점이다. 하지만, 수평형 구조는 이중기판상에 성장된 에피 웨이퍼의 사용으로 전류 용량과 항복 전압을 높이기 위해서는 칩 사이즈를 늘려야 하기 때문에, ~kV급의 고전력용 소자보다는 600~650V급의 중전력형 고속 스위칭 컨버터 등에 적합하다.

나. 증가형 GaN 전력반도체 소자 구현 기술

수평형 GaN 전력소자의 경우 일반적으로 2-DEG 채널에 의하여 음(negative)의 문턱 전압을 가지는 공핍형(Depletion-mode: D-mode) 전력반도체 소자로만 들어진다. 그러나, 전압을 소스로 하는 컨버터 등에서 공핍형 파워 반도체는 shoot-current 등과 같은 안정성 문제로 선호되지 않는다. 따라서 전력 모듈에 적합한 증가형(Enhancement-mode: E-mode) 소자를 구현하기 위한 여러 가지 기술이 개발 중이다. 증가형 GaN 소자를 구현하기 위해서는 일반적으로 게이트 하부를 인위적으로 조절하여 문턱전압을 음에서 양의 전압으로 바꾸는 방법이 이용된다. (그림 5)는 증가형 파워소자 구현기술 및 주요 기관을 나타내고 있다[5].

파나소닉과 EPC는 AlGaN 혹은 GaN 게이트 전극구조를 p형으로 만든 Gate Injection Transistor(GIT)를 활용한 p-GaN gate 기술을 이용하고 있다. 이를 통한, 게이트 전극 하부의 p-n 접합에 의해서 문턱전압(V_{th}) 값은 +1.0V 부근에서 형성이 된다. 하지만, p형 에피를 선택적으로 에칭하는 공정과 소수캐리어의 주입에 따른 게이트 드라이버 디자인이 복잡해지는 단점이 있다.

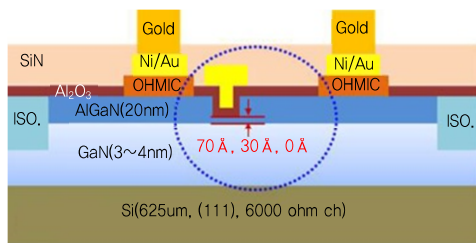
게이트 하부에 선택적으로 fluorine 플라즈마 처리를 함으로써 게이트 하부의 2-DEG 채널을 공핍형으로 바



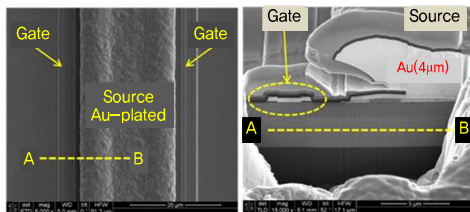
(그림 5) 증가형 GaN 전력반도체 소자 구현기술 및 주요 연구기관

꾸어 증가형 소자를 구현하는 F-treatment 기술은 홍콩과학기술대 (HKUST)의 Kevin Chen 교수 그룹에서 처음 제안을 하였지만, 고온 신뢰성 및 문턱 전압의 균일성(uniformity)이 부족한 단점을 가진다.

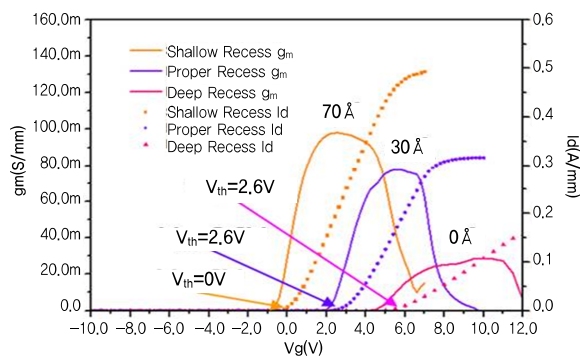
게이트 Recessed MISHEMT 기술은 물리적으로 2-DEG 채널을 없애는 기술로 NEC사와 Furukawa사를 포함한 여러 그룹에서 이용하고 있으나, 낮은 전류 밀도와 문턱전압(V_{th})의 한계를 가지고 있다. 하지만, 게이트 누설전류 감소와 항복전압 향상을 위해 게이트 recess 부분에 SiO_2 , Al_2O_3 등 gate dielectric를 추가함으로써 게이트 인버전(inversion)채널을 이용하는 Hybrid MOSFET 구조에 대한 연구개발이 활발히 진행



