

차세대 GaN RF 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향

Technical Trends in Next-Generation GaN RF Power Devices and Integrated Circuits

이상홍 (S.H. Lee, shl@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원

임종원 (J.W. Lim, jwlim@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원

강동민 (D.M. Kang, kdm1597@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원/실장

백용순 (Y.S. Baek, youngb@etri.re.kr)

광무선원천연구본부 책임연구원/본부장

ABSTRACT

Gallium nitride (GaN) can be used in high-voltage, high-power-density/-power, and high-speed devices owing to its characteristics of wide bandgap, high carrier concentration, and high electron mobility/saturation velocity. In this study, we investigate the technology trends for X-/Ku-band GaN RF power devices and MMIC power amplifiers, focusing on gate-length scaling, channel structure, and power density for GaN RF power devices and output power level and output power density for GaN MMIC power amplifiers. Additionally, we review the technology trends in gallium arsenide (GaAs) RF power devices and MMIC power amplifiers and analyze the technology trends in RF power devices and MMIC power amplifiers based on both GaAs and GaN. Furthermore, we discuss the current direction of national research by examining the national and international technology trends with respect to X-/Ku-band power devices and MMIC power amplifiers.

KEYWORDS GaAs RF power device, GaN RF power device, GaAs MMIC power amplifier, GaN MMIC power amplifier

1. 서론

반도체 고효율 RF(Radio Frequency) 전력증폭기는 수명시간, 유지보수 및 광대역 주파수 구현, 디지털 신호처리 등의 장점이 있다[1]. 반도체 고효

율 RF 전력증폭기는 크게 개별 반도체 RF 전력증폭 소자(Discrete RF Power Transistor)의 배열을 통한 전력 분배 및 결합, 반도체 기판상에서 전력증폭 능동소자와 수동소자를 동시에 사용한 모노리식 마이크로파 집적회로(MMIC: Monolithic Microwave

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340507>



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2019 한국전자통신연구원

Integrated Circuit), 소출력 또는 중간 정도 출력의 MMIC 배열을 통한 전력 분배 및 결합을 통하여 실현된다.

반도체 RF 전력증폭기에 사용되는 반도체 RF 전력증폭 소자로 실리콘반도체 기반의 LD-MOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) 소자, III-V 화합물반도체 기반의 갈륨비소(GaAs, Gallium-Arsenide)나 질화갈륨(GaN, Gallium-Nitride)을 사용한 HEMT(High Electron Mobility Transistor) 소자가 주로 사용된다. GaN 반도체 재료는 3.4eV의 넓은 에너지 갭, 분극전하를 이용한 고 캐리어 농도, 고 전자 이동도와 포화 속도의 재료적 특성으로 인하여 고전압, 고 전력 밀도, 고출력 및 고속의 GaN RF 전력증폭 소자로 이용될 수 있다[2-6].

GaN RF 전력증폭 소자는 L-대역, S-대역, X-대역, Ku-대역 및 Ka-대역의 민수 및 군수분야(대공방어, 항공기 및 무기탐색, 선박, 기상, 이동통신, 위성통신 및 방송)에서 반도체 RF 전력증폭기 소자로 많이 응용되고 있으며[4,7], 무선통신 등의 수요 확대로 민수분야의 응용이 증가하고 있다. 이 중 X-대역 GaN 전력증폭기는 고해상도 레이더(SAR: Synthetic Aperture Radar)용 송신기, 선박 항해 레이더용 송신기 등, 군 무기체계나 민수용에 많이 응용되고 있으며, Ku-대역 GaN 전력증폭기는 유도무기 탐색기용 송신기, 항공기 레이더용 송신기, 해상 레이더용 송신기, 위성통신용 지상 송신기 등에 응용되고 있다[4,7]. 이들 X-대역 및 Ku-대역 반도체 RF 전력증폭기는 GaN RF 전력증폭 소자와 수동소자를 동시에 사용하여 MMIC 형태로 구현하려는 노력이 계속되고 있다.

현재 GaN 반도체 파운드리(Foundry)를 제공하고 있는 회사나 기관은 Wolfspeed사, Global Communication Semiconductors사, Northrop Grumman사,

Qorvo사, OMMIC사, UMS사, WIN Semiconductors 사, National Research Council Canada 등이 있으며, GaN-on-SiC 공정은 대체적으로 0.15~0.5 μ m 게이트 공정 기술을 제공하고, GaN-on-Si 공정은 0.25~0.5 μ m 게이트 공정 기술을 제공한다[8]. 특히 이들 GaN 반도체 파운드리를 이용하여 외국에서 GaN MMIC를 제작하는 경우 국가 차원에서 엄격히 통제/관리를 하고 있다.

