GaN 전자소자 글로벌 연구개발 동향

Global R&D Trends of GaN Electronic Devices

스마트 & 그린 융합부품소재기술 특집

문재경 (J.K. Mun) RF융합부품연구팀 팀장
배성범 (S.B. Bae) RF융합부품연구팀 선임연구원
장우진 (W.J. Chang) RF융합부품연구팀 선임연구원
임종원 (J.W. Lim) RF융합부품연구팀 책임연구원
남은수 (E.S. Nam) 광무선융합부품연구부 부장

목 차

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 연구개발 동향
Ⅲ. 결론

차세대 화합물 반도체 플랫폼으로 각광을 받고 있는 GaN 전자소자 글로벌 연구개발 동향에 관하여 기술하고자 한다. GaN 전자소자는 와이드 밴드갭(Eg=3.4eV)과 고온 안정성(700℃) 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.

© 2012 한국전자통신연구원

Ⅰ. 서론

1. GaN, 차세대 에너지 절감 반도체

가. GaN-based Electronics의 역사

<표 1>은 GaN-based electronics의 개발 역사를 보여준다[1]. 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 반도체 형성 기술은 1992년 Nakamura 그룹에서 소개되었다. AlGaN/GaN HEMT 소자는 1993년 미국 South Carolina 대학의 Asif Khan 교수 그룹에서 처음으로 보고를 하였으며, 1997년 AlGaN/GaN HEMT on SiC 소자를 이용한 RF 전력특성은 4GHz S-band에서 1.4W, 10GHz X-band에서 0.85W 수준이었다.

최초의 AlGaN/GaN HBT 소자와 GaN MOSFET 소자는 1998년에 보고가 되었으며, Zhang 그룹에서는 2000년 p-n-p GaN BJT 소자를 개발하였다.

2011년 12월 현재 상용화되어 있는 AlGaN/GaN HEMT 소자는 전력밀도가 4~8W/mm 수준이며, 단일칩바 최대 출력전력은 TriQuint사 TGF2023-20의 경우 3GHz에서 90W 정도이다. 상용 파운드리는 Cree, RFMD, TriQuint, UMS 등에서 활용이 가능하며, Cree와 TriQuint는 4인치 X-band MMIC 제작도 가능하다. 그러나 비용이 워낙 고가(15~25만 달러)이며, 25W 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.

〈표 1〉 GaN-based Electronics의 개발 역사

Year	Event	Authors
1969	GaN by hydride vapor phase epitaxy	Maruska and Tietjen
1971	MIS LEDs GaN by MOCVD	Pankove et al. Manasevit et al.
1974	GaN by MBE	Akasaki and Hayashi
1983	AlN intermediate layer by MBE	Yoshida et al.
1986	Specular films using AlN buffer	Amano et al.
1989	p-type Mg-doped GaN by LEEBI and GaN p-n junction LED	Amano et al.
1991	GaN buffer layer by MOCVD	Nakamura
1992	Mg activation by thermal annealing AlGaN/GaN two-dimensional electron gas	Nakamura et al. Khan et al.
1993	GaN MESFET AlGaN/GaN HEMT Theoretical prediction of piezoelectric effect in AlGaN/GaN	Khan et al. Khan et al. Bykhovski et al.
1994	InGaN/AlGaN DH blue LEDs(1 cd) Microwave GaN MESFET Microwave IIFET, MISFET GaN/SIC HBT	Nakamura et al. Binari et al. Binari et al.; Khan et al. Pankove et al.
1995	AlGaN/GaN HEMT by MBE	Ozgur et al.
1996	Doped channel AlGaN/GaN HEMT Ion-implanted GaN JFET 340 V VGD AlGaN/GaN HEMT 1st blue laser diode	Khan et al. Zolper et al. Wu et al. Nakamura and Fosal
1997	Quantification of piezoelectric effect AlGaN/GaN HEMT on SiC 1.4 W @ 4 GHz 0.85 W @ 10 GHz 3.1 W/mm at 18 GHz	Asbeck et al. Binari et al.; Ping et al. Gaska et al. Thibeault et al. Siram et al. Wu et al.
1998	3.3 W p-n junction in LEO GaN HEMT in LEO GaN 6.8 W/mm(4 W) @ 10 GHz HEMT on SiC 10^{-4} Hooge factor for HEMT on SiC 1st AlGaN/GaN HBT 1st GaN MOSFET	Sullivan et al. Kozodoy et al. Mishra et al. Sheppard et al. Levinshtein et al. McCarthy et al. Ren et al. Ren et al.
1999	9.1 W/mm @ 10 GHz HEMT on SiC GaN BJT (n-p-n)	Mishra et al. Yoshida et al.
2000	4.3 kV AlGaN rectifler p-n-p GaN/AlGaN HBT p-n-p GaN BJT	Zhang et al. Zhang et al. Zhang et al.

© 2012 한국전자통신연구원

나. GaN 반도체의 장점

<표 2>는 Si, GaAs 및 GaN 반도체 재료의 특성을 보여준다. GaN 반도체는 실리콘이나 갈륨비소와 비교하면 와이드 밴드갭(Eg=3.4eV)과 고온 안정성(700°C) 등 재료적인 특징으로 인하여 고출력 RF 전력증폭기와 고전력용 전력반도체 응용에 큰 장점을 가진다.