(a) 단면 구조



(b) 게이트-소스 전극 SEM 단면사진



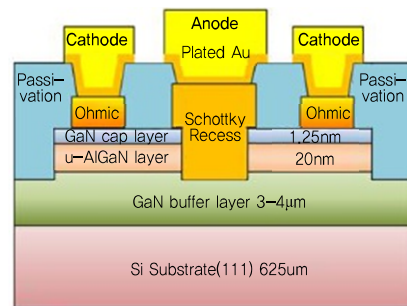
(c) recess 조건에 따른 문턱전압(V_{th}), 드레인 전류(I_d) 및 트랜스컨덕턴스(g_m) 곡선

(그림 6) 게이트 Recessed GaN MISHEMT

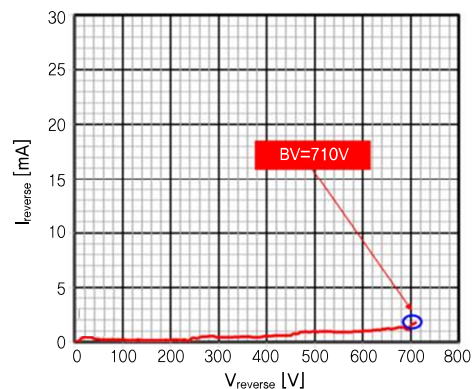
되고 있다. 또한, HRL사는 Recessed MISHEMT 기술과 F-treatment 기술을 병행하여 문턱전압을 높이는 방법을 사용하고 있다.

국내의 경우 경북대와 홍익대는 게이트 리세스형 구조를 연구 중이며, ETRI는 게이트 Recessed MISHEMT 기술[(그림 6 참조)]과 SBD의 Anode 전극을 Recess하여 Turn-on 전압을 줄이는 방법[(그림 7 참조)]을 연구하고 있다.

Transphorm과 Infineon(IR)사는 고전압 normally-on GaN MISHEMT와 다이오드를 내장한 저전압 증가형 Si MOSFET을 사용하여 Cascode 회로 구조를 통해 단일 패키지 형태로 구현된 Cascode형 증가형 MOS-HEMT 구조를 이용하고 있다. Cascode 회로 구조에서는 Si MOSFET과 GaN FET소자 간의 접합 용량(junction capacitance) 일치 정도와 인덕턴스가 스위칭 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 이값을 최적화하는 것

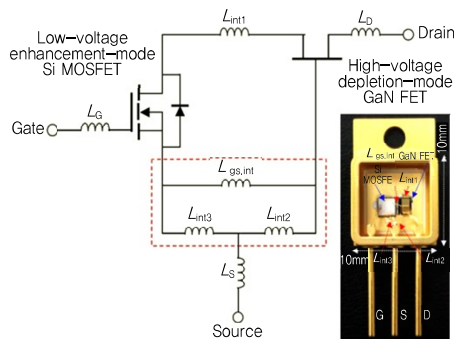


(a) Anode Recessed 구조

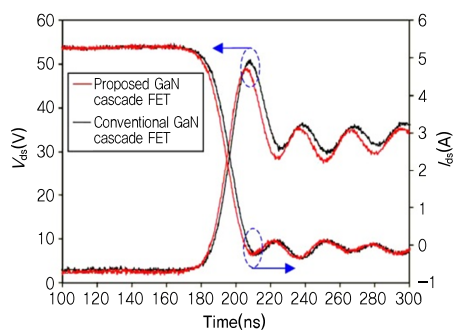


(b) 700 V 항복전압 특성[6]