한편, Yole[9]에 따르면, GaN RF 소자 시장은 무선 인프라(Wireless infrastructure), 군수(Defense), CATV(Cable Television, Community Antenna Television), 위성통신(Satellite communication), 기타(ISM, RF energy, R&D)로 분류하고 있으며, GaN RF 소자 전체 시장은 2016년 약 344억 달러, 2018년 약 421억 달러, 2020년 약 630억 달러로 예측하고 있다. GaN RF 소자의 민수분야와 군수분야 모두 고른 성장세를 예측하고 있으며, 이 중 2020년의 무선 인프라 시장과 군수 시장은 각각 약 375억 달러와 약 193억 달러로 무선 인프라 시장과 군수 시장은 각각 전체 시장의 약 60% 정도와 약 31% 정도를 점유할 것으로 예측하고 있다[9].

본 고에서는 X-대역과 Ku-대역 GaN RF 전력증폭 소자 및 MMIC 전력증폭기에 대한 국내외 기술 동향을 알아본다. X-대역과 Ku-대역 GaN RF 전력증폭 소자 및 MMIC 전력증폭기 기술을 고찰함에 있어, GaN RF 전력증폭 소자의 게이트 길이 스케일링, 채널형성 구조 및 전력밀도, GaN MMIC 전력증폭기의 출력 전력 및 전력밀도 성능을 중심으로 알아본다. GaAs RF 전력증폭 소자와 MMIC 전력증폭기 기술 동향을 동시에 고찰하여 관련 연구 및 산업동향의 관심도를 알아본다. 아울러, X-대역과 Ku-대역 GaN RF 전력증폭 소자 및 MMIC 전력증폭기의 해외 기술 동향을 통한 시사점을 다룬다.

II. 차세대 GaN RF 전력증폭 소자 및 집적회로 기술

1. X-대역 GaN 전력증폭 소자 및 집적회로 기술

이 절에서는 X-대역 GaN 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향에 대하여 살펴본다. X-대역 GaN 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향을 고찰하기 위해 앞서, X-대역 GaAs 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향에 대하여 알아본다.

표 1은 X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 기술을 나타내는 것으로서, 대표적인 GaAs MMIC 공정한 WIN Semiconductors사, RFMD사, TriQuint사, SELEX-SI 공정을 사용한 결과들이다(RFMD사와 TriQuint사는 RF분야 합병으로 (2015년 1월) 현재 Qorvo사로 있음)[10-14]. 표 1에서와 같이 X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기는 대체적으로 0.25~0.4μm GaAs pHEMT(pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) 전력증폭 소자 기술을 이용하고 있으며, 이는 차단주파수가 60GHz 정도로 Ku-대역 용도로 개발된 소자 기술이다. WIN Semiconductors사의 0.25μm GaAs 전력증폭 소자의 경우[10] 게이트 폭 4×200μm GaAs pHEMT 전력증폭 소자(단위 게이트 폭 200μm×4개의 finger)는 0.86W/mm의 전력밀도를 나타내며, WIN Semi-

conductors사의 0.1μm GaAs 소자[11]의 경우 차단주파수(f_c)와 최대발진주파수(f_{max})는 각각 130GHz와 180GHz의 RF 성능을 나타낸다. X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 칩의 전력밀도는 소자 성능과 설계기법에 따라 차이가 있을 수 있으나 대체적으로 0.66W/mm² 이하이며 최대 10W 정도의 성능을 나타낸다. 표 1의 X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 칩의 전력밀도가 0.66W/mm² 이하로 낮은 것은 앞의 WIN Semiconductors사의 0.25μm GaAs 전력증폭 소자에서 보듯이[10] GaAs pHEMT 전력증폭 소자의 전력밀도가 0.86W/mm 정도로 낮은데 기인하며, 또한 이는 고효율 MMIC 전력증폭기로 사용되기 어려운 이유도 된다. 그럼에도 불구하고 GaAs pHEMT 전력증폭 소자 공정이 GaN HEMT 전력증폭 소자 공정에 비해 매우 높은 공정 성숙도와 저렴한 생산 단가로 인하여 X-대역 반도체 MMIC 전력증폭기 제작에 일부 사용되고 있다.

