

전압채배기 구조를 이용한 5.8 GHz GaN HEMT F급 정류기

Design of a 5.8 GHz GaN HEMT Class-F Rectifier Using Voltage Doubler

박 종 진 · 임 원 섭* · 양 영 구

Jongjin Park · Wonseob Lim* · Youngoo Yang

요 약

본 논문에서는 전압채배기 구조를 이용한 5.8 GHz GaN HEMT F급 정류기에 대한 설계 및 측정결과를 제시한다. 제안된 정류기는 높은 출력 dc 전압 특성을 위해 전압채배기를 사용했고, 고효율 특성 확보를 위해 입력 정합회로에 3차 고조파 임피던스를 개방시키는 기법을 적용했다. 높은 항복전압과 넓은 밴드갭 특성을 갖는 GaN HEMT bare-chip을 다이오드로 사용했고, 이는 높은 입력전력에서 안정적인 동작을 할 수 있다는 장점이 있다. Bare-chip을 PCB와 전기적으로 연결하는 방식을 4가지 제안했고, 최적의 전기적 연결 방식의 검증을 위해 제작 및 측정을 진행했다. 제작된 정류기는 입력 RF 전력 32 dBm과 부하저항 1,000 Ω 기준 모든 방식에서 55 % 이상의 RF-dc 변환 효율과 직렬과 병렬 다이오드의 음극을 본드 와이어로, 병렬 다이오드의 양극을 through-wafer via로 PCB와 연결한 회로에서 69 %의 최대 효율을 얻었다.

Abstract

In this study, the design and measurement results of a 5.8 GHz GaN HEMT Class-F rectifier using a voltage doubler were proposed. The proposed rectifier employed a voltage doubler for high-output dc voltage characteristics and applied the technique of opening the third-harmonic impedance to an input-matching network to obtain high-efficiency characteristics. A GaN HEMT bare chip with a high breakdown voltage and wide bandgap was used as a diode, which enabled stable operation at a high input power. Four methods of electrically connecting a bare chip to a PCB were proposed, and fabrication and measurements were conducted to verify the optimal electrical connection method. At 5.8 GHz, with an input RF power of 32 dBm and load resistance of 1,000 Ω , the fabricated rectifier exhibited RF-dc conversion efficiency of over 55 % in all methods. Maximum efficiency of 69 % was obtained in a circuit in which the cathodes of series and parallel diodes were connected to the PCB with bond-wires, and the anode of the parallel diode was connected to the PCB with through-wafer via.

Key words: Rectifier, Class-F, GaN HEMT, Voltage Doubler

I. 서 론

휴대전화, 웨어러블 기기, IoT(internet of things, 사물인

터넷)와 같은 전자기기의 성능이 급격하게 발전함에 따라 충전시스템의 고도화가 불가피해졌다. 최근에는 무선 전력전송(WPT, wireless power transmission) 중 고주파를

「이 연구는 2022학년도 한국전기연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(NO.22A01014-02, 무선전력전송 수신부 성능개선 연구).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

*한국전기연구원 전력ICT연구센터(Power ICT Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute)

· Manuscript received March 27, 2023 ; Revised April 5, 2023 ; Accepted April 12, 2023. (ID No. 20230327-023)

· Corresponding Author: Youngoo Yang (e-mail: yang09@skku.edu)

이용한 마이크로파전력전송(MPT, microwave power transmission)이 주목받고 있다^{[1]~[3]}. MPT 시스템의 수신부에서 가장 중요한 성능은 RF-dc 변환 효율이고, 정류기는 이를 결정짓는 수신부의 주요한 단위 회로이다. 이에 따라 정류기의 고효율 특성 확보를 위한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다^{[4]~[17]}.

RF-dc 변환 효율을 높이는 방법으로는 고조파 제거 기술과 높은 dc 출력을 확보하는 방법이 있다. 고조파 제거 기술은 흔히 전력증폭기에서 전력 효율을 높이는 데에 사용되었다. 예를 들면, F급 전력증폭기는 2차 고조파 임피던스를 단락하고, 3차 고조파 임피던스를 개방하여 트랜지스터의 걸리는 전류와 전압 파형의 모양을 바꿔 효율을 높인다^[18]. 정류기에서도 다이오드의 비선형적인 동작으로 인해 고조파 성분이 발생하게 되고, 이는 RF-dc 변환 효율 감소로 이어진다^[4]. 전력증폭기의 고조파 제거 기술을 정류기에 적용하면 높은 RF-dc 변환 효율을 얻을 수 있다. 그림 1은 이상적인 F급 정류기의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 다이오드에 걸리는 전압의 파형을 사각파로, 전류의 파형을 사인파로 만들어 고효율의 F급 정류기를 구현할 수 있다. 실제로 연구된 F급 정류기로는 5.8 GHz에서 78.6 %의 RF-dc 변환 효율^[4]과 5.8 GHz에서 73.1 %의 RF-dc 변환 효율^[8]로 동작하는 연구가 제시되었다.

