

차세대 고효율/고출력 반도체: GaN 전력소자 연구개발 현황

Next Generation Energy Efficient Semiconductors: Status of R&D of GaN Power Devices

문재경 (J.K. Mun)	RF 융합부품연구팀 팀장
민병규 (B.G. Min)	RF 융합부품연구팀 책임연구원
김동영 (D.Y. Kim)	RF 융합부품연구팀 책임연구원
장우진 (W.J. Chang)	RF 융합부품연구팀 선임연구원
김성일 (S.I. Kim)	RF 융합부품연구팀 선임연구원
강동민 (D.M. Kang)	RF 융합부품연구팀 선임연구원
남은수 (E.S. Nam)	광무선융합부품연구부 부장

- I. 차세대 GaN 전력소자
- II. 글로벌 연구개발 현황
- III. 시장 및 특허 현황
- IV. 국내 연구개발 현황
- V. 국내 주요 연구과제
- VI. 맺음말

차세대 에너지 절감 반도체로 각광을 받고 있는 GaN(Gallium Nitride) 전자소자의 연구개발 동향, 특히 전력증폭기용 GaN 기술동향에 관하여 기술하였다. GaN 전자소자는 와이드 밴드갭($E_g=3.4\text{eV}$)과 고온(700°C) 안정성 등 재료적인 특징으로 인하여 고출력 RF(Radio Frequency) 전력증폭기와 고전력 스위칭 소자로서 큰 장점을 갖는다. 본고에서는 차세대 GaN 전력소자의 주요 특성을 소개하고 미국, 유럽, 일본을 중심으로 한 대형 국책 연구 프로젝트 분석을 통한 GaN 전력소자 연구개발 방향 및 GaN 전력소자 시장과 주요 특허 현황을 살펴보았다. 또한 국내의 주요 연구개발 현황과 현재 수행 중이거나 완료된 연구개발 과제를 간략하게 언급하였다. 이러한 연구개발 현황분석을 통하여 GaN 기술의 중요성과 함께 국산화의 시급성을 강조하고자 한다.

1. 차세대 GaN 전력소자

GaN(Gallium Nitride) 반도체는 실리콘이나 갈륨비소와 비교하면 와이드 밴드갭($E_g=3.4\text{eV}$) 특성과 고온(700°C) 안정성에 장점이 있다. 이동통신망 기지국의 전력증폭기로 사용될 경우, 기존 Si-기반 LDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) 트랜지스터보다 전력밀도가 10배 이상 높아 소형화와 경량화를 통해 30% 이상의 전력절감이 가능하고, 레이더, 위성 등의 송수신 모듈에 사용할 경우, GaAs(Gallium Arsenide)-기반 전력증폭기에 비해 높은 전력밀도($>8\text{배}$)와 효율($>20\%$) 특성으로 탑재체의 경량화와 에너지 절감에 크게 기여할 수 있다. 고전력용 GaN 전력 스위칭 소자는 기존 Si-기반 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)에 비하여 스위칭 손실과 온-저항 손실이 낮아 30% 이상의 에너지 절감이 가능하여 HEV(Hybrid Electric Vehicle)나 전기자동차에 적용하면 경량화, 변환효율 향상, 전용 냉각시스템을 제거할 수 있어 연료소모를 10% 이상 줄일 수 있다[1].

〈표 1〉은 GaN-based electronics의 개발 역사를 보여준다[2]. 최초의 GaN 반도체 재료는 1969년 Maruska와 Tietjen이 HVPE(Hydride Vapor Phase Epitaxy) 방법에 의한 결정성장으로 거슬러 올라간다. 1971년에는 MOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 방법으로, 1974년에는 Akasaki 그룹에서 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 방법으로 GaN 결정을 성장하였다. Mg 도핑과 급속열처리를 통한 p-형 GaN 반도체 형성 기술은 1992년 Nakamura 그룹에서 소개되었다. AlGaN(Aluminum Gallium Nitride)/GaN HEMT(High Electron Mobility Transistor) 소자는 1993년 미국 South Carolina 대학의 Asif Khan 교수 그룹에서 처음으로 보고를 하였으며, 1997년 AlGaIn/GaN HEMT on SiC(Silicon Carbide) 소자를 이용한 RF(Radio Frequency) 전력특성은 4GHz S-band에서 1.4W, 10GHz

〈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 AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas	Nakamura et al, Khan et al.
1993	GaN MESFET AlGaIn/GaN HEMT Theoretical prediction of piezoelectric effect in AlGaIn/GaN	Khan et al, Khan et al, Bykhovski et al.
1994	InGaIn/AlGaIn 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	AlGaIn/GaN HEMT by MBE	Ozgun et al.
1996	Doped channel AlGaIn/GaN HEMT Ion-implanted GaN JFET 340V VGD AlGaIn/GaN HEMT 1st blue laser diode	Khan et al, Zolper et al, Wu et al, Nakamura and Fosal
1997	Quantification of piezoelectric effect AlGaIn/GaN HEMT on SiC 1.4W @ 4GHz 0.85W @ 10GHz 3.1 W/mm at 18GHz	Asbeck et al, Binari et al.; Ping et al, Gaska et al, Thibeault et al, Siram et al, Wu et al.
1998	3.3W p-n junction in LEO GaN HEMT in LEO GaN 6.8W/mm(4W) @ 10GHz HEMT on SiC 10^{-4} Hooge factor for HEMT on SiC 1st AlGaIn/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	9.1W/mm @ 10GHz HEMT on SiC GaN BJT(n-p-n)	Mishra et al, Yoshida et al.
2000	4.3kV AlGaIn rectifier p-n-p GaN/AlGaIn HBT p-n-p GaN BJT	Zhang et al, Zhang et al, Zhang et al.