표 2는 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술을 나타내는 것으로서, UMS(United Monolithic Semiconductors)사, WIN Semiconductors사, SELEX-SI, Alcatel-Thales III-V Lab, ETRI(Electronics and Telecommunications Research Institute) 공정 기술들이다 [15,16,18,20,21,25]. 초창기 GaN HEMT 전력증

표 1 X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 기술

	[10,11]	[11]	[12]	[13]	[14]
Process	0.25μm GaAs (WIN Semi)	0.1μm GaAs (WIN Semi)	0.3μm GaAs (RFMD)	0.25μm GaAs (TriQuint)	0.4μm GaAs (SELEX-SI)
Frequency(GHz)	8.25~10.25	9	7.5~11.5	9~10.5	9.0~12.0
Saturated output power(W)	10.7	0.55	0.52	6.31	6.31
PAE(%)	41.4	55.3	65*	38	38
Power density (W/mm ²)	0.63	0.61	0.66	0.61	0.53

* Drain Efficiency

표 2 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술

	SELEX-SI[15]		Alcatel-Thales III-V Lab[16]		UMS[18]		WIN Semi[20,21]		ETRI[25]	
Substrate	SiC		SiC		SiC		SiC		SiC	
Channel	AlGaIn/GaN		AlGaIn/GaN		AlGaIn/GaN		AlGaIn/GaN		AlGaIn/GaN	
Gate length(μm)	0.5		0.25		0.25		0.25		0.25	
Total gate width(mm)	1.0(10 \times 0.1)		1.6(16 \times 0.1)		1.0(8 \times 0.125)		1.0(8 \times 0.125)		0.8(8 \times 0.1)	
f_t/f_{max} (GHz)	-		18/35		-		24.5/86.0		>50/>100	
Power density(W/mm)	4	$V_d=25\text{V}$, $V_g=-5.5\text{V}$ / $f=10\text{GHz}$	4	$V_d=25\text{V}$, $I_d=430\text{mA}$ / $f=10\text{GHz}$	3.9	$V_d=26\text{V}$, $I_d=242\text{mA}$ / $f=9.6\text{GHz}$	>4	$V_d=28\text{V}$ / $f=10\text{GHz}$	>4	$V_d=20\text{V}$, $V_g=-2\text{V}$ / $f=9\text{GHz}$
PAE(%)	-		55		62		64		35	

폭 소자 기술 구축기인 SELEX-SI의 0.5 μm 를 제외하곤, X-대역 GaN MMIC 전력증폭기 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자는 SiC(탄화규소, Silicon-Carbide) 기판상에 AlGaIn/GaN 채널을 사용한 게이트 길이 0.25 μm 공정 기술이 사용되고 있다. SELEX-SI의 0.5 μm GaN HEMT 전력증폭 소자의 경우[15], GaN HEMT 전력증폭 소자 제작의 전면공정 완료 후, 후면 비어 홀(back-side via hole) 공정을 통하여 소자와 접지 및 MMIC와 접지의 거리를 최소화하였다. X-대역 GaN HEMT 전력증폭 소자 공정 기술의 주안점에 따라, 차단주파수 및 최대발진주파수, 전력부가효율(PAE)의 특성이 기관별로 차이가 있지만, 전력증폭 소자의 전력밀도는 대체적으로 4W/mm를 상회한다. 이는 X-대역 GaN HEMT 전력증폭 소자의 전력밀도가 GaAs HEMT 전력증폭 소자의 전력밀도보다 월등히 우수하며, 이는 GaN 반도체 재료와 GaAs 반도체 재료의 재료적 특성에 기인한다. GaN HEMT 전력증폭 소자의 우수한 전력밀도 특성으로 인하여, X-대역 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술 개발과 더불어 GaN MMIC 전력증폭기 기술도 상당한 수준에 이르렀다. SELEX-SI, Alcatel-Thales III-V

Lab, UMS사, WIN Semiconductors사는 X-대역 MMIC 제작을 위한 고 전력밀도 및 고효율 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술을 확보하고 있음을 알 수 있다.