고출력용 GaN RF 전력증폭 소자의 전력밀도는 기존 Si-기반 LDMOS 트랜지스터보다 10배 이상 높아 제품의 소형화와 경량화를 통하여 30% 이상의 전력절감이 가능하며, 레이더, 위성 등 송수신 트랜시버 모듈에 GaN 전력증폭기를 이용할 경우 기존 GaAs 기반 전력증폭기에 비하여 높은 전력밀도(>x8)와 효율(>20%) 특성으로 인하여 모듈 크기를 50% 이상 줄임과 동시에 경량화를 이룰 수 있어 비행기, 위성 등 탑재체의 에너지 절감에 크게 기여할 수 있다.

고전력용 GaN 전력 스위칭 소자는 기존 Si-기반 IGBT에 비하여 스위칭 손실과 온-저항 손실이 낮아 30% 이상의 에너지 절감이 가능하다. 뿐만 아니라, 일본 도요타 자동차사의 보고에 의하면 HEV 등 전기자동차의 DC-DC 부스터 컨버터나 DC-AC 인버터에 GaN 전력반도체를 적용할 경우 경량화, 변환효율 향상, 전용 냉각시스템을 제거할 수 있어 연료소모를 10% 이상 줄일 수 있어 연간 400달러 이상의 에너지 절감 효과를 가진다.

이러한 장점으로 인하여 미국 DARPA는 GaN 반도체를 90년대 중반부터 차세대 화합물 반도체 플랫폼(next generation compound semiconductor platform)으로 명명한 후 정부 주도적으로 장기적인 국책 대형 프로젝트를 통하여 에피 소재, 소자, 공정 및 집적회로 관련 기술을 개발하여, 최초의 상용품은 2005년 미국과 일본에서 출시된 AlGaN/GaN HEMT 소자였으나, 2011년에는 20W급 Ku-band MMIC도 상용 제품이 판매되고 있으나, 역시 미국 정부의 규제(EL)로 인하여 제한적으로 소량만 구매가 가능한 실정이다.

〈표 2〉 Si, GaAs 및 GaN 반도체 재료의 특성

Parameter	Why?	Unit	Si	GaAs	GaN
V_{paek}	Transit time	10^7cm/s	1	2	2.5
E_{BK}	Voltage swing	10^5V/cm	5.7	6.4	40
E_g	Charge density	eV	1.12	1.42	3.4
κ	Heat removal	W/cm·K	1.3	0.5	2.9
T_{max}	Cooling system	℃	300	300	700

다. GaN 반도체의 이슈

GaN 반도체는 위와 같은 수많은 장점에도 불구하고 AlGaN과 GaN 에피의 격자부정합(lattice mismatched)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.

AlGaN/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, 결정결함, 특히 전위밀도(dislocation density)가 현재 10^9/cm^2 수준에 머물고 있어 고품위/고수명 소자를 위해서는 10^5/cm^2 이하로 결함농도를 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.

2. GaN 반도체의 응용 분야

(그림 1)은 GaN 반도체의 주요 응용 분야를 보여준다. GaN 반도체 소자는 크게 광소자와 전자소자로 분류할 수 있으며, 전자소자는 다시 통신용 마이크로웨이

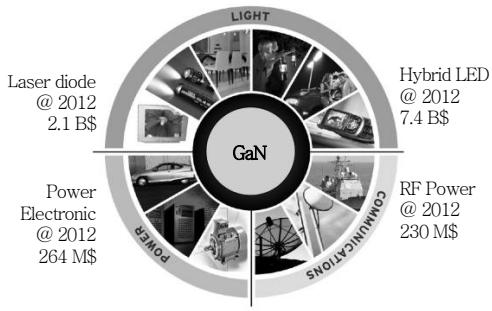
© 2012 한국전자통신연구원

브 소자와 전력전자용 스위칭 소자로 나눌 수 있다[2].

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 거대시장 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.

본고는 GaN 전자소자 기술(초고주파 소자, 특히 전력증폭 소자와 전력반도체 소자)의 글로벌 연구개발 동향을 총체적으로 분석함으로써 국내에서도 정부주도형의 장기적인 대형 국책 연구개발 프로젝트의 필요성을 언급함과 동시에 이를 통하여 고부가가치 GaN 전자소자의 선진국 기술 종속으로부터 탈피하는 계기가 되었으면 하는 바람이다.



<자료>: Yole Dev; ABI Res, 2009.

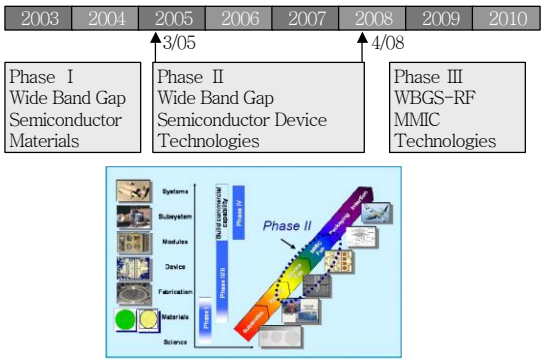
(그림 1) GaN 반도체의 주요 응용 분야

Ⅱ. 연구개발 동향

1. 정부주도형 연구개발 프로젝트

가. 미국의 주요 프로젝트

- WBGS-RF Program: 2003년 5월부터 2010년 4월까지 만 7년 동안 수행된 장기 대형 프로젝트로, Phase Ⅰ에서는 GaN 에피 소재 기술 개발, Phase Ⅱ는 핵심 소자 기술 개발, 그리고 Phase Ⅲ에서는 subsystem인 MMIC 기술 개발을 목표로, 참여 기관은 21개였으며, TriQuint가 주관하였다((그림 2) 참조). 주요 결과로는 AlGaN/GaN/SiC 기반 전력증폭기의 전력부가 효율 60% 이상, 10GHz에서 전력밀도 9W/mm 이상, 150℃에서 평균 수명(MTTF) 10^7시간 이상의 신뢰성을 얻었으며, 수율(yield)은 80% 이상이었다[3].