X-band에서 0.85W 수준이었다. 최초의 AlGaIn/GaN HBT(Hetero-Bipolar Transistor) 소자와 GaN MOSFET

(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) 소자는 1998년에 보고가 되었으며, Zhang 그룹에서는 2000년 p-n-p GaN BJT (Bipolar Junction Transistor) 소자를 개발하였다.

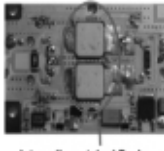
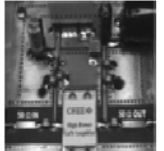
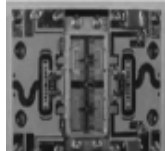
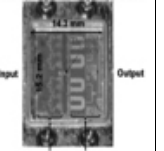
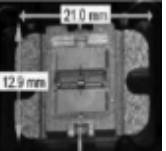
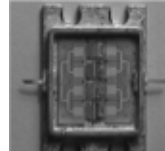
II. 글로벌 연구개발 현황

미국의 경우, 정부주도형으로 2003년부터 2010년까지 WBG-S-RF(Wide Band Gap Semiconductor for RF applications) 프로젝트를 통하여 전력부가효율 >60%, 전력밀도 >9W/mm(10GHz), 평균수명(MTTF: Mean-Time-To-Failure) >10⁷시간(150°C), 수율 >80%의 GaN on SiC 기반 전력증폭기를 개발하였다[3]. 2009년부터 2014년까지 NEXT(Nitride Electronic neXt-generation Technology) 프로젝트를 수행하고 있으며 고향복 전압의 아날로그-혼성 신호와 차세대 디지털 GaN 회로용 고성능 신소자 개발을 목표로 하고 있다. 목표 사양은 증가형 트랜지스터(enhancement mode FET)의 경우, $f_T/f_{max} > 400/450\text{GHz}$, 공핍형 트랜지스터(depletion

mode FET)의 경우, $f_T/f_{max} > 500/550\text{GHz}$ 이다[4].

유럽연방 7개국 29개 그룹을 중심으로 2005년부터 2009년까지 KORRIGAN(Key Organization for Research in Integrated Circuits in GaN Technology) 프로젝트를 통해 S-/X-band 고출력증폭기(HPA: High Power Amplifier)와 저잡음증폭기(LNA: Low Noise Amplifier) 및 스위치 MMICs를 개발하였다[5]. 2010년부터 2014년까지 수행 중인 MANGA(Manufacturable GaN Technology) 프로젝트는 영국, 프랑스, 이탈리아, 스웨덴, 독일 등 5개국 14기관이 참여하며 4인치 AlGaIn/GaN on SiC 양산기술 개발을 목표로 하고 있다 [6]. KORRIGAN 프로젝트와는 별도로 2005년부터 2008년까지 수행된 ULTRAGAN(Ultra-high Power Gallium Nitride) 프로젝트에서는 AlInN/GaN MOS-HEMT 소자를 개발하여 2GHz에서 전력밀도 13W/mm, 10GHz에서 출력 >10W과 전력부가효율 56%의 특성과 함께 최초로 1,000°C의 고온 동작을 선보였다[7]. 2008년부터 2011년까지 11개국 24기관이 참여한 MORGAN (Materials for Robust Gallium Nitride) 프로젝트에서는

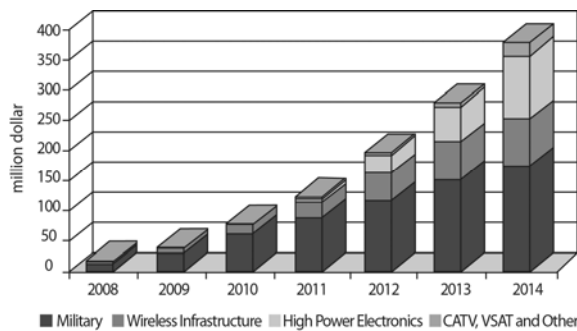
〈표 2〉 GaN 고출력 전력증폭기 개발 현황

	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
V _{dd} (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	 Internally matched Package (51mm × 36mm)		 (58.5mm × 40mm)	 Multi-divided lines (14.3mm × 15.2mm)	 (21mm × 12.9mm)	 (17mm × 24mm)

단결정 다이아몬드 기판 위에 제작된 0.2 μ m 게이트 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 f_T/f_{max} 는 21GHz/ 42GHz 수준을 얻었으며, InAlN/GaN HEMT on SiC 소자는 전력밀도 6.6W/mm(3.5GHz)와 PAE 70%를 보였다. 특히 cantilever 형태와 drumskin 형태의 고온-고압(550°C, 50bar) 센서를 제작하기도 하였다[8].

NEDO 국가 프로젝트는 일본 경제산업성 지원하에 2002년부터 2007년까지 16개 기관이 함께 수행한 고전력 고주파 AlGaIn/GaN HFETs 개발 프로젝트이다. 주요 연구결과로는 2GHz 주파수와 동작전압 50V에서 출력 230W(전력밀도 4.7W/mm), 전력부가효율 67%, 이득 9.5dB를 얻었으며, 30GHz Ka-band에서 0.25 μ m T-gate HFET(Hetero-structure Field Effect Transistor)의 경우 전력밀도는 5.8W/mm로 우수한 결과를 발표하였다[9].