표 3은 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술을 나타내는 것으로써, 각국의 X-대역 GaN MMIC 공정 기술(SELEX-SI, Alcatel-Thales III-V Lab, UMS사, WIN Semiconductors사, ETRI)을 이용한 결과들이다[16-25]. 표 3의 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기들은 3~50W 범위로 다양하며, 유럽의 Alcatel-Thales III-V Lab과 SELEX-SI는 KOR-RIGAN(Key Organisation for Research in Integrated Circuits in GaN Technology) 프로젝트를 통하여 X-대역 GaN HEMT 전력증폭 소자 및 MMIC 회로 기술을 조기에 구축하여 50W 전력증폭기 MMIC를 발표하였으며, Wolfspeed사[26]는 X-대역 35W의 GaN MMIC 전력증폭기를 상용화하였다. 표 1과 표 3으로부터 최대 10W 정도의 출력과 최대 0.66W/mm의 전력밀도의 X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기와는 달리 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기는 50W의 고출력과 0.78~3.62W/mm의 고 전력밀도를 나타내어 고집적 고효율 소형 전력증폭

표 3 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술

	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]
Process	0.25 μ m GaN (Alcatel-Thales III-V Lab)	0.5 μ m GaN (SELEX-SI)	0.25 μ m GaN (UMS)	0.25 μ m GaN (UMS)	0.25 μ m GaN (WIN Semi)
Frequency(GHz)	8.5~10.5	8.0~10.5	8.8~10.4	8.8~10.8	8.5~10.5
Saturated output power(W)	43	50	14	40	17.78
PAE(%)	52	35	38	44	37.3
Power density(W/mm ²)	2.39	3.13	0.78	1.92	1.95
	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
Process	0.25 μ m GaN (WIN Semi)	0.25 μ m GaN	0.25 μ m GaN (Qorvo/TriQuint)	0.25 μ m GaN (ETRI)	0.25 μ m GaN (ETRI)
Frequency(GHz)	9.0~10.0	8~12	9~10	8~10	9.0
Saturated output power(W)	21.38	40	17.78	6.0	3.5
PAE(%)	50.7	44.7	>40	25	35
Power density(W/mm ²)	2.71	3.62	1.35	1.35	3.31

기 MMIC 구현이 가능함을 알 수 있으며, Alcatel-Thales III-V Lab, SELEX-SI, UMS사, WIN Semiconductors사, Qorvo사, Wolfspeed사에서 보듯 유럽과 북미의 X-대역 GaN MMIC 공정 기술과 설계 기술이 상당한 수준에 이르렀음을 알 수 있다. 뿐만 아니라, X-대역 GaN MMIC 전력증폭기의 경우 일부 결과를 제외하곤, 2W/mm² 이상을 나타내어 전력증폭기 설계를 최적화할 경우, 2W/mm² 이상의 전력밀도 및 50W 출력의 MMIC 전력증폭기를 구현하기에 어려움이 없을 것으로 사료된다.

한편, 국내 ETRI의 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술은 세계 기술과 비교하여 GaN HEMT 전력증폭 소자의 효율(PAE)이 낮으며, 이를 이용한 전력증폭기 MMIC의 출력은 최대 6W 정도로 낮아 전력증폭 소자의 검증 수준이다. X-대역 GaN MMIC 전력증폭 기술의 세계 기술 수준과 중요성을 고려

할 때, X-대역 GaN MMIC 공정 기술에서의 전력증폭 소자 효율 개선 및 고출력 소자 구조 개발, 이를 이용한 고효율/고출력 GaN MMIC 전력증폭기 설계 기술 개발이 지속적으로 필요하다.

2. Ku-대역 GaN 전력증폭 소자 및 집적회로 기술

이 절에서는 Ku-대역 GaN 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향에 대하여 살펴본다. Ku-대역 GaN 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향을 고찰하기에 앞서, Ku-대역 GaAs 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향에 대하여 알아본다.

표 4는 Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 기술을 나내는 것으로서, GaAs MMIC 공정인 WIN Semiconductors사, Transcom사, TriQuint사(Qorvo사) 공정을 사용한 결과들이다[27-31]. 표 4에서와 같이 Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기는 대체적으로 0.25~0.35 μ m GaAs pHEMT 전력증폭 소자 기

표 4 Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 기술

	[27]	[28]	[29]	[30]	[31]
Process	0.35 μ m GaAs (TriQuint)	0.35 μ m GaAs (Transcom)	0.15 μ m GaAs (WIN Semi)	0.25 μ m GaAs (TriQuint)	0.25 μ m GaAs
Frequency(GHz)	10.7~12.7	13.5~14.3	12~16	13~18	13~19
Saturated output power(W)	6.6	6.76	4.47	6.5	1.26
PAE(%)	>35	24.6	29	-	35
Power density (W/mm ²)	0.63	0.79	0.48	0.58	0.42

