

W-band Driver and Power Amplifiers in 0.1 μm GaAs pHEMT Process

0.1 μm GaAs pHEMT 공정을 활용한 W-대역 구동 및 전력 증폭기

Seong-Hee Han · Dong-Wook Kim

한성희* · 김동욱†

Abstract

This paper presents the design and fabrication of the 2-stage driver amplifier and 3-stage power amplifier MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuits) for the transmitter modules of W-band military and commercial systems using 0.1 μm GaAs pHEMT process. The stabilization circuits were utilized in the gate and drain bias circuits and the impedance matching circuits were effectively implemented using RF pads for the compactness of the chip. The two-stage driver amplifier exhibited a linear gain of more than 9 dB and an output return loss of more than 10 dB from 92 to 98 GHz. The three-stage power amplifier had a linear gain of 12~13.6 dB and an output power of about 19 dBm from 90 to 98 GHz. The fabricated driver and power amplifier MMICs occupy $1 \times 1 \text{ mm}^2$ and $1 \times 1.5 \text{ mm}^2$, including RF pads and DC pads.

Key Words

GaAs pHEMT, W-band, Power amplifier, MMIC

1. Introduction

높은 정밀도의 고해상도 레이더, 초고속 데이터 전송 속도가 요구되는 5G 및 6G 무선통신 시스템, 복사체 열에너지 감지하는 수동 영상감시 시스템 등이 밀리미터파 주파수 대역에서 널리 개발되고 있다[1-3]. 초고속, 고정밀 밀리미터파 시스템의 송수신 모듈에 활용되는 전력 증폭기는 저잡음 특성을 요구하는 수신기와 달리 트랜지스터가 최대 출력 전력을 낼 수 있는 부하 임피던스로의 정합을 중시하며, 전력 증폭기를 구동하는 증폭기는 충분한 이득과 적정 수준의 선형성을 요구한다.

전력 증폭기는 GaAs pseudomorphic high electron mobility transistor(pHEMT), Si complementary metal oxide semiconductor(CMOS) field effect transistor, InP double heterojunction bipolar transistor (DHBT), GaN HEMT 등을 사용하여 단일칩 마이크로파 집적 회로(monolithic microwave integrated circuit, MMIC) 공정으로 제작되어왔다[4,5]. 특히 밀리미터파 전력 증폭기들은 높은 전자 이동도, 낮은 턴온(turn-on) 전압, 낮은 누설 전류 특성, 높은 전력부가 효율 등을 가지는 GaAs HEMT를 사용하여 구현되었다[6-8].

본 논문에서는 0.1 μm GaAs pHEMT를 사용하여 W-대역, 특히 밀리미터파 수동영상 감지 시스템, 원격탐사, 근접 관관 등

민군겸용 개발 분야에서 널리 응용되고 있는 94 GHz를 중심으로 동작하는 구동 증폭기 및 전력 증폭기를 설계 및 제작하였으며[9-11], 구동 증폭기의 이득 확보와 전력 증폭기의 최대 출력 확보를 설계의 주요 목표로 설정하였다.

2. MMIC design

본 논문에서는 Win Semiconductor의 0.1 μm GaAs pHEMT 모델을 활용하였고, Keysight의 Advanced Design System(ADS) 소프트웨어를 활용하여 구동 증폭기 및 전력 증폭기를 설계하였다. Metal-Insulator-Metal(MIM) 캐패시터 및 박막 저항의 모델은 측정 결과로 검증된 등가 모델을 사용하였으며, 마이크로 스트립 전송선로 및 스텔브 등과 같은 수동소자는 2.5차원 모멘텀 전자파 시뮬레이션 모델을 회로 설계에 적용하였다.

2.1 Stabilization circuit

그림 1은 A급 바이어스 조건($V_{GS} = -0.45 \text{ V}$, $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$, $I_{DS} = 180 \text{ mA/mm}$)에서 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 와 $4 \times 50 \mu\text{m}$ pHEMT의 최대 가용 이득(maximum available gain, MAG)과 안정도 지수(K)의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 중심 주파수인 94 GHz에서 최대 가용 이득은 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 의 경우 6.3 dB, $4 \times 50 \mu\text{m}$ 의 경우

† Corresponding Author : Dept. of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Korea
E-mail: dwkim21c@cnu.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0003-1913-4714>
* Dept. of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Korea
<https://orcid.org/0000-0002-5103-9074>

Received: Apr. 10, 2023 Revised: Jun. 25, 2023 Accepted: Jun. 27, 2023

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

6.4 dB이며 안정도 지수 K는 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 와 $4 \times 50 \mu\text{m}$ 모두 65 GHz 미만에서 1보다 작아 소자가 불안정하므로 발진 억제제를 위한 소자 안정화가 필수적이다.

