

GAN RFIC 설계 기술 및 연구 동향

□ 한국전자파학회-2023년 하계종합학술대회-워크숍

Changkun Park

2023.08.23

Intelligent Microwave Systems Lab.

School of Electronic Engineering, College of Information Technology

Soongsil University

CONTENTS

1. 5G 이동통신 기술

- 5G 통신 방식상 small-cell 수요 증가에 따른 GaN 시장성 및 유망 분야

2. GaN RF 소자·공정 기술

- 세계 GaN Foundry 업계 동향

3. 5G 응용을 위한 GaN 전력증폭기

- 5G 용 GaN power amplifier의 시장성

4. 주파수별 전력증폭기 성능 동향

- 동작 주파수별 GaN power amplifier 응용 영역 확인

5. 공정별 전력증폭기 성능 동향

- 반도체 공정별 주요 적용 영역 확인

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

- Phase shifter, attenuator, switch, and power amplifier

APPENDIX

- 보충 자료

REFERENCES

- 과학기술정보통신부, “혁신성장 실현을 위한 5G+전략,” 2019
- N. Hussaina et al., “Metasurface-based low-profile wideband circularly polarized patch antenna for 5G millimeter-wave systems,” IEEE Access, vol. 8, 2021, pp. 22127-22135, CC BY 4.0.
- <https://www.litepoint.com/ko/blog/an-introduction-to-the-5g-small-cell/>
- <https://kind.krx.co.kr/common/discslviewer.do?method=searchInitInfo&acptNo=20211115000729&docno=>
- <https://www.qorvo.com/foundry>
- <https://www.wolfspeed.com/products/rf/foundry-services/>
- <https://www.ums-rf.com/foundry-old/technologies/>
- <https://www.ommic.com/iii-v-processes/>
- 이종민 외 5명, “5G 이동통신을 위한 GaN RF 전자소자 및 집적회로 기술 동향”
- “Full W-Band GaN Power Amplifier MMICs Using a Novel Type of Broadband Radial Stub,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 66, no. 12, pp. 5664–5675, Dec. 2018.
- “W-Band GaN Power Amplifier MMICs,” in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Jun. 2011.
- “W-Band MMIC PA With Ultrahigh Power Density in 100-nm AlGaIn/GaN Technology,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 63, no. 10, pp. 3882–3886, Oct. 2016.
- “A W-Band Spatial Power-Combining Amplifier using GaN MMICs,” in 15th European Radar Conference (EuRAD), Sep. 2018.
- “D-Band and G-Band High-Performance GaN Power Amplifier MMICs,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 67, No. 12, Dec. 2019.
- “A W-Band Power Amplifier with Distributed Common-Source GaN HEMT and 4-Way Wilkinson-Lange Combiner Achieving 6W Output Power and 18% PAE at 95GHz”, International Solid- State Circuits Conference(ISSCC) Feb, 2020.
- <https://comm.eelabs.technion.ac.il/experiments/77-phased-antenna-arrays/>
- <https://www.remcom.com/mimo-and-array-design-for-5g>

1. 5G 이동통신 기술

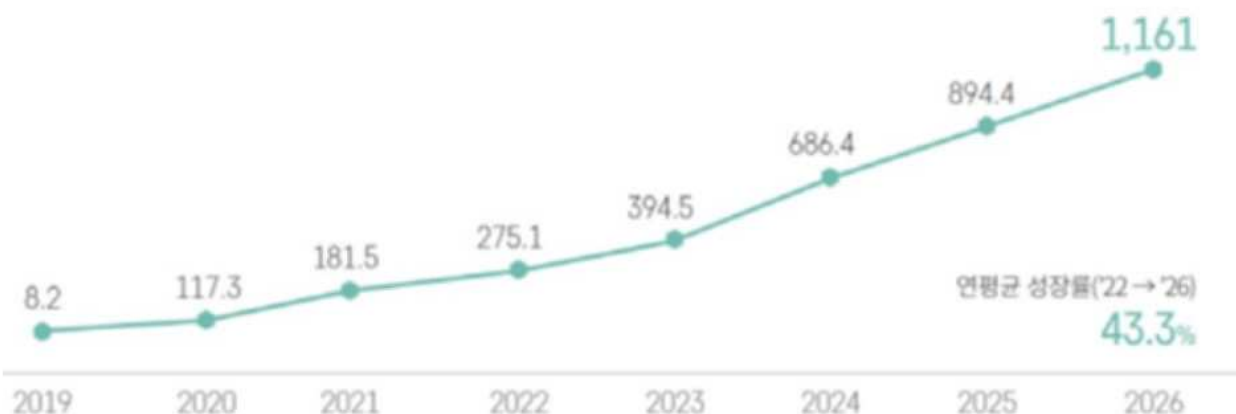
5G 이동통신 시장 현황

- 2019.04: 세계 최초 5G 이동통신 상용화
- 2021.02: 가입자 1,300만명 돌파
- 세계 연평균 성장률(CAGR) 43.3% 예측
- 세계 시장 창출 규모: 2026년 총 1,161조원 예측
- 관련 산업 분야

- 네트워크 장비 및 단말, 첨단 장치 및 보안, 융합 서비스 등 주요 연관 산업

연차별 세계시장 전망('19~'26)

(단위: 조원)



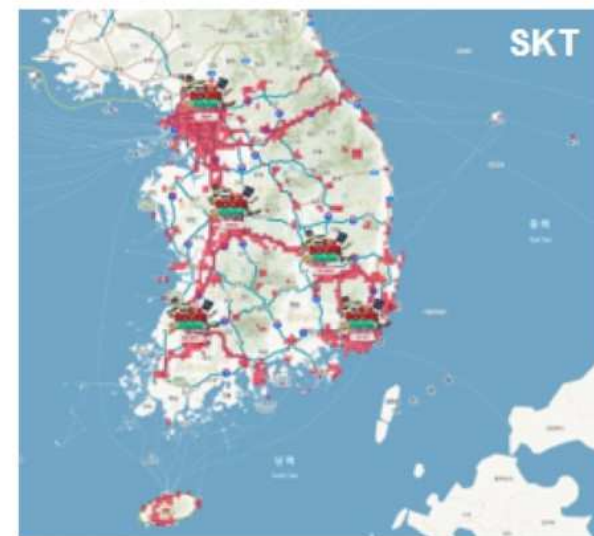
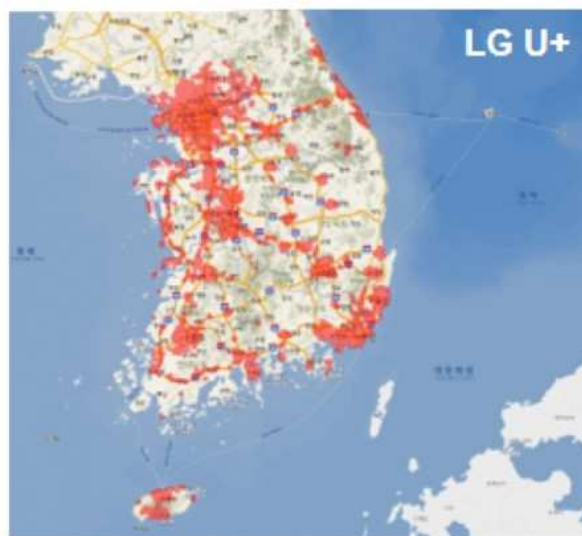
연차별 5G 세계시장 전망

(출처: 과학기술정보통신부, “혁신성장 실현을 위한 5G+전략,” 2019)

1. 5G 이동통신 기술

5G 이동통신 해결 과제

- 5G 가입자당 트래픽: 2만 6,056 MB → LTE 가입자당 트래픽의 3배
- 기지국 현황:
 - 수도권, 고속도로, 야외 중심 설치 → 실생활에서 끊김 현상 지속
 - 5G 이동통신 서비스에 대한 만족도 30% 내외
- 서비스 불만족의 원인
 - 중계기 부족으로 인한 커버리지 부족
 - 현재 주파수 대역이 Sub-6GHz 이하로 제한 → Sub-6GHz + 28 GHz 및 39 GHz














2020년 5G 커버리지 맵

(출처: <https://www.epnc.co.kr/news/articleView.html?idxno=93815>)

1. 5G 이동통신 기술

5G 이동통신의 주파수 대역

	<1 GHz	3GHz	4GHz	5 GHz	24–28 GHz	37–40 GHz
	600 MHz	3.5GHz		5.9–7.1GHz	27.5–28.35GHz	37–37.6GHz
	600 MHz	3.5GHz		5.9–7.1GHz	27.5–28.35GHz	37.6–40GHz
	700 MHz	3.4–3.8GHz		5.9–6.4GHz	24.5–27.5GHz	37–37.6GHz
		3.4–3.8GHz			26, 28GHz	37–40GHz
		3.4–3.7GHz			26, 28GHz	
		3.46–3.8GHz			26GHz	
		3.6–3.8GHz				
		3.3–3.6GHz			24.5–27.5GHz	37.5–42.5GHz
		3.4–3.7GHz	4.8–5GHz		26.5–29.5GHz	
		3.6–4.2GHz			27.5–29.5GHz	
		3.4–3.7GHz	4.4–4.9GHz		28 GHz	39GHz

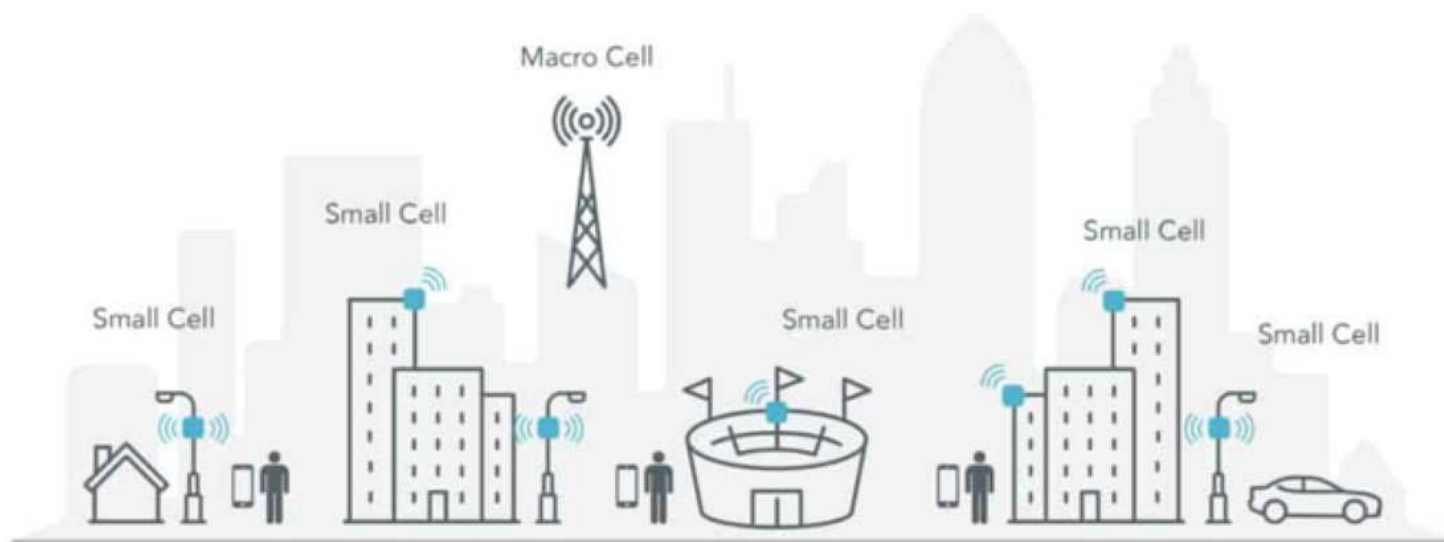
세계 5G 이동통신 주파수 대역

(출처:N. Hussaina et al., “Metasurface-based low-profile wideband circularly polarized patch antenna for 5G millimeter-wave systems,” IEEE Access, vol. 8, 2021, pp. 22127-22135, CC BY 4.0.)