<표 2>는 GaN 고출력 전력증폭기 개발 현황을 나타낸다. 미국의 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 Toshiba의 50W급(모델명: TGI 8596-50)이 최고 수준이다. 2012년 최근 Freescale사는 2.3~2.7GHz에서 출력 350W, 50% 효율, 16dB 이득의 전력증폭기를 개발하여 2013년 2분기에 양산 계획을 발표하였다[10].



(그림 1) GaN 전자소자 시장 예측

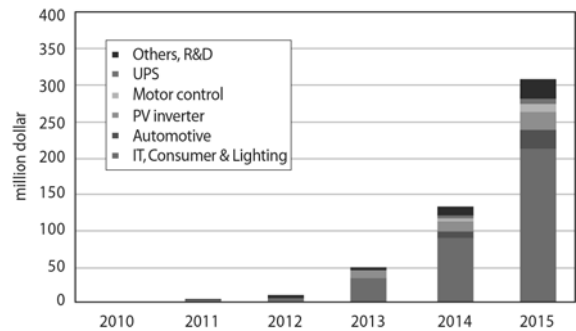
III. 시장 및 특허 현황

1. 국내의 시장 현황

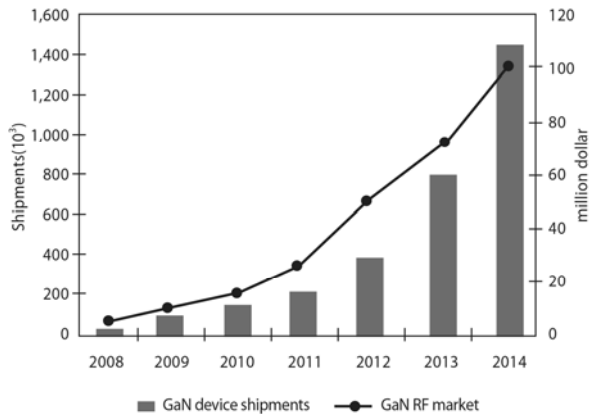
GaN 전력소자 시장은 크게 군수, 무선통신망, 고전력 및 케이블 TV/위성통신 분야로 나눌 수 있는데, 2010년 Strategy Analytics사에 의해 발표된 시장예측 자료(그림 1) 참조)에 의하면 현재 군수 분야가 가장 많은 점유율을 갖고 있으나 민수 분야로 시장이 확대되어 2014년 전체 약 3.8억 달러의 시장이 형성될 것으로 보고 있다. 즉, 2014년 전체 GaN 소자 시장에서 군수 분야가 46%를 차지할 것으로 예측하고, 민수시장 분야는 무선통신망에 사용되는 전력증폭기 요구에 의해 주도되어 성장하고, 자동차용 스위칭 소자와 같은 고출력을 요구하는 전력소자 분야에는 GaN과 경쟁관계에 있는 SiC 기술에 의해 초기 성장이 제한되었다고 보고하였다[11].

(그림 2)에서 볼 수 있듯이 Yole Development사의 시장분석 자료에 따르면 2011년 고전력용 GaN 전력소자 시장은 250만 달러 이하였으나, 2012년에는 거의 1,000만 달러까지 성장하고 2016년에는 5억 달러에 이를 것으로 예측하고 있다[12].

특히 2013년에는 GaN 전력소자의 생산품질관리에 집중하던 것이 생산단계로의 도약이 이루어져 칩 생산업체의 연간매출이 5000만 달러까지 상승할 것으로 예상된다. 2012년 현재 IR(International Rectifier)사와 EPC(Efficient Power Conversion)사가 GaN 전력소자의



(그림 2) 고전력 GaN 소자 시장 예측



(그림 3) GaN RF 소자 시장 예측

주요 공급업체이나 2015년 600V 이상의 항복전압을 갖는 전력소자가 널리 사용되면 6인치 웨이퍼 기준으로 십만 장 이상의 수요가 발생하여 12~15개의 업체가 시장을 공유할 것으로 예측된다[13].

무선통신 등의 RF 시장에서 GaN 전자소자의 시장은 (그림 3)의 예측된 자료에서 보듯이 2014년 1억 달러 이상으로 성장하고 140만 개의 전력증폭기가 소요될 것으로 보고 있다[11].

국내 군수용 고출력 전력증폭기 시장과 관련하여서는 대당 4억 원대의 대전차 탑재 레이저 레이더의 국산화 대체, 위치추적 및 근거리 물체 포착 센서 개발 등 초고가 무기 체계 국산화 및 정밀 군수용품에 대한 수요 발생으로 새로운 시장이 계속 확대되는 양상이다.

따라서 급격히 증가하게 될 초고주파 레이더용 고출력 전력소자 및 전력증폭 모듈의 해외 의존도에서 벗어나 부품소재 산업의 경쟁력과 지속적인 경제 성장을 위한 GaN 전력소자 및 모듈의 기술력 확보가 시급하다.