그림 2는 바이어스 회로에 안정화 기법을 적용한 예를 보여주고 있다. 일반적인 초고주파 전력 증폭기에서는 병렬 RC 회로를 트랜지스터의 게이트에 직렬로 연결하여 저주파 이득은 저항을 통해 감소시키고 고주파 이득은 캐패시터를 통해 유지하여 저주파 불안정성을 해소하는 방법을 많이 사용하였다 [12-14]. 그러나, 그림 1에 나타난 바와 같이 밀리미터파 대역에서는 트랜지스터의 최대 가용 이득 자체가 작아서 병렬 RC 회로를 트랜지스터에 직렬로 연결하는 방법은 효과적이지 않고, 집적회로의 크기를 증가시켜 단위 면적당 공정 제작비가 아주 비싼 W-대역 회로에 적용하기에는 적절하지 않다.

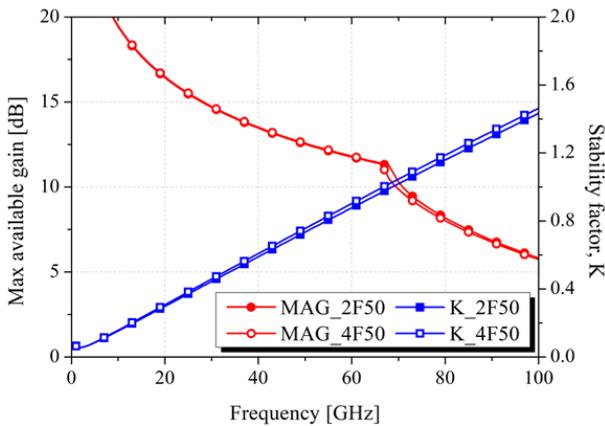


그림 1 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 및 $4 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 최대 가용 이득과 안정도 지수 K ($V_{GS} = -0.45 \text{ V}$, $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$, $I_{DS} = 180 \text{ mA/mm}$)

Fig. 1 Maximum available gain(MAG) and stability factor(K) of the $2 \times 50 \mu\text{m}$ and $4 \times 50 \mu\text{m}$ transistors ($V_{GS} = -0.45 \text{ V}$, $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$ and $I_{DS} = 180 \text{ mA/mm}$)

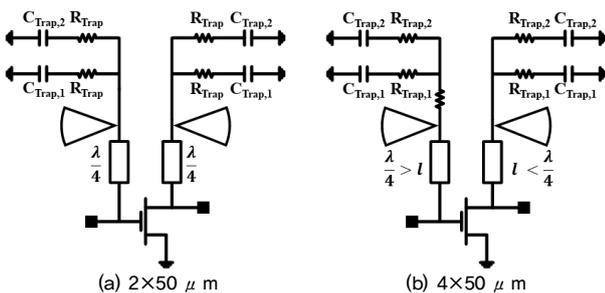


그림 2 W-대역 pHEMT 안정화 바이어스 회로

Fig. 2 Stabilization bias circuit of the W-band pHEMT

본 논문에서는 그림 2에 보인 바와 같이 $\lambda/4$ 의 전기적 길이를 가지는 방사형 스티브(radial stub)를 활용하여 설계 대역의 주파수에서 가상 접지를 구현함으로써 RF 신호가 바이어스 회로로 흐르는 것을 방지하는 RF choke 역할을 하도록 하였다 [15-17]. 또한, 직렬 RC 회로를 병렬(shunt)로 달아 손실 회로 역할을 하게 함으로써 설계 대역 이외의 주파수 대역에서 바이

어스 포트를 통한 루프 피드백 발진을 억제하고자 하였다[18,19]. 그림 3은 안정화 소자 추가에 따른 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 최대가용이득과 안정도 지수 k의 변화를 보여주고 있다. $4 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 경우 위에 제시된 방법과 더불어 게이트 바이어스 회로에 직렬 저항을 추가 삽입하였고 선로의 길이를 단축하여 안정성을 확보하였다[18,19].

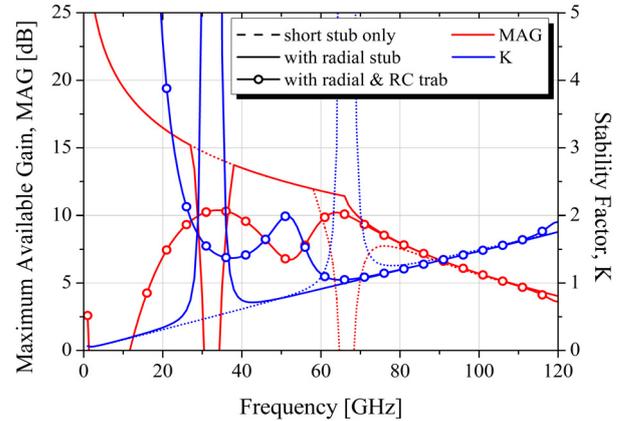


그림 3 안정화 소자 추가에 따른 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 최대가용이득과 안정도 지수 K 변화 ($V_{GS} = -0.45 \text{ V}$, $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$, $I_{DS} = 180 \text{ mA/mm}$)

Fig. 3 Variation of maximum available gain(MAG) and stability factor(K) of the $2 \times 50 \mu\text{m}$ transistor with the addition of stabilization elements ($V_{GS} = -0.45 \text{ V}$, $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$ and $I_{DS} = 180 \text{ mA/mm}$)

2.2 W-band driver amplifier

W-대역 밀리미터파 영역에서는 트랜지스터가 충분한 이득을 내지 못해 표 1에 제시된 설계 목표인 10 dB 이상의 이득을 위해서는 다단 증폭기 구조가 필요하다. 증폭기의 첫 번째 단에는 $2 \times 50 \mu\text{m}$ pHEMT를 사용하였고 두 번째 단에는 $4 \times 50 \mu\text{m}$ pHEMT를 사용하여 구동 출력을 증가시켰다.