1. 5G 이동통신 기술

5G 이동통신을 위한 MM-WAVE 대역 현황

- mm-Wave 대역의 전파손실 고려
 - 자유공간 경로 손실, 대기 감쇠 및 강우 감쇠
 - 산림에 의한 손실, 산란과 회절, 실내외 투과 손실
 - mm-Wave 특성 극복 기술 (짧은 커버리지 극복 기술)
 - Beamforming 기술
 - 5G Small cell 기술: 4G 대비 많은 수의 Small cell 기반 기지국 운영 필수
- ← 2035년 까지 12조 달러의 경제적 가치 창출 예상



Small cell 개념도 (출처: <https://www.litepoint.com/ko/blog/an-introduction-to-the-5g-small-cell/>)

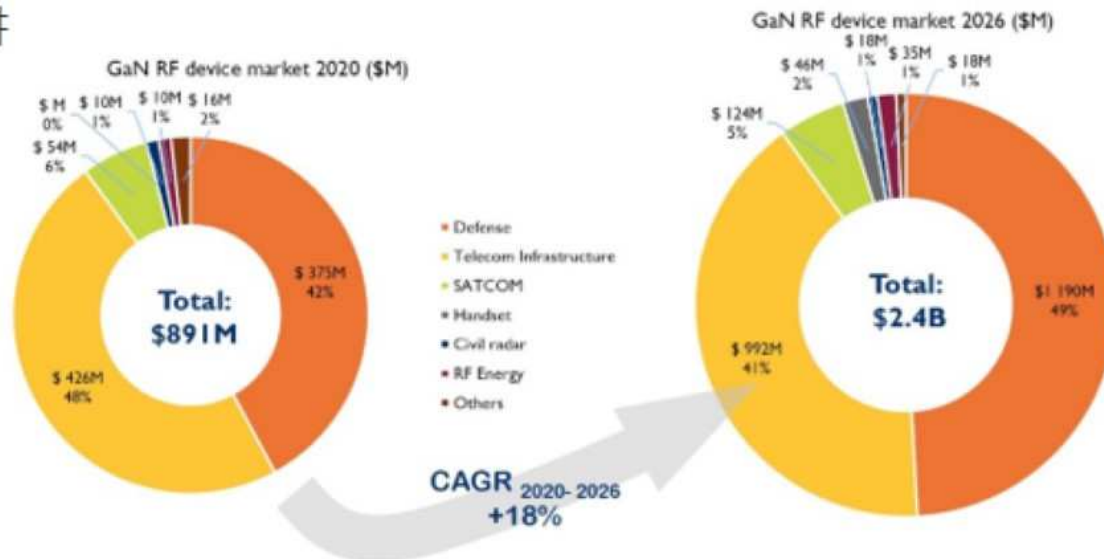
2. GAN RF 소자·공정 기술

GAN RF 소자 응용 분야

- 통신 인프라 (Telecom Infrastructure)
- 통신위성 (SATCOM)
- 케이블 통신망 (Wired Broadband)
- 레이더 (Commercial Radar)

GAN RF 소자 세계 시장 예측 (출처: YOLE 보고서)

- 연평균 성장률 12% & 2025년까지 세계 시장 규모 대략 20억 달러 예측
- GaN RF 주력 분야: Power Amplifier
 - 무선통신 분야: 2025년 7.21억 달러로 연평균 15% 성장 기대
 - 국방 분야



Yole Development, RF GaN Device Market (2021)

(출처: <https://kind.krx.co.kr/common/disclsvviewer.do?method=searchInitInfo&acptNo=20211115000729&docno=>)

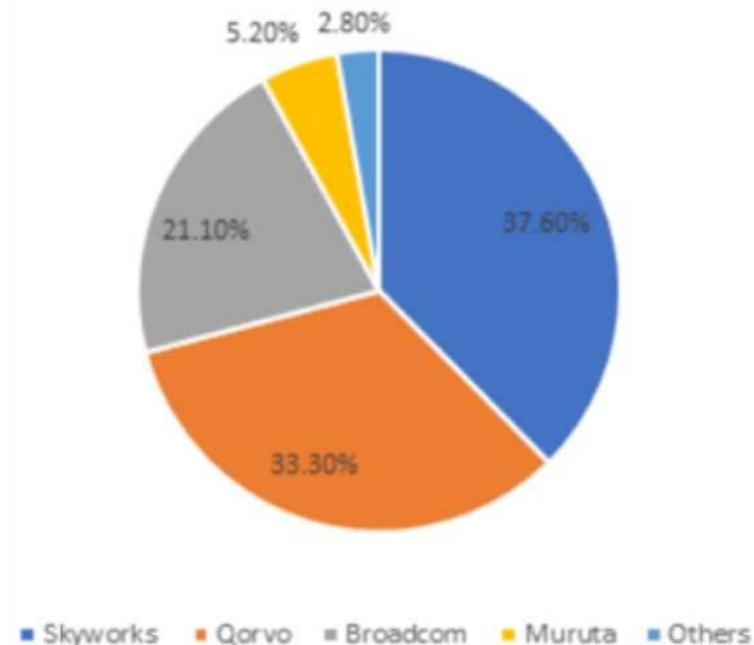
2. GAN RF 소자·공정 기술

이동통신용 전력증폭기 세계 시장 현황

- Skyworks, Qorvo, Broadcom, Murata 등
미국 및 일본 산업체가 독점적으로 시장 점유
- 세계적 기업의 경우,
가격 경쟁력 확보를 위하여 자체 공정 보유

GAN RF 기반 공정기술 및 전력증폭기 시장 현황

- 미국, 일본 및 유럽 등 해외 선진사 독점
- GaN-on-SiC의 경우 미국 및 일본 업체가
특히 경쟁력 이미 확보
- 우리나라의 경우 GaN 고주파 소자 전량 수입
- 선박 및 군수용 레이더, 미사일 등의
송수신기용 전력증폭기: 전략 및 수출통제 품목
→ High frequency & High power GaN
→ 자체 개발 확립 필요



이동통신용 전력증폭기 시장 점유 현황

(Source: RF GaN 2019 - Patent Landscape Analysis report, Knowmade, 2019)



GaN RF 기술 특허 동향

2. GAN RF 소자·공정 기술

GAN RF 기반 전력증폭기 개요

- **GaN 전력 소자: GaAs 및 LDMOS 대비 우수성**
 - 주파수 특성
 - 입/출력 정합
 - 선형성 및 전력 효율
- **GaN 전력 소자의 산업 규모 확장 시기**
 - 이동통신 분야의 새로운 서비스 개시 및 기존의 서비스 확장 시기
 - 군 통신장비의 개발 및 교체 주기
 - 테러나 전쟁 위협 등에 따른 전파 차단 수요 변화 시기
- **통신분야: Si 및 GaAs에서 GaN으로 대체 추세**
- **능동 위상배열레이더: GaAs에서 GaN으로 대체 추세**

GAN 산업체별 동향 개요

- 미국: Qorvo, Wolfspeed
- 유럽: UMS, OMMIC, IAF
- 일본: Mitsubishi
- 대만: Win Semiconductor

2. GAN RF 소자·공정 기술

미국: **QORVO** (출처: <https://www.qorvo.com/foundry>)

- 500-nm 급 기술(QGaN50)

- GaN on SiC (4-inch Wafer)
- DC ~ 10 GHz application
- < 65 V 구동 전압

- 250-nm 급 기술(QGaN25)

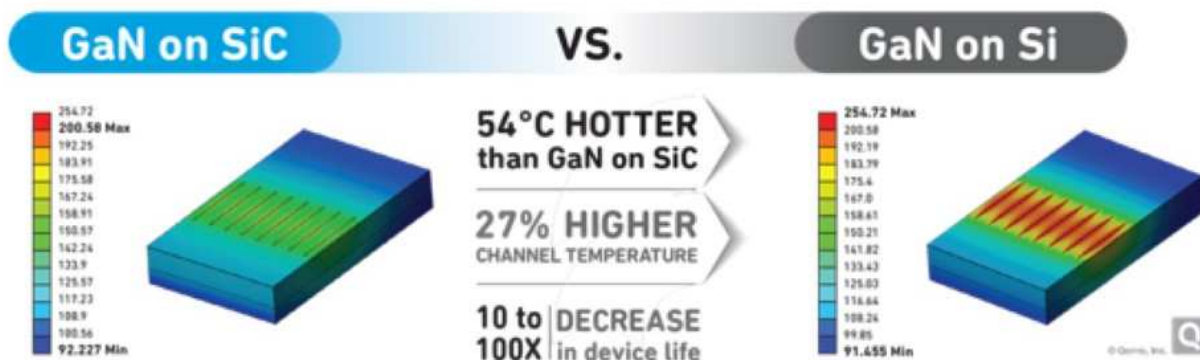
- GaN on SiC (4-inch Wafer)
- DC ~ 18 GHz application
- < 40 V 구동 전압

- 250-nm 급 기술(QGaN25HV)

- High-voltage GaN on SiC (4-inch Wafer)
- DC ~ 10 GHz (주력 분야: 6 GHz 이하)
- < 50 V 구동 전압 → 높은 이득 및 전력 효율
- Sub-6GHz 대역 5G 기지국 적합

- 150-nm 급 기술(QGaN15)

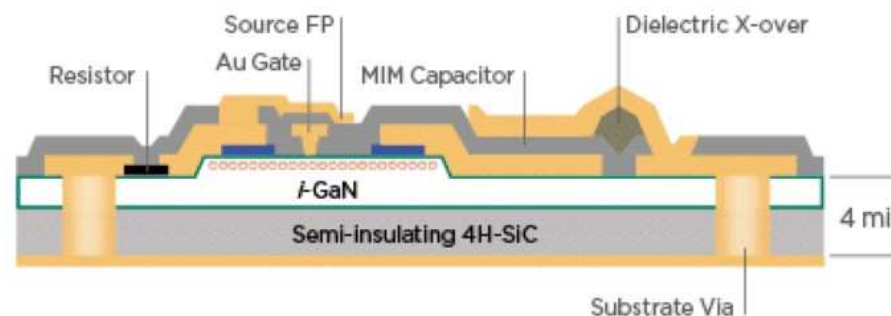
- GaN on SiC (4-inch Wafer)
- DC ~ 40 GHz application (주력 분야: mm-Wave 대역)
- < 28 V 구동 전압
- 4 Watt/mm



2. GAN RF 소자·공정 기술

미국: **WOLFSPEED** (출처: <https://www.wolfspeed.com/products/rf/foundry-services/>)

	G28V5	G28V4	G40V4	G28V3	G50V3	G50V4
Gate length	0.15 μ m	0.25 μ m	0.25 μ m	0.4 μ m	0.4 μ m	0.25 μ m
Bias Voltage	28V	28V	40V	28V	50V	50V
Breakdown Voltage	>84V	>84V	>120V	>84V	>150V	>150V
RF Power Density	3.75W/mm	4.5W/mm	6W/mm	4.5W/mm	8W/mm	8.5W/mm
Frequency Band	DC - 40GHz	DC - 18GHz	DC - 18GHz	DC - 8GHz	DC - 6GHz	DC - 18GHz
SiC Substrate thickness	75 μ m	100 μ m	100 μ m	100 μ m	100 μ m	.



2. GAN RF 소자·공정 기술

유럽: UMS (출처: <https://www.ums-rf.com/foundry-old/technologies/>)

- 250-nm 급 기술
- 150-nm 급 기술(GH15)
 - 구동 전압: 20 V
 - 기판 두께: 0.07 mm
 - 전력 밀도: 3.5 Watt/mm



Process	GH15 GaN	GH25 GaN	PH25 Low Noise	PH15 Low Noise	PH10 Low Noise	PPH25 Power	PPH25X High Power	PPH15X High Power	HB20M VCO	HP07	BES
Active device	HEMT	HEMT	pHEMT	pHEMT	pHEMT	pHEMT	pHEMT	pHEMT	HBT	MESFET	Schottky
Power Density	3.5W/mm	4.5W/mm	250mW/mm	300mW/mm	250mW/mm	700mW/mm	900mW/mm	800mW/mm	2W/mm	400mW/mm	-
Gate Length	0.15μm	0.25μm	0.25μm	0.15μm	0.1μm	0.25μm	0.25μm	0.15μm	2μm Emitter width	0.7μm	1μm
I _{ds} (gm max) I _{ds} sat/Ic	1200 mA/mm 1400 mA/mm	750mA/mm 1000mA/mm	200mA/mm 500mA/mm	220mA/mm 550mA/mm	280mA/mm	200mA/mm 500mA/mm	170mA/mm 250mA/mm	350mA/mm 575mA/mm	0.3mA/μm ²	300mA/mm 450mA/mm	-
V _{DS} / V _{GS}	>70V	>120V	> 6V	> 4.5V	> 5V	> 12V	> 18V	> 12V	> 14V	> 14V	< -5V (Anode/ Cathode)
Cut off freq.	> 35 GHz	30GHz	90GHz	110GHz	130GHz	50GHz	45GHz	70GHz	30GHz	15GHz	3THz
V _{pinch}	-3.2V	-3.4V	-0.8V	-0.7V	-0.45V	-0.9V	-0.9V	-0.95V	-	-4.0V	-
G _m max / β	390mS/mm	300mS/mm	560mS/mm	640mS/mm	750mS/mm	450mS/mm	360mS/mm	480mS/mm	60	110mS/mm	-
Wafer Thickness	70μm	100μm	100μm	100μm	70μm	100μm	70μm	70μm	100μm	100μm	100μm
Noise / Gain	1.5dB / 11dB @15GHz	1.8dB / 11dB @15GHz	0.6dB / 13dB @10GHz 2dB / 8dB @40GHz	0.5dB / 14dB @10GHz 1.9dB / 6dB @60GHz	2.3dB / 4.5dB @70GHz	0.6dB / 12dB @10GHz	-	1.8dB / 6dB @40GHz	-	-	-