2. 국내외 특허 현황

각국의 주요 연구주체 상위 순위(top 10)를 살펴본 결과, GaN 전자소자 분야에서 전 세계에 특허출원(등록)이 가장 활발한 연구주체로는 일본 기업인 Toyoda Gosei와 Hitachi Cable 및 Matsushita Electric사로 나타

났다. Toyoda Gosei, Hitachi Cable사는 각각 122건(1위), 59건(2위)을 출원하고 있으며, Matsushita Electric사는 55건(3위), Sony사가 48건(4위)의 출원으로 대다수 일본 기업들이 특허출원을 하였다. Top 10을 제외하고 기술적 관련도가 높은 기업에는 Nichia Chem, Oki Electric, 및 Nitronex사가 있다.

세부 기술별 핵심 기술을 보유한 기업군은 아래 <표 3>에 나타난 바와 같다. 소자 구조 및 제조 기술과 관련된 핵심 기술을 보유한 기업으로는 NTT, Sony, Cree 및 Nitronex사 등이 있는 것으로 파악되었다. 고품질 반도체 결정 기술의 대표적 특허출원 기업으로는 Toyoda Gosei, Matsushita Electric, Nichia Chem사로 나타났다. 그 외 Hitachi Cable과 Oki Electric사는 전자 이동도 분야에서 핵심 기술을 보유하고 있으며, Eudyna Device사는 물질 구성과 조성비율의 핵심 기술을 보유하고 특허를 출원한 것으로 파악되었다.

GaN 전자소자 기술 분야의 특허 분포를 살펴본 결과 결정성장, 단결정 에피택시, 도핑 조절 등의 기판 및 에

<표 3> GaN 전자소자 분야의 기업별 핵심기술 요약

※ 기술 중요도 구분: 핵심기술 ◎, 사용 기술 ○

기업명	에피택셜 웨이퍼 제조	물질 구성과 조성비율	고품질 반도체 결정	전자 이동도	저접촉 저항 전극	소자 구조 및 제조
Toyoda Gosei		○	◎		○	
Hitachi Cable	○	○		◎		
Nippon Telegraph & Telephone		○				◎
Sony		○				◎
Cree		○				◎
Matsushita Electric		○	◎		○	
Nichia Chem		○	◎			
Oki Electric		○		◎	○	
Nitronex						◎
Eudyna Device		◎			○	

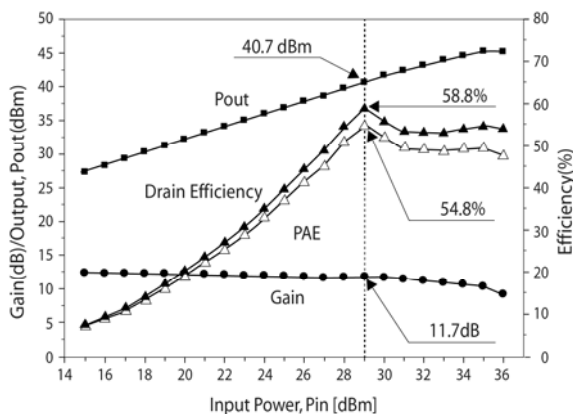
피 기술과 드레인/소스/게이트, 전자게이트, 전자공급층 등의 전극구조 구현 기술에 대한 밀집도가 높은 것으로 나타났다.

여전히 GaN 에피택시 분야가 중요한 이슈로 진행되고 있으며, 이는 기존의 Si 전자소자와 경쟁 우위를 가지기 위하여 대면적 에피택시 성장 및 GaN on Si의 에피택시 성장 분야에서 killer 기술이 확립되지 않았음을 알 수 있다.

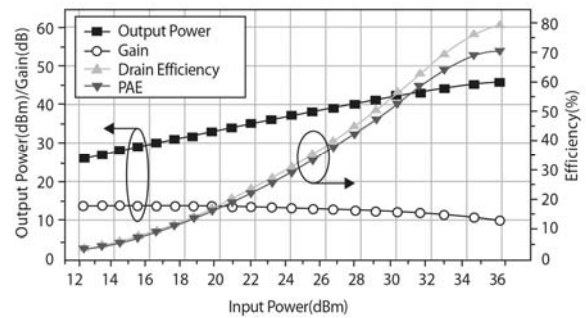
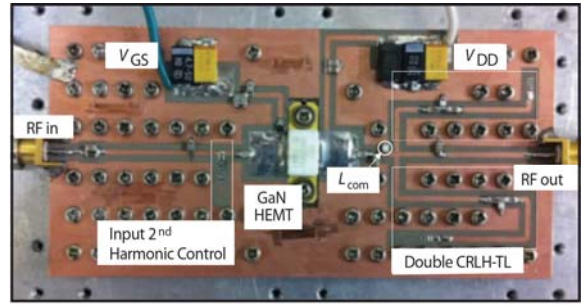
드레인/소스/게이트의 전극 분야와 전자게이트/전자공급층 분야가 비슷한 정도의 빈도를 가지고 특허출원이 되어 있는 것으로 파악되었으며, 전극과 채널구조를 최적화하는 설계 및 소자 공정 분야의 기술 개발이 원천성을 확보하는데 용이할 것으로 판단된다.

IV. 국내 연구개발 현황

포항공대에서는 Nitronex사의 GaN HEMT를 사용하여 (그림 4)에서 보는 바와 같이 2.14GHz에서 출력전력 40.7dBm의 특성을 갖는 Doherty 증폭기를 발표하였다 [14]. 그리고 포항공대에서는 Cree사의 GaN HEMT를 이용하여 (그림 5)에서 보는 바와 같은 3.5GHz에서 45.6dBm의 출력전력을 갖는 전력증폭기를 발표하였다 [15].



