THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2020 Jan.; 31(1), 43～50.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.1.43
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

S-대역 300 W급 GaN HEMT 내부 정합 전력증폭기

S-Band 300-W GaN HEMT Internally Matched Power Amplifier

권호상 · 최길웅* · 이상민** · 김동욱***

Ho-Sang Kwon · Gil-Wong Choi* · Sang-Min Lee** · Dong-Wook Kim***

요 약

본 논문에서는 0.4 μm GaN HEMT 공정을 사용하여 웨이비스에서 개발된 80×350 μm의 트랜지스터를 사용하여 S-대역에서 동작하는 300 W급 내부 정합 전력 증폭기를 설계 및 제작하였다. 웨이비스의 0.4 μm GaN HEMT 공정에 사용된 웨이퍼는 4 인치 GaN on SiC 기판이며, 개발된 소자는 필드 플레이트와 후면 비아 홀을 포함하고 있다. 전력 증폭기의 설계는 하이브리드 로드풀 측정을 통해 도출된 최적 입·출력 임피던스를 이용하여 진행되었다. 제작된 전력 증폭기는 2.9～3.5 GHz에서 300 μs의 펄스 폭과 2 ms의 펄스 주기로 동작하는 15 % 듀티의 펄스 모드로 측정되었으며, 입력 전력이 45 dBm일 때 295～336 W의 출력 전력과 46.9～58.5 %의 전력부가효율, 9.7～10.2 dB의 전력 이득을 보였다.

Abstract

In this study, an S-band 300-W internally matched power amplifier was designed and fabricated using 80×350 μm GaN HEMTs, which were developed by the 0.4-μm GaN HEMT process(Wavice). A 4-inch GaN-on-SiC wafer was used in the 0.4-μm GaN HEMT process, and the developed GaN HEMT includes a field plate and backside via holes. An internally matched power amplifier was designed using the optimum input/output impedances, which were extracted from a hybrid load-pull measurement. The fabricated power amplifier was measured at 2.9～3.5 GHz in the pulsed mode with 15 % duty cycle, which included a 300-μs pulse width and 2-ms pulse period, and showed an output power of 295～336 W, power-added efficiency of 46.9～58.5 %, and power gain of 9.7～10.2 dB at the input power of 45 dBm.

Key words: GaN HEMT, Internally Matched, Power Amplifier, Hybrid Load-Pull, S-Band

Ⅰ. 서 론

송수신 모듈의 성능과 형상은 능동형 위상배열 레이다 시스템의 성능, 크기 및 무게에 직접적인 영향을 미치는 중요한 설계 요소이다. 과거에는 튜브형 송신기를 이용한 수동형 위상배열 레이다가 주로 개발되었지만, 반도체 전력 증폭기 기술이 발전하면서 최근에는 능동형 위상배열 레이다가 주로 개발되고 있다. 능동형 위상배열 레이다의 송신 출력은 안테나 복사 소자의 개수와 송수신 모듈의 출력의 곱에 비례한다. 송수신 모듈의 출력과 효율은 능

「이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 연구되었음.」

국방과학연구소(Agency for Defense Development)
*한화시스템(Hanwha Systems)
**웨이비스(Wavice)
***충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received October 28, 2019 ; Revised December 16, 2019 ; Accepted January 14, 2020. (ID No. 20191028-113)

· Corresponding Author: Dong-Wook Kim (e-mail: dwkim21c@cnu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

동형 위상배열 안테나의 크기와 무게에 영향을 미치며, 레이다의 전원장치와 냉각 계통의 설계에도 큰 영향을 준다. 전력 증폭기는 송수신 모듈의 종단 전력 증폭기로 송수신 모듈의 성능에 직접적인 영향을 주는 소자이다. 전력 증폭기로 사용되는 반도체 소자로는 Si Bipolar Junction Transistor(BJT), Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor (LDMOS), GaAs Heterojunction Bipolar Transistor(HBT), pseudomorphic High Electron Mobility Transistor(pHEMT), GaN HEMT 등이 있으며, GaN HEMT 소자는 단위 면적당 높은 출력 특성과 우수한 열전도도, 높은 항복전압, 고속의 전자 이동도로 인해 효율과 출력 전력 면에서 우수한 특성을 제공할 수 있어 최근 들어 많은 시스템에서 사용되고 있다[1],[2].