2. GAN RF 소자·공정 기술

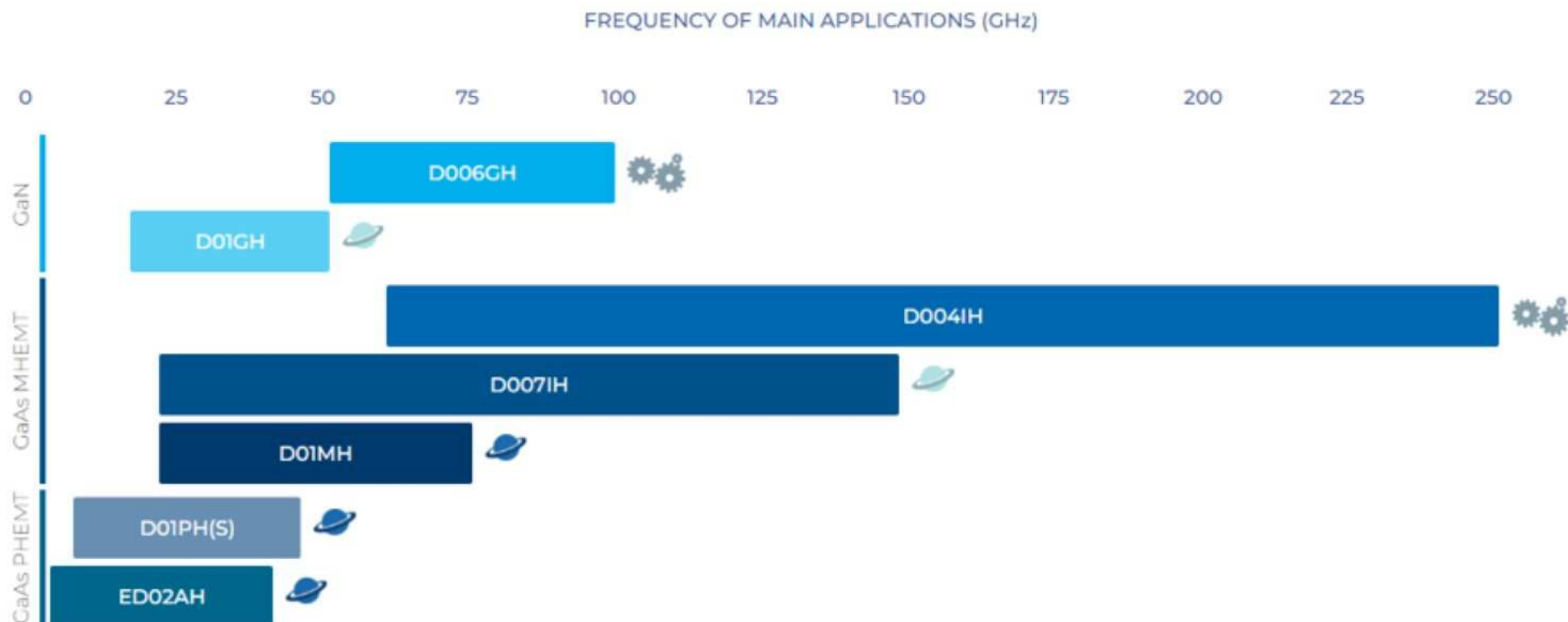
유럽: OMMIC (GAN ON SILICON, 3INCH WAFER) (출처: <https://www.ommic.com/iii-v-processes/>)

- 100-nm 급 기술 (D01GH)

- 구동 전압: 12 V
 - 전력 밀도: 3.5 (or 3.3) Watt/mm

- 60-nm 급 기술 (D006GH)

- 구동 전압: 12 V
 - 전력 밀도: 3.5 (or 3.3) Watt/mm
 - Cutoff frequency: ~ 150 GHz



2. GAN RF 소자·공정 기술

대만: WIN SEMICONDUCTOR (총 3개 공정)

- 150-nm 급 기술 (NP15)

- 구동 전압: 20 V (Breakdown voltage > 90 V)
- 기판 두께: 0.10 mm

GaN 소자 기술 특성 표

(출처: 이종민 외 5명, “5G 이동통신을 위한 GaN RF 전자소자 및 집적회로 기술 동향)

Company	Qorvo [12]	Wolfspeed [13]	UMS [14]	Ommic [15]	Win Semi. [16]	ETRI
Process	QGaN15	G28V5	GH15	D01GH	NP15	GaN
Gate Length(μm)	0.15	0.15	0.15	0.1	0.15	0.18
Bias(V)	28	28	20	12	20	15
BVdg(V)	70	70	70	40	70	60
Density(W/mm)	3.5	3.5	3.5	3	3	2.5
Max Operating Frequency(GHz)	40	40	40	50	40	30
Efficiency(%)	N/A	55	40@30GHz	45@40GHz	35@30GHz	23@30GHz
Wafer Size(inch)	4	4	4	3	4	4
Substrate	SiC	SiC	SiC	Si	SiC	SiC

3. 5G 응용을 위한 GAN 전력증폭기

5G 응용을 위한 GAN 전력 증폭기 개요

- 주 응용분야: Small cell 및 Macro cell
- 5G 이동통신의 기지국 소형화 및 소형셀의 의한 기지국 수 증가
- 타 공정 대비, 소형화, 고출력, 고선형 및 고효율 달성 용이
- 사례: Qorvo 150-nm 급 GaN 전력 증폭기
 - Ka 대역 동일 출력 전력 GaAs 전력증폭기 대비
 - 전력 밀도 4배, IC 면적 82% 감소
- 향후 수년내 기존 GaAs 및 Silicon 기반 전력 증폭기 시장의 전면적 대체 예상

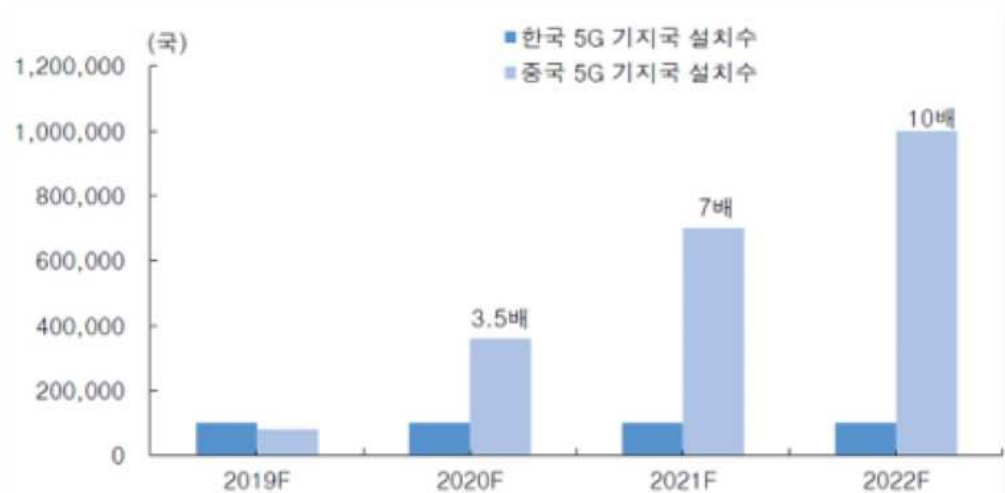
SUB-6 GHz GAN 전력 증폭기 국내 기술 동향

- 100% 해외 파운드리 업체로부터 Wafer 공급
- n78 대역 전력증폭기 개발 사례는 있으나, n79 개발 사례는 없음.
- GaN-on-SiC 기반 전력증폭기의 경우, 향후 가격 경쟁력 제고 필요.
- 5G 응용을 위한 선형성 확보 기술은 아직 미흡 한 수준임.

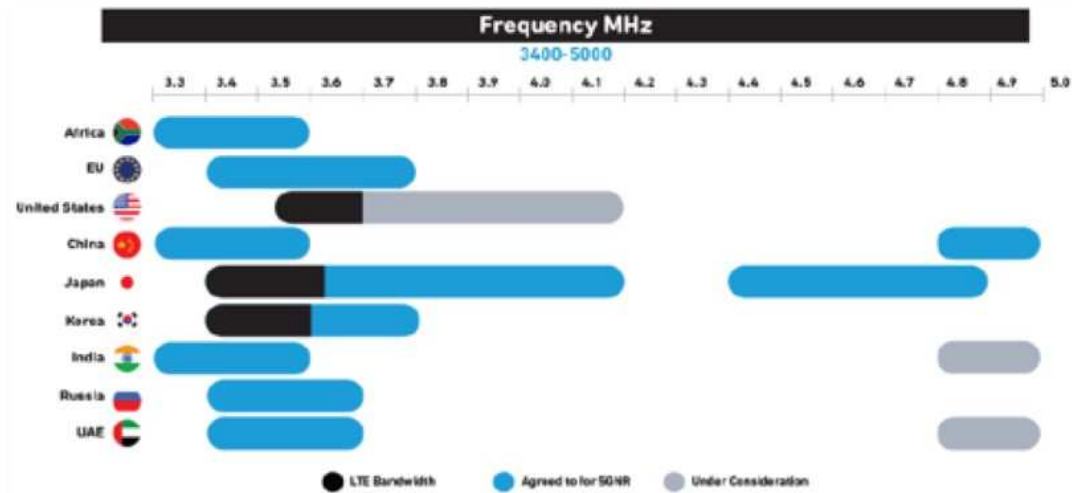
3. 5G 응용을 위한 GAN 전력증폭기

SUB-6 GHz GAN 전력 증폭기 국외 기술 동향

- 최근 중국의 5G용 스몰셀을 포함한 기지국 투자가 한국 보다 10 배 이상 많을 것으로 예상 됨.
- 국가별 주파수 할당을 고려할때, 국내용 n78 및 국외용 n79의 동시 지원 전력 증폭기가 효율적임.
- n77 (3.3 ~ 4.2 GHz): 미국, 일본 등
- n78 (3.3 ~ 3.8 GHz): 한국, 유럽, 중국 등
- n79 (4.4 ~ 5.0 GHz): 중국, 인도, 러시아 등



한국 및 중국의 기지국 설치 전망



n77/n78/n79 대역 세계 주파수 분배 현황

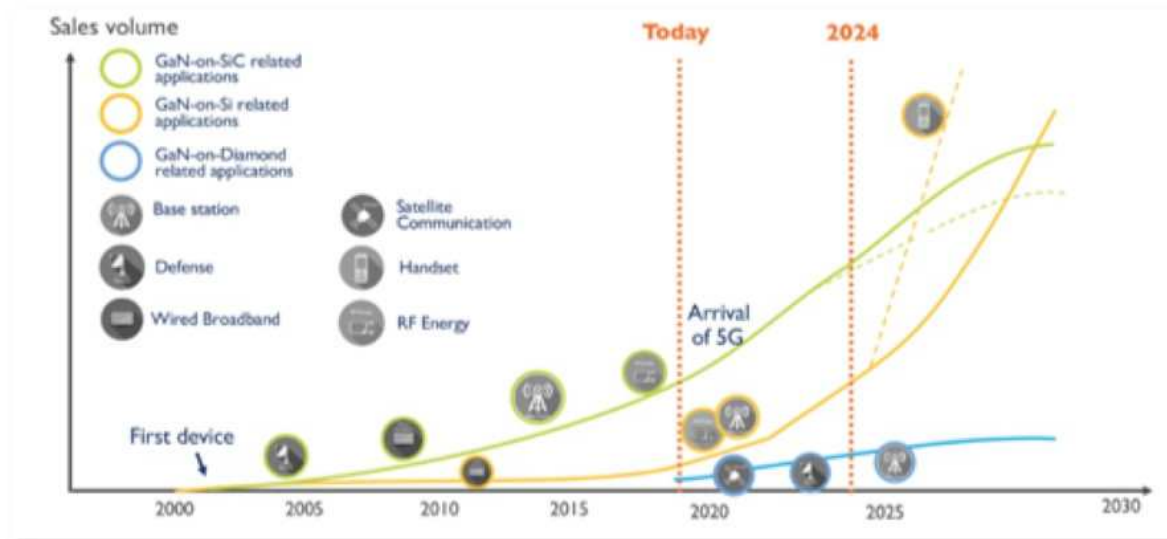
3. 5G 응용을 위한 GaN 전력증폭기

GaN FOUNDRY 동향

- 국내에서도 GaN-on-SiC 기반 GaN Foundry 서비스가 개시 됨.
- 국내의 경우, GaN-on-SiC 기술을 이용하여 가격 제한이 없는 국방용 사업화에 주력 함.
- 향후에는 가격 경쟁력을 위하여, GaN-on-Silicon이 시장을 주도 가능성 있음.



GaN Power Device Market Size



GaN 고정의 발전 동향

4. 주파수별 전력증폭기 성능 동향

2~6 GHz POWER AMPLIFIERS (ALL TECH.)

- 30 dBm 이하 영역: CMOS 기술이 주도
- 40 dBm 이상 영역: GaN 기술이 주도
 - 30 dBm 이하 영역은 GaN PA 개발 사례가 거의 없음.
 - 타 공정 기술 대비 높은 Power-added efficiency (PAE) 특성을 보임.