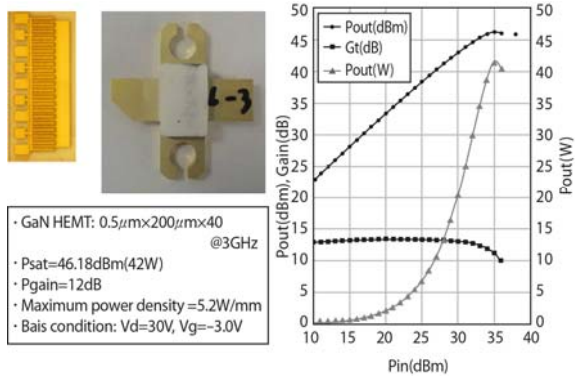
(그림 4) 포항공대 2GHz 대역 12W급 GaN HEMT Doherty 증폭기



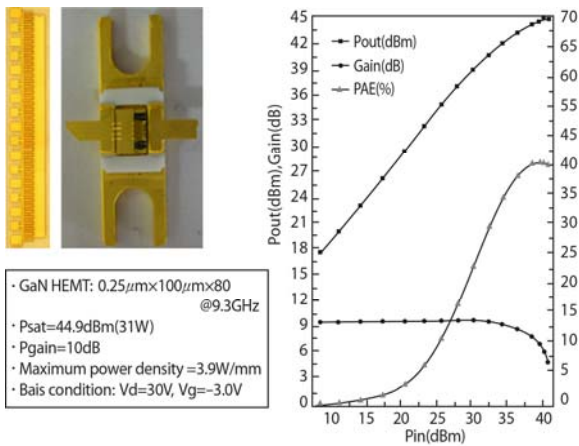
(그림 5) 포항공대 3.5GHz 대역 36W급 GaN HEMT 전력 증폭기

한국전자통신연구원에서는 2011년 8월 TriQuint사 GaN 상용 라이브러리를 활용하여 S-band에서 20W 출력전력과 40% 이상의 효율을 갖는 전력증폭기 MMIC(Microwave Monolithic Integrated Circuit)와 X-band에서 8W 출력에 25% 정도의 효율을 갖는 전력증폭기 MMIC를 함께 구현하였다[16].

한국전자통신연구원에서는 또한 자체 보유한 4인치 화합물 반도체 웨이퍼에서 독자적인 소자 설계 및 공정기술을 활용하여 2012년 2월 AlGaIn/GaN/SiC 이종접합구조를 기반으로 S-band용 20W급 GaN HEMT 소자와 X-band용 10W급 GaN HEMT 소자를 독자 개발하여 발표하였으며[17],[18], (그림 6)과 (그림 7)과 같이 2012년 6월 S-band용 40W급 GaN HEMT 소자와 X-band용 30W급 GaN HEMT 소자를 개발하여 경주에서 개최된 2012년 한국군사과학기술학회에 전시 발표하였다 [19]. 최근 제작된 S-band용 GaN HEMT 소자는 100W급 출력을 나타내었다. 뿐만 아니라 국내 최초로 자체 GaN 반도체 제조공정을 이용하여 개발된 S-band용



(그림 6) ETRI S-band 40W급 GaN HEMT 소자



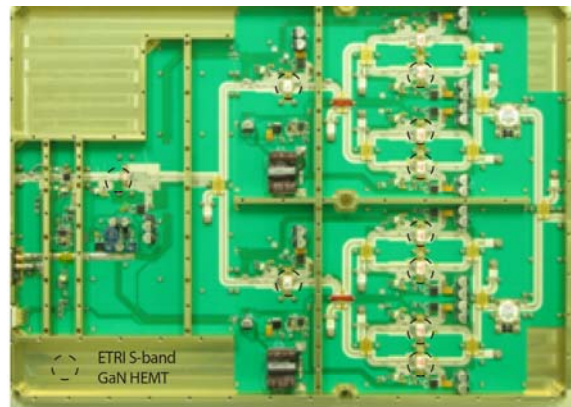
(그림 7) ETRI X-band 30W급 GaN HEMT 소자

GaN HEMT 소자를 활용하여 <표 4>와 (그림 8)에서 보는 바와 같은 S-band용 170W SSPA(Solid State Power Amplifier) 제작에 성공하였다[19]

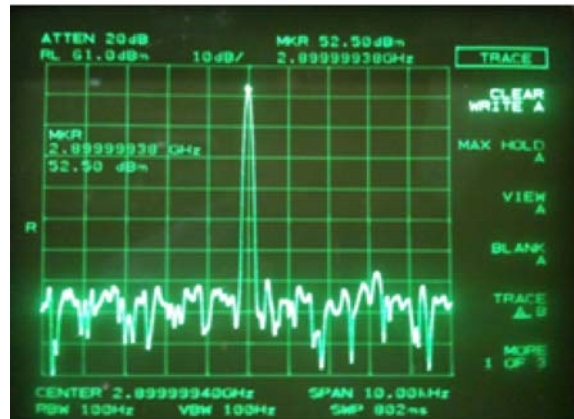
국내 산업계에서는 GaN LED(Light Emitting Diode)/LD(Laser Diode) 등의 광소자에 비해 GaN 전력소자에 대한 연구개발이 미비한 상태이다. LG전자기술원은 2004년 경북대와 함께 전자소자에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 나노이엔스는 2011년 5월까지 X-band GaN HEMT 전력소자 개발을 중소기업청 과제로 수행하였으나 가시적인 결과는 발표되지 않은 상태이다. 삼성전자는 Cree의 상용 GaN HEMT를 사용하여 기지국/중계기용인 2GHz 대역 20W GaN 증폭기를 개발하였다. RFCore에서는 TriQuint사 0.25 μ m GaN on SiC 상