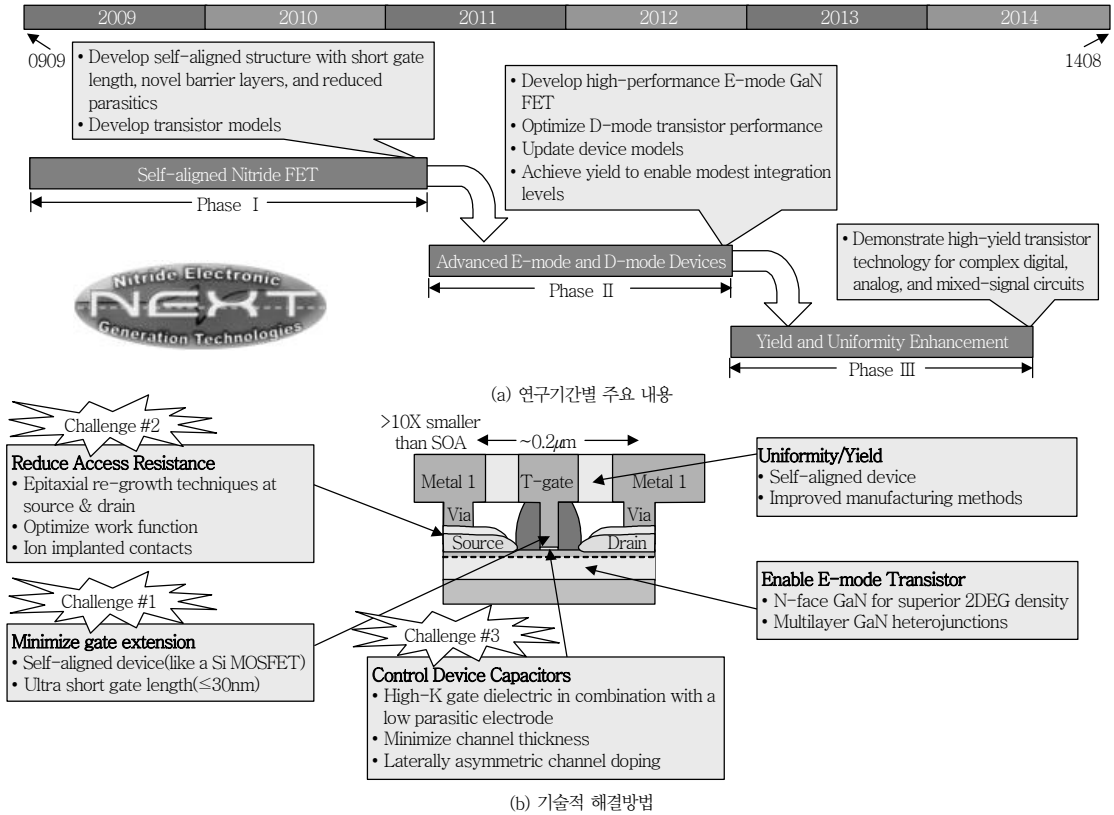


(a) 연구기간별 주요 내용

(b) 21개 참여 연구기관

(그림 2) WBGS-RF 프로그램

© 2012 한국전자통신연구원



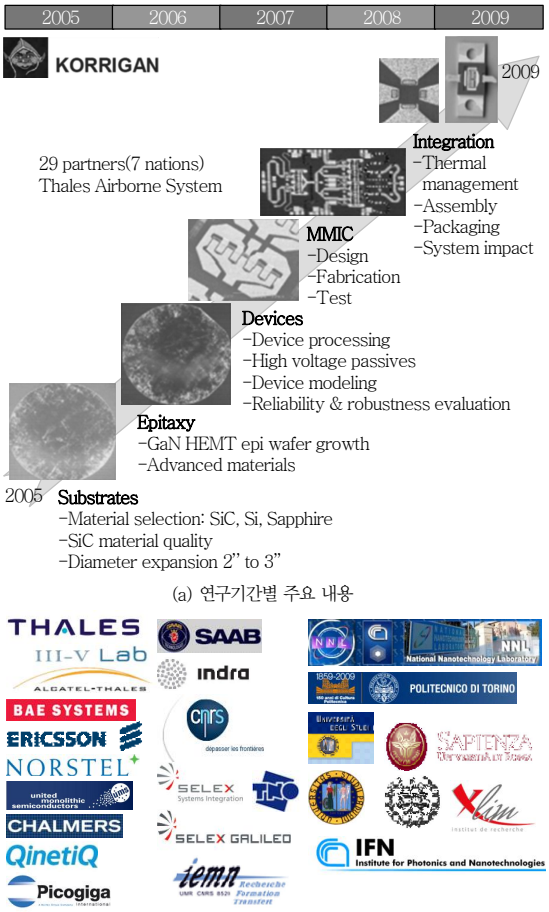
(그림 3) NEXT 프로그램

• NEXT Program: WBGS-RF 후속으로 2009년 9월부터 2014년 8월까지 만 5년 동안 수행 중인 프로젝트로, 고항복전압의 아날로그-혼성 신호와 차세대 디지털 GaN 회로용 고성능 신소자 개발이 목표이다((그림 3) 참조). 제1단계에서는 자기정렬 트랜지스터(self-aligned FET) 기술 개발, 제2단계에서는 고급 증가형/공핍형 트랜지스터 개발, 그리고 최종 3단계에서는 수율 95% 이상과 임계전압(V_{th}) 균일도 30mV 수준의 양산 기술 개발을 목표로 하고 있다. 개발 소자의 차단(f_T)/최대진동(f_{max}) 주파수 특성의 목표값은 증가형 트랜지스터(enhancement mode FET)의 경우 f_T/f_{max}>400/450GHz, 공핍형 트랜지스터(depletion mode FET)의 경우 f_T/f_{max}>500/550GHz이다[4].