술을 이용하고 있으며, 이는 차단주파수가 60GHz 정도이다. X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기와 마찬가지로, Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 칩의 전력밀도는 소자 성능과 설계기법에 따라 차이가 있을 수 있으나, 대체적으로 0.79W/mm² 이 higher이며 최대 7W 정도의 전력 성능을 나타낸다. Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 칩의 전력밀도가 0.79W/mm² 이하로 낮은 것은 GaAs pHEMT 전력증폭 소자의 전력밀도가 낮아 기인하며, 또한 이는 고효율 MMIC 전력증폭기로 사용되기 어려운 이유도 된다. X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기와 마찬가지로, Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기 역시 GaAs pHEMT 전력증폭 소자 공정이 GaN

HEMT 전력증폭 소자 공정에 비해 매우 높은 공정 성숙도와 저렴한 생산 단가로 인하여 Ku-대역 반도체 MMIC 전력증폭기 제작에 일부 사용되고 있다.

표 5는 Ku-대역 GaN MMIC 제작을 위한 상용 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술을 나내는 것으로서 UMS사, Wolfspeed사, BAE Systems사, Qorvo사의 GaN HEMT 전력증폭 소자 공정 기술들이다 [32-34, 39-41, 44]. Ku-대역 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자는 SiC 기판상에 AlGaIn/GaN 채널을 사용한 게이트 길이 0.25 μ m 공정 기술이 사용되고 있으며, 0.15 μ m GaN HEMT 공정 기술로 스케일링되는 추세이다. Qorvo사

표 5 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술

	UMS[32,39]	Wolfspeed[33,40]	BAE Systems[41]	Qorvo[34,44]	
Substrate	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Channel	AlGaIn/GaN	AlGaIn/GaN	AlGaIn/GaN	AlGaIn/GaN	AlGaIn/GaN
Gate length(μ m)	0.25	0.25	0.2	0.25	0.15
Total gate width(mm)	0.6(8×0.075)	-	0.2(2×0.1)	0.4(4×0.1)	0.4(4×0.1)
f_t/f_{max} (GHz)	25/>50	-	52/121	>35/>150	>65/>150
Power density (W/mm)	4.5	6	5.5	6	3
PAE(%)	-	-	51	60	50

표 6 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술

	[35]	[36]	[37]	[38]	[39]
Process	0.25 μ m GaN (Mitsubishi)	0.25 μ m GaN	0.25 μ m GaN (Fraunhofer)	0.25 μ m GaN (Fraunhofer)	0.25 μ m GaN (UMS)
Frequency(GHz)	6~18	13.5~14.5	14~18	12	18
Saturated output power(W)	20	17.5	2.5	25	10*
PAE(%)	15	>36.4	-	22	20
Power density(W/mm ²)	1.04	1.52	0.41	1.0	0.51
	[40]	[41]	[42]	[43]	[44]
Process	0.25 μ m GaN (Wolfsped)	0.2 μ m GaN (BAE Systems)	0.2 μ m GaN (Northrop Grumman)	0.15 μ m GaN (Qorvo)	0.15 μ m GaN (Qorvo)
Frequency(GHz)	13.75~14.5	12~16	13.5~15.5	12	13.0~15.5
Saturated output power(W)	25	16.2*	16	15	35.5
PAE(%)	22	24.1	43	>37	>32
Power density(W/mm ²)	-	0.43	4.92	0.83	1.07

* Output power at 3dB gain compression (P3dB)

[34,44]의 경우 최근 게이트 길이 0.15 μ m GaN HEMT MMIC 공정 기술을 파운드리 서비스하고 있다. 이들 Ku-대역 GaN MMIC 제작을 위한 상용 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술[32-34,39-41,44]에서는 GaN MMIC 전력증폭 소자 제작의 전면공정 완료 후, 후면 비어 홀(back-side via hole) 공정을 통하여 소자와 접지, MMIC와 접지의 거리를 최소화하였다. Ku-대역 0.25 μ m GaN HEMT 전력증폭 소자의 전력밀도는 4.5~6W/mm의 높은 값을 가지며, Qorvo사[34,44]의 게이트 길이 0.15 μ m GaN HEMT 전력증폭 소자의 전력밀도는 3W/mm 수준이다. 이와 같이 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭 소자의 전력밀도가 매우 우수한 것은 X-대역 GaN MMIC 전력증폭 소자의 전력밀도와 마찬가지로, GaN 반도체 재료적 특성에 기인한다. GaN HEMT 전력증폭 소자의 우수한 전력

밀도 특성으로 인하여, Ku-대역 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술 개발과 더불어 GaN MMIC 전력증폭기 기술도 상당한 수준에 이르렀다. 상용 UMS사, Wolfsped사, BAE Systems사, Qorvo사를 중심으로 Ku-대역 MMIC 제작을 위한 고 전력밀도 및 고효율 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술을 확보하고 있음을 알 수 있다.