기본적인 정류기 구조는 단일의 병렬 다이오드와 직렬 다이오드로 구성되어 있다^{[4],[5],[7],[9]~[11]}. 하지만, 이와 같은 구조는 출력 전압이 낮아 높은 입력 RF 전력에서 RF-dc 변환 효율이 낮다는 단점이 있다. 전압채배기는 병렬 다

이오드와 직렬 다이오드로 구성되어 있어서 단일 다이오드 구조보다 약 두 배의 전압을 얻을 수 있다는 장점이 있다^[19]. 회로구조뿐만 아니라, 다이오드 선택도 중요하다. 정류기에는 상대적으로 문턱전압이 낮은 쇼트키 다이오드를 사용하고 낮은 입력 전력부터 다이오드가 동작하게 되어 손실을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 이런 장점을 기반으로 GaAs 혹은 Si 기반의 패키징된 상용 쇼트키 다이오드를 사용한 정류기 연구가 제시되었고, 5.8 GHz 대역에서 17.65 dBm의 입력전력 기준 79.8 %의 RF-dc 변환 효율^[4]과 19 dBm의 입력전력 기준 65.8 %^[5]의 RF-dc 변환 효율을 측정결과로 보였다. 하지만, 이 다이오드들은 낮은 항복전압을 가지고 있어서 높은 입력전력에 대해 고효율로 동작하기 어렵고, 패키지의 기생성분으로 인한 전력 손실이 불가피하다는 단점이 있다. 반면, GaN HEMT 기반의 다이오드를 활용하여 높은 입력전력에 대해 고효율로 동작하는 연구가 제시되었고, 0.915 GHz 대역에서 39 dBm의 입력전력 기준 61.2 %의 RF-dc 변환 효율^[13]과 0.928 GHz 대역에서 30.5 dBm의 입력전력 기준 85.1 %의 RF-dc 변환 효율^[14]을 측정결과로 보였다. GaN HEMT는 넓은 에너지 밴드갭과 높은 항복전압을 특징으로 갖고, 이로 인해 높은 전력 환경에서 안정된 동작을 할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 diode-connected GaN HEMT를 다이오드로 이용하고 고조파 제거 기술과 전압채배기를 이용하여 5.8 GHz 대역에서 높은 입력 RF 전력에 대해 고효율로 동작하는 정류기를 설계했다. 다이오드는 Win Semiconductors사의 0.25 μm GaN HEMT 공정의 다이오드를 이용했다. 트랜지스터의 드레인과 소스를 1개의 metal로 묶은 다이오드 2개를 사용하여 전압채배기를 구성했고, 이를 bare-chip으로 설계했다. 이 구조를 사용하면 입력 RF 전압의 첨두값의 약 2배가 되는 출력 dc 전압을 얻을 수 있어 높은 입력전력에서 고효율의 정류기 설계가 가능하다. Bare-chip은 COB(chip-on-board) 방식으로 PCB에 실장했고, bare-chip과 PCB를 전기적으로 연결하는 방법을 4가지 제시했다. 어떤 방식이 가장 우수한 성능을 갖는지 실험적으로 검증했다. 입력 정합회로에는 3차 고조파 정합회로를 포함시켜 3차 고조파 제거 가능한 F급 정류기를 구현했고, 직렬 전송 선로와 병렬 개방 스텝만을 이용

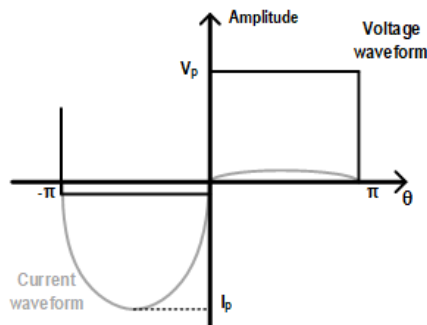


그림 1. 이상적인 F급 정류기의 전압과 전류 파형도
Fig. 1. Diode voltage and current waveforms of the ideal Class-F rectifier.

하여 간단하게 설계했다.