표 1 W-대역 구동 증폭기 및 전력 증폭기의 설계 목표

Table 1 Design specifications of the W-band driver amplifier and power amplifier

Items	Driver amplifier	Power amplifier
Frequency [GHz]	90~98	
Linear gain [dB]	≥ 10	≥ 15
Return loss [dB]	≥ 15	≥ 10
Output power [dBm]	≥ 18	≥ 20
Drain voltage [V]	3.5	
Size [mm^2]	1.0	1.5

그림 4는 그림 2의 안정화 회로가 연결된 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 및 $4 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 이득-원과 로드-풀 및 소스-풀 시뮬레이션 결과를 보여준다[20,21]. 그림 4의 이득-원, 로드-풀 및 소스-풀 결과는 $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$, $I_{DS1} = 18 \text{ mA}$, $I_{DS2} = 36 \text{ mA}$ 의 바이어스 조건에서 진행되었으며, 로드-풀 및 소스-풀의 등고선(contour) 그림은 16 dBm의 입력 전력이 인가되었을 때의 결과이다. 그림 4의 GA-

circle은 94 GHz에서 트랜지스터의 부하가 공액 정합 되었을 때 소스의 이득을 중심으로 동일한 이득 열화를 가지는 소스 임피던스 궤적을 나타낸다. GP-circle은 특정 이득을 가지는 부하 임피던스 궤적을 표시하고 있다. $2 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 GA-circle 중심점은 $7.33 - j13.75 \Omega$, GP-circle의 중심점은 $12.56 + j8.45 \Omega$ 이며, 소스 임피던스 $Z_{S,1}$ 과 부하 임피던스 $Z_{L,1}$ 은 88~100 GHz에서 최적 이득 소스 및 부하 임피던스 궤적을 나타낸다.

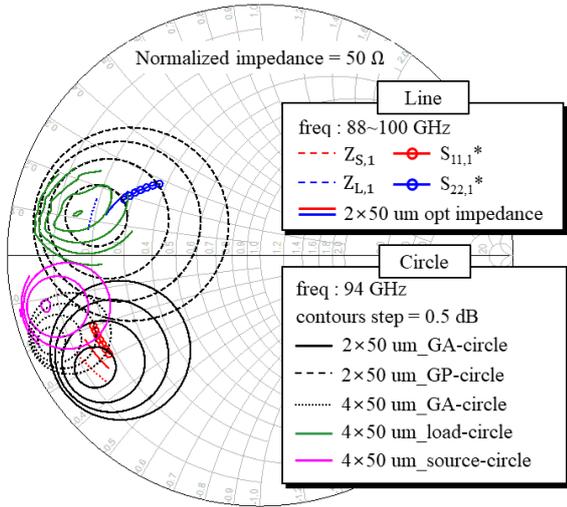


그림 4 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 이득-원 및 $4 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 로드-풀/소스-풀 시뮬레이션 결과
 Fig. 4 Simulation results for the gain-circles of the $2 \times 50 \mu\text{m}$ transistor and the load/source-pull contours of the $4 \times 50 \mu\text{m}$ transistor

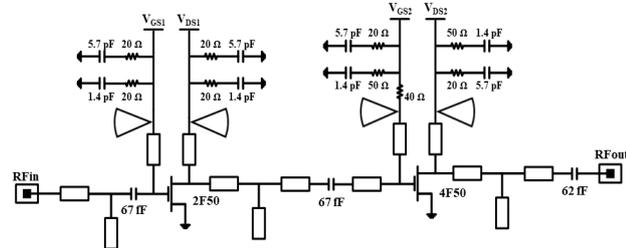


그림 5 2단 구동 증폭기 회로도
 Fig. 5 Schematic circuit of the two-stage driver amplifier

구동 증폭기의 이득 및 선형성 확보를 위하여 첫 번째 단의 경우 $Z_{S,1}$ 및 $Z_{L,1}$ 과 트랜지스터의 임출력 반사 계수의 복소값 (S_{11}^* , S_{22}^*)이 절충되는 영역의 임피던스(그림 4의 opt impedance)를 설계 임피던스로 설정하였다[22]. 두 번째 단은 $4 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 소스-풀 궤적이 GA-circle의 궤적과 크게 다르지 않아 GA-circle과 중첩되는 소스-풀 궤적을 기준으로 회로를 설계해도 원하는 수준의 이득을 확보할 수 있어 소스-풀 임피던스를 기준으로 설정하였다.

