차세대 레이더용 C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로 기술 동향

Technological Trends of C-/X-/Ku-band GaN Monolithic Microwave Integrated Circuit for Next-Generation Radar Applications

안호균 (H.K. Ahn, hkahn@etri.re.kr) 국방RF부품연구실 책임연구원/실장
이상흥 (S.H. Lee, shl@etri.re.kr) 국방RF부품연구실 책임연구원
김성일 (S.I. Kim, sikim@etri.re.kr) 국방RF패키징연구실 책임연구원/실장
노윤섭 (Y.S. Noh, nohys@etri.re.kr) 국방RF부품연구실 책임연구원
장성재 (S.J. Chang, sjchang@etri.re.kr) 국방RF부품연구실 선임연구원
정현욱 (H.U. Jung, hujung@etri.re.kr) 국방RF부품연구실 선임연구원
임종원 (J.W. Lim, jwlim@etri.re.kr) DMC융합연구단 책임연구원/단장

ABSTRACT

GaN (Gallium-Nitride) is a promising candidate material in various radio frequency applications due to its inherent properties including wide bandgap, high carrier concentration, and high electron mobility/saturation velocity. Notably, AlGaN/GaN heterostructure field effect transistor exhibits high operating voltage and high power-density/power at high frequency. In next-generation radar systems, GaN power transistors and monolithic microwave integrated circuits (MMICs) are significant components of transmitting and receiving modules. In this paper, we introduce technological trends for C-/X-/Ku-band GaN MMICs including power amplifiers, low noise amplifiers and switch MMICs, focusing on the status of GaN MMIC fabrication technology and GaN foundry service. Additionally, we review the research for the localization of C-/X-/Ku-band GaN MMICs using in-house GaN transistor and MMIC fabrication technology. We also discuss the results of C-/X-/Ku-band GaN MMICs developed at Defense Materials and Components Convergence Research Department in ETRI.

KEYWORDS GaN MMIC, GaN transistor, low noise amplifier, power amplifier, switch MMIC

Ⅰ. 서론

현재 ICT(Information and Communications Technology)와 자동차, 에너지, 의료, 환경 등 타 산업의 융합으로 많은 산업분야에서 스마트화가 진행되면서 시스템반도체가 이를 견인하듯, 무기체계의 첨단화 및 고도화 또한 반도체가 중추적 역할을 한다. 특히,

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370502
* This work was supported by the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government(MSIT) (No. CRC-19-02-ETRI).

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2022 한국전자통신연구원

무기체계 레이더와 같이 고출력 및 고주파를 요구하는 송수신 시스템은 화합물반도체를 많이 필요로 한다.

무기체계 레이더의 반도체 송신기에는 초기부터 화합물반도체인 갈륨비소(GaAs) 반도체가 사용되어 왔으나, 현재는 넓은 에너지 밴드갭, 고 캐리어 밀도, 높은 전자 이동도 등의 재료 특성으로 인하여 고전압, 고 전류밀도, 고주파 동작이 가능한 질화갈륨(GaN) 반도체가 갈륨비소 반도체의 역할을 대체하고 있다[1-7]. 질화갈륨 반도체는 주로 AlGaN/GaN 등의 이종접합 에피 구조를 적용한 반도체 소자(HFET) 형태로 제작되며, 이 반도체 소자는 무기체계 레이더뿐만 아니라 고주파 및 고출력을 필요로 하는 항공, 이동통신 무선인프라, 위성통신 등의 민수영역으로 수요가 확대되고 있다[8,9]. 앞서 언급한 이들 민수 및 군수 분야의 주요 화합물반도체의 주파수 영역은 L-대역, S-대역, C-대역, X-대역, Ku-대역 및 Ka-대역이며[10], 이들 반도체를 이용한 부품들이 국방 무기체계에 사용되는 경우 수출규제로 인하여 수급이 어려울 뿐만 아니라 구입비용 또한 고가이다.

한편, 참고문헌[11]에 따르면, GaN RF(Radio Frequency) 소자(디바이스) 전체시장은 2019년 7.74억 달러, 2022년 13.7억 달러, 2024년 20.01억 달러를 예측하고 있으며, GaN RF 소자 전체시장 중 2024년 기준 무선인프라 38%, 군수 49% 점유를 예상할 만큼 민수 및 군수 분야 모두 성장세이다[11].

본고에서는 C-대역, X-대역 및 Ku-대역 중심의 GaN 집적회로 기술 동향을 다룬다. 상용 GaN 집적회로 및 파운드리(Foundry) 기술 중심의 글로벌 기술 동향을 다루되, 최근 국내 연구진과 국내 반도체 제조시설을 기반으로 한국전자통신연구원(ETRI) DMC융합연구단에서 개발한 GaN 집적회로 기술을 소개한다.