<표 4> ETRI에서 개발한 S-band 170W SSPA 특성

Parameter	Specification	Remark
Operating Frequency	2.9 to 3.1GHz	Bandwidth: 200MHz
Peak Output Power	170W max, 10% Duty	@30°C case temperature
Large Signal Average Gain	34.5dB \pm 2dB	@ 0dBm Input Power, 30°C case temperature
Input/Output VSWR	1.6:1	-
DC condition	27V, 2.3A	-



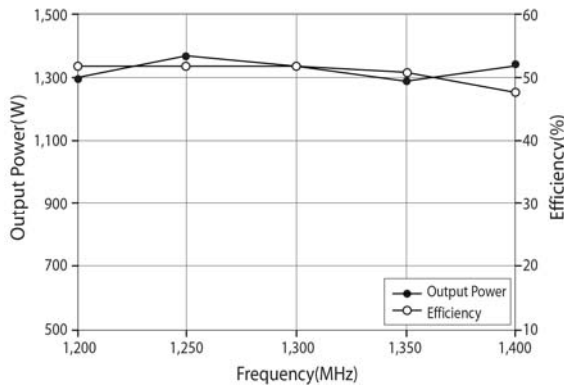
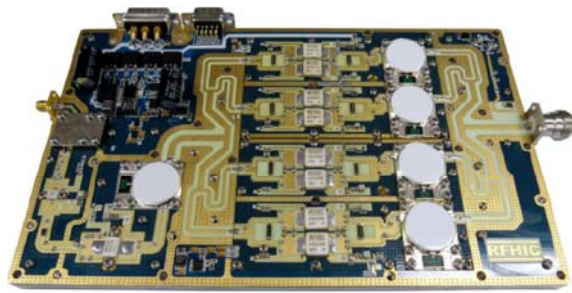
(a) S-band SSPA 내부사진



(b) SSPA 출력 전력 특성

(그림 8) ETRI S-band 170W SSPA

용 라이브러리를 이용하여, 2~6GHz에서 17W의 출력과 24dB의 이득, 35%의 효율을 갖는 전력증폭기 MMIC와 8~11GHz에서 10W의 출력과 18dB 이상의 이득, 28% 이상의 효율을 갖는 전력증폭기 MMIC를 제작하여 2011년 마이크로파 및 밀리미터파 워크숍에서 발표하



(그림 9) RFHIC L-band 1kW급 GaN 전력증폭기

였다[20]. 또한, RFCore는 2011년 초 Cree사와 Toshiba사의 GaN HEMT 상용칩을 사용하여 S-band 200W GaN SSPA와 X-band 100W GaN SSPA를 한국전자통신연구원과 함께 개발하였다. RFHIC는 (그림 9)에서 보는 바와 같이 1.2~1.4GHz에서 약 1.3kW의 출력을 갖고 이득이 53dB이고 효율이 50%인 GaN 전력증폭기를 개발하여 발표하였다[21].

한국전자통신연구원에서 자체 개발한 S-band 및 X-

band용 GaN 전력소자의 특성은 (그림 10)에서 보는 바와 같다. X-band용 소자는 0.25 μ m의 게이트 길이와 2 \times 100 μ m의 게이트 폭을 갖는 AlGaIn/GaN HEMT 구조로 pinch-off 전압은 -3.5V로서 6% 정도의 균일도를 가지며, 0V의 게이트 전압에서 드레인 전류는 0.7A/mm 수준이고, 최대 상호전달 이득은 270mS/mm의 특성을 가진다. RF 특성으로서 차단주파수(f_c) 및 최대 발진주파수(f_{max})는 8V의 드레인 전압에서 각각 39GHz 및 119GHz의 특성을 보여주고 있다. X-band GaN 고출력 소자의 항복전압은 120V 이상으로 $\pm 4\%$ 정도의 균일도를 가지며, 단일칩 파워바의 출력은 30W 이상을 나타내었다.

이처럼 한국전자통신연구원에서는 2012년 6월 현재 자체 보유한 4인치 화학물 반도체 팹과 GaN 공정 및 설계기술을 활용하여 S-/C-/X-band용 고출력 전력소자를 개발하였으며, 향후에는 Ku-/K-/Ka-band용 전력소자 연구개발과 함께 글로벌 트렌드에 발맞추어 차세대 디지털 레이더 트랜시버용 구동증폭기(DA: Drive Amplifier), 고출력증폭기(HPA: High Power Amplifier), 저잡음증폭기(LNA: Low Noise Amplifier), 스위치 (switch) MMIC 설계 및 제작을 위한 국산 라이브러리를 구축함으로써 세계 선진국으로부터 기술 자립화가 시급한 GaN 기술의 총체적인 국산화를 위한 기반을 구축하여 국가의 국방 기술 중장기 로드맵에 대응할 예정이다.