그림 5는 설계된 2단 구동 증폭기의 회로도를 도시하였으며, 칩의 소형화를 위해 RF 패드를 임피던스 정합 소자의 일부로 활용하였다. 패드 중앙에 위치하는 프로브의 위치를 고려하여 패드 크기의 절반 부분은 개방 스텐브(open stub)로 해석하였다. 후면 접지와의 연결에 필요한 비아홀(via hole)과 전송선로와의 간격, 전송선로와 전송선로 사이의 간격은 커플링에 의한 성능 열화가 일어나지 않는 범위에서 설정되었다. 입력 및 출력 정합 회로를 최대한 간단하게 구성할 수 있도록 임피던스가 조정되었으며 최종 제작된 칩의 크기는 그림 6에 나타난 바와 같이 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 이다.

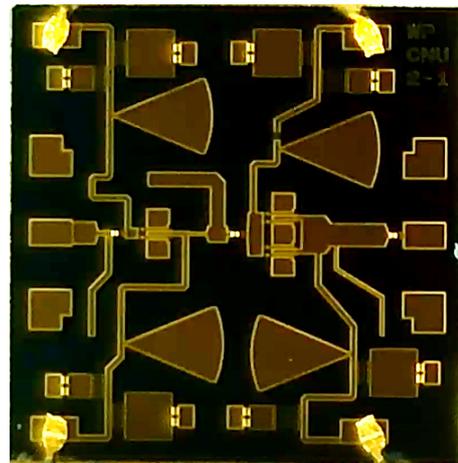


그림 6 제작된 W-대역 구동 증폭기 MMIC
 Fig. 6 Fabricated W-band driver amplifier MMIC

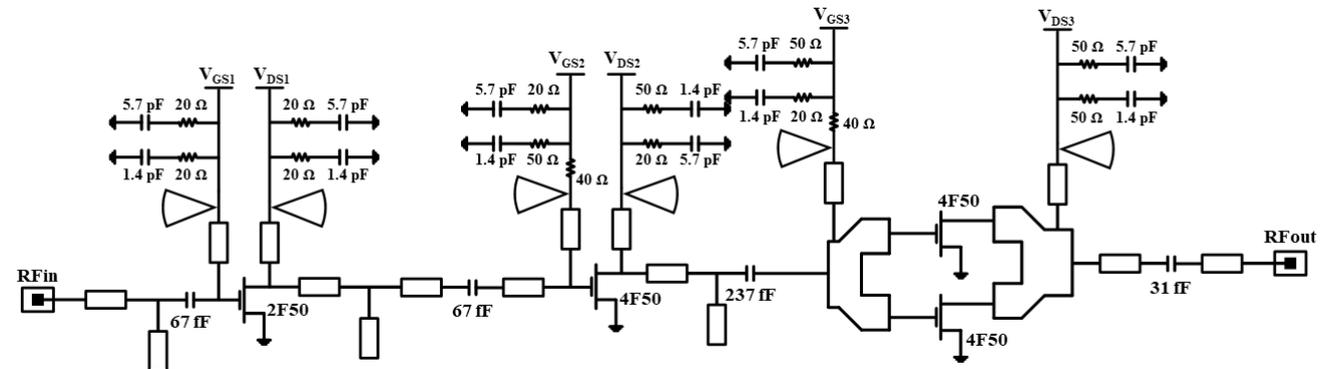


그림 7 3단 전력 증폭기 회로도
 Fig. 7 Schematic circuit of the three-stage power amplifier

2.3 W-band power amplifier

그림 7의 W-대역 3단 전력 증폭기는 세 번째 단으로 충분한 전력이 전달될 수 있도록 두 번째 단까지는 2.2절의 2단 구동 증폭기 구조를 활용하였다. 세 번째 단은 $4 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터 2개를 병렬 연결하여 출력 전력을 높이는 구조를 선택하였다 [23]. 그림 4의 $4 \times 50 \mu\text{m}$ 트랜지스터의 로드-풀 및 소스-풀 시뮬레이션 결과를 활용하여 최대출력 정합을 진행하였으며, DC 차단을 위한 커패시터는 인터디지탈(interdigital) 커패시터를 사용하였다. 임피던스 정합에 필요한 커패시터의 값이 작아 W-대역에서 사용 가능한 자기 공진 주파수(self resonance frequency, SRF)를 가지는 MIM 커패시터로는 충분한 전력을 견딜 수 없고, 기생 커패시턴스 성분이 커패시터 용량 값의 부정확성을 만들 수 있다. 따라서, 선로 폭, 면적 및 임피던스 변환 측면에서 설계 자유도가 높은 인터디지탈 커패시터를 사용하여 W-대역 전력 증폭기 칩을 그림 8과 같이 $1 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 크기로 구현하였다[24].