나. 유럽의 주요 프로젝트

• KORRIGAN Program: 미국과 달리 유럽연방 7개국 29개 그룹을 중심으로 독자적으로 2005년 1월부터 2009년 12월까지 만 5년 동안 수행된 프로젝트로, 기판, 에피 소재, 소자, MMIC 및 패키지 집적화를 목표로 Thales Airborne System이 주관하였다((그림 4) 참조). Sapphire, Si, SiC 기판을 이용한 에피 성장과 0.25μm/0.5μm 게이트 AlGaN/GaN HEMT 소자와 이를 이용한 연구 수준의 S-/X-band 고출력증폭기(HPA)와 저잡음증폭기(LNA) 및 스위치 MMICs를 개발하였다[5].

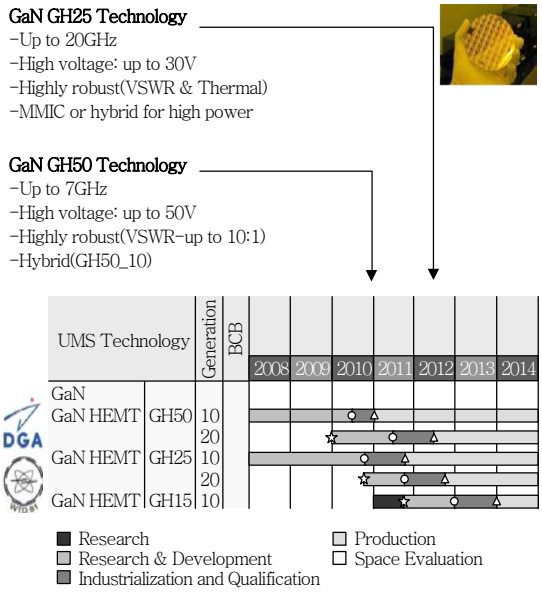
© 2012 한국전자통신연구원



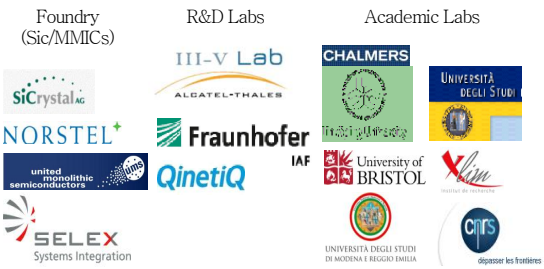
(a) 연구기간별 주요 내용

(b) 21개 참여 연구기관

(그림 4) KORRIGAN 프로그램



(a) 연구기간별 주요 내용



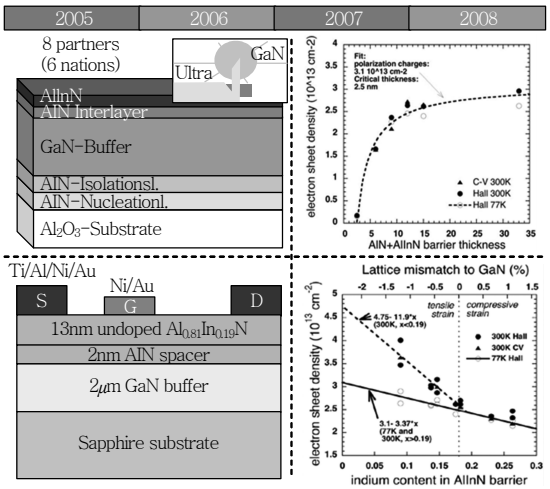
(b) 14개의 참여 연구기관

(그림 5) MANGA 프로그램

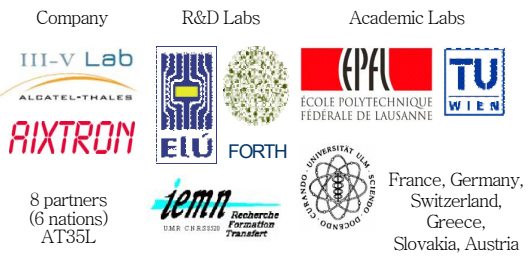
• MANGA Program: KORRIGAN 프로그램 종료 후 2010년 5월부터 2014년 12월까지 수행 중인 프로젝트로, 영국, 프랑스, 이탈리아, 스웨덴, 독일 등 5개국 14기관이 참여하며 SELEX SI가 주관하고 있다((그림 5) 참조). 4인치 AlGaN/GaN on SiC 양산기술 개발을 목표로, 주요 내용으로는 SiC 에피 성장, 0.15μm/0.25μm/0.5μm 게이트 AlGaN/GaN 고출력 HEMT 소자와 마이크로 스트립 라인 및 CPW 전송선을 이용한 고출력 증폭기, 저잡음증폭기, 스위치 MMICs 양산과 차기 밀리미터파용 회로의 사전연구를 포함하고 있다[6].