본 논문에서는 웨이비스에서 개발된 0.4 μm GaN HEMT 소자를 사용하여 S-대역에서 동작하는 내부 정합형 전력 증폭기를 설계, 제작하고 시험한 결과를 제시한다. 개발된 GaN HEMT 소자의 최적 입출력 임피던스를 추출하기 위하여 하이브리드 로드풀 측정법을 사용하였으며, 제작된 전력 증폭기는 2.9~3.5 GHz에서 최대 336 W의 출력 전력과 58.5 %의 전력부가효율 특성을 보였다.

Ⅱ. GaN HEMT 소자 기술

본 논문에 사용된 웨이비스의 0.4 μm GaN HEMT 소자의 단면 구조를 그림 1에 나타내었으며, 사용된 에피층 구조는 24 nm Al0.22Ga0.78N, 1 nm AlN, 2 μm Fe-GaN으로 4인치 고순도 반절연 SiC 기판 위에 Metal Organic Chemical Vapor Deposition(MOCVD)으로 형성되었다. 저항성 접촉 저항을 낮추기 위하여 Si^+ 이온을 상온에서 implanter를 이용하여 소스와 드레인 영역에 주입하였으며, AlGaN/AlN 장벽 층을 제거한 후 Si^+ 이온이 주입된 GaN 층 위에 저항성 접촉을 위한 금속을 형성하였다. 저항성 접촉용 금속은 NiSi 합금을 사용하였으며, 480℃에서 5분간 열처리하여 약 10^{-6} Ωcm^2의 접촉 저항 특성을 얻었다. 소자 영역을 N^- 이온주입 방법을 사용하여 전기적으로 절연시키고, SiN_x 박막을 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition(PECVD) 방법으로 형성한 후 Inductively Coupled Plasma(ICP) 식각으로 0.4 μm 게이트를 형성하였다. Ni

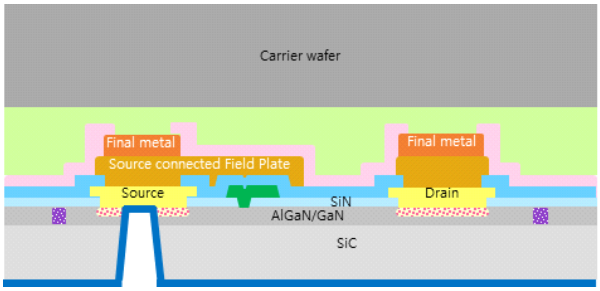


그림 1. AlGaN/GaN HEMT 소자 단면 구조
Fig. 1. Cross-sectional view of AlGaN/GaN HEMT.

을 기저 금속으로 하는 Gamma 게이트 형태를 제작한 후 전기 도금 방법으로 결함이 없는 소스 연결 필드 플레이트를 형성하였다.

고전류가 흐르는 전송선로 부분에 5 μm 두께의 금속을 전기도금 방법으로 형성한 후 SiN_x로 최종 보호막을 형성하였다. 제작된 소자는 기판을 약 85 μm 두께로 얇게 갈아낸 후 후면에서 소스에 직접 연결되는 비아 홀을 ICP 공정을 사용하여 형성하고, 전기 도금으로 후면 금속 공정을 완성하였다. 공정이 완료된 소자의 전자현미경 단면사진을 그림 2에 나타내었다.

단위 소자는 게이트 폭이 2×350 μm이며, 주요 특성은 다음과 같이 측정되었다. 단위 소자의 DC 특성은 반도체 파라미터 분석기를 사용하여 측정하였으며, RF 출력 특성은 로드풀 측정을 통하여 얻었다.