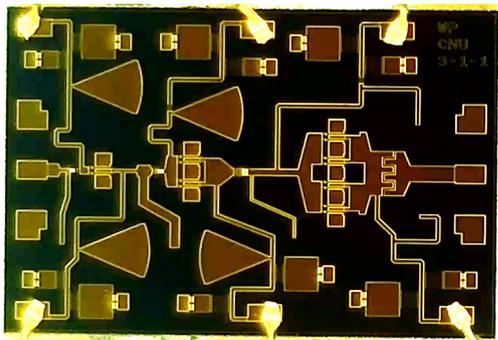


그림 8 제작된 W-대역 전력 증폭기 MMIC
Fig. 8 Fabricated W-band power amplifier MMIC

3. MMIC measurement

구동 증폭기 및 전력 증폭기 MMIC는 캐리어 위에 실버 에폭시 작업으로 부착하였으며, 미세한 저주파 신호의 발전을 억제하기 위하여 DC 패드와 DC 바이어스 전압 사이의 게이트 및 드레인 바이어스 회로에 10 nF와 100 pF의 단일층 커패시터(single layer capacitor, SLC)를 병렬로 배치하여 와이어본딩으로 연결하였고 10 μF 탄탈 커패시터를 PCB 위에 추가하여 측정을 진행하였다[25]. 칩의 효율적인 열 방출을 위하여 PCB 하단에는 heat sink를 위한 Al jig를 배치하였다.

S-파라미터 측정은 온 웨이퍼 프루브 시스템 및 주파수 확장(extender) 모듈을 사용하여 진행되었으며, 대신호 측정은 소스 모듈과 하모닉 믹서를 활용하여 고주파 믹싱 방법으로 측정하였다[26,27].

그림 9는 $V_{DS}=3.5 \text{ V}$, $I_{DS1}=20 \text{ mA}$, $I_{DS2}=40 \text{ mA}$ 의 바이어스 조건에서 2단 구동 증폭기의 S-파라미터 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하고 있다. 이득은 92~94 GHz에서 약 9.5 dB가 측정되었으며 90~98 GHz 주파수에서 9 dB 이상의 이득을 확보

하였다. 전체 주파수 대역 기준으로 이득 특성은 약 2 GHz 상향 이동하였다. 출력 반사 계수는 설계 주파수 대역에서 10 dB 이상으로 측정되어 시뮬레이션과 거의 유사한 결과를 얻었다.

3단 전력 증폭기는 발진을 해결하기 위하여 3단 게이트 바이어스 회로의 직렬 저항을 200 Ω 으로 변경하고 드레인 바이어스 회로에 10 Ω 의 직렬 저항을 삽입하였다. 드레인 전압은 저항을 통한 전압 강하와 트랜지스터의 전달 컨덕턴스를 고려하여 4 V를 인가하였다. 그림 10은 $V_{DS}=4 \text{ V}$, $I_{DS1}=19 \text{ mA}$, $I_{DS2}=36 \text{ mA}$, $I_{DS3}=70 \text{ mA}$ 의 바이어스 조건에서 3단 전력 증폭기의 S-파라미터 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 90~98 GHz에서 12~13.6 dB의 이득이 측정되었고 전체적으로 3 dB 이내의 이득 열화가 발생하였다. 출력 반사 계수는 7.5 dB 이상의 값을 가지며 약 4 GHz의 주파수 상향 특성을 보였다.

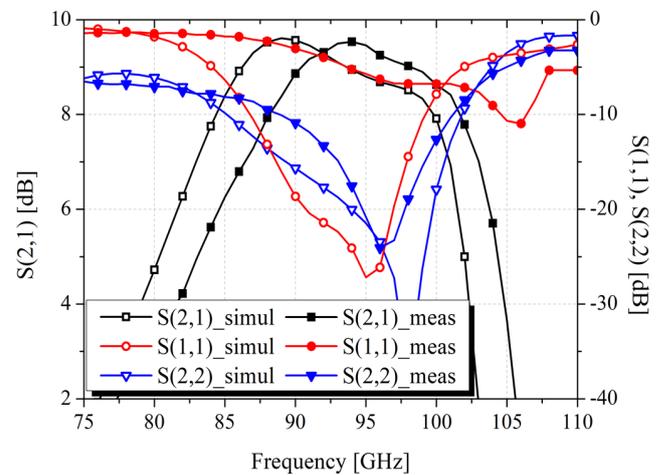


그림 9 W-대역 구동 증폭기 S-파라미터 시뮬레이션 및 측정 결과 비교
Fig. 9 Comparison of the simulated and measured S-parameter results of the W-band driver amplifier