표 6은 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술을 나타내는 것으로써, 각국의 Ku-대역 GaN MMIC 공정 기술(Fraunhofer, Mitsubishi, UMS, Wolfsped, BAE Systems, Northrop Grumman, Qorvo)을 이용한 결과들이다[35-44]. 표 6의 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기들은 2.5~35.5W 출력 범위로 다양하며, Wolfsped사[40], Northrop Grumman 사[42], Qorvo사[44]는 각각 Ku-대역 25W, 16W, 35.5W의 GaN MMIC 전력증폭기를 상용화하였다. 표 4

와 표 6으로부터, 최대 6.76W 정도의 출력과 최대 0.79W/mm²의 전력밀도의 Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기와는 달리 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기는 35.5W의 고출력과 0.83~4.92W/mm²의 고 전력밀도를 나타내어 고집적 고출력 소형 전력증폭기 구현이 가능함을 알 수 있으며, Fraunhofer, Mitsubishi사, UMS사, Wolfspeed사, BAE Systems사, Northrop Grumman사, Qorvo사에서 보듯 일본, 유럽과 북미의 Ku-대역 GaN MMIC 공정 기술과 설계 기술이 상당한 수준에 이르렀음을 알 수 있다. 앞의 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기 전력밀도 범위를 언급함에 있어서 Fraunhofer[37]는 이중 게이트(dual-gate) GaN HEMT 구조를 사용한 출력 전력을 나타내고, UMS사[39]와 BAE Systems사[41]는 3dB 이득 압축에서의 출력 전력(output power at 3dB gain compression, P3dB)을 나타낸 것으로 인하여 제외하였다. 앞의 결과들로부터 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기 설계를 최적화할 경우, 1W/mm² 이상의 전력밀도 및 35W 이상 출력의 MMIC 전력증폭기를 구현하기에 어려움이 없을 것으로 사료된다.

한편, 국내의 경우 외국 상용 Ku-대역 GaN MMIC 파운드리를 이용하여 전력증폭기를 설계해 본 기관이 다수 존재하여 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기 설계 기술력을 상당한 수준으로 보유하고 있으며, ETRI의 경우 0.25 μ m 게이트 길이 GaN HEMT 소자 기술로 Ku-대역(16GHz에서) 17W 개별 GaN HEMT 전력증폭 소자(Discrete 17W GaN HEMT device)를 개발하였다[4].

III. 결론

본 고에서는 X-대역과 Ku-대역 GaN RF 전력증폭 소자 및 전력증폭기 기술에 대하여 중점적으

로 살펴보았다.

X-대역 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자는 AlGaIn/GaN 채널을 사용한 게이트 길이 0.25 μ m 소자 공정 기술이 사용되고 있으며, 전력증폭 소자의 전력밀도는 대체적으로 4W/mm를 상회한다. X-대역 GaN MMIC 전력증폭기들은 3~50W 출력 범위로 다양하며, 최대 10W 정도의 출력과 최대 0.66W/mm²의 전력밀도의 X-대역 GaAs MMIC 전력증폭기와는 달리 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기는 50W의 고출력과 0.78~3.62W/mm²의 고 전력밀도를 나타내어 고 집적 고출력 소형 전력증폭기 구현이 가능함을 알 수 있었다.

Ku-대역 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자는 AlGaIn/GaN 채널을 사용한 게이트 길이 0.25 μ m 소자 공정 기술과 후면 비어 홀 공정이 사용되고 있으며, 0.15 μ m GaN HEMT 공정 기술로 스케일링되는 추세이다. 0.25 μ m GaN HEMT 소자 공정 기술에서의 전력증폭 소자 전력밀도는 4.5~6W/mm의 높은 값을 갖는다. Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기들은 2.5~35.5W 출력 범위로 다양하며, 최대 6.75W 정도의 출력과 최대 0.79W/mm²의 전력밀도의 Ku-대역 GaAs MMIC 전력증폭기와는 달리 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기는 35.5W의 고출력과 0.83~4.92W/mm²의 고 전력밀도를 나타내어 고집적 고출력 소형 전력증폭기 구현이 가능함을 알 수 있었다.