II. 회로 설계

그림 2는 제안된 전압채배기를 이용한 5.8 GHz GaN HEMT F급 정류기 도식도이고, 입력단, 다이오드단 그리고 출력단으로 구성되어 있다. 입력단에서는 F급 정류기 구현을 위해 원천주파수 정합회로에 3차 고조파 정합회로를 포함시켜 입력 정합회로를 설계했다. 다이오드단은 전압채배기를 사용했다. 전압채배기는 병렬 다이오드 D1과 직렬 다이오드 D2의 다이오드의 순차적인 도통 및 차단과 커패시터(C_{IN} 과 C_{OUT})의 충전 및 방전에 따라서 이론적으로 입력 RF전압의 첨두값의 2배가 되는 출력 dc 전압을 얻을 수 있는 구조이고, 이는 높은 RF-dc 변환 효율로 이어진다. 이 구조에서 이상적으로 2개의 다이오드는 push-pull 증폭기에서의 2개의 트랜지스터와 같이 균형을 이루는 구조이고, 교대로 동작하게 되어 2차 고조파가 상쇄되기 때문에 입력 정합회로에 3차 고조파 정합회로만 포함하여 비교적 간단하게 F급 정류기를 설계할 수 있다^[8]. 출력단에서는 최적의 C_{OUT} 과 R_{load} 의 값을 찾고 최종적으로는 출력 dc전력의 값을 확인하여 RF-dc 변환 효율을 확인했다.

그림 3은 본 논문에서 제안된 5.8 GHz에서 동작하는 전압채배기를 이용한 F급 정류기 회로도이다. 입력 정합회로는 원천주파수 정합회로에 3차 고조파 정합회로를 포함시켜 설계했다. 그림 4는 원천주파수의 소스 임피던스 정합 궤적을 나타낸 것이다. $50 \angle 61.5^\circ$ (D)와 $50 \angle 30^\circ$ (B)의 병렬 개방 스텝과 $50 \angle 30.5^\circ$ (C)와 $50 \angle 30^\circ$ (A)의 직렬 전송 선로를 이용하여 50 Ω에서 $16+j*34$ Ω으로 정합

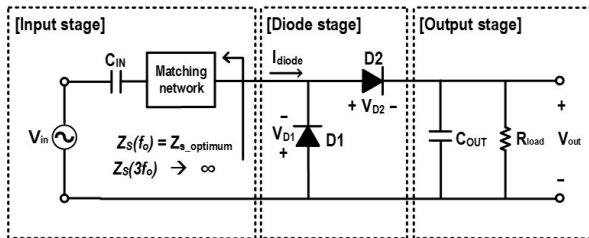


그림 2. 제안된 정류기 도식도
Fig. 2. Diagram of the proposed rectifier.

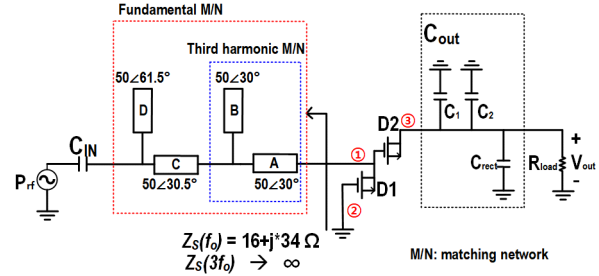


그림 3. 제안된 정류기 회로도
Fig. 3. Schematic of the proposed rectifier.

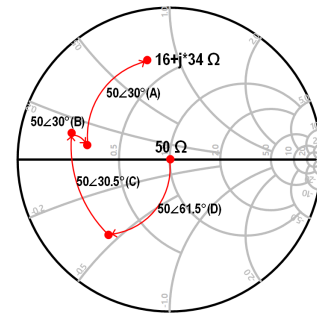


그림 4. 원천주파수의 소스 임피던스 정합 궤적
Fig. 4. Source impedance matching trajectory of the fundamental frequency.