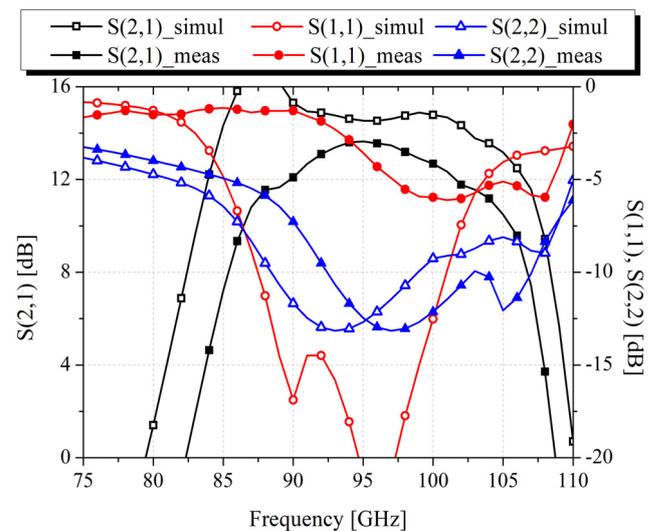


그림 10 W-대역 전력 증폭기 S-파라미터 시뮬레이션 및 측정 결과 비교
Fig. 10 Comparison of the simulated and measured S-parameter results of the W-band power amplifier

표 2 본 논문의 결과와 기존 발표된 W-대역 전력 증폭기 결과의 비교

Table 2 Comparison of our work and the previously published W-band power amplifier results

References	Frequency [GHz]	Power Gain [dB]	Output power [dBm]	PAE [%]	Chip size [mm ²]	Process
[28]	84~103	15	21.5	N.A.	2	0.1 μm GaAs pHEMT
[29]	75~110	16.5	15.5	9.6	5	0.1 μm GaAs pHEMT
[30]	90	14.5	26	3.7	5	0.1 μm GaN HEMT
[31]	93~95	7.5	25	N.A.	3.7	0.1 μm GaAs pHEMT
This work	92~94	9	18	15.6	1	0.1 μm GaAs pHEMT
	92~94	12	19	8.7	1.5	

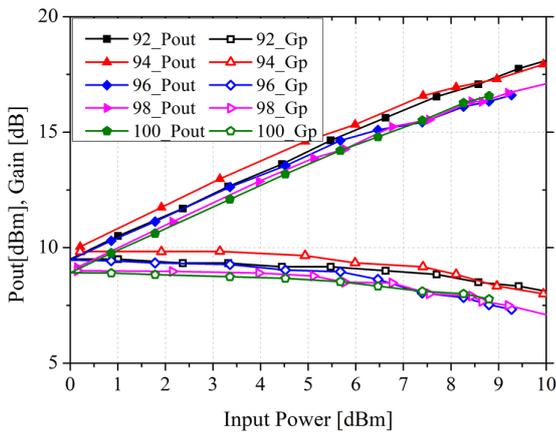


그림 11 W-대역 구동 증폭기 MMIC의 출력전력(P_{out})과 전력이득(G_p) 측정 결과
Fig. 11 Measured output power(P_{out}) and power gain(G_p) of the W-band driver amplifier MMIC

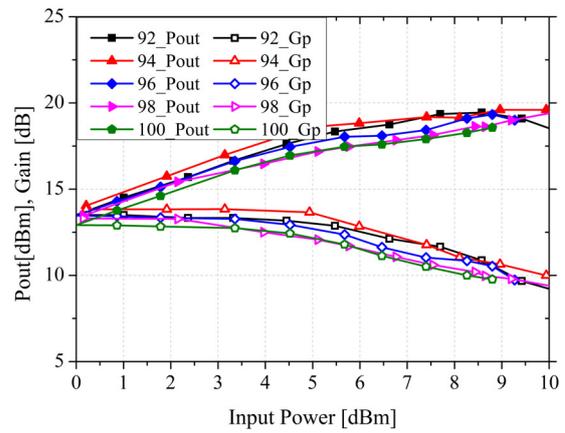


그림 12 W-대역 전력 증폭기 MMIC의 출력전력(P_{out})과 전력이득(G_p) 측정 결과
Fig. 12 Measured output power(P_{out}) and power gain(G_p) of the W-band power amplifier MMIC

전력 증폭기의 이득 열화를 분석하기 위해 설계에 사용한 트랜지스터 비선형 모델 대신 Win Semiconductor 회사에서 제공하는 트랜지스터 mdf(measurement data format) 측정 파일을 대체하여 전달 컨덕턴스 gm 특성을 분석한 결과 1단에서 7%, 2단에서 10%의 gm 하향 특성이 도출하였으며, 이는 열화된 이득 측정값과 유사함을 확인하였다. W-대역에서 비선형 트랜지스터 모델의 부정확성은 전체 회로의 입력 반사손실 특성 열화도 불리움을 측정으로 확인되었다.

그림 11과 그림 12는 92~100 GHz의 주파수 구간에서 2 GHz 간격으로 측정한 2단 구동 증폭기와 3단 전력 증폭기의 단일 톤 신호에 대한 전력 이득 및 출력 전력 결과를 보여주고 있다. 92~94 GHz에서 2단 구동 증폭기는 약 18 dBm, 3단 전력 증폭기는 약 19 dBm의 출력 전력특성을 확보하였다. 구동 증폭기는 시뮬레이션과 비슷한 결과를 확보하였지만, 전력 증폭기는 이득 열화로 인하여 두 번째 단에서 충분한 전력이 세 번째 단으로 전달되지 못해 최종 출력 전력이 시뮬레이션에서 예측한 것만큼 확보되지 못하였다.