(그림 7) GaN 전력 SBD 소자



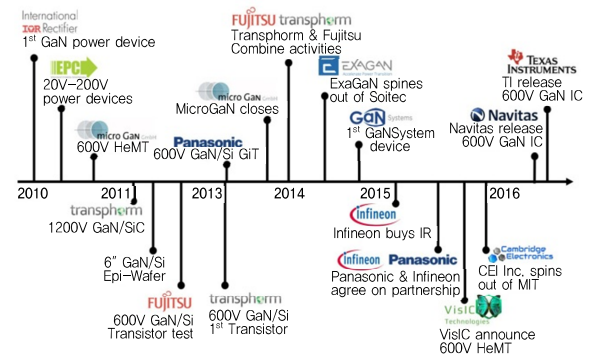
(a) 회로구조와 패키징 구조



(b) Turn-On 스위칭 특성 곡선[7]

(그림 8) 기생 캐패시턴스 감소를 위한 ETRI Cascode 구조

이 중요한 이슈이다. (그림 8)은 기생 캐패시턴스 감소를 위해 ETRI에서 개발한 Cascode 회로 구조와 향상된 턴-온 스위칭 특성을 나타내고 있다[7].







(그림 9) 글로벌 GaN 전력반도체 연대표

〈출처〉: Point the Power, 2016[8]

다. GaN 전력반도체 소자 글로벌 연구개발 동향

(그림 9)와 <표 4>은 현재까지 글로벌 GaN 전력반도체 소자 개발 연대기와 주요 선진기관의 핵심기술 및 주요성능을 보여준다. 세계 최초로 GaN-on-Si 기반 20~200V급 소자를 상용화한 미국 EPC사는 300V 이하급 기술의 선두이다. 미국 Transphorm사는 2011년 GaN-on-SiC 기반의 Cascode 회로구조를 개발하였으며, 현재 GaN-on-Si 기반의 650V/50A급 전력소자 적용하여 태양광(PV, ESS) 등 신재생에너지 응용을 타겟으로 일본의 Fujitsu와 양산하고 있다. 캐나다의 GaN

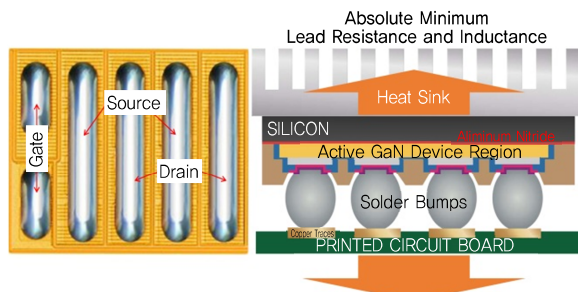
〈표 4〉 주요 기관별 GaN 전력반도체 연구동향

플랫폼기술	연구기관	주요특성	기타
GaN-on-Si	EPC-Co 	<ul style="list-style-type: none"> Normally-off FETs 세계최초 상용화(2009.6) Filp-Chip bonding using solder bump 300V, Id=6.3A, R_DS(on)=120mΩ·cm² \$2.65@1000ea 	<ul style="list-style-type: none"> eGaN Transistor EPC2025 15~300V용 상용칩 Chip size: 1.95mm×1.95mm
GaN-on-Si	GaN System 	<ul style="list-style-type: none"> Normally-off 기반 기술 Island Technology(2015.5) 3D integration-CMOS driver and GaN switch 600V, Id=60A, R_DS(on)=25mΩ 	<ul style="list-style-type: none"> Isolated structure로 공간활용 PQFN package for low inductance 100V 및 650V용 상용칩 TSMC에서 Production
GaN-on-Si	Transphorm 	<ul style="list-style-type: none"> Normally-off MISFET 기술 Cascode type eGaN 기술 세계 최초 GaN JEDEC Standard 규격화(2013.3) 650V, Id=50A, R_DS(on)=35mΩ 	<ul style="list-style-type: none"> EZ-GaN platform Fujitsu와 합병(2013.11) 600V와 650V용 칩 양산 TO 패키지 타입으로 제공
GaN-on-Si	Fujitsu 	<ul style="list-style-type: none"> Normally-off MISFET (V_th=+3V) 기술(2009.6) Gate Recess 기술이용 eGaN 실현 420V, R_DS(on)=105mΩ 	<ul style="list-style-type: none"> Triple-cap Al2O3 MISFET Transphorm과 합병(2013.11) TO 패키지 타입으로 제공