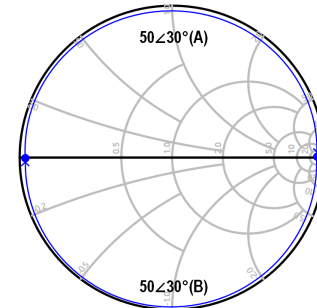
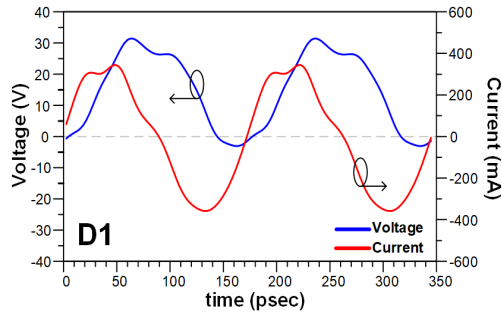
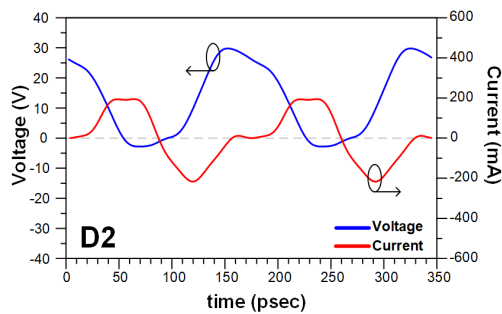


그림 5. 3차 고조파의 소스 임피던스 정합 궤적
Fig. 5. Source impedance matching trajectory of the third harmonic frequency.

했다. 그림 5는 3차 고조파의 소스 임피던스 정합 궤적을 나타낸 것이다. $50 \angle 30^\circ$ (B)의 병렬 개방 스텝과 $50 \angle 30^\circ$ (A)의 직렬 전송 선로를 이용하여 3차 고조파 임피던스가 개방이 되도록 정합했다. C_{IN} 은 dc 차단 커패시터 역할을 하고 입력 정합의 기능은 하지 않는다.



(a) 병렬 다이오드(D1)
(a) Shunt diode (D1)



(b) 직렬 다이오드(D2)
(b) Series diode (D2)

그림 6. 전압과 전류 파형 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result of voltage and current waveforms.

그림 6은 병렬과 직렬 다이오드의 전압과 전류 파형 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 3차 고조파 제어에 따라서 전압은 사각파, 전류는 사인파 형태에 가까운 파형을

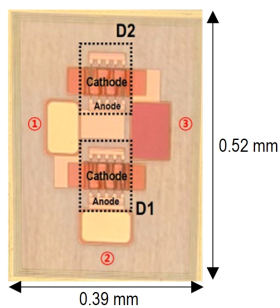


그림 7. 제안된 정류기의 GaN HEMT 다이오드 bare-chip 사진
Fig. 7. Photograph of GaN HEMT diode bare-chip of the proposed rectifier.

나타내었다.

그림 7은 제안된 정류기의 GaN HEMT 다이오드 bare-chip 사진이다. Diode-connected GaN HEMT를 다이오드로 사용했고, 다이오드의 음극은 드레인과 소스를 1개의 metal로 묶어서 구성했고, 양극은 게이트를 사용했다. 2개의 다이오드를 1개의 bare-chip으로 구성했고, D1은 병렬로, D2는 직렬로 배치하여 전압채배기를 구현했다. Bare-chip 크기는 $0.39 \times 0.52 \text{ mm}^2$ 이고 두께는 $100 \mu\text{m}$ 이다. 그림 8은 입력 RF 전압과 출력 dc 전압의 시뮬레이션 결과이다. 전압채배기를 사용하여 입력전력 32 dBm에서 출력 전압이 입력 전압의 첨두값의 약 2배인 30~32 V인 것을 확인했다.

Bare-chip을 PCB에 부착하기 위해서 COB 방법을 택했다. COB는 패키지로 인해 발생하는 기생 성분의 영향을 최소화할 수 있다는 장점이 있다^[13]. Bare-chip을 COB 방식으로 PCB에 부착하게 되면 그림 3 및 그림 7의 노드 ①, ②, ③을 PCB와 전기적으로 연결해야 한다. 연결 방법으로는 TWV와 와이어 본딩이 있으며 다이오드 모델의 불확실성을 감안해서 2개의 방법을 조합하여 표 1과 같이 총 4가지 버전으로 회로를 설계했고 어떤 버전이 최고의 성능을 갖는지 실험적으로 검증했다.