그림 3은 3.5 GHz에서 측정된 단위 소자의 입력 전력에 따른 출력 전력 특성을 나타내고 있다. 입력 신호는 연속파 신호이며, 입력 신호의 크기에 따른 출력 전력, 이득,

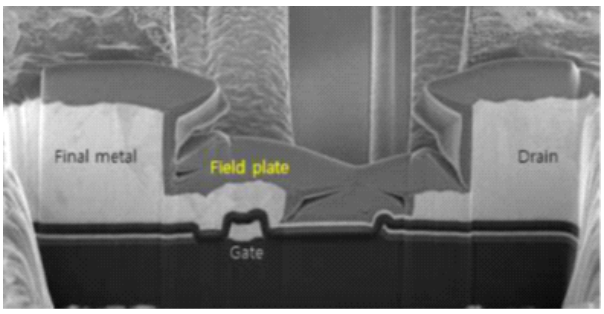


그림 2. GaN HEMT 소자의 전자현미경 단면 사진
Fig. 2. Cross-sectional microphotograph of GaN HEMT.

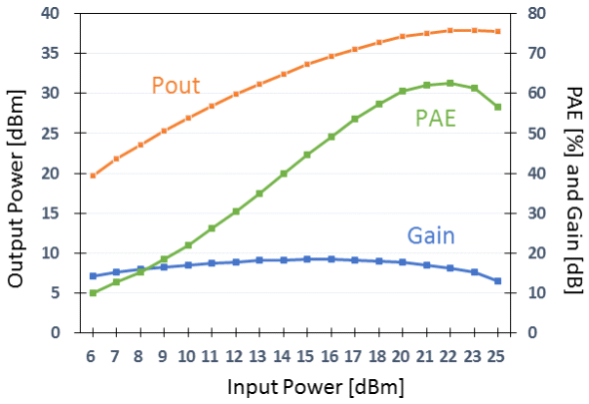


그림 3. 단위 소자의 출력 특성 측정 결과
Fig. 3. Measured output performance of the unit transistor.

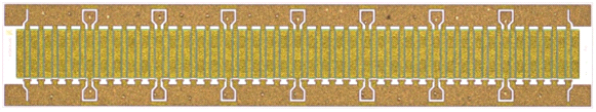


그림 4. 제작된 0.4 μm GaN HEMT 칩 사진
Fig. 4. Photograph of the fabricated 0.4 μm GaN HEMT chip.

전력부가효율을 측정하였다. V_{DS}=50 V, I_{dq}=0 mA, V_{GS}=–3.0 V의 측정 조건에서 전력 이득 13 dB, 출력 전력 6 W, 전력 밀도 8.5 W/mm, 전력부가효율 57 %의 측정 결과를 얻었다.

웨이비스에서 개발한 대면적 소자는 크기가 4.38×0.86 mm^{2}이며, 게이트의 폭은 80×350 μm로 총 28 mm이다. 제작된 대면적 0.4 μm GaN HEMT 칩 사진을 그림 4에 나타내었다.

Ⅲ. 로드풀 측정 및 최적 임피던스 추출

개발된 소자의 비선형 모델이 아직 구축되어 있지 않았으므로, 전력 증폭기 설계를 위하여 최적의 입출력 임피던스를 로드풀 측정을 통하여 얻어야 한다. 일반적인 로드풀 측정 방법에는 수동 임피던스 튜너를 사용하는 수동 로드풀 측정법과 능동 소자를 이용하여 임피던스 정합을 구현하는 능동 로드풀 측정법이 있다.

수동 로드풀은 수동 임피던스 튜너를 사용하여 다양한 부하 임피던스 정합을 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있지만, 튜너의 삽입손실로 인해 고출력 증폭기의 정합이 어려운 단점이 있다. 반면에 능동 로드풀 측정법은 능동 소자를 사용하기 때문에 삽입손실에 따른 음영 구역이 존재하지 않고 빠른 임피던스 정합을 구현할 수 있는 장점이 있지만, 시험 구성이 복잡하고 측정하고자 하는 트랜지스터의 출력 전력과 측정 구성의 삽입손실에 따라 능동 회로에 높은 출력 전력을 제공하는 증폭기가 필요하다는 단점이 있다. 최근에는 수동 및 능동 로드풀 측정 방법의 장점만을 결합한 하이브리드 로드풀 측정법이 많이 연구되고 있다[3],[4].

그림 5는 하이브리드 로드풀 측정 방법의 구성도를 나타내고 있다. 신호발생기, 소스 임피던스 튜너, 방향성 결합기, 로드 임피던스 튜너, 회로망 분석기 및 전력 증폭기로 구성이 되며, 소스 임피던스 정합은 수동 임피던스 튜너를 사용하고, 부하 임피던스 정합은 로드 임피던스 튜너와 전력 증폭기를 함께 사용하여 구현된다.