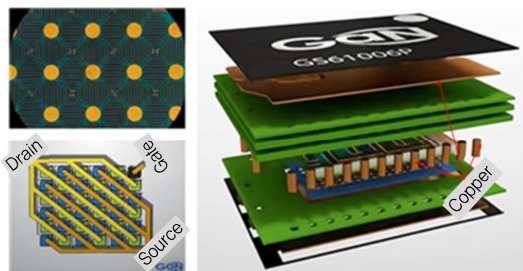
>>뒤에 계속

〈표 4〉 주요 기관별 GaN 전력반도체 연구동향

플랫폼기술	연구기관	주요특성	기타
GaN-on-Si	Infineon(IR) 	<ul style="list-style-type: none"> Normally-off FET 기술(2010,2) Filp-chip 패키징 플랫폼→고효율 및 고속($\times 2$) 성능 구현 6" CMOS compatible GaN-on-Si 기술 5mhz, 20A, $V_{in}=7-13V$, $V_{out}=0.6-5.5V$, $I_{out}=20A$ 	<ul style="list-style-type: none"> GaNpowIR Infineon으로 합병(2014,8) Panasonic과 eGaN 기술 협력(2015,3) 6" CMOS compatible GaN 기술
GaN-on-Si (GaN-on-SiC)	EpiGaN(IMEC) 	<ul style="list-style-type: none"> DHFET 에피 이용한 GaN FET용 기술(2014,2) 6" GaN on Si 이용한 최초의 GaN HEMT In-situ SiN 이용한 6" GaN 에피 상용화 	<ul style="list-style-type: none"> IMEC spin-off company SiN/AlGaIn/GaN/AlGaIn DHFET 현재 8" GaN Si 양산준비
GaN-on-Si	MicroGaN 	<ul style="list-style-type: none"> Normally-on-HFET 기술(2010,10) SBD Rectifier 개발(2010,8) 600V, 5A, 170mΩ 3D 소형화(Lateral구조 금속저항극복)→고속, 고전류, 고전압 	<ul style="list-style-type: none"> 3D-GaN platform Chip size: 2.6mm \times 1.2mm TO패키지 6" 및 8" GaN 공정
GaN-on-Si	Panasonic 	<ul style="list-style-type: none"> Normally-off($V_{th}=+1V$) 기반 기술 세계최초 모터구동용 인버터 단일칩 개발(2009,12) 10kV GaN HEFT 구현 9.4kV급 natural super junction diode 	<ul style="list-style-type: none"> GIT(Gate Injection Transistor) 20W output(2.7mm \times 2.5mm) AlN passivation 사용 및 Short-pulse laser 이용 Via 구현
GaN Bulk	Toyota 	<ul style="list-style-type: none"> AlGaIn/GaN-on-bulk GaN HEMT 기술 AlGaIn/GaN-on-bulk GaN gate MOSFET 기술 600V, $i_d=8A$, $R_{DS(on)}=5m\Omega$ 300$^{\circ}C$ 구동 10kV GaN HEMT 	<ul style="list-style-type: none"> Bulk GaN 기관 Chip size: 4mm \times 2mm Lateral type GaN 소자 연구 Vertical type GaN 소자 연구



(a) EPC의 LGA 전극 구조



(b) GaN Systems의 Island Technology 전극 구조

(그림 10) 상용칩 전극 구조 기술 예시

Systems의 경우는 Island Technology를 통해 소자 신뢰성을 향상시켰으며, 650V/60A급 소자를 TSMC사 6인치 CMOS 호환 공정라인을 통해 대량 생산하고 있다.