C_{out} 은 총 3개의 커패시터로 구성했다. C_1 과 C_2 는 각각 원천주파수와 2차 고조파에서 단락이 되는 커패시터이며

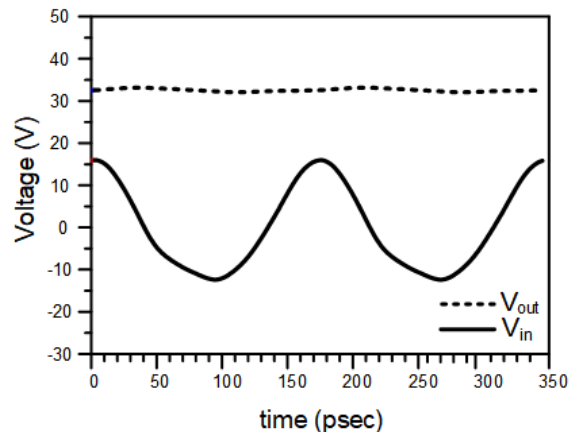


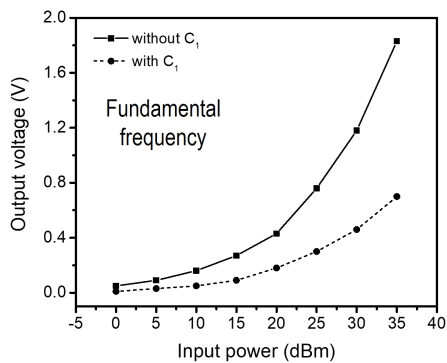
그림 8. 제안된 정류기의 입력 RF 전압 및 출력 dc 전압 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation result of voltage of input RF and output dc of the proposed rectifier.

표 1. 버전별 bare-chip과 PCB 전기적 연결 방식

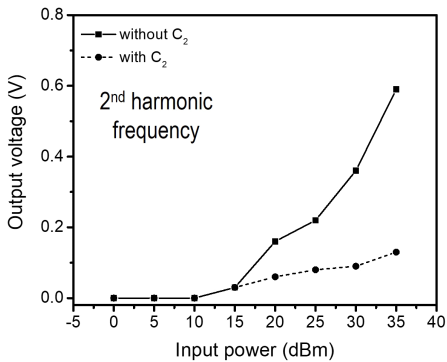
Table 1. The method of electrical connection between bare-chip and PCB for each version.

Version	①	②	③
1	TWV	Wire bonding	Wire bonding
2	Wire bonding	TWV	Wire bonding
3	Wire bonding	Wire bonding	Wire bonding
4	Wire bonding	Wire bonding	TWV

*TWV: through-wafer via.



(a) 원천주파수
(a) Fundamental frequency



(b) 2차 고조파
(b) Second harmonic frequency

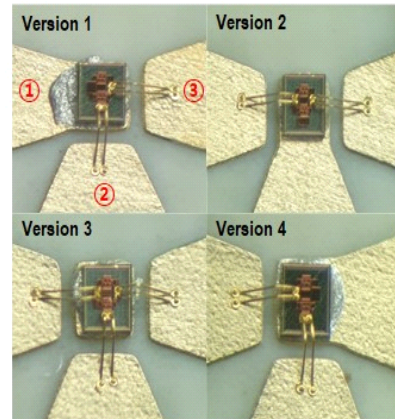
그림 9. 제안된 정류기의 출력 dc 전압 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation result of output dc voltage.

출력단에서 두 개의 주파수 신호를 bypass하는 역할을 한다. 그림 9는 시뮬레이션에서 C_1 과 C_2 가 각각 원천주파수와 2차 고조파의 출력 전압을 감소시키는 것을 보여준다. 이는 정류된 dc 성분의 ripple를 최소화하여 RF-dc 변

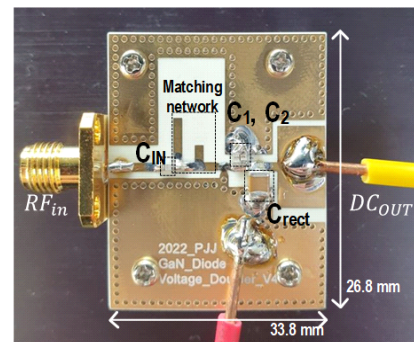
환 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. C_{rect} 는 상대적으로 큰 값의 커패시턴스와 100 V의 정격전압 갖는 dc 통과 필터 커패시터이며, 부하에서 RF 신호를 dc 성분으로 정류하는 역할을 한다.

III. 제작 및 측정결과

정류기는 GaN HEMT로 구현된 다이오드 bare-chip과 PCB의 전송선로를 이용하여 제작했다. 그림 10(a)는 TWV와 와이어 본딩 방식을 사용하여 버전별로 bare-chip과 PCB를 전기적으로 연결한 사진이고 그림 10(b)는 제



(a) 버전별 bare-chip과 PCB 연결 방식
(a) The method of electrical connection between bare-chip and PCB for each version



(b) 제안된 정류기
(b) The proposed rectifier

그림 10. 제작된 정류기 사진
Fig. 10. Photograph of the fabricated rectifier.