II. C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로 제작 공정 기술 현황

이 장에서는 차세대 레이더용 C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로 공정을 할 수 있는 해외 파운드리 업체의 기술 동향에 대하여 알아보고, 국내 GaN 집적회로 공정 기술에 대해서도 알아본다. C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로에 적용되는 GaN 반도체 소자는 주로 AlGaN/GaN 에피 구조가 적용되고 있으며, W-대역과 같은 높은 주파수 영역에 대해서는 InAlGaN/GaN, InAlN/GaN 등 얇은 베리어층(Thin Barrier) 에피 구조가 연구되고 있다. 대표적인 GaN 공정 해외 파운드리 업체는 미국의 Qorvo, Wolfspeed, GCS, HRL Lab, 유럽의 UMS, OMMIC, 대만의 WIN Semiconductors 등이 있다. 이중 GaN 소자와 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 공정을 대표하는 파운드리 5곳을 선정하여 공정 특성을 분석하였으며, 이를 표 1에 요약하였다[12-17]. Si 기판 기반의 OMMIC사를 제외하곤 대부분의 파운드리 업체가 SiC 기판을 사용하고 있으며 4인치 크기의 웨이퍼로 공정하고 있다. Qorvo사의 특정 공정과 OMMIC사의 경우 6인치 웨이퍼로 공정을 하고 있으며, Wolfspeed사도 향후 6인치 웨이퍼 공정을 할 예정이다. GaN 공정의 주파수 응용 범위는 대부분 20GHz 미만이지만 각 파운드리 회사별로 K-/Ka-대역 이상의 공정을 갖추고 있다. 특히 OMMIC사의 경우 게이트 길이가 0.1μm 이하로 다른 파운드리 업체보다 높은 동작주파수를 목표로 하고 있다.

WIN Semiconductors사는 자체 집적회로 개발 없이 파운드리만을 제공하고 있으며, Wolfspeed사는 전력증폭기(PA) 위주로 개발하고 있다. UMS사는 전력증폭기와 스위치를, Qorvo사는 송수신 집적회로 전부를 개발하여 X-대역 FEM(Front End Module)도 개발하였다. OMMIC사는 고주파 제품 위주로

표 1 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 소자 공정 기술

Company	Process	Max. frequency (GHz)	Power density (W/mm)	Wafer size (inches)	Gate length (μm)	Nom. drain voltage(V)	Breakdown voltage(V)	Efficiency
Qorvo[13]	QGaN50	8	10	4	0.5	65	〉190	-
	QGaN25HV	12	8	4,6	0.25	48	〉150	-
	QGaN25	25	8	4	0.25	40	〉100	-
	QGaN15	50	4	4,6	0.15	28	〉60	-
UMS[14]	GH50	6	3.5	4	0.5	50	〉200	65%(2GHz)
	GH25	20	3	4	0.25	30	〉120	50%(10GHz)
	GH15	38	2.5	4	0.15	20~25	〉80	-
WIN[15]	NP45-11	6	10	4	0.45	50	160	60~75%(2GHz)
	NP25-02	18	6	4	0.25	28	120	50%(6GHz)
	NP15-00	35	3	4	0.15	28	120	-
Wolfspeed [16]	G28V3	8	4.5	4	0.4	28	120	65%
	G28V4	18	4.5	4	0.25	28	120	65%
	G28V5	40	3.75	4	0.15	28	84	65%
	G40V4	18	6	4	0.25	40	120	65%
	G50V3	6	8	4	0.4	50	120	65%
OMMIC [17]	D01GH	110	4.5	6	0.1	12	〉60	-
ETRI	ETG20	35	5	4	0.2	30	〉180	-

출처 Reproduced from [12-17].

개발하고 있으며 일부 낮은 대역(X-/Ku-대역)의 전력증폭기도 개발하였다.

전력증폭기 집적회로를 설계할 수 있는 GaN HEMT 소자의 특성은 각 파운드리 업체별로 차이가 있다. 일반적으로 게이트 길이에 따라 최대 동작주파수가 결정되며, 전력밀도는 동작전압에 따라 차이가 있다. 즉 최대 전력밀도는 측정 주파수에 따라 달라지며, 보통 28V 동작전압일 경우 최대 전력밀도는 5~6mW/mm, 40V 동작전압일 경우 6~8mW/mm, 50V 이상의 동작전압일 경우 8~10mW/mm의 특성을 나타낸다.

주파수별로 이용 가능한 해외 파운드리 현황을 살펴보면 C-대역 이하의 주파수에서는 주로 0.4μm GaN HEMT 공정 기술을 적용하여 Qorvo, Wolfspeed, WIN Semiconductors, GCS사가 MMIC 파운드리 서비스를 제공하고 있다. X-/Ku-대역의 경우 0.25μm 공정을 적용하여 Qorvo, Wolfspeed, WIN Semiconductors, GCS, UMS사가, Ka-대역 이상에서는 주로 0.1~0.2μm 공정을 적용하여 Qorvo, Wolfspeed, WIN Semiconductros, OMMIC, UMS, Northrop Grumman사 등이 MMIC 파운드리 서비스를 제공하고 있다[18].