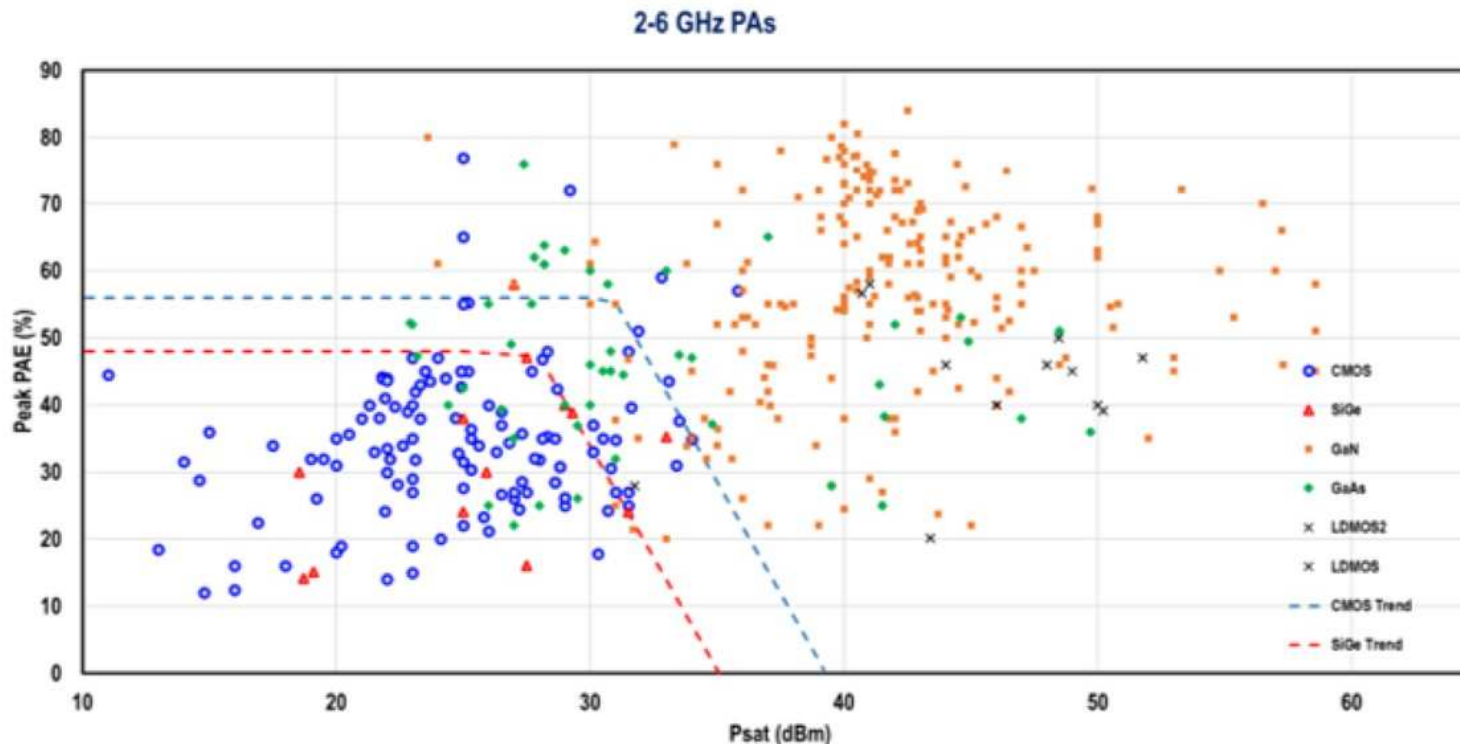


그림 출처: Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present, Hua Wang, Georgia-Tech Electronics and Micro-Systems (GEMS) Lab, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology

4. 주파수별 전력증폭기 성능 동향

6~20 GHz POWER AMPLIFIERS (ALL TECH.)

- 25 dBm 이하 영역: CMOS 기술이 주도
- 30 dBm 이상 영역: GaN 및 GaAs 기술이 주도
- 25 dBm 이하 영역은 GaN PA 개발 사례가 거의 없음.

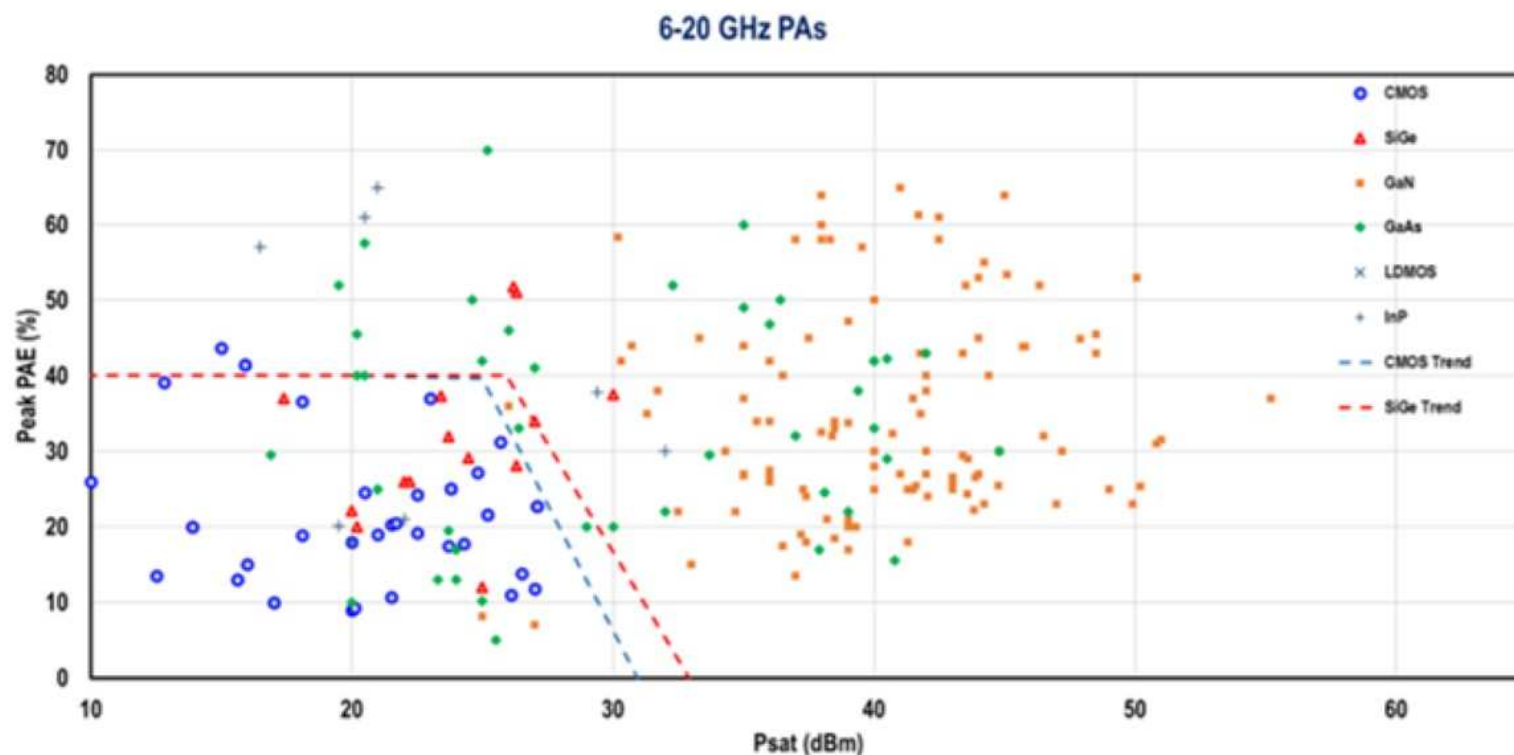


그림 출처: Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present, Hua Wang, Georgia-Tech Electronics and Micro-Systems (GEMS) Lab, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology

4. 주파수별 전력증폭기 성능 동향

20~50 GHz POWER AMPLIFIERS (ALL TECH.)

- 24 dBm 이하 영역: CMOS 기술이 주도
- 25~35 dBm 영역: GaAs 기술이 주도
- 35 dBm 이상 영역: GaN 기술이 주도

- 24 dBm 이하 영역은 GaN PA 개발 사례가 거의 없음.

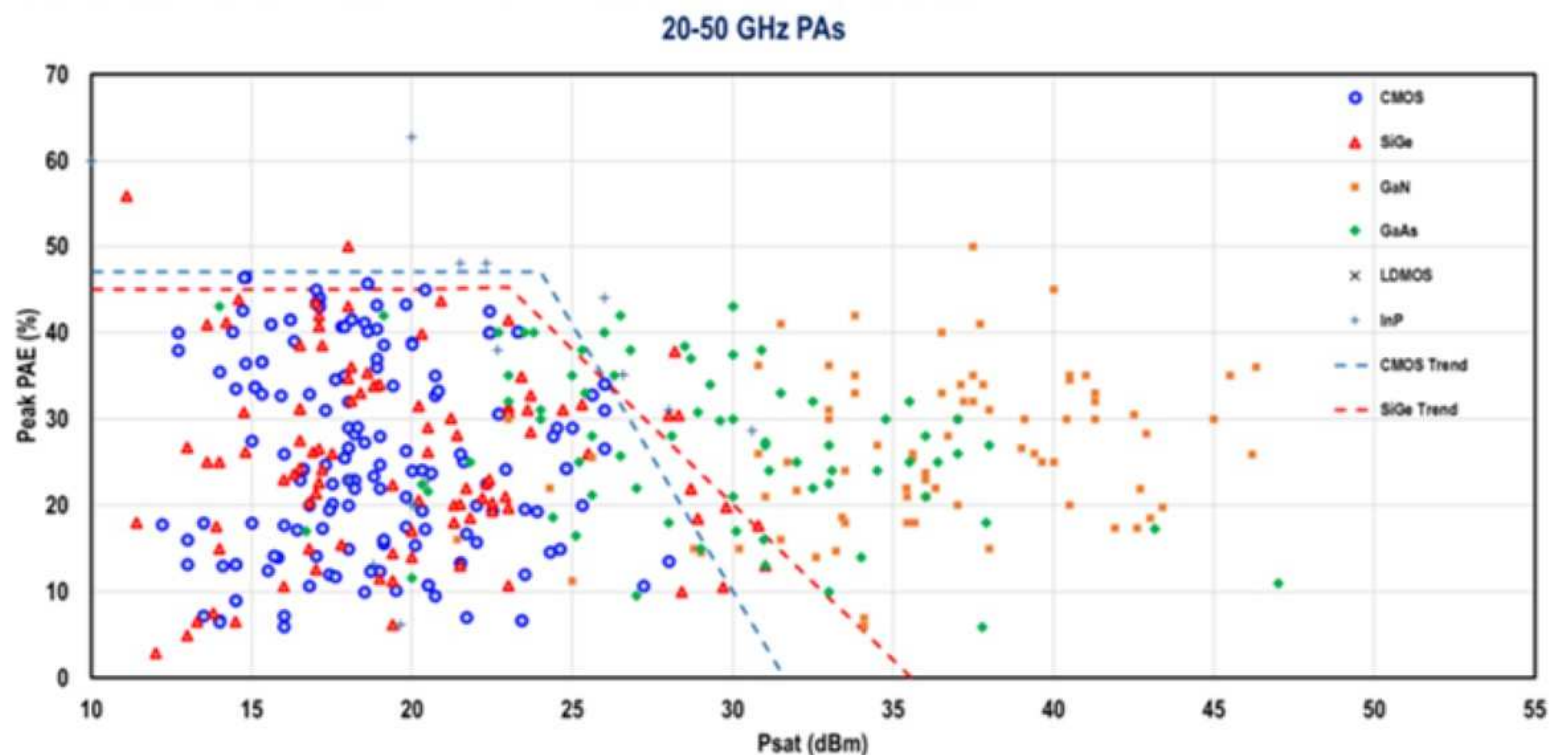


그림 출처: Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present, Hua Wang, Georgia-Tech Electronics and Micro-Systems (GEMS) Lab, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology

4. 주파수별 전력증폭기 성능 동향

>50 GHz POWER AMPLIFIERS (ALL TECH.)

- 20 dBm 이하 영역: CMOS 기술이 주도
- 25 dBm 이상 영역: GaN 및 GaAs 기술이 주도
- 30 dBm 이상 영역: GaN 기술이 주도

- 20 dBm 이하 영역은 GaN PA 개발 사례가 거의 없음.

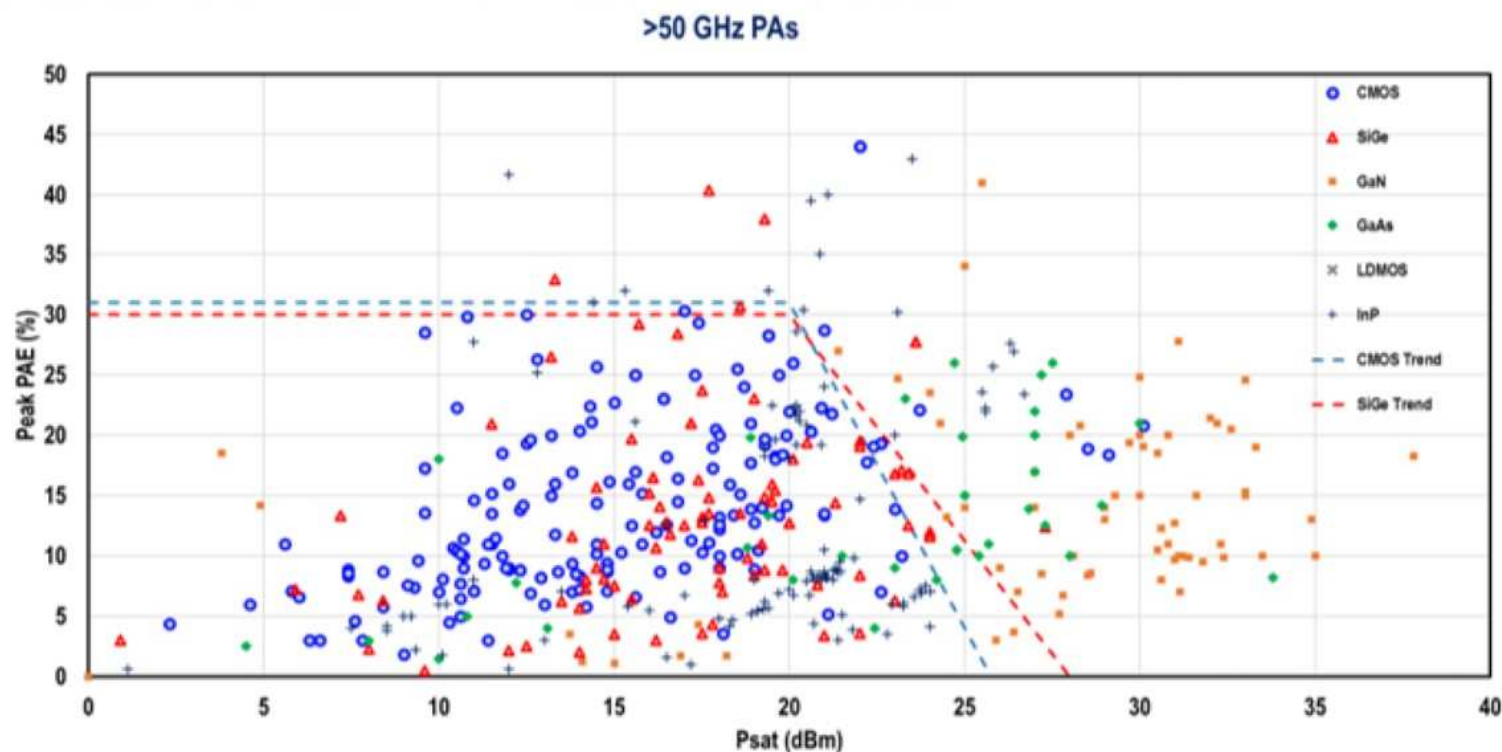


그림 출처: Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present, Hua Wang, Georgia-Tech Electronics and Micro-Systems (GEMS) Lab, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology

5. 공정별 전력증폭기 성능 동향

POWER AMPLIFIERS (ALL TECH.)