작된 정류기 사진이다. 각 다이오드의 음극과 양극은 버전별로 표 1과 같이 bare-chip과 PCB를 전기적으로 연결했다. 제작된 회로의 크기는 $33.3 \times 26.8 \text{ mm}^2$ 이다. 회로의 입력에는 dc 차단 역할을 하는 3.3 pF 의 커패시터(C_{IN})를 사용했고, 출력에는 원천주파수와 2차 고조파 성분을 bypass시키는 1.0 pF (C_1)과 0.3 pF 의 커패시터(C_2)와 정류 동작에 사용되는 $10 \mu\text{F}$ 의 상대적으로 큰 값의 커패시터(C_{rect})를 사용했다.

그림 11은 제작된 정류기의 RF-dc 변환 효율 시뮬레이션 및 측정결과이다. 제작된 회로는 전자부하기를 이용해

서 부하저항의 값을 800Ω , $1,000 \Omega$, $1,200 \Omega$, 그리고 $1,400 \Omega$ 으로 바꿔가면서 RF-dc 변환 효율을 확인했다. 5.8 GHz에서 입력 RF 전력 32 dBm 과 부하저항 $1,000 \Omega$ 기준 모든 버전에서 55 % 이상의 RF-dc 변환 효율을 가지며, 버전 2에서 69 %의 최대효율을 갖는 것을 확인했다.

표 2는 제안된 정류기의 측정 결과 및 이전에 보고된 정류기의 성능 비교를 제시한다. 제안된 정류기는 참고문헌 [4]~참고문헌 [12]와 비교해서 더 높은 입력 RF전력에서 69 %의 RF-dc 변환 효율을 얻었다. 동일한 GaN HEMT 다이오드를 사용한 참고문헌 [13] 및 참고문헌 [14]와 비