〈표 5〉 상용 GaN 전력반도체 소자 사양[9]~[14]

제조사	모델명	항복 전압 (V)	전류 레전 (A)	온-저항 (m Ω)	Q_g (nC)	패키징
EPC	EPC2023	30	60	1.3	20	LGA
	EPC2022	100	90	3.2	13.2	LGA
	EPC2034	200	31	10	8.5	BGA
	EPC2025	300	6.3	120	1.8	BGA
GaN Systems	GS61008T	100	90	7	12	GaN PX
	GS66516T	650	60	25	12.1	GaN PX
Transphorm	TPH3205WS	600	36	52	28	TO-247
	TPH3207WS	650	50	35	28	TO-247
MicroGaN	—	600	30	170	4	TO-263
Panasonic	PGA26C09DV	600	15	71	—	TO-220
On Semi.	NTP8G202NG	600	9	290	6.2	TO-xx

(그림 10)에 EPC사의 LGA 전극 기술과 함께 GaN Systems사의 Island Technology 전극기술을 비교하여 나타내었다. 현재 200V 이하급 저전압과 650V급 중전압 분야에서 성능이 가장 우수한 전력반도체 소자를 양산하는 두 기관의 경우 고속/저손실 고효율을 구현하기 위한 소자의 본딩패드 전극 구조와 패키지 기술의 특징

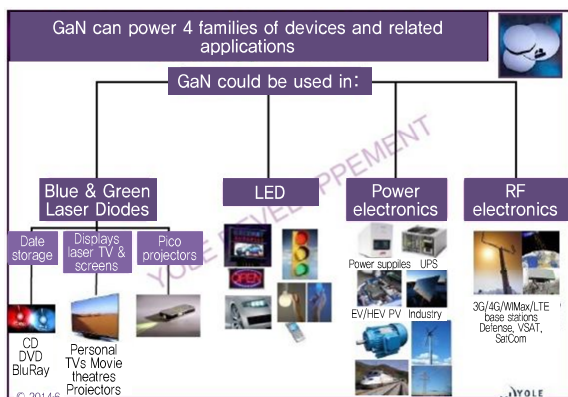
을 잘 알 수 있다. 2010년 최초로 GaN 전력반도체 소자를 소개한 미국의 IR은 현재 Infineon에 매각되어 대량 생산을 준비 중이다.

이처럼 글로벌 선두 기업체들은 양산기술 축적과 신뢰성 향상을 통해 연구개발에서 상용화 단계로 넘어가고 있다. <표 6>은 현재 시장에서 구입 가능한 GaN 전력소자의 주요 사양을 정리하였다[9]~[14].

3. GaN 전력모듈 및 응용분야

전력변환모듈 측면에서 GaN 전력반도체는 고속 스위칭 구동 및 낮은 온-저항 값으로 고전력밀도 및 고효율의 시스템 구현이 가능하다는 큰 장점을 갖는다. 아직은 GaN 전력반도체를 활용한 제품이 상용화되어 시장을 형성하고 있지는 않으나, 데이터센터[15], 차세대 자동차[16][17], 이동통신 기지국/중계기, 반도체 장비 및 가전기기 분야 등 고효율 및 소형화 제품을 위해 전 세계적으로 활발히 연구개발을 진행하고 있다[18]. (그림 11)은 GaN 전력반도체를 활용한 다양한 응용분야를 보여준다.