X-대역과 Ku-대역 MMIC 전력증폭기 제작에 GaAs pHEMT 전력증폭 소자 공정이 공정 성숙도와 저렴한 생산 단가로 인하여 일부 사용되고 있으나, 비싼 가격에도 불구하고 외국의 상용 GaN HEMT 공정 기술은 상당한 정도로 안정화되어 X-대역과 Ku-대역 MMIC 전력증폭기 제작에 주류로 자리 잡기에 이르렀다. 국내의 경우 X-대역

과 Ku-대역 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술은 외국 수준과 비교하여 출력과 전력부가효율이 낮거나 개별 전력증폭 소자 개발 수준이다. GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술 및 MMIC 공정 기술은 세계적 기술 수준과 중요성을 감안할 때 국내에서도 세계적 기술 수준과 동등한 수준으로 확보하고 구축해야 할 핵심기술로 사료된다.

약어 정리

ETRI	Electronics and Telecommunications Research Institute
GaAs	Gallium-Arsenide
GaN	Gallium-Nitride
HEMT	High Electron Mobility Transistor
KORRIGAN	Key Organisation for Research in Integrated Circuits in GaN Technology
LDMOS	Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
pHEMT	pseudomorphic High Electron Mobility Transistor
RF	Radio Frequency
SAR	Synthetic Aperture Radar
UMS	United Monolithic Semiconductors

참고문헌

[1] K. Yamauchi et al., "A 45% Power Added Efficiency, Ku-Band 60W GaN Power Amplifier," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Jun. 2011, pp. 1-4.
 [2] C.E. Weitzel, "RF Power Devices for Wireless Communications," IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, Jun. 2002, pp. 369-372.
 [3] S.J. Pearton et al., "Gallium Nitride Processing for Electronics, Sensors and Spintronics," Springer, 2006.

[4] 이상홍 외 5인, "차세대 GaN 고주파 고효율 전력증폭기 기술 동향," 전자통신동향분석, 제29권, 제6호, Dec. 2014, pp. 1-13.
 [5] H.-T. Kwak et al., "Operational Improvement of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor by an Inner Field-Plate Structure," Applied Sciences, vol. 8, no. 6, 974, Jun. 2018, pp. 1-14.
 [6] H.-T. Kwak et al., "DC Characteristics of AlGaIn/GaN High-Electron Mobility Transistor with a Bottom Plate Connected to Source-Bridged Field Plate Structure," Journal of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 19, no. 4, Apr. 2019, pp. 2319-2322.
 [7] U.K. Mishra et al., "AlGaIn/GaN HEMTs-An Overview of Device Operation and Applications," Proc. IEEE, vol. 90, no. 6, June 2002.
 [8] K. Yuk et al., "Future Directions for GaN in 5G and Satellite Communications," IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Aug. 2017, pp. 803-806.
 [9] Yole Developpement, "GaN RF Market," 2016.
 [10] G.V.D. Bent et al., "Low-Cost High-Efficient 10-Watt X-Band High-Power Amplifier," IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, Nov. 2009.
 [11] A. Pereira et al., "X-Band High-Efficiency GaAs MMIC PA," IEEE Annual Conference on Wireless and Microwave Technology, Jun. 2014.
 [12] J.R. Powell et al., "GaAs X-Band High Efficiency (>65%) Broadband (>30%) Amplifier MMIC Based on the Class B to Class J Continuum," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Jun. 2011.
 [13] "TGA2740," <https://www.qorvo.com/>
 [14] R. Giofre et al., "X-Band GaAs MMIC High Power Amplifier for Transmitter Space Module," Microwave and Optics Technology Letters, vol. 54, no. 11, Nov. 2012, pp. 2633-2635.
 [15] C. Costrini et al., "A 20 Watt Micro-strip X-Band AlGaIn/GaN HPA MMIC for Advanced Radar Applications," European Microwave Integrated Circuits Conference, Sep. 2008, pp. 566-569.
 [16] S. Piotrowicz et al., "43W, 52% PAE X-Band AlGaIn/GaN HEMTs MMIC Amplifiers," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, May 2010, pp. 505-508.
 [17] C. Costrini et al., "50W X-Band GaN MMIC HPA: Effective Power Capability and Transient Thermal Analysis," European Microwave Integrated Circuits Conference, Sep. 2010, pp. 408-411.
 [18] D. Resca et al., "X-Band GaN Power Amplifier for Future Generation SAR Systems," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 24, no. 4, Apr. 2014, pp. 266-268.
 [19] D.H. Shin et al., "X-Band GaN MMIC Power Amplifier for the SSPA of a SAR System," IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Aug. 2017, pp. 93-95.