• ULTRAGAN Program: KORRIGAN 프로그램과 달리 새로운 재료 기반 GaN 소자 기술개발을 위하여 2005년 9월부터 2008년 8월까지 3년간 6개국 8기관이 참여하고 Alcatel-Thales III-V Labs가 주관하여 수행된 프로젝트이다((그림 6) 참조). 주요 연구결과로는 Sapphire와 SiC 기판 상에 MOCVD와 MBE 방법으로 에피를 성장하고 AlInN/GaN MOS-HEMT 소자와 제조 공정을 개발하여 2GHz에서 전력밀도 13W/mm, 10GHz에서 출력 10W 이상과 전력부가효율(PAE) 56%의 특성과 함께 최초로 1000°C의 고온에서 동작을 선보였다[7].

© 2012 한국전자통신연구원

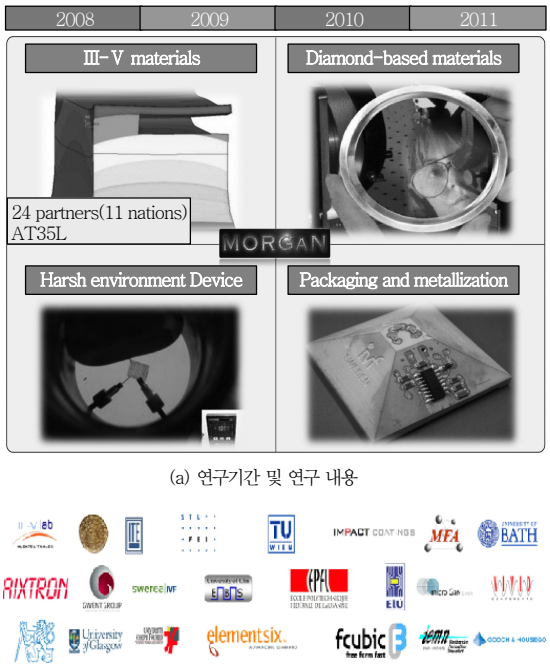


(a) 연구기간별 주요 내용



(b) 8개 참여 연구기관

(그림 6) ULTRAGAN 프로그램



(a) 연구기간 및 연구 내용

(b) 24개 참여 연구기관

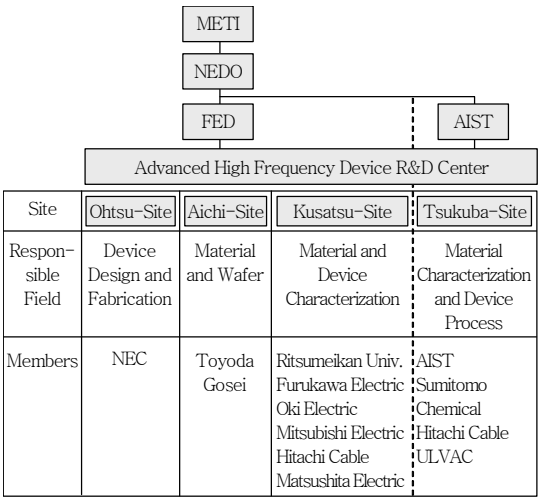
(그림 7) MORGAN 프로그램

- MORGAN Program: ULTRAGAN 프로그램 종료 후 InAlN/GaN 기반 GaN 소자 기술개발을 위하여 2008년 11월부터 2011년 10월까지 3년간 11개국 24기관이 참여하고 Alcatel-Thales III-V Labs가 주관하여 수행된 프로젝트이다((그림 7) 참조). 주요 연구결과로는 단결정 다이아몬드 기판 위에 성장한 0.2μm 게이트 AlGaN/GaN HEMT 소자의 f_T/f_{max}는 21GHz/42GHz 수준을 얻었으며, InAlN/GaN HEMT on SiC 소자는 3.5GHz에서 전력밀도 6.6W/mm와 PAE 70%를 보였다. 특히 cantilever 형태와 drumskin 형태의 고온-고압(550°C, 50bar) 센서를 제작하여 압력에 따른 전압 및 전류 변화에 대한 상관관계를 모니터링하였다[8].

다. 일본의 주요 프로젝트

- NEDO National Project: 일본 경제산업성(METI) 지원하에 2002년 9월부터 2007년 3월까지 4년 6개월 동안 16개 기관이 함께 수행한 고전력 고주파 AlGaN/GaN HFETs 개발 프로젝트이다((그림 8) 참조). 주요 연구결과로는 2GHz 주파수와 동작전압 50V에서 출력 230W(전력밀도 4.7W/mm), 전력부가효율 67%, 이득 9.5dB를 얻었으며, 30GHz Ka-band에서 0.25μm T-gate HFET의 경우 전력밀도는 5.8W/mm로 우수한 결과를 발표하였다[9]. 정부 기관 AIST, 생산 수준 기술은 NEC와 Toyoda Gosei가 담당하고, 기초 R&D 연구는 Furukawa Electric, Oki Electric, Mitsubishi Electric, Hitachi Cable, Matsushita Electric, Sumitomo Electric, 그리고 ULVAC가 담당하였다.

© 2012 한국전자통신연구원



(그림 8) 고전력, 고주파 GaN 반도체 소자 프로젝트

• METI Project: 일본 정부 지원의 마이크로웨이브 소자 기술개발 프로젝트는 2007년 이후 주춤해진 반면 경제산업성(METI) 주관으로 신재료 파워반도체 프로젝트를 2010년 1월부터 2014년 12월까지 5년 과제를 수행 중에 있다. 예산 규모는 20억 엔이며 전기자동차와 고속철도에 탑재를 목표로 웨이퍼의 대구경화(6인치 목표)를 통한 저가격화와 고품질화와 아울러 소자 및 시스템 전체 개발을 계획하고 있는 중대 프로젝트이다.