하이브리드 로드풀 측정법은 그림 6에 보인 바와 같이 'b'에 해당하는 임피던스의 위상과 크기는 수동 임피던스 튜너를 이용하여 'A'로 이동시키고, 'A'를 중심으로 전력 증폭기를 이용하여 'a'에 해당하는 임피던스의 위상과 크기를 결정한다. 따라서 하이브리드 로드풀 측정 방법은 일반 능동 로드풀 측정 방법과 비교하여 전력 증폭기의 출력 전력이 낮아도 된다는 장점을 가지며, 능동 로드풀의 단점인 임피던스 정합을 위한 음영 구역이 없고 정합 시간이 빠르다는 장점을 가진다.

개발된 대면적 소자는 대신호 측정 시 DC 전류로 인해 많은 열이 발생하므로 웨이퍼 상에서는 직접 로드풀 측정을 수행하기 어렵다. 로드풀 측정을 수행하기 위하여 GaN HEMT 칩을 CPC141 기판 위에 유테틱 본딩으로 접

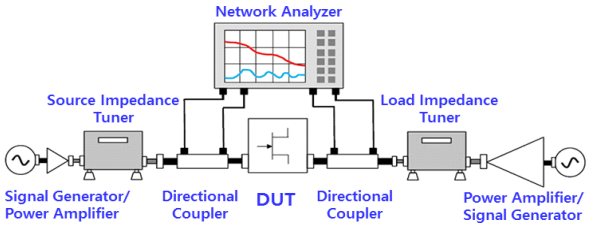


그림 5. 하이브리드 로드풀 측정 구성
Fig. 5. Hybrid load-pull measurement set-up.

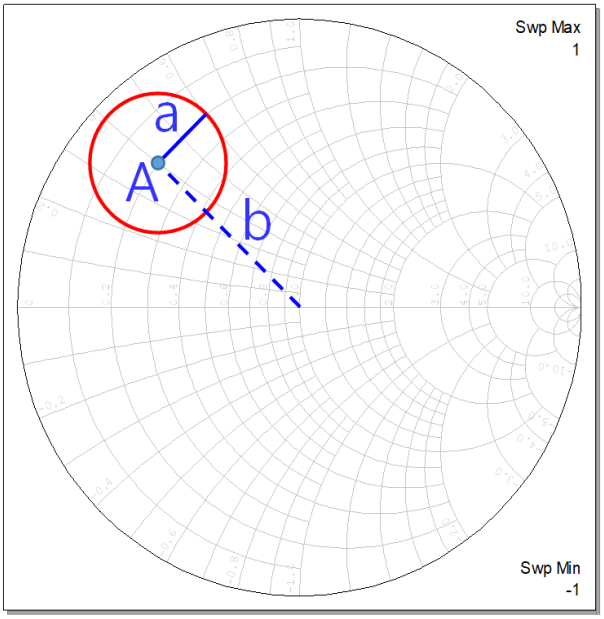


그림 6. 하이브리드 로드풀 방식의 부하 임피던스 정합
Fig. 6. Load impedance matching of the hybrid load-pull technique.

합하였으며, 패키지 리드(lead)는 kovar를 사용하고, 절연용 세라믹은 Alumina96을 사용하였다. 로드풀 측정을 위하여 제작된 소자 패키지 사진을 그림 7에 나타내었다.

본 논문에서는 Maury Microwave사의 MT1000을 사용하여 로드풀 측정을 수행하였다[5]. 로드풀 측정을 위하여 V_{DS}=40 V, I_{dq}=10.9 mA, V_{GS}=−2.55 V의 측정 조건에서 소자를 동작 시켰으며, 측정 주파수는 3.2 GHz로 하였다. 입력 신호는 펄스 모드로 동작하며 30 μs의 펄스 폭과 3.4 %의 듀티를 가진다. 로드풀 측정을 통하여 패키지 기준면(package reference plane)의 소스 임피던스(source impedance: Z'_S)와 부하 임피던스(load Impedance: Z'_L)를 측정한 다음 와이어 본딩의 길이에 해당하는 인덕턴스를 보상하여 GaN HEMT Die 소자 기준면(device reference plane)의 소스 임피던스(Z_S)와 부하 임피던스(Z_L)를 추출하였다. 로드풀 측정을 통하여 소스와 부하 임피던스의 변화에 따른 최대 출력과 최대 효율이 측정되는 등고선도를 추출하고, 출력 전력이 최대가 되는 임피던스를 최적 임피던스로 선택하였다. 로드풀 측정으로부터 얻은 GaN HEMT 소자의 최적 소스 및 부하 임피던스는 표 1과 같다.