- 0.5 μ m GaN 소자특성
 - 2.4GHz 기지국용
 - S-band 레이더용
 - 저가격용 플랫폼



- 0.25 μ m GaN 소자특성
 - 10GHz 기지국용
 - X-band 레이더용
 - 고성능용 플랫폼



ETRI 0.5 μ m Gallium Nitride(GaN) Process Details			
Element	Parameter	Typical Value	Units
FETs	I_{dss}	500	mA/mm
	g_m	250	mS/mm
	V_{gd}	>120	v
	$f_r(\text{peak})$	31	GHz
	f_{max}	53	GHz

ETRI 0.25 μ m Gallium Nitride(GaN) Process Details			
Element	Parameter	Typical Value	Units
FETs	I_{dss}	700	mA/mm
	g_m	270	mS/mm
	V_{gd}	>120	v
	$f_r(\text{peak})$	39	GHz
	f_{max}	119	GHz

(a) ETRI GaN 전력 소자 특성 요약 1

ETRI Gallium Nitride(GaN) Devices Details			
Platform	Features	Chips	Application
GaN-on-Si (저가격용)	<ul style="list-style-type: none"> Gate length(L_g): 0.5μm V_{ds}: up to 40V Power density: 5W/mm Gain: >15dB PAE: > 45% 		<ul style="list-style-type: none"> S-band Radar, BST 2.4~3.5GHz
GaN-on-SiC (고성능용)	<ul style="list-style-type: none"> Gate length(L_g): 0.25μm V_{ds}: up to 40V Power density: 5W/mm Gain: >12dB PAE: > 40% 		<ul style="list-style-type: none"> X-band Radars 8~10GHz

(b) ETRI GaN 전력 소자 특성 요약 2

(그림 10) ETRI GaN 전력소자 특성

V. 국내 주요 연구과제

1. 에피 성장 기술

한국전자통신연구원에서는 2011년 3월부터 2016년 2월까지 차세대 데이터센터용 에너지절감 반도체 기술 개발 과제를 수행 중에 있으며, GaN 전력소자용 에피 소재 기반 기술 및 normally-off FET와 쇼트키 다이오드 기반 기술 확보를 목표로 하고 있다.

전자부품연구원에서는 2011년 10월부터 2013년 9월까지 계통연계형 인버터 시스템을 위한 고효율 GaN 전력소자 기반 기술개발 과제를 수행하고 있으며, 4인치 이상급 에피택시 성장 기술을 경북대학교와 공동으로 개발하고, 여기서 구현된 에피택시 기술을 바탕으로 6인치급 에피택시에 대한 적용기술 개발을 목표로 하고 있다.

경북대학교에서는 2008년 9월부터 2015년 2월까지 MOCVD를 이용하여 실리콘 기판 위에 선택적 GaN계 박막 성장 기술 개발 과제를 수행하고 있으며, 다기능성 센서 및 구동회로가 집적화된 복합 시각 센서 모듈을 위한 선택적 GaN계 박막 성장 기술 개발을 내용으로 하고 있다.

2. 공정/소자 기술

한국전자통신연구원에서는 2009년 1월부터 2012년 12월까지 광/RF 융합소자 기반의 차세대 국방부품 플랫폼 개발 과제를 수행 하고 있다. 연구목표는 군수용 레이더 등의 송수신 핵심 기술인 GaN 전력소자의 개발이다. 또한 2012년부터 3년간 기가레인, 한국전자통신연구원, RFCore가 참여하여 민군 겸용 기술개발 과제인 GaN 트랜지스터 기반의 Ku-band 고출력증폭기 개발을 수행할 예정이다.

K-band 고출력/고효율 SSPA 국산화 기술 개발 과제

는 삼성탈레스 주관으로 경북대학교와 기가레인이 참여하여 2011년부터 2013년까지 소자 개발부터 K-band SSPA 개발까지 진행 중이다.

홍익대학교에서는 에너지 절감형 그린 반도체 소자 실용화를 위한 GaN 전력소자의 신뢰성 향상 연구를 수행 중이다. 최종적으로 600V급 고전압 GaN 이중접합 전력소자의 10⁵시간 수명 확보를 목표로 한다.

3. 회로/모듈/시스템 기술

항공관제 레이더용 X-band GaN 패키지 모듈 개발 과제를 2011년 9월부터 2012년 8월까지 엘이디팩에서 수행 중이다. 연구목표는 칩과 외부와의 인터커넥션 방법, 구동 시 발생하는 열을 외부로 신속하게 배출시켜줄 수 있는 방열 구조 설계 그리고 열악한 환경에서도 성능을 보장할 수 있는 신뢰성 확보 기술 개발이다. 최종목표는 X-band 50W급 GaN 고출력증폭기 제조 기술 개발이다.

GaN 전력소자를 이용한 시스템 개발 과제는 2011년 7월부터 2014년 6월까지 개발 중인 국지방공 레이더 시스템 개발, 2011년 8월부터 2013년 7월까지 개발 중인 K-band 고효율/고전력 고출력증폭기 개발, 2011년 7월부터 2015년 6월까지 수행 중인 X-band 이중편파 기상레이더 시스템 개발, 그리고 2011년 11월부터 2016년 12월까지 차기 대포병 탐지 레이더 개발 과제가 있다.

향후 추진 예정인 군수용 핵심 시스템 개발 과제는 X-band AESA(Active Electronically Scanned Array) 레이더 개발, 밀리미터파(Ka-band) 탐색기 개발 등이 있다. 이러한 군수 시스템 개발 및 국산화는 모두 GaN 전력소자를 고출력 트랜시버 모듈의 솔루션으로 채택하고 있다. 따라서 시스템의 국산화를 제고와 선진국의 기술종속으로부터 탈피하기 위하여 정부주도적으로 GaN 전력소자 및 제조공정 기술의 국산화가 시급한 실정이다.