국내 GaN HEMT 공정 기술 현황을 살펴보면, 한국전자통신연구원과 GaN HEMT 소자 양산팹을

구축한 웨이비스사가 4인치 웨이퍼 일괄 공정 설비를 구축하고 있으며, 한국전자통신연구원의 경우 0.2μm 및 0.15μm GaN HEMT 라이브러리를 개발하여 GaN MMIC 공정 기술을 구축하였으며, 재현성 및 수율 향상과 신뢰성 확보를 위한 연구를 진행하고 있다. 특히, 한국전자통신연구원 DMC융합연구단에서는 GaN MMIC 개발을 위해 0.2μm GaN HEMT 라이브러리 및 PDK(Process Design Kit)를 구축하였으며, 이를 적용하여 C-/X-/Ku-대역 GaN 전력증폭기(PA), 저잡음증폭기(LNA) 및 스위치 MMIC(Switch MMIC)를 개발하였다. 또한, 이들 개별칩 MMIC 기술을 이용하여 송수신 단일칩(Single Chip) MMIC도 2022년 내 완료할 예정이다. 한편, 웨이비스사의 경우는 자체 양산팹을 이용하여 GaN HEMT 전력소자 양산 공정을 구축한 상태이며[19,20], GaN MMIC 공정도 개발 중에 있다. 최근 GaN HEMT 소자와 이종기판상의 수동소자를 하이브리드 집적한 20W급 전력증폭기를 발표하였다[21]. 아울러, RFHIC사는 GaN 기반 트랜지스터/MMIC 패키지 및 서브시스템 기술을 확보하였으며 GaN MMIC 국산화 공정 기술 확보를 위해 한국전자통신연구원과 협력 중이다.

Ⅲ. C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로 기술 동향

이 장에서는 앞서 살펴본 대표적인 파운드리 업체의 GaN 소자/회로 공정 기술이 적용된 차세대 레이더 송수신 모듈용 핵심 GaN MMIC인 전력증폭기, 저잡음증폭기, 스위치 MMIC의 기술 동향을 알아보고자 한다.

앞서 언급한 바와 같이 민수/군수 레이더 송수신 모듈용 GaN MMIC는 주로 C-대역~Ka-대역 GaN MMIC가 주로 적용되고 있으며, 게이트 길이 0.4~0.5μm의 공정에서는 C-대역 MMIC, 0.25μm 공정에서는 X-/Ku-대역 MMIC, 0.15μm 이하 공정에서는 K-/Ka-대역 MMIC 설계 및 공정이 가능하다.

1. C-/X-/Ku-대역 GaN 전력증폭 집적회로 기술

GaN 전력증폭기 집적회로의 경우 대표적인 파운드리 업체인 Qorvo, Wolfspeed, UMS사의 상용 제품을 대상으로 비교·분석하였다. 전력증폭기의 주요 파라미터는 최대 출력, 효율, 소신호 이득이다. 각 업체별 다양한 주파수와 출력전력이 있음에도 본고에서는 레이더용 출력을 고려하여 10~30W 출력전력의 상용 제품을 비교하였다.

C-대역의 전력증폭기(표 2)의 경우 Qorvo사의 TGA2578 제품은 2~6GHz에서 30W 출력, 소신호이득 27dB, 효율 40%의 특성을 보이고 있으며, Wolfspeed사의 CMP5259025F 제품은 5.2~5.9GHz에서 37W 출력, 소신호이득 32dB, 최대효율 50%의 특성을 갖는다. UMS사의 CHA7060-QAB 제품은 5.6~8.5GHz에서 30W 출력, 소신호이득 30dB, 효율 40%의 특성을 갖는다[22-24].

X-대역의 전력증폭기(표 3)의 경우 Qorvo사의 QPA1010D 제품은 7.9~11GHz에서 15W 출력, 소신호이득 25dB, 효율 38%의 특성을 보이고 있으며, Wolfspeed사의 CMPA601C025D 제품은 6~12GHz에서 25W 출력, 소신호이득 32dB, 효율 32%의 특성을 갖는다. UMS사의 CHA8352-99F 제품은 10.7~12.75GHz에서 20W 출력, 소신호이득 25dB, 효율 45%의 특성을 갖는다. OMMIC사의 경우 Si 기판을 이용한 미세 게이트 길이의 GaN 소자는 높은 차단주파수(110GHz)를 가지며, 상대적으로 낮은 주파수인 X-대역 전력증폭기도 개발하였다. OMMIC사의 CGY2631UH 제품은 6~18GHz에서 10W 출력, 소

표 2 C-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술

Company	Qorvo[22]	Wolfspeed[23]	UMS[24]
Model	TGA2578	CMPA5259025F	CHA7060-QAB
Process	QGaN50	G28V3	GH25
Frequency(GHz)	2~6	5.2~5.9	5.6~8.5
Saturated power(W)	30	37	12
Small signal gain(dB)	27	32	30
PAE(%)	40	50	40
Voltage(V)	28	28	20
Current(mA)	400	-	420

출처 Reproduced from [22-24].