- 20 GHz 이하 영역: GaN의 경우 30 dBm 이상 출력 전력

Saturated Output Power vs. Frequency (All Technologies)

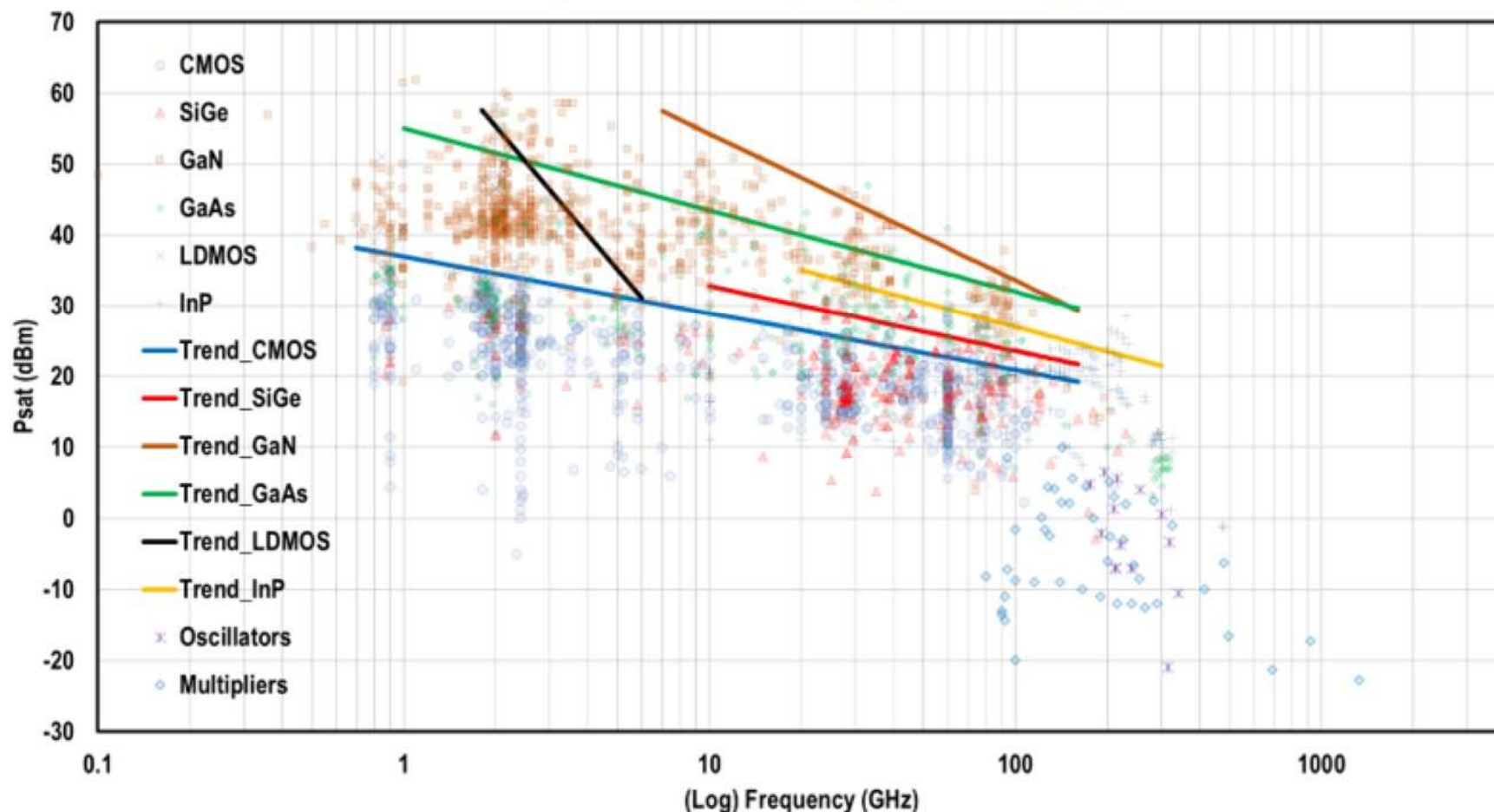


그림 출처: Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present, Hua Wang, Georgia-Tech Electronics and Micro-Systems (GEMS) Lab, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology

5. 공정별 전력증폭기 성능 동향

GAN POWER AMPLIFIERS

- W 대역 이하에서는 대부분 30 dBm 이상 출력 전력

- Mobile application 의 경우 대부분 $P_{sat} < 30$ dBm (Max. 33 dBm)
- GaN Power amplifier는 대부분 스몰셀 및 기지국 응용

Saturated Output Power vs. Frequency (GaN)

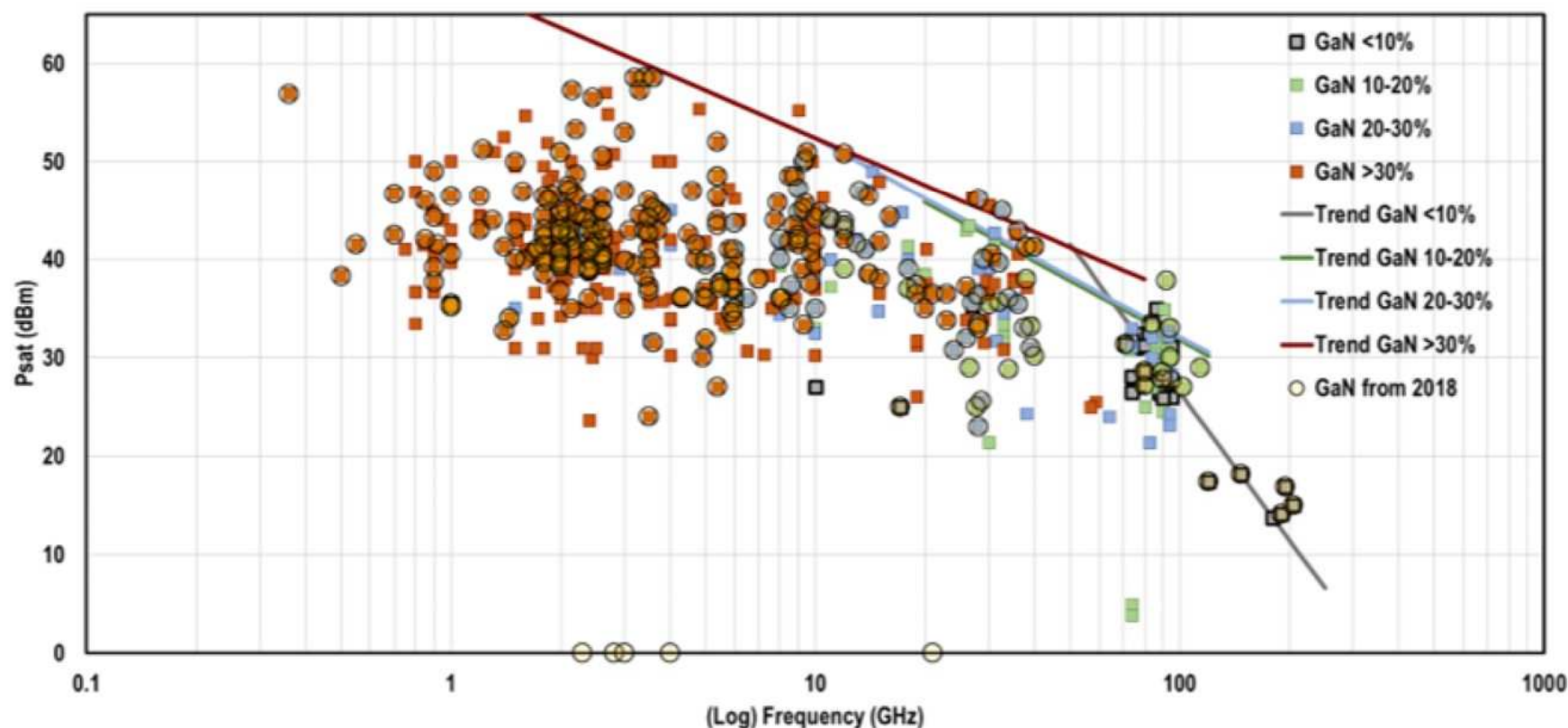
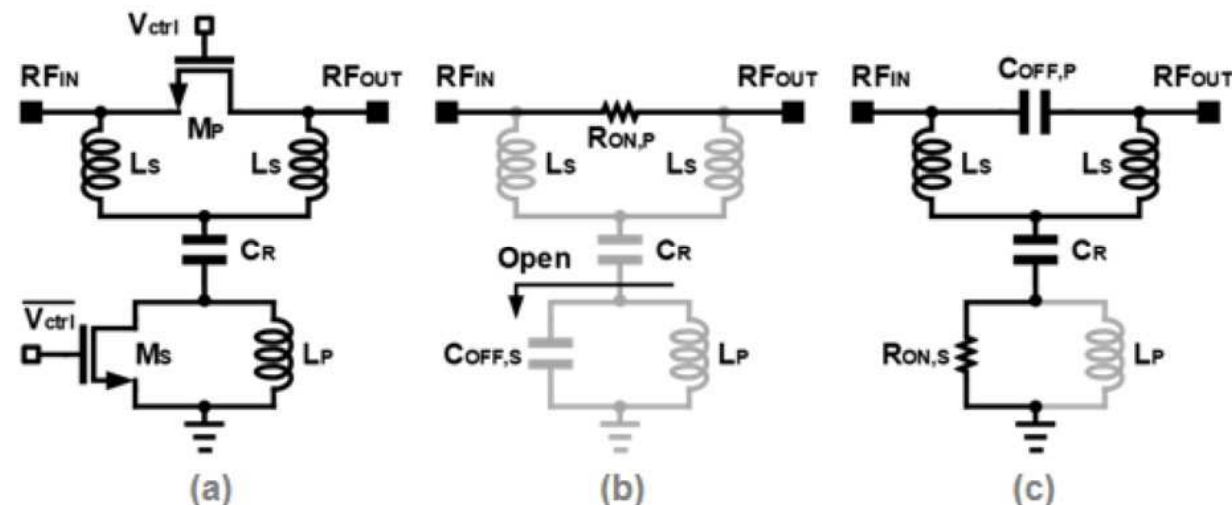


그림 출처: Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present, Hua Wang, Georgia-Tech Electronics and Micro-Systems (GEMS) Lab, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology

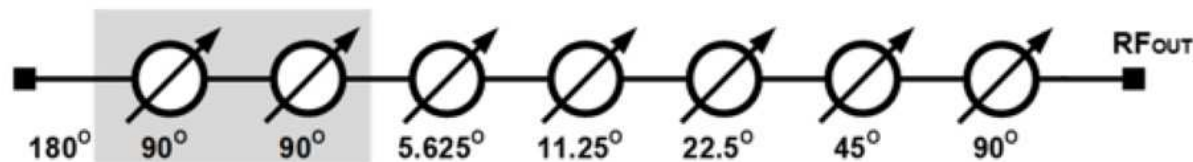
6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

36 ~ 39 GHz 6-BIT PHASE SHIFTER (1/4)

- Win Semiconductor 150nm (NP15)
- Ref.: S. Kim, S. Jang, J. Lee, H. Jeong, K. -J. Kim and C. Park, "Ka-Band GaN HEMT Phase Shifter With T-Type Structure for Beamforming Applications," IEEE Microw. Wireless Technol. Lett., vol. 33, no. 6, pp. 743-746.



T-type structure: (a) schematic of the used low-pass T-type structure, and equivalent circuits for the (b) pass- and (c) shift-states.