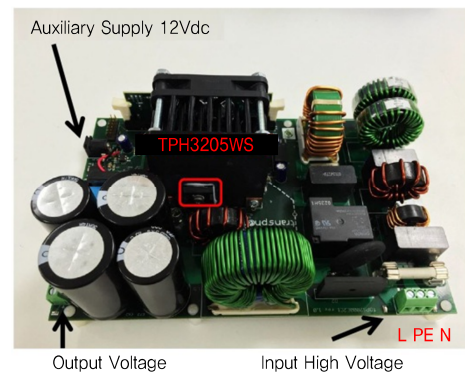
캐나다 GaN Systems는 E-mode의 100V급과 650V급의 다양한 GaN 전력반도체를 개발하고 있으며, 2015년 650V의 항복전압 및 55mΩ의 온 저항을 갖는 E-mode GS66508T 소자를 적용한 2kW급 half-bridge 평가보드를 개발하였다. (그림 12)에서 보여주



(그림 11) GaN 전력반도체 응용분야[18]



(그림 12) GaN E-HEMT half-bridge 평가보드 (GS66508T-인덕터 불포함)[10]



(그림 13) 2.8kW Totem-Pole PFC 보드[19]

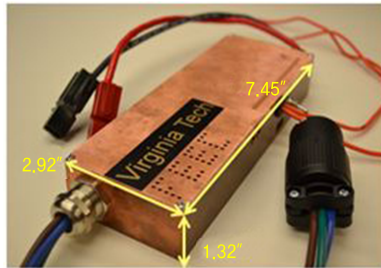
는 평가 보드는 인덕터를 외부에서 연결하도록 제작되었으며, 입력전압 400Vdc와 출력전압 200Vdc 사양을 갖는 Synchronous buck converter의 측정 결과 1~2kW의 출력전력에서 98.5% 이상의 효율을 보여주었다.

고전압 전력변환용 GaN FET를 개발하기 위해 2007년 설립한 Transphorm[11]은 항복전압 600V와 52mΩ의 온-저항을 갖는 캐스코드 형태의 TPH3205WS 소자를 적용하여 (그림 13)과 같이 85~260Vac의 입력 전압 및 390Vdc의 출력전압을 갖는 2.8kW급 bridgeless totem-pole Power Factor Correction(PFC) 보드(TDPS2800C2C1)를 개발하였고 230Vac 와 115Vac 입력 조건에서 각각 98.8%와 97.5%의 최대 효율을 보여주었다[19].

2007년 3명의 엔지니어가 설립하여 2009년 6월 세계 최초로 E-mode GaN FET를 출시한 EPC[9]는 항복전



(그림 14) EPC9509(60V ZVS Class-D Amplifier Board for Wireless Power Transfer Systems)[20]

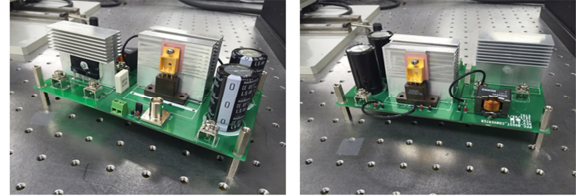


(그림 15) 구글 LBC용 Power Inverter[21]

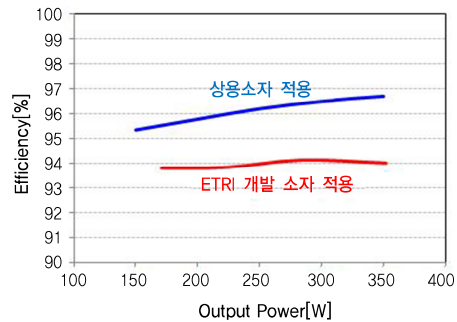
압 60V 및 150mΩ의 온 저항을 갖는 EPC2108 소자를 활용하여 (그림 14)와 같이 Alliance for Wireless Power(A4WP) 표준의 6.78 MHz에서 동작하는 무선전력전송 시스템에 적용 가능한 Differential-mode Zero Voltage Switching(ZVS) Class-D amplifier 보드(EPC9509)를 개발 및 발표함으로써 고속 스위칭 구동이 가능한 소자를 개발했음을 간접적으로 보여주고 있다[20].