표 3 X-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술

Company	Qorvo[25]	Wolfspeed[26]	UMS[24]	OMMIC[27]
Model	QPA1010D	CMPA601C025D	CHA8352-99F	CGY2631UH
Process	QGaN25	G28V4	GH25	D01GH
Frequency(GHz)	7.9~11	6~12	10.7~12.75	6~18
Saturated power(W)	15	25	20	10
Small signal gain(dB)	25	32	25	20
PAE(%)	38	32	45 @43dBm	36
Voltage(V)	24	28	20	12
Current(mA)	600	-	500	2

출처 Reproduced from [24-27].

표 4 Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술

Company	Qorvo[28]	Wolfspeed[29]	UMS[24]	OMMIC[27]
Model	QPA1013D	CMPA1D1E025F	CHA7062-QCB	CGY2632AUH
Process	QGaN25	G28V4	GH25	D01GH
Frequency(GHz)	6~18	13.5~14.5	12.7~19.7	14.5~18
Saturated power(W)	〉10	25	5	20
Small signal gain(dB)	〉25	26	20	29
PAE(%)	〉20	16	20 @37dBm	35
Voltage(V)	20	40	20	12
Current(mA)	1250	-	300	-

출처 Reproduced from [24,27-29].

신호이득 20dB, 효율 36%의 특성을 갖는다[24-27].

Ku-대역 전력증폭기(표 4)의 경우 Qorvo사의 QPA1013D 제품은 6~18GHz에서 10W 출력, 소신호이득 25dB, 효율 20%의 특성을 가지며, Wolfspeed사의 CMPA1D1E025F 제품은 13.5~14.5GHz에서 25W 출력, 소신호이득 26dB, 효율 16%의 특성을 갖는다. UMS사의 CHA7062-QCB 제품은 12.7~19.7GHz에서 5W 출력, 소신호이득 20dB, 효율 20%의 특성을 가지며, OMMIC사의 CGY2632AUH 제품은 14.5~18GHz에서 20W 출력, 소신호이득 29dB, 효율 35%의 특성을 갖는다[24,27-29].

한편, 한국전자통신연구원, 미연구소 및 충남대, 한양대 등에서는 해외 상용 파운드리를 이용하여 GaN 전력증폭기 MMIC를 지속적으로 개발해 오고 있으며, 국내 공정을 이용한 GaN MMIC 개발은 한국전자통신연구원, (주)웨이비스 및 RFHIC 등에서 이루어지고 있다[30-32].

2. C-/X-/Ku-대역 GaN 저잡음증폭기 집적회로 기술

그간 저잡음증폭기(LNA)는 잡음지수 특성이 우수한 GaAs 소자를 이용하여 개발되어 왔으나, 최근 들어 GaAs 저잡음증폭기와 더불어 GaN 플랫폼에서 다른 증폭기들과 동시 집적이 가능한 GaN 저잡음증폭기를 개발하고 있다[33-35]. 저잡음증폭기 또한 전력증폭기 집적회로와 마찬가지로 공정상의 게이트 길이에 따라 최대 주파수가 정해진다. 저잡음증폭기의 경우 주요 특성 파라미터는 잡음지수(NF)와 최대입력전력이다.

표 5에 의하면, C-대역 저잡음증폭기의 경우 Qorvo사의 TGA2611-SM 제품은 2~6GHz에서 잡음지수 1dB, 최대입력전력 30dBm, 이득 22dB의 특성을 가지며, X-대역 저잡음증폭기의 경우 OMMIC사의 CGY2222UH 제품은 8~12GHz에서 잡음지수 1.5dB, 최대입력전력 20dBm, 이득 20dB의 특성을 갖는다. X-/Ku-대역 저잡음증폭기는 Qorvo사의 TGA2227-SM 제품은 광대역 특성으로 2~22GHz에서 잡음지수 2.6dB, 최대입력전력 23dBm, 이득 15.7dB의 특성을 갖는다[22,23,25,28].

국내에서는 전력증폭기의 경우와 마찬가지로 연구소와 학계를 중심으로 해외 상용 파운드리를 이용한 GaN 저잡음증폭기를 개발해 오고 있으며, 국내 공정을 이용한 GaN LNA MMIC 개발은 한국전

표 5 C-/X-/Ku-대역 GaN MMIC 저잡음증폭기 기술

	C-band	X-band		Ku-band
Company	Qorvo[22]	Qorvo[25]	OMMIC[23]	Qorvo[28]
Model	TGA2611-SM	TGA2227-SM	CGY2222UH	TGA2227-SM
Frequency(GHz)	2~6	2~22	8~12	2~22
NF(dB)	1	2.6	1.5	2.6
Small signal gain(dB)	22	15.7	20	15.7
OP1dB(dBm)	18	〉23	20	〉23
Volatge(V)	10	8	8	8
Current(mA)	100	125	-	125

출처 Reproduced from [22,23,25,28].