<표 3>은 최근 10년간 미국, 유럽, 일본 선진국의

〈표 3〉 최근 10년간 미국, 유럽, 일본 선진국의 정부주도형 연구개발 프로젝트

N / Y	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
미국	WBGS-RF • 2003. 5.~2010. 4.(84m) • AlGaN/GaN/SiC for Next generation MMICs(Substrate, Epi, Device, Reliability, Yield) • 21 partners(X-band@Cree, Wideband@TQNT, Q-band@NGST) • DARPA-MTO(Microsystems Technology Office) • X-, Q-band HPA MMICs with high yield and good reliability							NEXT • 2009. 9.~2014. 8.(60m), Total budget 16.2M$ • Novel Device for Analogue-Mixed signal and NEXT circuit-complex digital GaN circuits with very high breakdown voltages • DARPA-MTO(Microsystems Technology Office)					
EU				KORRIGAN • 2005. 1.~2009. 12.(60m) • Building blocks for radar & EW front-ends • 29 partners(7 nations) • European Defense Agency • Tech. demo. @ research level • S-, X-band HPA, LNA, SW MMICs				MANGA • 2010. 5.~2014. 12.(42m) • Mass production of 4"-S.I. SiC, epi-wafers & MMICs • 14 partners(5 nations) • European Defense Agency • System demo. @ product level • Substrate, Epi, and MMICs				
				ULTRAGAN • 2005. 9.~2008. 8.(36m) • Total 3.1M€(funding 2.0M€) • Ultra high-power microwave TRs • 8 partners(6 nations) • European Defense Agency • Tech. demo. @ research level • InAlN/GaN/Al_2O_3 epi/process/device				MORGAN • 2008.11.~2011.10.(36m) • Total 13.9M€(funding 9.2M€) • GaN + Diamond for harsh environments • 24 partners(11 nations) • European Defense Agency • Demo. @ R&D level • Hybrid substrate, TR & sensors, package			

(뒤에 계속)

© 2012 한국전자통신연구원

(계속) 〈표 3〉 최근 10년간 미국, 유럽, 일본 선진국의 정부주도형 연구개발 프로젝트

N / Y	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
일본	NEDO-METI • 2002. 9.~2007. 3.(52m) • Hi-Power and Hi-Frequency HFETs • 16 partners • NEDO-METI • Tech. demo. @ R&D level • AlGaN/GaN epi/process/device • Demonstration for base station power amplifier								METI • 2010. 1.~2014. 12.(60m) • 예산: 20억 엔(2010) • 신재료 파워반도체 프로젝트 • 전기자동차, 고속 철도에 탑재 목표 • Tech. demo. @ 시제품 level • 전력반도체 epi 웨이퍼/디바이스/시스템 • 웨이퍼의 저가격화, 대구경화, 고품질화 (6인치 목표)				

정부주도형 연구개발 프로젝트를 종합하여 나타내었다. 분석된 결과에 의하면 선진국 모두 2014년 말 연구개발 프로젝트가 종료됨을 알 수 있다.

따라서 선진국으로부터 고부가가치 GaN 전자소자의 기술적 종속 탈피와 세계 시장 선점을 위해서는 국내에서도 정부주도적으로 체계적인 연구비 지원을 통하여 2015년 이전에 GaN 전자소자 및 파워소자에 관한 모든 연구개발이 종료되고 상용품을 2015년 상반기에 출시할 수 있도록 준비를 해야 할 것으로 생각된다.

2. GaN 전력증폭기 기술동향

가. GaN 관련 기술 파운드리 서비스

현재 GaN 기술 관련 사용 가능한 파운드리 서비스는 ① 기판(substrate), ② Epi 웨이퍼, ③ GaN MMIC 제작, ④ 고가의 웨이퍼 재사용을 위한 Wafering 등이다. <표 4>에 GaN 기술 관련 각각의 서비스가 가능한 주요 회사를 정리하였다.

GaN MMIC 제작을 위한 파운드리 서비스는 미국 TriQuint, RFMD, Cree사와 유럽의 UMS 정도이며, 이 중 X-band용 전력증폭기 설계 및 제작은 TriQuint와 Cree사만 가능하며, UMS도 2012년부터 제공을 계획하고 있다. <표 5>에 GaN MMIC 파운드리 서비스를 제공하는 각 회사의 특징을 요약하여 나타내었다.

NovaSiC사는 SiC(4H, 6H, 3C), AlN, Al_2O_3, ZnO 웨이퍼를 wafering과 polishing하여 에피 성장 또는 재성장을 가능하게 하며, 특히 소자 제작 과정에서 실

〈표 4〉 GaN 기술 관련 파운드리 서비스

Technology	Company
Substrate	II-VI, Cree, SiCrystal, Dawa Corning
Epi wafer	IQE-RF, TriQuint, Cree, RFMD, Nitronex, UMS, Eudyna/Fujitsu, NTT-AT, Hitachi Cable
MMIC	TriQuint, RFMD, Cree, Ums, Nitronix
Wafering	NovaSiC

〈표 5〉 GaN MMIC 파운드리 서비스사의 특징

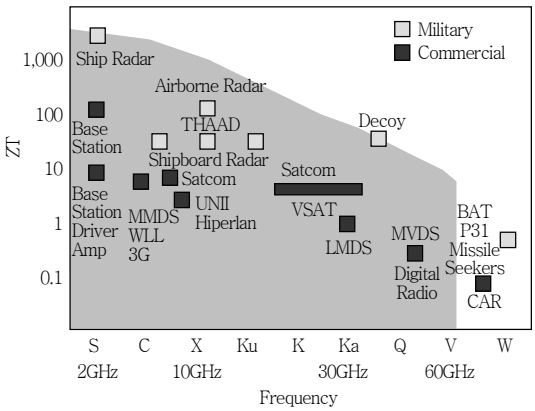
Company	Wafer size	Substrate	L_g(㎛)	Thickness	Via hole	Power density(W/mm)
Cree	4"	SiC	0.4 0.25	100㎛	Y	4~6
RFMD	3"	SiC	0.5	100㎛	N	6~8
Nitronex	4"	Si	0.7	100㎛	Y	-
TriQuint	4"	SiC	0.5 0.25	100㎛	Y	5~7
UMS	4"	SiC	0.5 0.25	100㎛	Y	4~6

© 2012 한국전자통신연구원

패한 고가의 웨이퍼나 결함이 있는 웨이퍼를 재사용할 수 있게 서비스해준다.