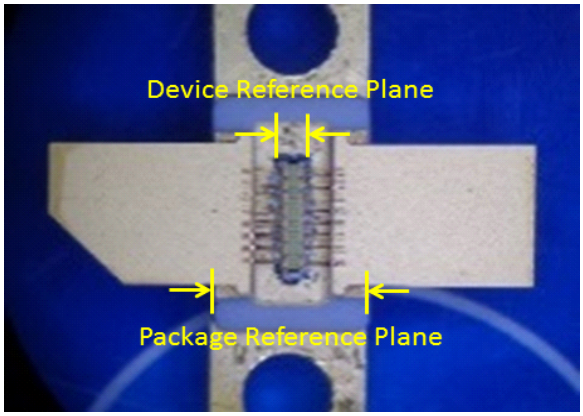


그림 7. 로드풀 측정을 위해 패키지된 GaN HEMT 소자 사진
Fig. 7. Photograph of the packaged GaN HEMT device for load-pull measurement.

표 1. 하이브리드 로드풀 측정으로부터 추출된 GaN HEMT 소자의 최적 소스 및 부하 임피던스
Table 1. Optimum source and load impedances of the GaN HEMT device extracted from the hybrid load-pull measurement.

Frequency	3.2 GHz
Z'_S(package)	0.0404−j0.1201 Ω
Z'_L(package)	0.0599−j0.0945 Ω
Z_S(Die)	0.0402+j0.0189 Ω
Z_L(Die)	0.0593+j0.0241 Ω
P_{out}	51.9 dBm
P_{in}	39.8 dBm
Gain	12.1 dB
PAE	48.4 %

Ⅳ. 내부 정합 전력 증폭기 제작 및 측정

4-1 내부 정합 전력 증폭기의 설계 및 제작

본 논문에서는 로드풀 측정을 통하여 150 W 이상의 출력을 확인한 28 mm GaN HEMT 소자를 두 개 사용하여 300 W 급의 전력 증폭기를 설계하였다. 설계한 내부 정합 전력 증폭기는 그림 8과 같이 두 개의 GaN HEMT 소자와 Au 와이어로 형성된 인덕터 및 단일층 캐패시터

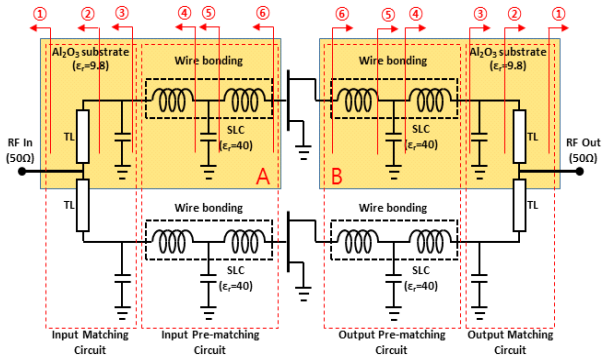


그림 8. 내부 정합 전력 증폭기의 회로 구성도
Fig. 8. Schematic circuit diagram of the internally-matched power amplifier.
※ TL: transmission line

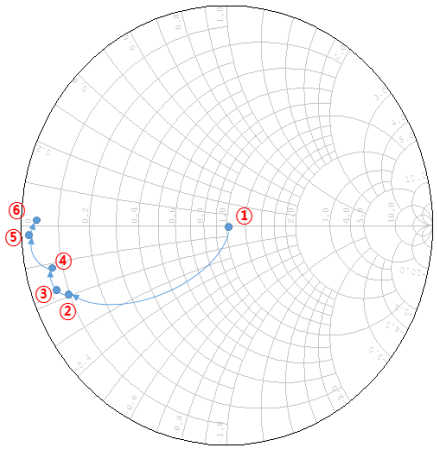
(single layer capacitor, SLC)로 구성된 사전 입출력 정합회로와 알루미나(Al_2O_3) 기판을 이용한 결합기 및 단일층 캐패시터(SLC)와 전송선로가 포함된 입출력 정합 회로로 구성된다.