표 6 C-/X-/Ku-대역 GaN MMIC SPDT 기술

	C-band		X-band		Ku-band	
Company	Qorvo[22]	UMS[24]	Qorvo[25]	UMS[24]	Qorvo[28]	UMS[24]
Part #	TGS2352-2-SM	CHS7012-99F	QPC2040	CHS8618-99F	TGS2353-2	CHS8618-99F
Frequency(GHz)	0.5~12	DC-12	8~12	6~18	0.5~18	6~18
Insertion loss(dB)	<1	1.4	<1.2	1.3	1.5	1.3
Isolation(dB)	35	35	30	34	30	34
Switching speed(ns)	<35	-	35	-	35	-
OP0.1dB(dBm)	43	40.5	40	42	40	42
Input power(W)	20	-	10	-	10	-

출처 Reproduced from [22,24,25,28].

자통신연구원에서 해오고 있다[36,37].

3. C-/X-/Ku-대역 GaN 스위치 집적회로 기술

최근 들어 송수신기의 GaN 단일칩 연구가 진행되고 있으며, 이에 따라 단일칩 송수신기에서 GaN 스위치 집적회로가 필요하게 되었다[38-42]. Qorvo사와 UMS사가 대표적이며 WIN Semiconductors사도 스위치 집적회로 설계를 위한 설계 라이브러리를 갖추고 있다. 스위치의 경우 주요 특성 파라미터는 삽입손실(Insertion Loss)과 격리도(Isolation), 최대입력전력이다.

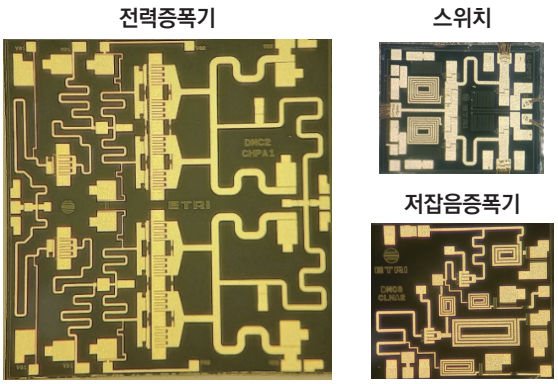
표 6에 의하면, C-대역 스위치의 경우 Qorvo사의 TGS2352-2-SM 제품은 0.5~12GHz에서 삽입손실 1dB 이하, 격리도 35dB, 최대입력전력 20W 특성을 가지며, UMS사의 CHS7012-99F 제품은 DC-12GHz에서 삽입손실 1.4dB, 격리도 35dB, 최대입력전력 40.5dBm 특성을 갖는다.

X-대역 스위치의 경우 Qorvo사의 QPC2040 제품은 8~12GHz에서 삽입손실 1.2dB 이하, 격리도 30dB, 최대입력전력 10W 특성을 가지며, Ku-대역 스위치의 경우 Qorvo의 TGS2353-2 제품은 0.5~18GHz에서 삽입손실 1.5dB, 격리도 30dB, 최대입력전력 10W 특성을 갖는다. UMS사의 CHS8618-99F 제품은 X-/Ku-대역 스위치로 6~18GHz에서 삽입손실 1.2dB 이하, 격리도 30dB, 최대입력전력 10W 특성을 갖는다[22,24,25,28].

국내에서는 연구소와 학계를 중심으로 해외 상용 파운드리를 이용한 GaN 스위치 MMIC 개발해 오고 있으며, 국내 공정을 이용한 GaN 스위치 MMIC는 한국전자통신연구원에서 개발해 오고 있다[43].

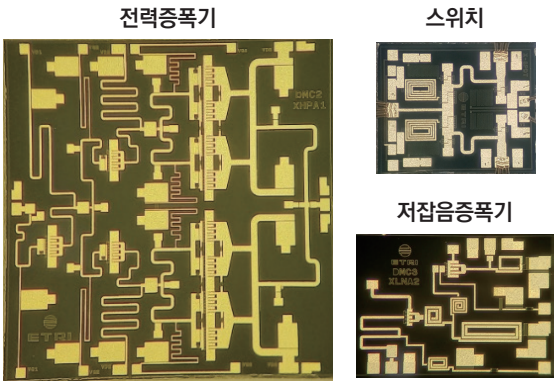
4. ETRI DMC융합연구단 C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로 기술

한국전자통신연구원 DMC융합연구단은 2019년 12월부터 차세대 레이더용 핵심 GaN MMIC 개발을 위해 0.2μm GaN HEMT 라이브러리 및 PDK를 구축하고, 이를 이용하여 C-/X-/Ku-대역 GaN 전력증폭기(PA), 저잡음증폭기(LNA) 및 스위치 MMIC(Switch MMIC)를 개발하였다.



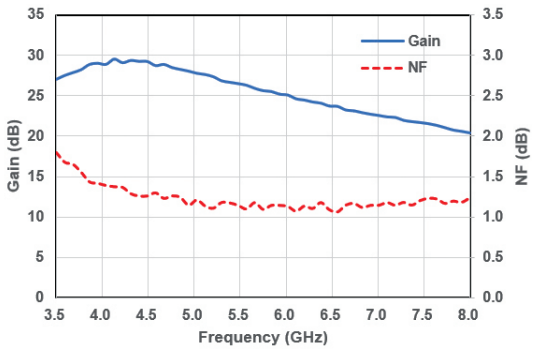
출처 Reprinted with permission from [44].