나. GaN 전력증폭기 응용 분야 및 특성

GaN 전력증폭기는 이동통신 기지국, 선박 및 군수용 레이더 등 여러 분야에 응용이 가능한 기술로, 특히 군수용 핵심 기술 확보를 통하여 초고가의 무기체계 국산화 및 미래 초고주파 레이더 기술 확보를 통한 관련 부품 산업의 경쟁력을 제고할 수 있다.



(그림 9) GaN 전력증폭소자의 응용 분야

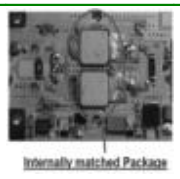
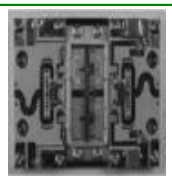
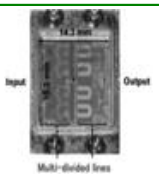
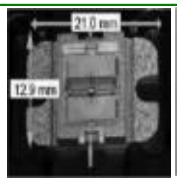
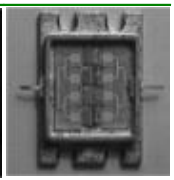
기지국용 전력증폭기 소자는 2010년 기준으로 세계 시장은 6.5억 달러 그리고 국내 시장은 780억 원 규모로, 현재 90% 이상 수입에 의존하는 LDMOS 전력증폭기는 점차 GaN 전력증폭기로 대체되고 있다[10].

세계 레이더 시스템 시장은 2014년 52억 달러 규모로, 이 중 약 30% 정도가 전력증폭기의 가격에 해당한다. 현재 능동형 위상배열레이더는 기존 기술인 GaAs 기반 전력증폭기에서 GaN 전력증폭기로 대체가 진행되고 있다[11].

(그림 9)는 GaN 전력증폭 소자의 주파수별 응용분야를 보여준다. 그림에서 민수용 보다는 군용의 전력 레벨이 높은 것을 볼 수 있으며, X-band 이하의 응용이 집중되어 있음을 알 수 있다[12].

<표 6>은 S-band와 X-band용 GaN 고출력 전력증폭기 개발 현황을 나타낸다. Cree사에서 S-band용으로 최대출력 520W, 효율 63% 제품을 개발하였고, X-band용으로는 일본 Fujitsu사가 최대출력 101W, 효율 53% 제품을 개발하였으나 실제로 구매를 할 수 있는 X-band 내부정합형 전력증폭기는

〈표 6〉 GaN 고출력 전력증폭기 개발 현황

	RFHIC	Cree	Eudyna	Fujitsu	Toshiba	NKL(China)
Freq. band	S-band	S-band	S-band	X-band	X-band	X-band
Freq.(GHz)	2.7-3.1, 2.9-3.3	3.3-3.6	2.9-3.3	9.5	9.5	8/7.7-8.2
$P_{out,max}$(W)	160/250	520	150/300/600	101	81	37/110
PAE(%)	55/38	63	55	53	34	40/38
Gain(dB)	11/34	12	14	-	8	8
Duty(%)	20	3	10	-	CW	CW
Vdd(V)	40	55	65	-	30	35/32
Etc.	Nitronex Thales vendor		Four chips highest in S	Four chips highest in X		Four chips highest in X
photo	 (51mm×36mm)		 (58.5mm×40mm)	 (14.3mm×15.2mm)	 (21mm×12.9mm)	 (17mm×24mm)

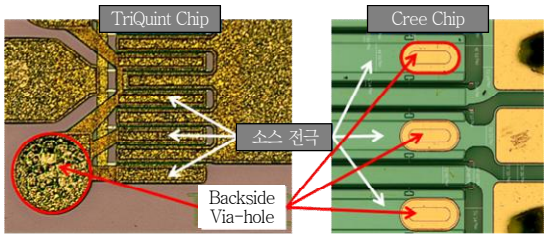
© 2012 한국전자통신연구원

Toshiba의 50W급(모델명: TGI8596-50)이 최고 수준이다. 유일하게 국내 기업인 RFHIC는 핵심 칩을 미국에서 수입하여 모듈을 제작 후 판매하는 형태로, 고부가가치 GaN 고출력 전력증폭기 칩의 국산화가 시급한 실정이다.

다. 고출력 GaN 전력증폭기 핵심 기술

고출력 GaN 전력증폭기는 일반적으로 동작전압이 28~55V 수준이며, 출력전력이 50W 이상으로 높은 항복전압, 낮은 소스 인덕턴스와 안정적인 접지 및 열방출 특성을 요구한다. 트랜지스터의 항복전압 향상은 게이트-드레인 전극 사이의 피크전계강도(E_{peak}: peak electric field intensity)의 감소로 가능하다. 1992년 MIT Lincoln Lab에서 처음으로 피크전계 완화를 위한 게이트 전극구조[13]를 소개한 후 게이트 연결, 소스 연결, 또는 게이트와 소스 동시 연결된 다양한 구조의 필드 플레이트(filed plate) 기술이 개발되었다. 일반적으로 X-band 이하의 고출력 전력증폭 소자는 소스 연결된 필드 플레이트와 후면 비어 접지 및 SiC 기판을 사용한다. 그러나 사용 주파수가 Ku-band 이상으로 증가하면 필드 플레이트에 의한 기생 커패시턴스 증가가 이득 등 주파수 특성을 악화시켜 소자구조 내 필드플레이트 적용을 기피하는 경향이다.