GaN HEMT 소자의 소스 임피던스(Z_S)와 부하 임피던스(Z_L) 정합회로 설계를 위해 표 1의 로드풀 측정 결과를 적용하였으며, 단일 GaN HEMT 소자에 대하여 설계된 입력 정합회로(A)와 출력 정합회로(B)에 대한 3.2 GHz 주파수에서의 소스 및 부하 임피던스 궤적을 그림 9에 나타내었다.

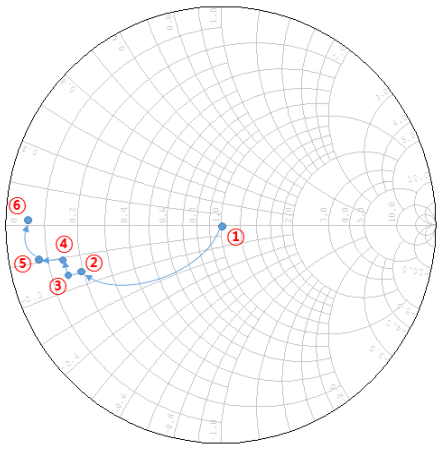
그림 10은 제작된 내부 정합 전력 증폭기의 사진을 보여준다. 입력과 출력 정합회로는 비유전율이 9.8인 알루미나 기판에 형성되어 있으며, 비유전율이 40인 SLC를 트랜지스터의 게이트와 드레인에 인접하여 배치함으로써 패키지 소형화를 구현하였다. 내부 정합 전력 증폭기의 패키지를 위해 GaN HEMT는 CPC141 베이스 위에 유테틱 본딩(Au/Sn=80:20)으로 접합하였고, 알루미나 기판은 Ag 에폭시로 접합하였다. 패키지 리드(lead)는 Alloy42를 사용하고, 리드 절연용 세라믹은 알루미나를 사용하였다.

4-2 내부 정합 전력 증폭기의 측정

제작된 전력 증폭기는 V_{DS}=40 V, I_{dq}=0 mA, V_{GS}=−2.9 V의 측정 조건에서 동작시켰다. 전력 증폭기의 입력 신호는 300 μs의 펄스 폭과 2 ms의 펄스 주기로 동작하는



(a) 소스 임피던스 궤적
(a) Source impedance traces



(b) 부하 임피던스 궤적
(b) Load impedance traces

그림 9. 입출력 정합회로의 임피던스 궤적
Fig. 9. Impedance traces of input and output matching circuits.

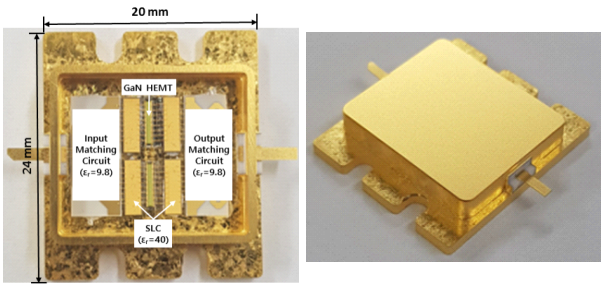


그림 10. 제작된 내부 정합 전력 증폭기
Fig. 10. Fabricated internally-matched power amplifier.

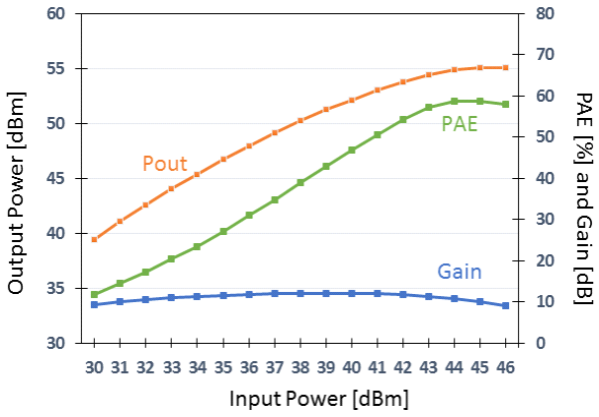


그림 11. 3.2 GHz에서 측정된 전력 증폭기의 출력 특성
Fig. 11. Measured output performance of the power amplifier at 3.2 GHz.