그림 1 C-대역 레이더용 송수신 MMIC 칩셋



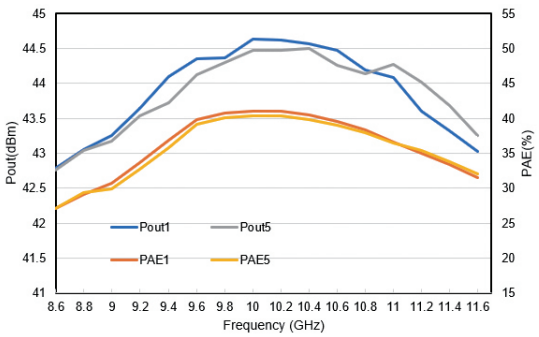
출처 Reproduced with permission from [47-49].

그림 3 X-대역 레이더용 송수신 MMIC 칩셋



출처 Reprinted with permission from [46].

그림 2 C-대역 저잡음증폭기 MMIC 이득 및 NF 특성



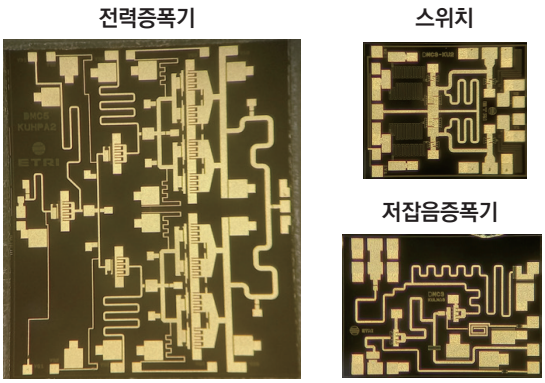
출처 Reprinted with permission from [49].

그림 4 X-대역 전력증폭기 MMIC 출력전력 및 효율 특성

그림 1은 ETRI DMC융합연구단에서 개발한 C-대역(5~6GHz) 레이더용 송수신 MMIC 칩셋이다. 전력증폭기는 3.5mm × 3.6mm의 크기로 출력전력 46dBm 및 효율 38.6% 수준의 특성을 갖는다. SPDT 스위치는 1.8mm × 1.55mm의 크기로 0.63dB의 삽입손실, 34.5dB의 격리도 및 45.5dBm의 최대 입력전력 특성을 갖는다[44,45]. 저잡음증폭기 MMIC의 경우 1.8mm × 1.55mm의 크기이며, 그림 2와 같이 25dB의 이득과 1.2dB의 잡음지수 특성을 갖는다[46].

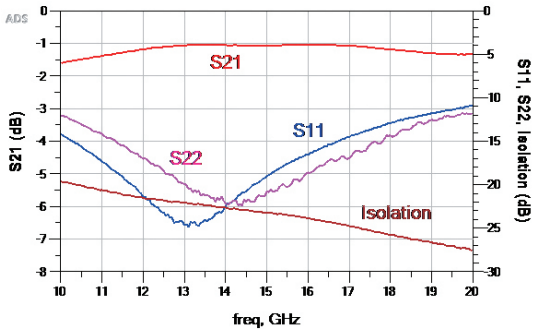
그림 3은 X-대역(9~10GHz) 레이더용 송수신 MMIC 칩셋이다. SPDT 스위치는 1.8mm × 1.3mm의 크기로 0.95dB의 삽입손실, 31.5dB의 격리도 및 45dBm의 최대 입력전력 특성을 갖는다[47]. 저잡음증폭기의 경우 1.8mm × 1.55mm의 크기로 19dB의 이득과 1.78dB의 잡음지수 특성을 갖는다[48]. 전력증폭기 MMIC는 3.5mm × 3.6mm의 크기이며, 그림 4와 같이 출력전력 44dBm 및 효율 38% 수준의 특성을 갖는다[49].

그림 5는 Ku-대역(15~16GHz) 레이더용 송수신 MMIC 칩셋이다. 전력증폭기는 3.1mm × 3.6mm의 크기로 출력전력 43.8dBm 및 효율 34% 수준



출처 Reprinted with permission from [51].

그림 5 Ku-대역 레이더용 송수신 MMIC 칩셋



출처 Reprinted with permission from [51].

그림 6 Ku-대역 SPDT 스위치 삽입손실 및 격리도 특성

의 특성을 갖는다. 저잡음증폭기의 경우 1.8mm × 1.55mm의 크기로 15.7dB의 이득과 1.65dB의 잡음지수 특성을 갖는다[50]. SPDT 스위치는 1.8mm × 1.3mm의 크기로 개발되었으며, 그림 6과 같이 1.1dB의 삽입손실, 23.2dB의 격리도 특성을 갖는다. 최대 입력전력은 42.5dBm 수준이다[51].

Ⅳ. 결론

본고에서는 차세대 레이더용 핵심 송수신 MMIC인 C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로 기술 동향에 대해서 중점적으로 살펴보았다.