Overall structure of the designed phase shifter.

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

36 ~ 39 GHz 6-BIT PHASE SHIFTER (2/4)

- Chip size: 3,740 x 0.980 mm².

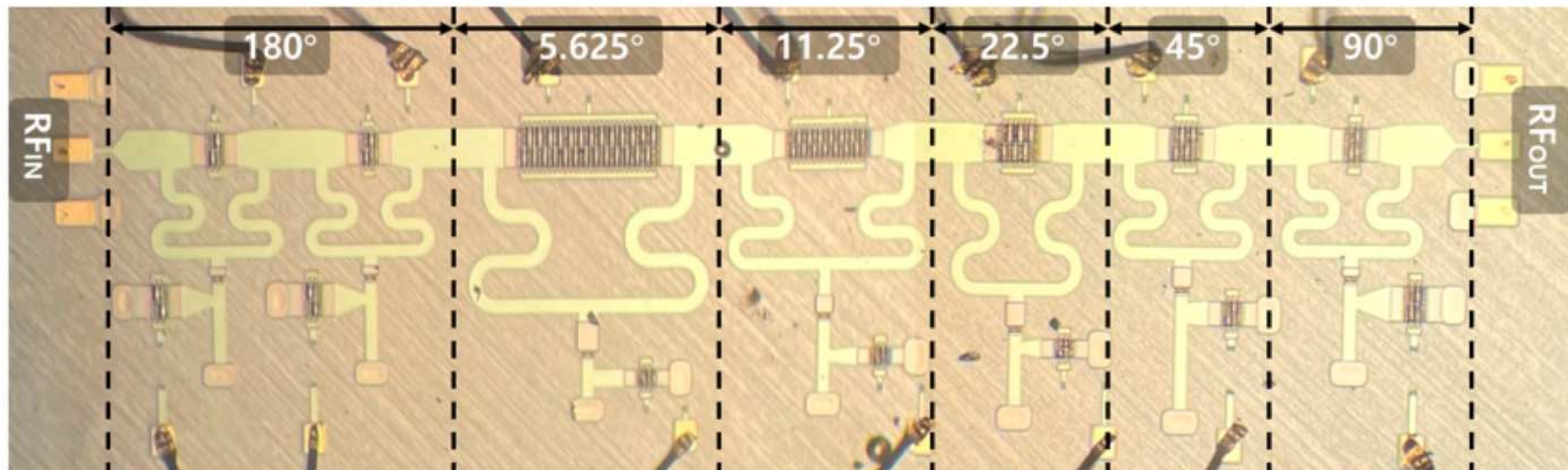


$$L_{EQ} = \frac{L_S}{1 - 2\omega^2 L_S C_{OFF,P}},$$

$$C_{EQ} = \frac{1 - 2\omega^2 L_S C_{OFF,P}}{\omega^4 L_S^2 C_{OFF,P}}$$

$$L_S = \frac{L_{EQ}}{1 + 2\omega^2 C_{OFF,P} L_{EQ}} < L_{EQ}$$

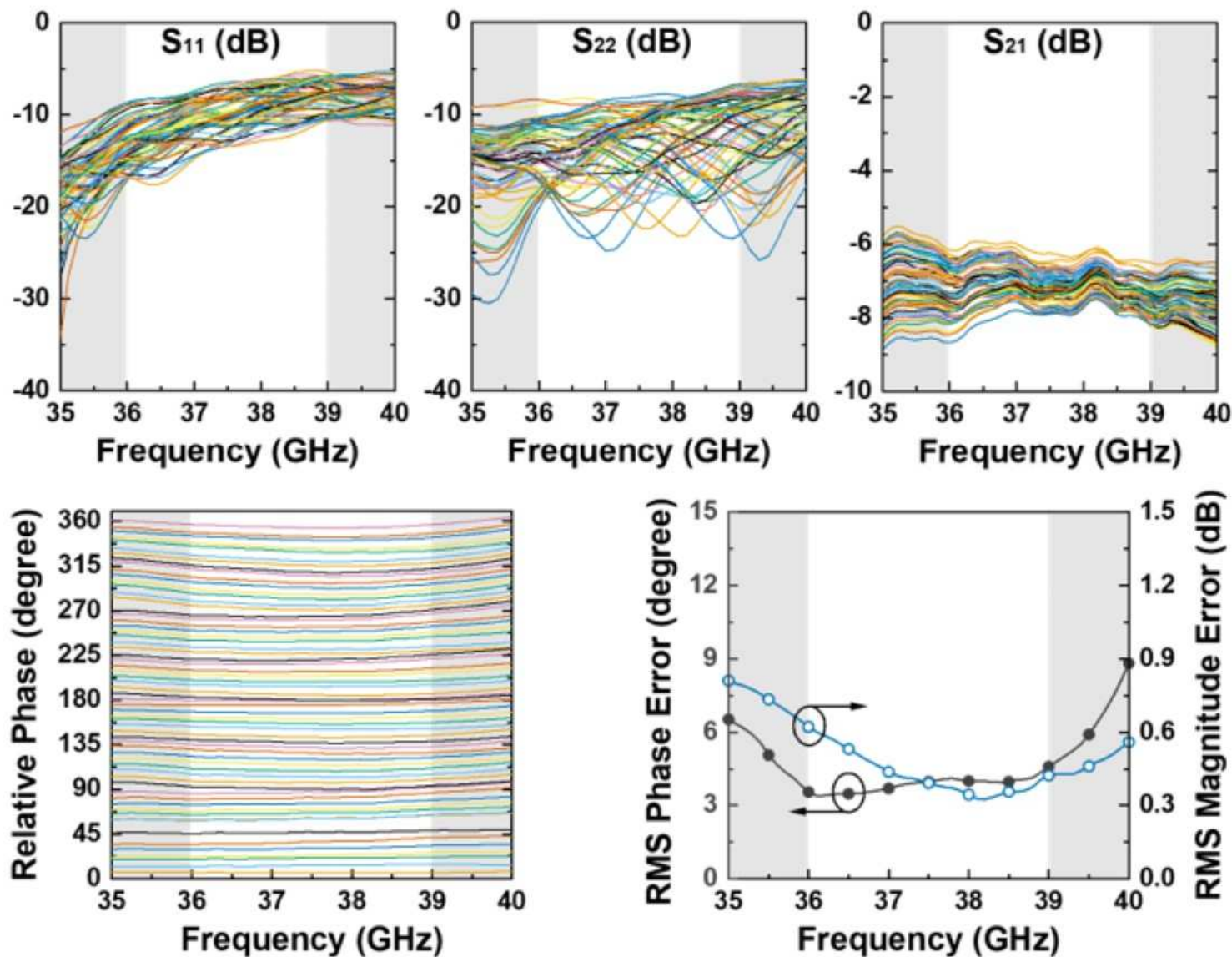
Equivalent circuit of unit-bit in shift-state considering the parasitic capacitance effect of M_P .



Chip photograph of the designed Ka-band GaN phase shifter.

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

36 ~ 39 GHz 6-BIT PHASE SHIFTER (3/4)



Measurement results

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

36 ~ 39 GHz 6-BIT PHASE SHIFTER (4/4)

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	This Work
Technology	0.25 μm GaN HEMT	0.25 μm GaN HEMT	0.25 μm GaN HEMT	0.15 μm GaAs pHEMT	0.15 μm GaAs HEMT	0.15 μm GaN pHEMT
Freq. (GHz)	8-12	8-12	8-10	10-14	18-20	36-39
Bits	5	5	3	3	4	6
I/O Return loss(dB)	< 9 / < 8.5	< 8	< 9 / < 8.5	< 8.5 / < 7	< 9.8	< -5.1/< -6.7
Insertion loss (dB)	12	11.65 \pm 3.45	13.5 \pm 1.5	6.5 \pm 1.5	9 \pm 1	> 8.68
RMS phase error (°)	5.5	2.52 – 6.23	< 3	< 15	< 5	< 4.60
RMS magnitude error (°)	0.8	0.41 – 1.16	1.1	< 1.1		< 0.62
Chip size (mm ²)	1.9 \times 4.5	6	4.1 \times 2.5	1.5 \times 1	2 \times 1	3.665

[1] P. Sun, H. Liu, Z. Zhang, M. Geng, R. Zhang, and W. Luo, "X-band 5-bit MMIC phase shifter with GaN HEMT technology," Solid. State. Electron., vol. 136, 2017.

[2] H. C. Chiu, C. M. Chen, L. C. Chang, and H. L. Kao, "A 5-bit x-band GaN HEMT-based phase shifter," Electron., vol. 10, no. 6, 2021.

[3] P. Sun, H. Liu, M. Geng, R. Zhang, T. Yuan, and W. J. Luo, "High power 3-bit GaN high-pass/low-pass phase shifter for X-band applications," Microelectron. Int., vol. 35, no. 2, 2018.

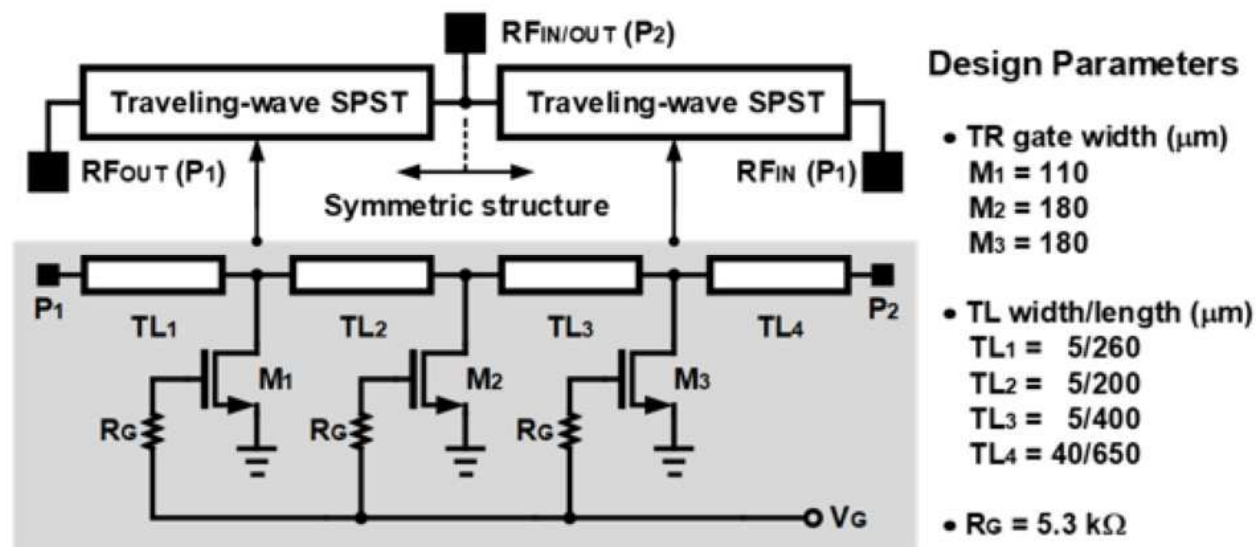
[4] J. H. Tsai, Y. T. Kuo, and H. C. Yu, "A Ku-band 3-bit phase shifter MMIC using GaAs pHEMT technology for phased array system," Microw. Opt. Technol. Lett., vol. 57, no. 4, 2015.

[5] K. T. Trinh, C. H. Lin, H. L. Kao, H. C. Chiu, and N. C. Karmakar, "18-20 GHz compact passive 4-bit GaAs MMIC phase shifter with low insertion loss," in Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC, 2019, vol. 2019-December.

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

18 ~ 42 GHz SPDT SWITCH (1/4)

- Win Semiconductor 150nm (NP15)
- Ref.: T. Kim, H. Im, S. -H. Lee, K. -J. Kim and C. Park, "Highly 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, pp. 987-990.



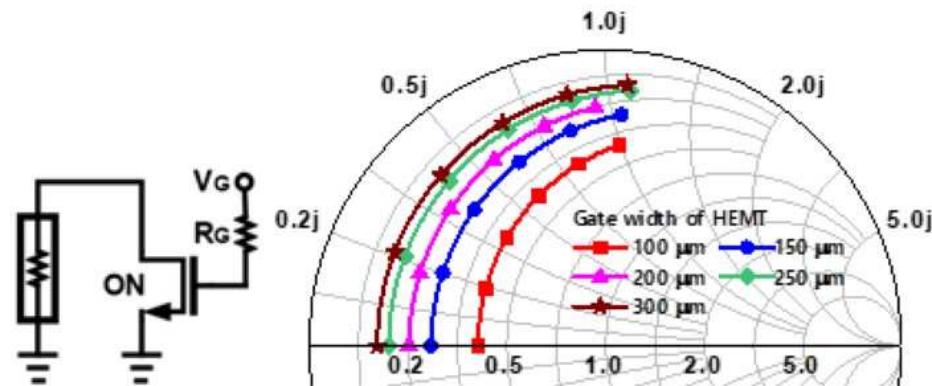
Schematic of the SPDT switch based on the traveling-wave concept.