- [20] Y.S. Noh et al., "A 16 Watt X-Band GaN High Power Amplifier MMIC for Phased Array Applications," IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, vol. 2, Jun. 2016, pp. 979-981.
- [21] B.-H. Lee et al., "A 20 W GaN-Based Power Amplifier MMIC for X-Band Radar Applications," Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers, vol. 23, no. 1, Mar. 2019, pp. 181-198.
- [22] R. Chen, "An X-Band 40 W Power Amplifier GaN MMIC Design," Electronics, vol. 8, no. 1, Jan. 2019.
- [23] "TGA2624," <https://www.qorvo.com/>
- [24] 이상홍 외 12인, "ETRI 0.25 μ m GaN HEMT 공정을 이용한 X-대역 3 W 및 6 W 전력증폭기 MMIC," 대한전자공학회 하계종합학술대회논문집, Jun. 2016, pp. 110-112.
- [25] 이상홍 외 12인, "ETRI 0.25 μ m GaN MMIC 공정 및 X-대역 전력증폭기 MMIC," 한국전자과학기술논문지, 제28권, 제1호, Jan. 2017, pp. 1-9.
- [26] "CMPA801B025D," <https://www.wolfsped.com/>
- [27] C. Florian et al., "A Ku Band Monolithic Power Amplifier for TT&C Applications," European Microwave Conference, vol. 3, Oct. 2005, pp. 1623-1626.
- [28] C.-H. Lin et al., "A Compact 6.5-W PHEMT MMIC Power Amplifier for Ku-Band Applications," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 17, no. 2, Feb. 2007, pp. 154-156.
- [29] I. Ju et al., "Ku-Band GaAs MMIC High Power Amplifier with High Efficiency and Broadband," Conference on Microwave Techniques, Apr. 2015.
- [30] "TGA2514," <https://www.qorvo.com/>
- [31] E. Babakrpur et al., "Wideband GaAs MMIC Driver Power Amplifiers for X and Ku Bands," IEEE Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and System, Mar. 2017.
- [32] "GaN Technology: The 0.25 μ m GaN HEMT MMIC Process (GH25)," <https://www.ums-gaas.com/>
- [33] "GaN HEMT MMICs: GaN HEMT MMIC Process Components," <https://www.wolfsped.com/>
- [34] Qorvo, Inc, "GaN on SiC 15 Years of Reliability & Producibility," 2015, pp. 7-11.
- [35] E. Kuwata1 et al., "C-Ku Band Ultra Broadband GaN MMIC Amplifier with 20W Output Power," IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, Dec. 2011, pp. 1558-1561.
- [36] Y.S. Noh et al., "Ku-Band GaN HPA MMIC with High-Power and High-PAE Performances," Electronics Letters, vol. 50, no. 19, Sep. 2014, pp. 1361-1363.
- [37] P. Dennler et al., "Modeling and Realization of GaN-Based Dual-Gate HEMTs and HPA MMICs for Ku-Band Applications," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Jun. 2011.
- [38] P. Dennler et al., "Monolithic Three-Stage 6-18 GHz High Power Amplifier with Distributed Interstage in GaN Technology," European Microwave Integrated Circuits Conference, Sep. 2015, pp. 29-32.
- [39] G. Mougnot et al., "Three Stage 6-18 GHz High Gain and High Power Amplifier Based on GaN Technology," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, May. 2010, pp. 1392-1395.
- [40] "CMPA1D1E025F," <https://www.wolfsped.com/>
- [41] J.J. Komiak et al., "Decade Bandwidth 2 to 20 GHz GaN HEMT Power Amplifier MMICs in DFP and No FP Technology," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, WE4D-2, May, 2011.
- [42] "APN232," <https://www.northropgrumman.com/>
- [43] A. Fong et al., "Ku- and K-Band High-Efficiency GaN MMIC HPA Chipset for Satellite Communications," Electronics Letters, vol. 55, no. 7, Apr. 2019, pp. 393-395.
- [44] "TGA2239," <https://www.qorvo.com/>