C-/X-/Ku-대역 GaN 집적회로 제작 공정 기술은 Qorvo, Wolfspeed, UMS, GCS 및 WIN Semiconductors사와 같은 해외 파운드리 업체들이 세계 시장을 주도하고 있으며, 현재 국내 무기체계에도 전량 해외 수입 제품 및 해외 파운드리를 이용하여 제작된 GaN MMIC가 적용되고 있다. 최근 학계 및 연구소와 관련 업체를 중심으로 국산화 공정 기술을 확보하여 국내 파운드리를 구축하려는 노력이 진행 중이다.

민수/군수 레이더 송수신 모듈용 GaN MMIC는 C-대역~Ka-대역 GaN MMIC가 주로 적용되고 있다. C-대역의 경우 0.4~0.5μm 게이트 공정, X-/Ku-대역의 경우 0.25μm 게이트 공정 및 K-/Ka-대역에서는 0.15μm 게이트 공정을 통해 제작되고 있다.

한편, 한국전자통신연구원 DMC융합연구단에서는 C-/X-/Ku-대역 GaN MMIC를 개발하기 위해 0.2μm GaN HEMT 라이브러리 및 PDK를 구축하고, 이를 적용하여 C-/X-/Ku-대역 GaN 전력증폭기(PA), 저잡음증폭기(LNA) 및 스위치 MMIC(Switch MMIC)를 개발하였다. 국내 공정을 이용한 GaN 저잡음증폭기와 스위치 MMIC개발은 국내 최초이며, 이로 인해 GaN MMIC 기술 국산화의 기틀을 공고히 하였다.

약어 정리

HEMT	High Electron Mobility Transistor
LNA	Low Noise Amplifier
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
NF	Noise Figure
PA	Power Amplifier
PAE	Power Added Efficiency

참고문헌

[1] N.J. Lolias et al., "GaN technology for microwave and millimeter wave applications," in Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., (Anaheim, CA, USA), May 2010.

[2] J.C. Zolper, "Wide bandgap semiconductor microwave technologies: From promise to practice," in Proc. Int. Electron Devices Meeting (IEDM), Tech. Dig., (Washington, DC, USA), Aug. 1999, pp. 289-392.

[3] C.E. Weitzel, "RF power devices for wireless communications," in Proc. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp., (Seattle, WA, USA), June 2002, pp. 369-372.

[4] S.J. Pearton, C.R. Abernathy, and F. Ren, Gallium Nitride Processing for Electronics, Sensors and Spintronics, Springer, London, United Kingdom, 2006.

[5] 이상흥 외, "ETRI 0.25μm GaN MMIC 공정 및 X-대역 전력증폭기 MMIC," 한국전자파학회논문지, 제28권 제1호, 2017, pp. 1-9.

[6] H.-T. Kwak et al., "Operational improvement of AlGaN/GaN high electron mobility transistor by an inner field-plate structure," Appl. Sci., vol. 8, no. 6, 2018, pp. 1-14.

[7] H.-T. Kwak et al., "DC characteristics of AlGaN/GaN high-electron mobility transistor with a bottom plate connected to source-bridged field plate structure," J. Nanosci. Nanotechnol., vol. 19, no. 4, 2019, pp. 2319-2322.

[8] 이상흥 외, "차세대 GaN 고주파 고출력 전력증폭기 기술동향," 전자통신동향분석, 제29권 제6호, 2014, pp. 1-13.

[9] U.K. Mishra, P. Parikh, and Y.F. Wu, "AlGaN/GaN HEMTs-An overview of device operation and applications," Proc. IEEE, vol. 90, no. 6, 2002.

[10] 이상흥 외, "차세대 GaN RF 전력증폭 소자 및 집적회로 기술동향," 전자통신동향분석, 제34권 제5호, 2019, pp. 71-80.

[11] Yole Developement, "GaN RF Market," 2019.

[12] G. Lerude, "Survey of RF GaN fabs: Successful commercialization and global supply," Microw. J., June 2021.

[13] https://www.qorvo.com/foundry

[14] https://www.ums-rf.com/foundry-old/technologies/

[15] https://www.winfoundry.com/en-US/Tech/tech_advanced

[16] https://www.wolfspeed.com/products/rf/foundry-services/#foundry-gan

[17] https://www.ommic.com/iii-v-processes/

[18] 김민철, "초고주파 전력증폭기 MMIC 기술 동향 및 개발 현황," 제14회 군수용 초고주파부품 워크샵, 2021.

[19] 권호상 외, "S-대역 300W급 GaN HEMT 내부 정합 전력증폭기," 한국전자파학회논문지, 제31권 제1호, 2020, pp. 43-50.

[20] S. Lee et al., "Qualification of Wavice Baseline GaN HEMT process with 0.4μm gate on 4" SiC wafers," CS-MANTECH, May 2022.

[21] S. Lee et al., "3.4~3.8GHz 20W compact 2-stage GaN HEMT power amplifier using IPDs on HPSI SiC substrates," CS-MANTECH, May 2022.