버지니아 공대의 the Future Energy Electronics Center(FEEEC)에서는 GaN systems의 650V의 항복전압과 50mΩ의 온 저항 특성을 보이는 E-mode의 GS66508P 소자 6개를 적용하여 (그림 15)와 같이 구글의 Little Box Challenge(LBC)용 power inverter를 개발하여 28.84in3 사이즈에 98% 효율 특성을 2016년 9월에 보고한 바 있다[21].

국내에서는 ETRI와 공동연구를 수행한 G-Philos가 처음으로 2016년 3월 GaN Systems의 650V급 상용소



(그림 16) 제작된 평가보드의 앞면과 뒷면 사진



(그림 17) 250W급 PFC 컨버터의 효율 측정 결과

자를 적용하여 700W급 연료전지용 인버터를 기존 Si 소자 적용한 제품 대비 동일 효율을 갖지만, 30% 이상 사이즈를 축소된 제품을 개발하였다[22].

ETRI에서는 자체 개발한 GaN 전력반도체 소자를 검증하기 위한 컨버터 및 인버터를 제작하여 소자 성능을 평가해 왔다[23][24]. (그림 16)은 18cm×10cm 크기로 PFC 컨버터 평가 보드로, ETRI에서 개발한 GaN FET는 앞면에 GaN SBD는 뒷면에 부착된 사진을 보여준다. 220Vac 전압을 400Vdc로 변환하는 PFC 컨버터는 정류기 다음 단에서 DC 전압을 인가할 수 있는 옵션과 controller/gate driver를 거치지 않고 function generator로 직접 FET의 게이트에 duty와 frequency를 조절할 수 있는 옵션을 추가하였다.

(그림 17)은 제작된 컨버터에 상용소자와 ETRI에서 개발한 소자를 적용하여 측정한 효율 그래프를 보여준다. 평가 보드는 전력반도체 및 수동 부품들에 의한 손실 이외에도 시험 평가에 용이성을 위해 사용한 소켓과 다수의 테스트 포인트 및 rework을 고려한 보드 제작에 따라 추가적으로 발생하는 손실을 포함하고 있다. 측정 결과 250W 출력에서 상용소자 대비 약 2%의 효율 차이

는 두 소자의 온-저항값의 성능에 기인하며, 현재 전력 소자의 성능 향상을 위하여 ETRI에서 지속적인 연구개발을 수행하고 있다.

III. 결론

차세대 고효율 전력반도체 소자로서 GaN 전력소자는 기존 실리콘 대체와 고효율 제품 개발을 위하여 활발한 연구개발이 진행 중이다. 글로벌 GaN 전력반도체 기술 개발과 상용화는 초기단계로 선진업체 캐치업과 추월이 가능한 분야이다. 현재 상용화된 소자는 고속 스위칭, 전력모듈 소형화 및 시스템의 고효율화를 요구하는 응용 제품을 타깃으로 200V급 이하와 650V급 응용에 특화되어 있다.

글로벌 선진 기업들은 기존 Si MOSFET 대비 고성능 제품의 저가격화를 위하여 6인치급 GaN-on-Si 플랫폼 기반 Au-free CMOS 호환 공정을 통하여 양산을 진행하고 있다.

따라서 국내에서도 무선전력전송, 전기자동차, 신재생에너지 등 글로벌 신시장 점유와 기술적 종속을 탈피하기 위하여 정부의 지속적인 지원과 함께 산학연이 체계적으로 6인치 CMOS 호환 공정 플랫폼 구축과 GaN 전력반도체 연구개발을 통한 조기 상용화가 시급한 실정이다.