표 2는 본 논문의 결과를 기존 발표된 GaAs 및 GaN 전력 증폭기 논문들의 결과와 비교하고 있다. 제작된 W-대역 GaAs MMIC 구동 증폭기와 전력 증폭기는 작은 칩 면적에도 불구하고 전력 이득 및 출력 전력 측면에서 양호한 특성을 보임을 알 수 있다.

4. Conclusion

본 논문은 94 GHz의 중심 주파수에서 동작하는 W-대역 2단 구동 증폭기와 3단 전력 증폭기 MMIC를 설계 및 제작한 결과를 보였다. 제작된 구동 증폭기 MMIC는 1×1 mm²의 크기를 가지며, 92~98 GHz에서 이득은 9 dB 이상, 출력 반사 계수는 약 10 dB 이상을 만족하였으며, 17~18 dBm의 출력 전력을 가졌다. 전력 증폭기 MMIC는 1×1.5 mm²로 90~98 GHz에서 12~13.6 dB의 이득, 5 dB 이상의 출력 반사 계수를 확보하였으며, 약 19 dBm의 출력 전력을 가짐을 확인하였다. 제작된 W-대역 GaAs pHEMT 구동 증폭기 및 전력 증폭기 MMIC는 고해상도 레이더 및 근접 신관 등의 민군겸용 시스템의 송신 모듈에 폭넓게 활용될 수 있다.

Acknowledgements

This work was supported by research fund of Chungnam National University.

References

[1] S. E. Hong, I. K. Kim, and S. C. Bang, "Trends of technology

- developments for mmwave-based 5G Mobile communications,” *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 28, no. 6, pp. 107-117, Dec. 2013.
- [2] S. H. Jang, S. W. Kong, H. D. Lee, J. H. Park, K. S. Kim, and K. C. Lee, “Millimeter and terahertz wave circuit and system technologies and trends for future mobile communications,” *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 33, no. 5, pp. 1-12, Oct. 2018.
- [3] K. Y. Kim, G. S. Kim, J. H. Myung, C. H. Yoon, W. Shin, C. S. Kim, S. H. Moon, K. P. Kim and T. Kim, “Research trends on limitless connections in wireless transmission and access technologies,” *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 34, no. 1, pp. 61-74, Feb. 2019.
- [4] H. G. Ji, D. P. Chang, E. H. Shin, and I. B. Yom, “GaN, GaAs MMIC developments and trends,” *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 26, no. 4, pp. 105-114, Aug. 2011.
- [5] S. H. Lee, S. J. Chang, J. W. Lim, and Y. S. Baek, “Technical trends of fusion semiconductor devices composed silicon and compound materials,” *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 32, no. 6, pp. 8-16, Dec. 2017.
- [6] R. J. Trew, “Wide bandgap semiconductor transistors for microwave power amplifiers,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 46-54, Mar. 2000.
- [7] Q. Ge, W. Liu, B. Xu, F. Qian, and C. Yao, “A 77-100 GHz power amplifier using 0.1- μm GaAs pHEMT technology,” *Journal of Semiconductors*, vol. 38, no. 3, Mar. 2017.
- [8] C. S. Whelan, P. F. Marsh, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, P. S. Lyman, P. J. Lemonias, S. M. Lardizabal, R. E. Leoni, S. J. Lichwala, and T. E. Kazior, “Millimeter-wave low noise and high power metamorphic HEMT amplifier and devices on GaAs substrates,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 9, pp. 1307-1311, Sep. 2000.
- [9] K. K. Jung, J. S. Yoon, and Y. S. Chae, “Image measurement and processing using near-range passive millimeter-wave imaging system,” *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 52, no. 8, pp. 1561-1567, Aug. 2015.
- [10] W. H. Lee, W. J. Lee and T. J. Chung, “Trends of Millimeter Wave and Terahertz Imaging Technologies,” *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 27, no. 6, pp. 114-123, Dec. 2012.
- [11] Y. Meng, A. Qing, C. Lin, J. Zang, Y. Zhao, and C. Zhang, “Passive millimeter wave imaging system based on helical scanning,” *SCIENTIFIC REPORTS*, vol. 8, no. 7852, May. 2018.
- [12] Y. Ayasli, S. W. Miller, R. L. Mozzi, and L. K. Hanes, “Capacitively coupled traveling-wave power amplifier,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-32, no. 12, pp. 1704-1709, Dec. 1984.
- [13] S. K. Lee, K. T. Bae, and D. W. Kim, “2-6 GHz GaN HEMT power amplifier MMIC with bridged-T all-pass filters and output-reactance-compensation shorted stubs,” *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol. 16, no. 3, pp. 312-318, Jun. 2016.
- [14] D. H. Shin, I. B. Yom, and D. W. Kim, “6 GHz to 18 GHz AlGaIn/GaN cascaded nonuniform distributed power amplifier MMIC using load modulation of increased series gate capacitance,” *ETRI Journal*, vol. 39, no. 5, pp. 737-745, Oct. 2017.
- [15] Y. Y. Wei, L. H. Chua, and S. H. Tan, “Design of 12 W X-band high power cascade amplifier,” *RF and Microwave Conference*, pp. 24-32, 2007.
- [16] D. P. Nguyen, X. T. Tran, N. L. K. Nguyen, P. T. Nguyen, and A. V. Pham, “A wideband high efficiency Ka-band MMIC power amplifier for 5G wireless communications,” *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May, 2019.
- [17] S. Kim, M. P. Lee, S. J. Hong, J. S. Lim, and D. W. Kim, “Ku-band 50 W GaN HEMT internally-matched power amplifier,” *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 1, pp. 8-11, Jan. 2019.
- [18] Y. Ayasli, S. W. Miller, R. L. Mozzi, and L. K. Hanes, “Capacitively coupled traveling-wave power amplifier,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 12, pp. 1704-1709, Dec. 1984.
- [19] H. W. Sung, S. H. Han, S. I. Kim, H. K. Ahn, J. W. Lim, and D. W. Kim, “C-band GaN dual-feedback low-noise amplifier MMIC with high-input power robustness,” *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 6, pp. 678-685, Nov. 2022.
- [20] Kyung-Whan Yeom, *Microwave Circuit Design*, 1st Edition, Pearson, 2015.
- [21] M. P. Lee, S. Kim, S. J. Hong, and D. W. Kim, “Compact 20 W GaN internally matched power amplifier for 2.5 GHz to 6 GHz jammer systems,” *Micromachines*, vol. 11, no. 4, Apr. 2020.
- [22] J. Rahola, “Power waves and conjugate matching,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 55, no. 1, pp. 92-96, Jan. 2008.
- [23] J. B. Forsythe, “Paralleling of power MOSFETs for higher power output,” 1981 Annual Meeting Industry Applications Society, pp. 777-796, 1981.
- [24] L. Zhu, V. Devabhaktuni, C. Wang, and M. Yu, “Adjustable bandwidth filter design based on interdigital capacitors,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 1, pp.16-18, Jan. 2008.
- [25] D. T. Smith, “Low frequency noise in tantalum capacitors,” *Active and Passive Electronics Components*, vol. 12, pp. 215-221, Jan. 1987.
- [26] B. Geck, and J. Marquardt, “A millimeter-wave frequency extender for microwave network analyzers,” 27th European Microwave Conference, pp. 476-480, Sep. 1997.