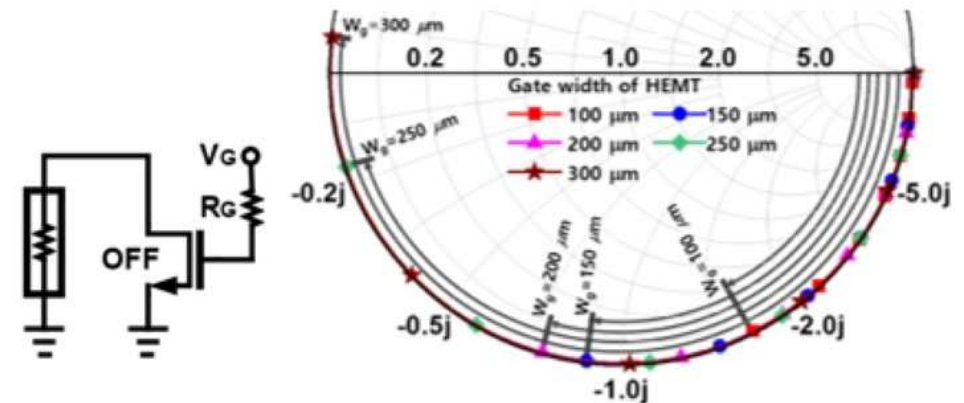
Microphotograph of the GaN SPDT switch

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

18 ~ 42 GHz SPDT SWITCH (2/4)

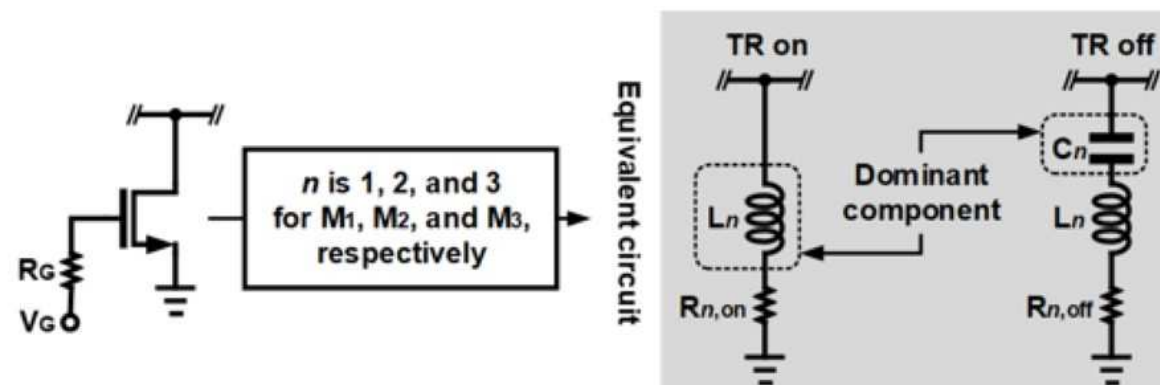


(a)



(b)

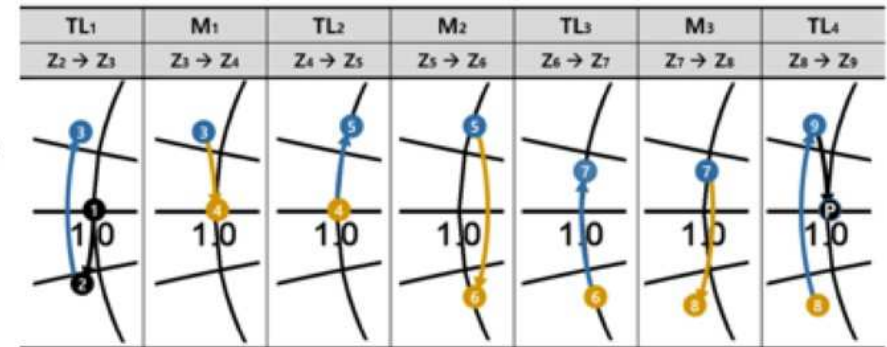
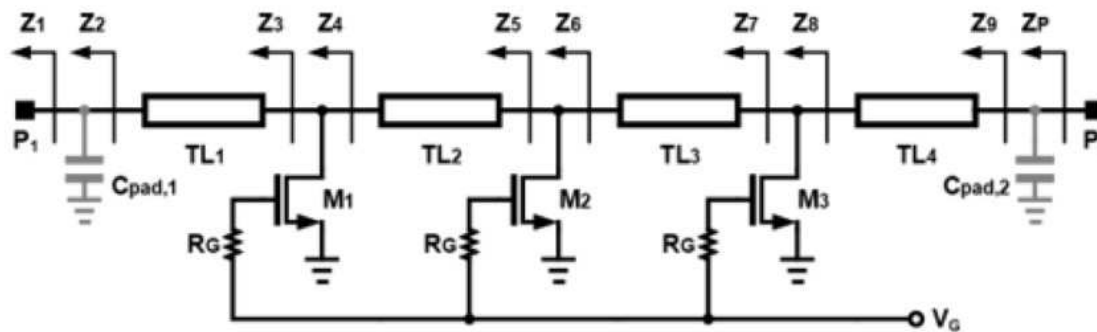
Simulated S-parameters of HEMT device (frequency range: dc - 50 GHz): (a) on-state, (b) off-state.



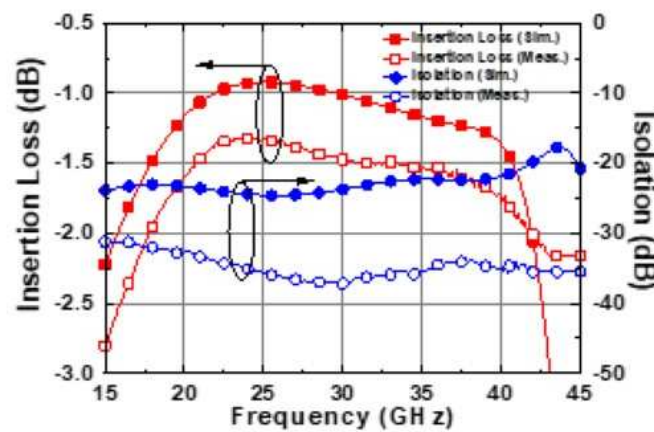
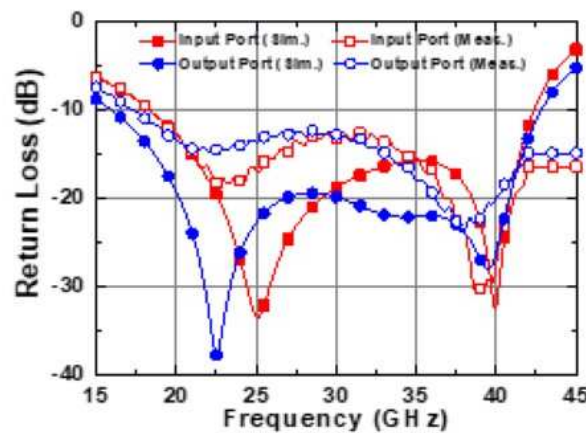
Equivalent circuit of HEMT device for on- and off-states

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

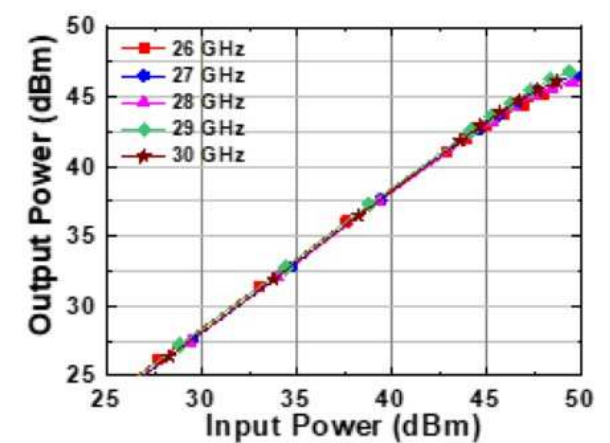
18 ~ 42 GHz SPDT SWITCH (3/4)



Matching process of the on-state SPST switch



Measurement results



6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

18 ~ 42 GHz SPDT SWITCH (4/4)

Reference	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	This Work
Process	90-nm CMOS	90-nm CMOS	100-nm GaAs HEMT	45-nm SOI CMOS	150-nm GaAs HEMT	130-nm SiGe HBT	150-nm GaN HEMT
Topology	Traveling-wave	Traveling-wave	Traveling-wave	Series-shunt	Traveling-wave	Series-shunt	Traveling-wave
Freq. (GHz)	DC-60	50-94	15-80	DC-50	36-38	DC-110	18-42
RL (dB)	> 10	> 20	> 10	NA	> 8.1	> 10.9	> 9.6
IL (dB)	< 3	< 3.3	< 3.6	0.76 @30 GHz	< 3.2	2.5 @60 GHz	< 2
ISO (dB)	> 48	> 27	> 25	23 @30 GHz	> 28	27.3 @60 GHz	> 32.2
IP1dB (dBm)	17	15 @77 GHz	27 @35 GHz	29 @30 GHz	12 @37 GHz	17.1 @60 GHz	49.5 @27 GHz
Chip size (mm ²)	0.68 × 0.87	0.57 × 0.42	1.0 × 1.0	0.16 × 0.025	1 × 1.1	0.54 × 0.18	3.7 × 0.51

- [1] H.-Y. Chang and C.-Y. Chan, "A low loss high isolation DC-60 GHz SPDT traveling-wave switch with a body bias technique in 90 nm CMOS Process," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 20, no. 2, pp. 82-84, Feb. 2010.
- [2] S.-F. Chao, H. Wang, C.-Y. Su and John G. J. Chern, "A 50 to 94-GHz CMOS SPDT switch using traveling-wave concept," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 17, no. 2, pp. 130-132, Feb. 2007.
- [3] K.-Y. Lin, W.-H. Tu, P.-Y. Chen, H.-Y. Chang, H. Wang and R.-B. Wu, "Millimeter-wave MMIC passive HEMT switches using traveling-wave concept," IEEE Trans. Microw. Theory. Techn., vol. 52, no. 8, pp. 1798-1808, Aug. 2004.
- [4] C. Li, B. Ustundag, A. Kumar, M. Boenke, U. Kodak, and G. Rebeiz, "0.8dB IL 46dBm OIP3 Ka band SPDT for 5G communication," in Proc. IEEE 18th Topical Meeting Silicon Monolithic Integr. Circuits RF Syst. (SiRF), Anaheim, CA, USA, Jan. 2018, pp. 1-3.
- [5] K. T. Trinh, H.-L. Kao, H.-C. Chiu and N. C. Karmakar, "A Ka-Band GaAs MMIC traveling-wave switch with absorptive characteristic," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 29, no. 6, pp. 394-396, Jun. 2019.
- [6] C. Tinella, J.M. Fournier, D. Belot and V. Knopik, "A high-performance CMOS-SOI antenna switch for the 2.5-5-GHz band," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 38, no. 7, pp. 1279-1283, Jul. 2003.

CONTENTS

1. 5G 이동통신 기술

- 5G 통신 방식상 small-cell 수요 증가에 따른 GaN power amplifier 시장 확대 예상

2. GAN RF 소자·공정 기술

- 세계 GaN Foundry GaN-on-SiC 가 주도 / 해외 Foundry가 독점적 시장 지배

3. 5G 응용을 위한 GAN 전력증폭기

- 5G / 6G 기지국용 GaN power amplifier 시장 확대 예상

4. 주파수별 전력증폭기 성능 동향

- GaN power amplifier: 최소 30 dBm 이상의 응용분야에 적용

5. 공정별 전력증폭기 성능 동향

- GaN power amplifier: 최소 30 dBm 이상의 응용분야에 적용

6. IMS LAB. DESIGN EXAMPLES

- Phase shifter, attenuator, switch, and power amplifier

APPENDIX

- 보충 자료

APPENDIX

□ A1. Case study: W-Band GaN Power Amplifiers

Changkun Park

2023.08.23

Intelligent Microwave Systems Lab.

School of Electronic Engineering, College of Information Technology

Soongsil University

A1. CASE STUDY: W-BAND GAN POWER AMPLIFIERS

독일: Faunhofer Institute for Applied Solid State Physics – 2018년

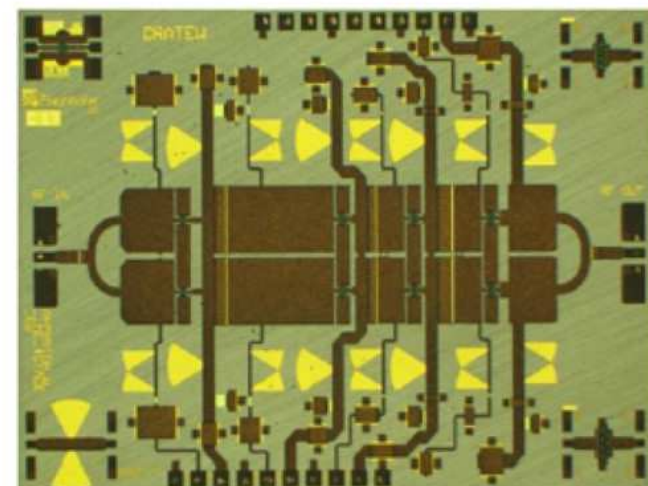
- 문헌: "Full W-Band GaN Power Amplifier MMICs Using a Novel Type of Broadband Radial Stub," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 66, no. 12, pp. 5664–5675, Dec. 2018.
- 공정: 100-nm GaN HEMT (Substrate: SiC, Thickness: 75 μm), $f_T = 95$ GHz, $f_{\text{MAX}} = 280$ GHz.
- Power Combiner

Corporate TL power combiner/divider를 입력부 및 출력부에 사용.