VI. 맺음말

차세대 화학물 반도체 플랫폼으로 각광을 받고 있는 GaN 전력소자의 글로벌 연구개발 및 국내 동향에 관하여 기술하였다. GaN 플랫폼은 고출력 전력증폭기뿐만 아니라 고전력 스위칭 소자로서 차세대 에너지 절감용 핵심소자로 각광을 받고 있으며, 글로벌 선진국은 모두 GaN 기술을 차세대 고출력/고효율 전력소자의 솔루션으로 채택하고 있다. 따라서 국내에서도 선진국의 기술 종속으로부터 탈피하고 고부가가치 신시장을 선점하기 위해서는 정부주도적인 대형 국책사업을 통하여 미국, 유럽, 일본 등 선진 각국의 연구개발 일정에 뒤처지지 않도록 늦어도 2015년까지 GaN 전력소자 기술의 연구개발과 함께 고출력, 고효율 에너지 절감 GaN 반도체 소자, 제조공정, MMIC 라이브러리의 국산화가 반드시 이루어져야 할 것으로 생각된다.

용어해설

Frequency Band의 관용적인 분류(미국전기전자기술인협회)

L-band	1 to 2 GHz(Long wave)
S-band	2 to 4 GHz(Short wave):
C-band	4 to 8 GHz(Compromise between S and X)
X-band	8 to 12 GHz(X for cross):
Ku-band	12 to 18 GHz(Kurz-under)
K-band	18 to 27 GHz(German Kurz (short))
Ka-band	27 to 40 GHz(Kurz-above)
V-band	40 to 75 GHz
W-band	75 to 110 GHz
mm-band	110 to 300 GHz

약어 정리

AESA	Active Electronically Scanned Array
AlGaN	Aluminum Gallium Arsenide
f_{max}	Maximum oscillating frequency
f_T	Cut-off frequency
GaAs	Gallium Arsenide
GaN	Gallium Nitride
HBT	Hetero-junction Bipolar Transistor

HEMT	High Electron Mobility Transistor
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HFET	Hetero-structure Field Effect Transistor
HPA	High Power Amplifier
HVPE	Hydride Vapor Phase Epitaxy
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LD	Laser Diode
LDMOS	Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor
LED	Light Emitting Diode
LNA	Low Noise Amplifier
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MMIC	Microwave Monolithic Integrated Circuit
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
MTTF	Mean-Time-To-Failure
RF	Radio Frequency
SiC	Silicon Carbide
SSPA	Solid State Power Amplifier

참고문헌

- [1] 문재경 등, "GaN 전자소자 글로벌 연구개발 동향," 전자통신동향분석, vol. 27, no. 1, 2012. 2, pp. 74-85.
- [2] S.J. Pearton et al., "GaN Electronics for High Power, High Temperature Applications," *Electrochem. Soc. Interface*, vol. 9, no. 2, 2000, pp. 34-39.
- [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," Dec 3th, 2008.
- [5] ESA-MOD Workshop on GaN Microwave Component Technologies, Ulm, March 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 AlGaIn/GaN High

- Power and High Frequency HFETs under NEDO's Japanese National Project," CSMAN-TECH, 2006, pp. 45-48.
- [10] ElectronicsWeekly, "Freescale Offers First GaN Power Amp for Mobile," June 12th, 2012.
- [11] Strategy Analytics, "GaN Microelectronics Market Update 2009-2014," Apr. 2010.
- [12] P. Roussel, "600V Devices Set to Switch on GaN Power Electronics," *Power Dev'*, I-Micronews, July 2011.
- [13] EETimes, "GaN Power Market to Rise to \$10 Million in 2012, Says Yole," Mar. 7th, 2012.
- [14] Y.-S. Lee, M.-W. Lee, and Y.-H. Jeong et al, "Linearity-Optimized Power Tracking GaN HEMT Doherty Amplifier Using Derivative Superposition Technique for Repeater Systems," *Microwave Symposium Digest*, 2008, pp. 427-430.
- [15] J.-C. Park et al, "GaN HEMT Based High Efficiency Push-Pull Inverse Class-F Power Amplifier Using Chip-on-Board Technique," *APMC*, 2011, pp. 522-525.
- [16] 지홍구 외, "GaN, GaAs MMIC 개발 및 전망," *전자통신 동향분석*, vol. 26, no. 4, 2011. 8, pp. 105-114.
- [17] 장우진 외, "Packaged GaN HEMT Power Bar with 17 W Output Power at 3 GHz," 제19회 한국반도체학술대회, 2012. 2. 15-17, pp. 325-326.
- [18] 김성일 외, "X-band 6W AlGaIn/GaN HEMT 소자의 특성," 제19회 한국반도체학술대회, 2012. 2. 15-17, pp. 381-382.
- [19] 한국군사과학기술학회 종합학술대회 전시회, 2012. 6. 7-8.
- [20] 심상훈, "GaN 기반 고효율 증폭기 MMIC," 2011 마이크로파 및 밀리미터파 워크샵, 2011. 9. 8, pp. 209-224.
- [21] K.-W. Kim, J.-Y. Kwack, and S. Cho, "1 kW Solid State Power Amplifier for L-band Radar System," *ISOC*, 2010.