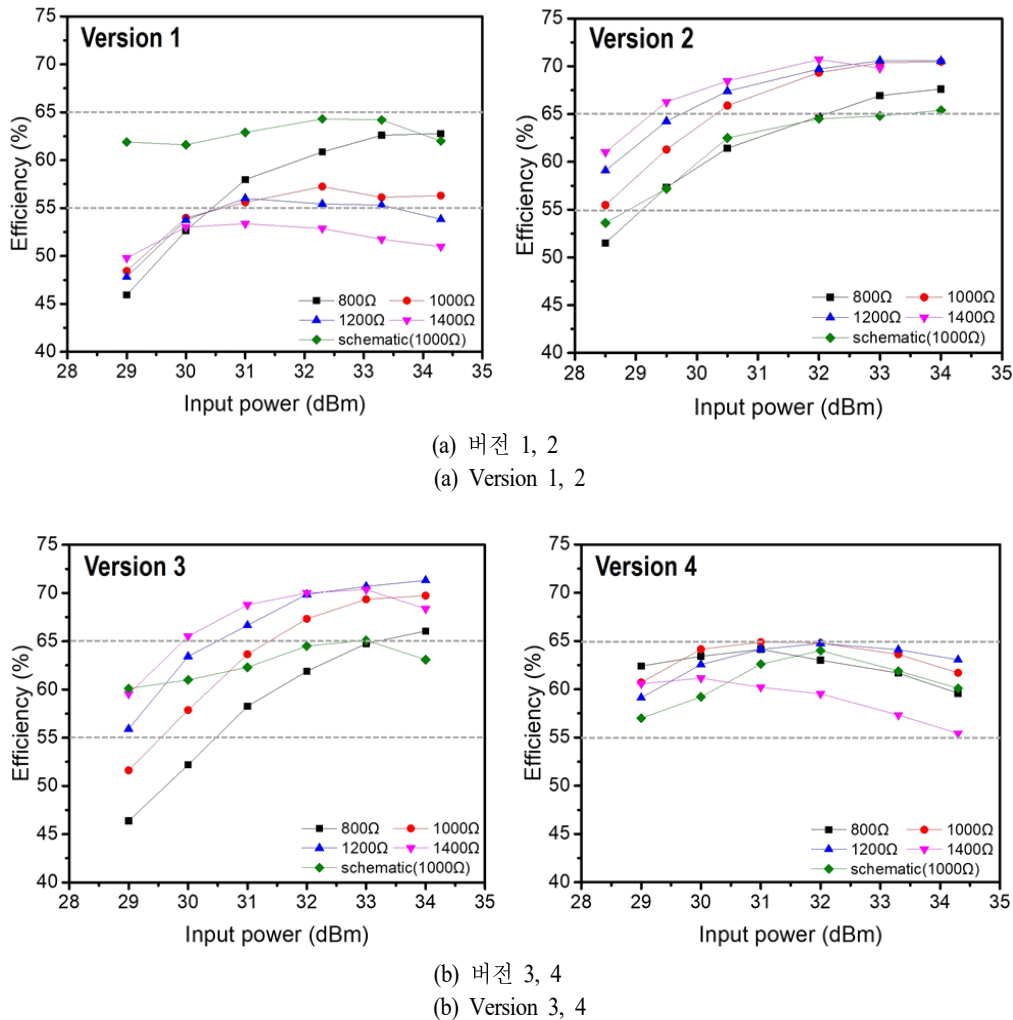


그림 11. 제안된 정류기의 RF-dc 변환 효율 시뮬레이션 및 측정결과
Fig. 11. Simulation and measurement results of the fabricated rectifier.

표 2. 이전에 보고된 정류기와 성능 비교

Table 2. Performance comparison with the previously reported rectifiers.

Ref.	Device	Circuit topology	Technique	Freq. (GHz)	Eff. (%)	Input RF power (dBm)
[4]	MA4E1317	Shunt diode	Harmonic control (Class-F)	5.8	79.8	17.65
[5]	MA4E2054	Shunt diode	2 nd Harmonic control	5.8	65.8	19
[6]	HSMS286F	Miniaturized branch-line hybrid coupler(MBLHC)	Harmonic control	5.8	81	15
[7]	HSMS286B	Shunt diode	Optimizing output ripple, harmonic control	5.8	60.6	9
[8]	MA4E1317-1	4-stack voltage doubler	Harmonic control (Class-F), RF isolation network	5.8	73.1	27
[9]	HSMS2860	Series diode	Dual band impedance matching	5.8	51.5	10
[10]	HSMS286	Shunt diode	Dual band impedance matching	5.8	62.2	11
[11]	HSMS2850	Series diode	Dual band impedance matching	5.8	33.6	0
[12]	SMS-7630	Voltage doubler	Dual band impedance matching	5.8	39.2	1
[13]	GaN HEMT	Shunt diode	Optimizing bond-wire	0.915	61.2	39
[14]	GaN HEMT	Shunt diode	Optimizng diode	0.928	85.1	30.5
[15]	GaN HEMT	Shunt diode	-	5.78	44.8	41.1
This work	0.25 μ m GaN HEMT	Voltage doubler	Harmonic control (Class-F)	5.8	69	32

교해서 더 높은 주파수에서 고효율의 RF-dc 변환 효율을 얻었고, 참고문헌 [15]와 비교해서 동일한 주파수 대역에서 더 높은 RF-dc 변환 효율을 얻었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 5.8 GHz 대역에서 동작하는 전압채배기의 F급 GaN HEMT 정류기를 설계했다. F급 동작을 위하여 입력 정합회로에 3차 고조파 임피던스를 개방시키는 기법을 적용하여 RF-dc 변환 효율 특성을 개선했다. 정류소자는 diode-connected GaN HEMT를 사용했고, bare-chip에 2개의 다이오드로 구성된 전압채배기를 설계하여 높은 dc 출력 특성을 확보했다. Bare-chip을 PCB와 전기적

으로 연결하는 방식을 4가지 제시했으며, 어떤 방식이 최대 효율을 갖는지 실험적으로 검증했다. 출력단은 bypass 커패시터를 사용하여 교류 성분을 제거하고, 출력 dc 전압의 ripple을 최소화하였다. 제작된 정류기는 5.8 GHz에서 입력 RF 전력 32 dBm과 부하저항 1,000 Ω 기준 모든 버전에서 55 % 이상의 효율과 버전 2에서 69 %의 최대 효율을 얻었다.