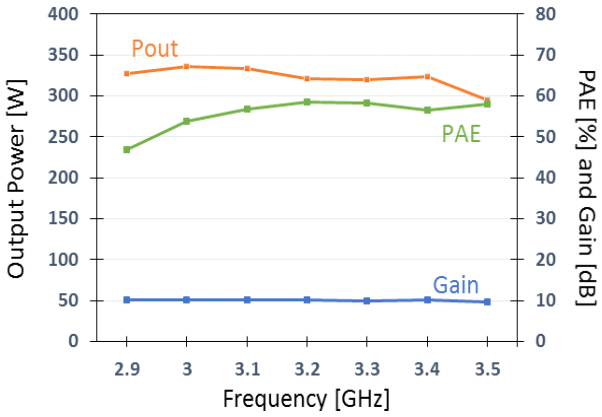


그림 12. 전력 증폭기의 주파수에 따른 출력 특성
Fig. 12. Output performance of the power amplifier with the frequency.

15 % 듀티의 펄스 모드 신호이다. 그림 11은 3.2 GHz의 주파수에서 측정된 전력 증폭기의 입력 전력에 대한 출력 전력 특성을 보여주고 있다. 입력 신호 레벨을 30~46 dBm의 범위로 가변하면서 출력전력, 이득, 전력부가효율을 측정하였다. 전력 이득은 10 dB로 측정되었으며, 두 개의 GaN HEMT 칩을 전송 선로로 결합하는 입출력 정합 회로의 손실에 의하여 로드풀 측정 결과보다 2 dB 정도 작게 측정되었다.

그림 12는 2.9~3.5 GHz에서 45 dBm의 입력 신호에 대한 출력 특성을 측정한 결과를 보여주고 있다. 전력 이득은 9.7~10.2 dB로 측정되었으며, 출력 전력은 295~336 W, 전력부가효율은 46.9~58.5 %로 측정되었다.

표 2는 본 논문에서 제작된 전력 증폭기의 측정 결과와 기존의 S-대역 전력 증폭기의 측정 결과를 비교하였으며, 상대적으로 넓은 주파수 대역에서 균일한 출력 전력과 이득 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 0.4 μm GaN HEMT 공정을 이용하여 웨이비스에서 개발된 80×350 μm의 트랜지스터를 사용하여 S-대역에서 동작하는 300 W급 내부 정합 전력 증폭기를 설계하고 제작하였다. 하이브리드 로드풀 측정을 이용하여 최적의 소스 임피던스(Z_S) 및 부하 임피던스(Z_L)를

표 2. 제작된 전력 증폭기의 측정 결과와 기존 발표된 전력 증폭기 결과의 비교
Table 2. Comparison of measured results of the fabricated power amplifier and previously published power amplifier results.

	This work	Ref. [6]	Ref. [7]	Ref. [8]	Ref. [9]
Frequency [GHz]	2.9~3.5	2.62~2.69	3.1~3.5	2.9~3.3	3.2~3.6
Gain [dB]	9.7~10.2	13.6~14.7	11.2~11.5	13.1~14.1	9.8~10.2
P_{out} [W]	295~336	257~323	355~380	480~545	603~720
PAE [%]	46.9~58.5	61.8~68.8	52.4~58.7	65.1~68.1	45.5~57.8
V_{DS} [V]	40	50	36	50	50
Fully internal matched	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Number of die	2	1	3	4	2
Size [mm^2]	24×20	-	24×17.4	24×17.4	24×17.4

추출하였으며, 제작된 전력 증폭기는 2.9~3.5 GHz에서 최대 336 W의 출력 전력과 58.5 %의 전력부가효율 특성을 보였다. 본 논문에서 제작된 전력 증폭기의 출력 특성은 최근 발표된 S-대역의 전력 증폭기와 대등한 수준의 성능을 보여주고 있으며, 높은 출력 특성이 요구되는 능동 위상 배열 레이다 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] D. W. Runton, B. Trabert, J. B. Shealy, and R. Vetury, "History of GaN: High-power RF gallium nitride (GaN) from infancy to manufacturable process and beyond," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 82-93, May 2013.