전송선로의 특성임피던스를 17 Ω 으로 낮게 형성 (0.5 m metal width) \rightarrow 낮은 저항성 손실, 광대역 특성 확보

항목	단위	성능		비고
		3-stage	4-stage	
동작주파수	GHz	70 – 110	70 – 110	-
출력전력	dBm	27.2	28.6	average (70 – 110)
전력이득	dB	> 10	> 13	-
효율	%	> 6.5	> 6.1	average (70 – 110)
크기	mm ²	3.75 X 3.0	4.25 X 3.0	-

Measurement results



Chip photograph

A1. CASE STUDY: W-BAND GAN POWER AMPLIFIERS

미국: Raytheon – 2011년 (High Gain/Efficiency/Power Versions)

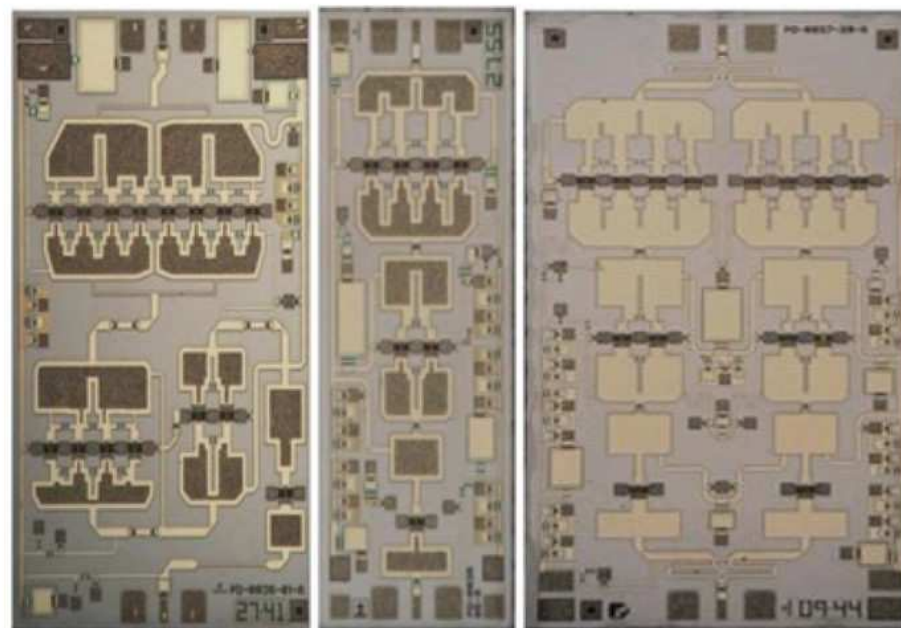
- 문헌: "W-Band GaN Power Amplifier MMICs," in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Jun. 2011.
- 공정: 150-nm GaN HEMT (Substrate: SiC, Thickness: 50 μm), $f_T = -$ GHz, $f_{\text{MAX}} = -$ GHz.
- Power Combiner

Corporate TL power combiner/divider를 각 단의 입력부 및 출력부에 사용. (2nd, 3rd 및 4th stages)

전송선로폭을 두껍게 하여 특성임피던스를 낮게 형성 \rightarrow 낮은 저항성 손실, 광대역 특성 확보

항목	단위	전력 증폭기별 성능			비고
		High Gain	High Eff.	High Pout	
동작주파수	GHz	95	91	91	-
$P_{3\text{dB}}$	Watt	1.3	1.2	1.7	-
전력이득	dB	21	16	> 15	-
효율	%	10	> 20	11	@ $P_{3\text{dB}}$
크기	mm^2	2.5 X 1.6	2.5 X 0.9	2.9 X 1.6	-
V_{DS}	V	15.0	17.5	20.0	-
Power density	mW/mm^2	330	530	366	-

Measurement results



Chip photograph (High gain/efficiency, power versions)

A1. CASE STUDY: W-BAND GAN POWER AMPLIFIERS

중국: Nanjing Electronic Devices Institute – 2016년

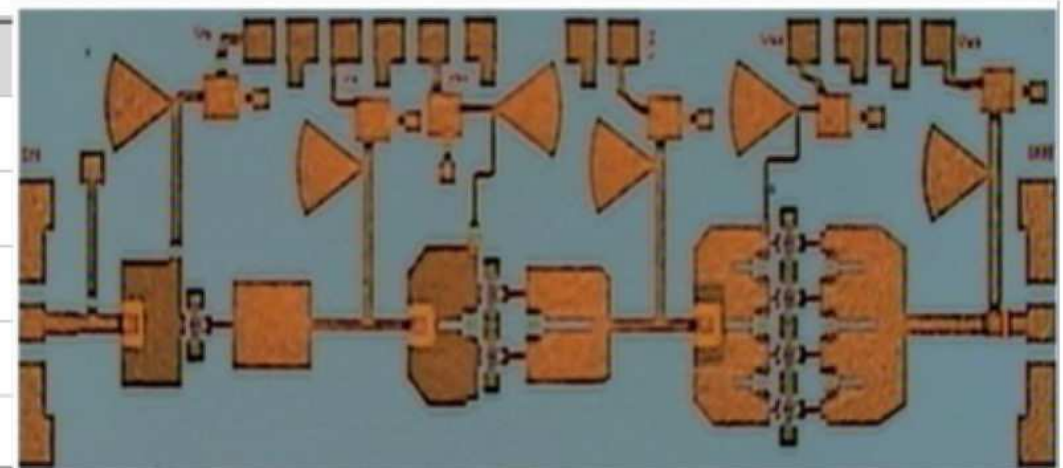
- 문헌: "W-Band MMIC PA With Ultrahigh Power Density in 100-nm AlGaIn/GaN Technology," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 63, no. 10, pp. 3882–3886, Oct. 2016.
- 공정: 100-nm GaN HEMT (Substrate: SiC, Thickness: - μm), f_T = - GHz, f_{MAX} = - GHz.
- Power Combiner

Corporate TL power combiner/divider를 각 단의 입력부 및 출력부에 사용. (2nd 및 3rd stages)

전송선로폭을 두껍게 하여 특성임피던스를 낮게 형성한 것으로 예측 됨 → 낮은 저항성 손실, 광대역 특성 확보

항목	단위	성능	비고
동작주파수	GHz	90 – 97	-
출력전력	dBm	> 31.5	32.2 dBm peak power @ 93 GHz
전력이득	dB	16.7	peak small signal gain
효율	%	21	w/ power gain 13.7 dB @ 93 GHz
크기	mm ²	-	-

Measurement results



Chip photograph

A1. CASE STUDY: W-BAND GAN POWER AMPLIFIERS

미국: California Institute of Technology – 2018년

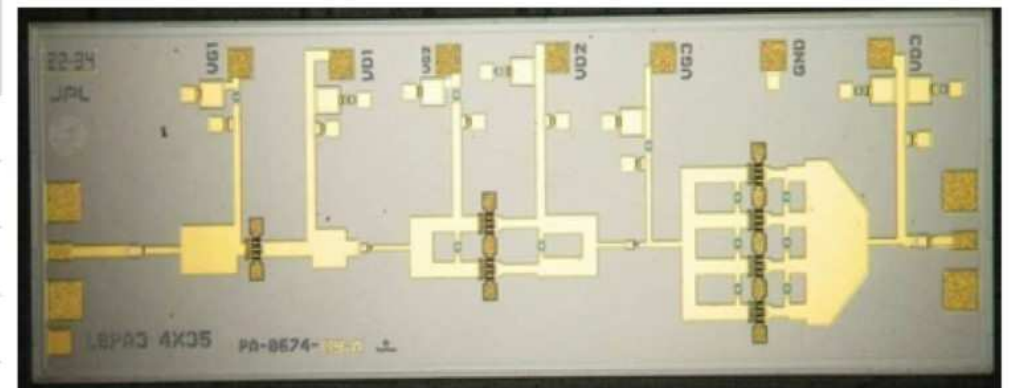
- 문헌: "A W-Band Spatial Power-Combining Amplifier using GaN MMICs," in 15th European Radar Conference (EuRAD), Sep. 2018.
- 공정: 150-nm GaN HEMT (Substrate: SiC, Thickness: 50 μm), $f_T = -$ GHz, $f_{\text{MAX}} = -$ GHz.
- Power Combiner

Corporate TL power combiner/divider를 각 단의 입력부 및 출력부에 사용. (2nd 및 3rd stages)

전송선로폭을 두껍게 하여 특성임피던스를 낮게 형성한 것으로 예측 됨 → 낮은 저항성 손실, 광대역 특성 확보

항목	단위	성능		비고
		단일 MMIC	최종 증폭기	
동작주파수	GHz	94	94 – 97	-
출력전력	dBm	30	33	w/ $V_{\text{DS}} = 14$ V
전력이득	dB	16*	14	w/ $V_{\text{DS}} = 10$ V
peak 효율	%	15*	15	w/ $V_{\text{DS}} = 14$ V
크기	mm ²	-	-	-

Measurement results



Chip photograph

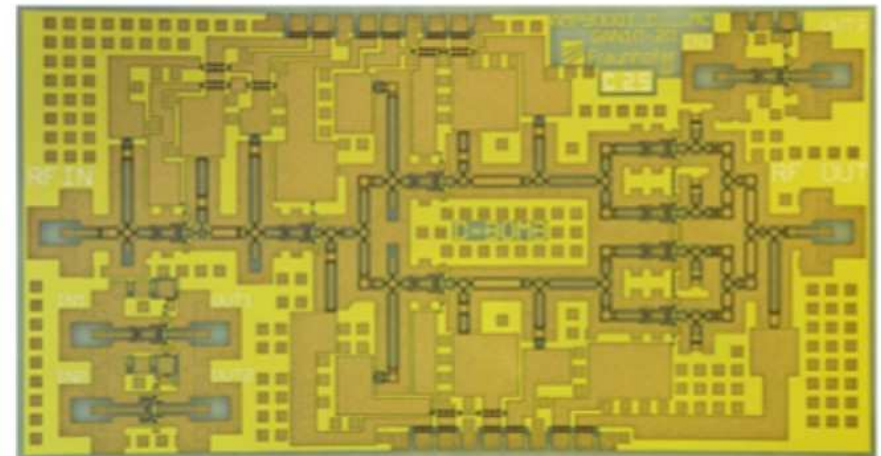
A1. CASE STUDY: W-BAND GAN POWER AMPLIFIERS

독일: Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF – 2019년

- 문헌: "D-Band and G-Band High-Performance GaN Power Amplifier MMICs", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 67, No. 12, Dec. 2019.
- 공정: 100-nm GaN HEMT (Substrate: SiC, Thickness: 70 μm), $f_T = 100$ GHz, $f_{\text{MAX}} = 300$ GHz.
- **Power Combiner**
1 : 1 : 2 : 4 비율의 다단 구조이며, 3rd 및 4th stage는 단위 증폭을 병렬로 결합
GCPW 구조를 사용하여 CPW 구조 대비 낮은 특성 임피던스 확보 및 선로폭에 대한 둔감성 확보

항목	단위	성능	비고
동작주파수	GHz	107 – 148	D-band
출력전력	dBm	26.4	@ 120 GHz
전력이득	dB	> 25	-
효율	%	11.5	@ 120 GHz
크기	mm ²	7.5	-

Measurement results



Chip photograph

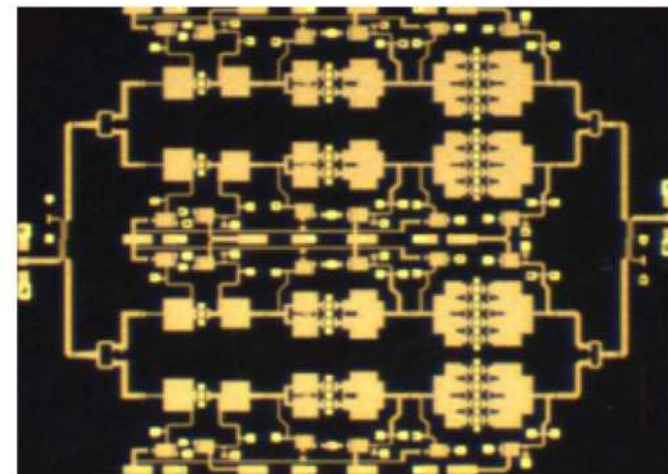
A1. CASE STUDY: W-BAND GAN POWER AMPLIFIERS

중국: Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory–
2020년

- 문헌: "A W-Band Power Amplifier with Distributed Common-Source GaN HEMT and 4-Way Wilkinson-Lange Combiner Achieving 6W Output Power and 18% PAE at 95GHz", International Solid- State Circuits Conference(ISSCC) Feb, 2020 .
- 공정: 150-nm GaN HEMT (Substrate: -, Thickness: - μm), f_T = - GHz, f_{MAX} = - GHz.
- Power Combiner
1 : 2 : 4 비율의 다단 구조의 단위 전력증폭기를 총 4개를 결합 함.
Wilkinson 및 Lange 결합기를 혼용하여 대역폭 및 고출력 확보

항목	단위	성능	비고
동작주파수	GHz	93 – 99	-
출력전력	dBm	37.8	@ 92 GHz
전력이득	dB	15.3	-
효율	%	18.3	@ 95.5 GHz
크기	mm ²	16.72	-

Measurement results



Chip photograph