References

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications," *IEEE Communications*

- Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413-1452, Nov. 2016.
- [2] C. Wang, J. Zhang, S. Bai, X. Zhu, and Z. Zheng, "A harmonic suppression energy collection metasurface insensitive to load and input power for microwave power transmission," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 8, pp. 4036-4044, Aug. 2022.
- [3] C. Liu, H. Lin, Z. He, and Z. Chen, "Compact patch rectennas without impedance matching network for wireless power transmission," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 5, pp. 2882-2890, May 2022.
- [4] J. Guo, H. Zhang, and X. Zhu, "Theoretical analysis of RF-DC conversion efficiency for class-F rectifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 4, pp. 977-985, Apr. 2014.
- [5] S. Imai, S. Tamaru, K. Fujimori, M. Sanagi, and S. Nogi, "Efficiency and harmonics generation in microwave to DC conversion circuits of half-wave and full-wave rectifier types," in *2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, Kyoto, May 2011, pp. 15-18.
- [6] S. C. Wang, M. J. Li, and M. S. Tong, "A miniaturized high-efficiency rectifier with extended input power range for wireless power harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 6, pp. 617-620, Jun. 2020.
- [7] H. Lee, J. C. Lee, "Optimization of a 5.8-GHz rectifier considering ripple amplitude and DC-voltage pattern," in *2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference*, Jeju, May 2014, pp. 212-215.
- [8] J. Bae, S. H. Yi, W. Choi, H. Koo, K. C. Hwang, and K. Y. Lee, et al., "5.8 GHz high-efficiency RF-DC converter based on common-ground multiple-stack structure," *Sensors*, vol. 19, no. 15, p. 3257, Jul. 2019.
- [9] D. Wang, R. Negra, "Design of a dual-band rectifier for wireless power transmission," in *2013 IEEE Wireless Power Transfer(WPT)*, Perugia, May 2013, pp. 127-130.
- [10] K. Hamano, A. Suzuki, K. Nishikawa, and S. Kawasaki, "2.4/5.8 GHz dual-band rectifiers for aerospace wireless sensor and RF energy harvester system," in *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium(RWS)*, Orlando, FL, Jan. 2019, pp. 1-4.
- [11] X. B. Huang, J. J. Wang, X. Y. Wu, and M. X. Liu, "A dual-band rectifier for low-power wireless power transmission system," in *2015 Asia-Pacific Microwave Conference(APMC)*, Nanjing, Dec. 2015, pp. 1-3.
- [12] M. ur Rehman, W. Ahmad, and W. T. Khan, "Highly efficient dual band 2.45/5.85 GHz rectifier for RF energy harvesting applications in ISM band," in *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference(APMC)*, Kuala Lumpur, Nov. 2017, pp. 150-153.
- [13] S. D. Joseph, S. S. H. Hsu, A. Alieldin, C. Song, Y. Liu, and Y. Huang, "High-power wire bonded GaN rectifier for wireless power transmission," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82035-82041, Apr. 2020.
- [14] T. Liu, Y. Li, J. Y. Yang, T. T. Wang, X. Wang, and L. A. Yang, et al., "High-efficiency and high-current GaN-based microwave rectifier for wireless strain sensing and monitoring," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 2, pp. 898-906, Feb. 2023.
- [15] S. Yoshida, K. Nishikawa, and S. Kawasaki, "10 W class high power C-band rectifier using GaN HEMT," in *2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, London, Jun. 2019, pp. 595-598.
- [16] H. Park, B. Kim, and J. Oh, "Ultra-wideband compact rectifier based on coupled transmission-line network," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 4, pp. 278-283, Apr. 2022.
- [17] B. Kim, D. Lee, and J. Oh, "High-efficiency rectifier based on transmission-line transformer with wide input power and frequency ranges," *The Journal of Korean*

Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 33, no. 3, pp. 206-211, Mar. 2022.

- [18] F. H. Raab, "Class-E, Class-C, and Class-F power amplifiers based upon a finite number of harmonics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 8, pp. 1462-1468, Aug. 2001.
- [19] A. Mouapi, N. Hakem, and N. Kandil, "Performances

comparison of Shottky voltage doubler rectifier to support RF energy harvesting," in *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Madrid, Jun. 2020, pp. 1-5.

박 종 진 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-8833-0891>



2022년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2022년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] Wireless Power Transfer Via Microwaves, RF Power Amplifier and Low Noise Amplifier

양 영 구 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3463-0687>



1997년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2002년 3월~2002년 7월: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후 연구원
 2002년 8월~2005년 2월: Skyworks Solutions Inc., Senior Electronic Engineer

2005년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, 무선통신 송/수신기 시스템 설계, 비선형 회로 분석 및 시뮬레이션 기법 연구

임 원 섭 [한국전기연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9353-6853>



2012년 2월: 한양대학교 전자통신공학부 (공학사)
 2019년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학박사)
 2018년 12월~현재: 한국전기연구원 선임연구원
 [주 관심분야] RF Power Amplifiers, Wireless Power Transfer Via Microwaves