[2] H. S. Kang, K. T. Bae, I. J. Lee, H. W. Cha, B. G. Min, and D. M. Kang, et al., "X-band 50 W pulse-mode GaN HEMT internally matched power amplifier," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 10, pp. 892-898, Oct. 2016

[3] M. S. Hashmi, F. M. Ghannouchi, P. I. Tasker, and K. Rawat, "High reflectrive load-pull," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 96-107, Jun. 2011.

[4] G. Simpson, "Hybrid active tuning load pull," in *77th ARFTG Microwave Measurement Conference*, Baltimore, MD, Jun. 2011, pp. 1-4.

[5] Maury Microwave, "MT2000 mixed-signal active load pull system (Version 2.11.00)." Available: https://www.maurymw.com

[6] H. S. Kang, I. J. Lee, K. T. Bae, S. Kim, and D. W. Kim, "S-band 300 W GaN HEMT harmonic-tuned internally matched power amplifier," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 4, pp. 290-298, Apr. 2018.

[7] L. Gu, S. Tang, Y. Xu, W. Che, and W. Feng, "An S-band 350 W internally matched solid-state power amplifier using GaN power HEMTs," in *2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition(iWEM)*, Nanjing, May 2016, pp. 1-3.

[8] B. Zhao, B. Henricksen, and R. Santhakumar, "A high PAE, highly integrated, low-cost 500 W pulsed S-band GaN IMFET power amplifier," in *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*, Oklahoma City, OK, Apr. 2018, pp. 1416-1421.

[9] K. Oh, S. Lee, H. Kim, and H. Yoon, "An S-band internally matched packaged GaN HEMT with over 720 W peak power and 58% PAE," in *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS*, Philadelphia, PA, Jun. 2018, pp. 643-646.

권 호 상 [국방과학연구소/책임연구원]

https://orcid.org/0000-0001-5133-296X

1995년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2018년 3월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 박사 과정

1997년 3월~1999년 2월: 대우전자 연구원

1999년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 레이다, 레이다용 송수신기, RF 송수신 모듈, RF Power Amplifier 등

최 길 웅 [한화시스템/전문연구원]

https://orcid.org/0000-0002-5386-852X

2004년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)

2006년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2011년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

2011년 2월~현재: 한화시스템 연구원

[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, TRM, Radar 시스템 등

이 상 민 [웨이비스/연구소장]

https://orcid.org/0000-0002-1227-993X

1990년 2월: 서강대학교 물리학과 (이학사)
1992년 2월: 서강대학교 물리학과 (이학석사)
1996년 2월: 서강대학교 물리학과 (이학박사)
1996년 3월～1998년 2월: ETRI 박사후 연수연구원
1998년 3월～1999년 5월: 포항공대 기초과학연구소 연구원
1999년 6월～2000년 9월: SUNY Stony Brook 연구원
2000년 10월～2002년 9월: UC Santa Barbara 연구원
2002년 10월～2006년 3월: GCS 엔지니어
20006년 5월～2009년 12월: RFMD 엔지니어
2010년 1월～2015년 3월: Cree 엔지니어
2015년 4월～현재: ㈜ 웨이비스 연구소장
[주 관심분야] GaN, InP 초고주파 RF 소자 설계 제작

김 동 욱 [충남대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0003-1913-4714

1990년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
1992년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
1996년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
1991년 8월～2000년 5월: LG 종합기술원 선임연구원
2000년 6월～2002년 8월: ㈜텔레포스 연구소장
2002년 9월～2004년 9월: 에스원기술연구소 응용기술팀장
2009년 6월～2009년 12월: ETRI 초빙연구원
2010년 1월～2011년 1월: 미국 UCSD 방문교수
2004년 10월～현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 초고속 및 초고주파 집적회로, 마이크로파 및 밀리미터파 전력증폭기 모듈, 근거리 레이다 모듈