- [27] Keysight, Millimeter wave frequency extenders, <https://www.keysight.com/kr/ko/assets/7018-04100/>
- [28] F. Zhu and G. Luo, "A W-band balanced power amplifier in 0.1-um GaAs pHEMT process," IEEE MTT-S International Wireless Symposium, 2020.
- [29] B. Kin, A. Tran and J. Schellenberg, "Full W-band power amplifier/combiner utilizing GaAs technology," IEEE MTT-S International Wireless Symposium, 2012.
- [30] M. van Heijningen, M. Rodenburg, F. E. van Vliet, H. Massler, A. Tessmann, P. Bruckner, S. Müller, D. Schwantuschke, R. Quay and T. Narhi, "W-band power amplifier MMIC with 400 mW output power in 0.1 um AlGaIn/GaN technology," 7th European Microwave Integrated Circuit Conference, pp. 135-138, 2012.
- [31] Northrop Grumman, APH482 datasheet, Document available on-line: <https://www.northropgrumman.com/wp-content/uploads/Microelectronics-APH482.pdf>.

저자소개



한성희 (Seong-Hee, Han)

He received the B.S. and M.S. degree in Radio Science and Engineering from Chungnam National University, Daejeon, South Korea, in 2021 and 2023, respectively. He is currently a Ph.D student. His research interests include 3D printing techniques and their applications to microwave devices and components and mm wave & sub-THz front-end monolithic microwave integrated circuit modules.



김동욱 (Dong-Wook, Kim)

He received the B.S. degree in electronic communications from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1990, and the M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea, in 1992 and 1996, respectively. In 1996, he joined the LG Electronics Research Center, where he developed high power devices and monolithic microwave integrated circuits until 2000. From 2000 to 2002, he led research teams and developed RF integrated passive devices on a thick oxidized Si substrate as a director of the research center in Telephus Inc. From 2002 to 2004, he was involved with the development of wireless security systems in S1 Corporation, a company of Samsung Group. In 2004, he joined the faculty of Chungnam National University (CNU), Daejeon, Korea and is working with it. He is currently a dean of academic affairs in CNU. His research interests are monolithic microwave integrated circuits and their applications, short range radar modules, and ultra wideband circuits and systems.