종합적으로 볼 때 고출력 고신뢰성 GaN 전력증폭 소자의 가장 중요한 핵심 기술은 소스 전극에 가능한 근접하게 후면 비어홀을 형성하여 접지하는 기술이다. TriQuint, UMS, Toshiba 등은 소스 전극을 적당수 단위로 묶어 하나의 비어홀에 연결하지만, Cree사는 (그림 10)과 같이 채널 위 소스 전극에 곧바로 개별적 후면 비어홀을 하나씩 형성하여 접지함에 따라 칩의 면적 감소와 패키징 시 발생하는 소스 인덕턴스를 최소화하여 이득 손실을 줄임으로써 칩의 성능과 수명향상 등 신뢰성을 높였다.



(그림 10) 후면 비어홀을 통한 접지 방법 비교

Ⅲ. 결론

차세대 화합물 반도체 플랫폼으로 각광을 받고 있는 GaN 전자소자 글로벌 연구개발 동향에 관하여 기술하였다. GaN 플랫폼은 고출력 전력증폭기뿐만 아니라 고전력 스위칭 소자로서 차세대 에너지 절감용 핵심소자로 각광을 받고 있다. 따라서 국내에서도 선진국의 기술 종속으로부터 탈피하고 고부가가치 신시장을 선점하기 위해서는 정부주도적인 대형 국책사업을 통하여 미국, 유럽, 일본 등 선진 각국의 연구개발 일정에 뒤쳐지지 않도록 늦어도 2015년까지 GaN 전자소자 기술의 연구개발과 함께 고출력, 고효율 에너지 절감 GaN 반도체 소자의 상용화가 필요할 것으로 생각된다.

● 용 어 해 설 ●

MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition의 준말이며, 3족인 유기금속 원소와 5족인 기체 소스를 이용하여 화합물 반도체를 성장하는 반도체 장비임.

약어 정리

AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
BJT	Bipolar Junction Transistor
CPW	Co-Planar Waveguide
EL	Export License
f_{max}	Maximum oscillating frequency
f_T	Cut-off frequency

© 2012 한국전자통신연구원

HBT	Hetero-Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HPA	High Power Amplifier
HVPE	Hydride Vapor Phase Epitaxy
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors
KORRIGAN	Key Organization for Research in Integrated Circuits in GaN Technology
LDMOS	Lateral Double Diffused Metal-Oxide Semiconductor
LNA	Low Noise Amplifier
MANGA	Manufacturable GaN Technology
MBE	Molecular Beam Epitaxy
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
MMIC	Microwave Monolithic Integrated Circuit
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
MORGAN	Materials for Robust Gallium Nitride
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
MTTF	Mean Time To Failure
NEXT	Nitride Electronic NeXt-Generation Technology
PAE	Power Added Efficiency
ULTRAGAN	Ultra-high Power Gallium Nitride
WBGS-RF	Wide Band Gap Semiconductor for RF Applications

참고문헌

[1] S.J. Pearton et al., "GaN Electronics for High Power, High Temperature Applications," *Electrochem. Socity's Interface*, vol. 9, no. 2, 2000, pp. 34-39.

[2] ABI Research Report, 2009.

[3] M. Rosker et al., "The DARPA Wide Band Gap Semiconductors for RF Applications (WBGS-RF) Program," *CS MANTECH Conf.*, Tampa, Florida, USA, May 18th-21st, 2009.

[4] M.J. Rosker et al., "NEXT Program," 3, Dec. 2008. http://www.darpa.mil/our_work/MTD/program

[5] P. Dueme et al., "Overview of the KORRIGAN Project," ESA-MOD Workshop on GaN Microwave Component Technologies, Ulm, Mar. 2009.

[6] DGA, "European Scenario for GaN and SiC for Microwave Applications," Apr. 27th, 2010.

[7] S.L. Delage, "UltraGaN Project: Breakthrough in GaN Devices Thanks to InAlN/GaN Heterostructure," *2nd EU FET-Clustee Meeting*, Nov. 13th-16th, 2007.

[8] S. Delage, "MORGAN-Materials for Robust Gallium Nitride," June 2009.

[9] Y. Nanishi et al., "Development of AlGaN/GaN High Power and High Frequency HFETs under NEDO's Japanese National Project," *CSMANTECH*, 2006, pp. 45-48.

[10] IDC, "Market Analysis : Worldwide Cellular Base station Semiconductor 2008-2013 Forecast and Analysis," 2008.

[11] "Radars-A Global Strategic Business Report," Global Industry Analysts, Inc. 2009.

[12] U.K. Mishra et al., "AlGaN/GaN HEMTs: an Overview of Device Operation and Applications," *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 6, 2002, pp. 1021-1031.

[13] C.-L. Chen et al., "High-breakdown Voltage GaAs MESFET with a Low-temperature-Grown GaAs Passivation Layer and Overlapping Gate Structure," MIT Lincoln Lab., *IEEE EDL*, vol. 13, no. 6, 1992, p. 335.

© 2012 한국전자통신연구원