약어 정리

2-DEG	Two-Dimensional Electron Mobility Gas
A4WP	Alliance for Wireless Power
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
D-mode	Depletion-mode
ECPE	European Center for Power Electronics
eGaN	Enhancement-mode Gallium Nitride
E-mode	Enhancement-mode
ESS	Energy Storage Systems
FEEC	The Future Energy Electronics Center

GaN	Gallium Nitride
GIT	Gate Injection Transistors
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HFET	Heterostructure Field Effect Transistor
NPII	Next Generation Power Innovation Institute
PFC	Power Factor Correction
WBG	Wideband gap
WPM	World Premium Material
ZVS	Zero Voltage Switching

참고문헌

- [1] 문재경, "GaN 파이버다이오드 연구개발 동향 및 향후 발전방향," SiC 및 GaN 전력반도체 실용화를 위한 핵심기술 분석 세미나, KINTEX, Korea, 2013.
- [2] 문재경, "GaN 파워반도체 글로벌 기술개발 동향 및 시사점," 세라믹코리아, Special II, vol. 29, no. 4, 2016, pp. 77-89.
- [3] Yole, "Power GaN 2014" Report, <http://www.yole.com>
- [4] Avogy co., <http://avogy.com>
- [5] 문재경, "GaN 파워다이오드 국내외 연구개발 동향 및 향후 발전방향," 세라미스트, 제16권 제4호, 2013, pp. 53-66.
- [6] J. Na et al., "700V/20A Double AlGaIn/GaN Lateral-Schottky Barrier Diodes with Recessed Anode Structure on Silicon Substrate," *11th ICNS*, 2015.
- [7] W.J. Chang et al., "Design of Parasitic Inductance Reduction in GaN Cascode FET for High-Efficiency Operation," *ETRI Journal*, vol. 38, no. 1, Feb. 2016, pp. 133-140.
- [8] Point the power 2016, <http://www.pointthepower.com/product/applications-markets-gan-power-electronics/>
- [9] EPC co., <http://www.epc-co.com>
- [10] GaN systems co., <http://www.gansystems.com/>
- [11] Tansphorm co., <http://www.transphormusa.com/>
- [12] MicroGaN co., <http://www.microgan.com/>
- [13] Panasonic, <http://www.semicon.panasonic.co.jp/en/products/powerics/ganpower/>
- [14] On Semi., <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/content.do?id=18622>
- [15] M.G. Txapartegi and P. Gueguen, "Data Center Market and Technology Trends in Power Electronics," *APEC Industry Presentations, Session IS10*, Mar. 2016.
- [16] Dr. Andreas, "Future Developments of Electric Vehicles," EPE ECCE keynote 3, Sept. 2016

- [17] 고상춘 외, “자동차용 WBG 전력반도체 및 전력변환모듈과 ETRI GaN 소자 기술,” 전자통신동향분석, 제29권 제6호, 2014. 12, pp. 53-62.
- [18] Yole, “Power GaN, GaN Technologies for PowerGaN Electronic Applications: Industry and Market Status & Forecasts,” Yole Development, June 2014.
- [19] J. Cuadra, “GaN Takes Server Power Supplies’ Power Density to New Heights,” *APEC Industry Presentations, Session IS04*, Mar. 2016.
- [20] M.A. de Rooij, “Introducing eGaN IC Targeting Highly Resonant Wireless Power,” *APEC Industry Presentations, Session IS04*, Mar. 2016.
- [21] X. Zhao et al., “A Novel Inverter Design using GaN Transistors with a Power Density of $61.2\text{W}/\text{in}^3$,” *Power Systems Design Magazine*, Sept. 2016.
- [22] <http://gannewsroom.com/articles>, Mar. 2016
- [23] 정동윤 외, “고효율 및 고속 스위칭용 GaN 기반 부스트 컨버터,” 제22회 한국반도체학술대회, 2015, p. 49.
- [24] 장현규 외, “GaN 전력소자를 적용한 3상 BLDCM 인버터,” SoC 학술회, 2016.