[22] https://www.qorvo.com/applications/defense-aerospace/radar#ba0021

[23] https://www.wolfspeed.com/products/rf/c-band

[24] UMS, 2022_Selection_Guide, https://www.ums-rf.com/products/product-support/brochures/

[25] https://www.qorvo.com/applications/defense-aerospace/radar#ba0022

[26] https://www.wolfspeed.com/products/rf/x-band

[27] https://www.ommic.com/our-gan-products/

[28] https://www.qorvo.com/applications/defense-aerospace/radar#ba0023

[29] https://www.wolfspeed.com/products/rf/satellite-communications/

[30] J.C. Jeong et al., "AlGaN/GaN based ultra-wideband 15-W high-power amplifier with improved return loss," ETRI J., vol. 38, no. 5, 2016.

[31] D.H. Shin et al., "A decade-bandwidth distributed power amplifier MMIC using 0.25μm GaNHEMT technology," J. Electr. Eng. Sci., vol. 17, no. 4, 2017.

[32] 이복형 외, "0.25μm GaN HEMT 기술을 이용한 우수한 성능의 X-대역 전력 증폭기," 전기전자학회논문지, 제23권 제2호, 2019, pp. 425-430.

[33] L. Letailleur et al., "GaN/Si vs GaAs LNA linear and nonlinear caracterizations, new FOMs, in millimeter wave T/R chip context," in Proc. Int. Workshop Integrated Nonlinear Microw. Millim.-Wave Circuits (INMMIC), (Cardiff, United Kingdom), Apr. 2022.

[34] A. Fung et al., "Development of Gallium nitride monolithic microwave integrated circuits for Ka-band remote sensing," in Proc. IEEE Aerospace Conf., (Big Sky, MT, USA), June 2021.

[35] X. Tong et al., "An 18~56-GHz wideband GaN low-noise amplifier with 2.2~4.4-dB noise figure," IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 30, no. 12, 2020, pp. 1153-1156.

[36] 성하욱 외, "유도성 소스 축퇴를 이용한 X-대역 GaN MMIC 저잡음 증폭기," 한국전자파학회논문지, 제33권 제5호, 2022, pp. 356-364.

[37] J.S. Seo et al., "High linearity Ka-band GaN HEMT low noise amplifier," in Proc. Int. Conf. Inform. Commun. Technol. Convergence (ICTC), (Jeju Island, Rep. Korea), Oct. 2021, pp. 383-385.

[38] B. Kim and V.Z.Q. Li, "39GHz GaN front end MMIC for 5G applications," in Proc. IEEE Compd. Semicond.

Integrated Circuit Symp. (CSICS), (Miami, FL, USA), Oct. 2017.

[39] P. Schuh et al., "High performance GaN single-chip frontend for compact X-Band AESA systems," in Proc. Eur. Microw. Integrated Circuits Conf. (EuMIC), (Nuremberg, Germany), Oct. 2017.

[40] S. Masuda et al., "GaN single-chip transceiver frontend MMIC for X-band applications," in Proc. IEEE MTT-S Int. Symp. Dig., (Montreal, Canada), June 2012.

[41] P. Schuh et al., "GaN-based single-chip for next-generation X-band AESA systems," Int. J. Microw. Wirel. Technol., vol. 10, special issue. 5-6, 2018.

[42] D. Palombini et al., "Design of a 5W single chip front-end for C-Ku band T/R modules," in Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. (IMS), (Philadelphia, PA, USA), June 2018.

[43] T. KIm et al., "High linear K-/Ka-band SPDT switch based on traveling-wave concept in a 150-nm GaN pHEMT process," IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 32, no. 8, 2022.

[44] 노윤섭 외, "C 대역 0.2μm GaN 공정을 이용한 30W급 SPDT 스위치 MMIC 개발," 대한전자공학회 추계학술대회, 2020.

[45] 노윤섭 외, "0.2μm GaN 공정을 이용한 광대역 SPDT 스위치 MMIC 개발," 한국전자파학회 동계종합학술대회, 제3권 제1호, 2021.

[46] 노윤섭 외, "C 대역 GaN 저잡음증폭기 집적회로 설계," 한국전자파학회 하계종합학술대회, 제9권 제1호, 2021.

[47] 노윤섭 외, "0.2μm GaN 공정을 이용한 X 대역 20W급 고전력 SPDT MMIC 스위치 설계," 대한전자공학회 하계종합학술대회, 2021.

[48] 노윤섭 외, "X 대역 GaN 저잡음증폭기 MMIC 연구," 한국전자파학회 하계종합학술대회, 2022.

[49] 노윤섭 외, "X 대역 25W급 GaN 전력증폭기 MMIC 개발," 통신정보합동학술대회, 2022.

[50] 노윤섭 외, "Ku대역 GaN 저잡음증폭기 집적회로 설계에 관한 연구," 한국통신학회 종합학술대회, 2021.

[51] 노윤섭 외, "0.2μm GaN HEMT 공정을 이용한 Ku대역 GaN SPDT 스위치 MMIC 개발," 한국전자파학회 동계종합학술대회, 제4권 제1호, 2022.