

# GaN-SBD를 이용한 RF-DC 변환기 회로 분석

손명식<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>순천대학교 전자공학과

## An Analysis of RF-DC Converter Circuits with GaN Schottky Barrier Diodes

Myung Sik Son<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>Department of Electronic Engineering, Sunchon National University, Korea

### ABSTRACT

In this paper, GaN-SBD devices with excellent breakdown voltage and frequency characteristics for use in high-power microwave wireless power transmission has been modeled for PSpice circuit simulation. The RF-DC conversion circuits were simulated and compared with a commercial Si-SBD device. Although the modeled GaN-SBD devices had lower RF-DC conversion efficiency compared to Si-SBD at 2.4 and 5.8 GHz, it was confirmed through PSpice circuit simulations that they can be used sufficiently according to the required application circuit in a high power situation.

**Key Words** : Microwave, Wireless Power Transmission System, RF-DC Converter, Schottky Barrier Diode, GaN

### 1. 서 론

마이크로파 무선전력전송 기술[1]을 이용하여 모바일 기기를 충전하기 위한 RF 무선충전 방식에 대한 연구들이 진행되어 왔다[2,3]. 5.8-GHz RF 신호를 수신하여 RF-DC 변환기를 거쳐 수전된 DC 전력을 이용하여 스마트폰을 충전하는 방식이다[3]. 이 방식인 경우 RF 전력 송수신기간 거리, 주변 장애물, 수신기 효율 등에 따라 수신 세기가 불안정하게 변하므로 스마트폰 충전에 필요한 5V를 안정적으로 공급하고 동시에 충분한 충전 전류를 제공하기 위해서는 최적화된 RF-DC 변환기 회로가 필수적이다[4].

그러나, RF-DC 변환기 회로가 최적화되어 좋은 변환 효율을 보이더라도 송신단의 송전 전력이 충분하지 않으면 수신단에서 수전된 DC 전류가 충분하지 않아 충전 시간

이 너무 많이 걸려 충전 자체가 불가능해진다. 또한, 송신 전력이 매우 큰 대전력 마이크로파 무선전력전송[1]인 경우에 실리콘(Si)-SBD(Schottky Barrier Diode) 소자를 사용하면 낮은 항복전압 특성으로 인해 쉽게 소자가 타버리는 단점이 있다. 우수한 항복전압 특성을 보이는 GaN(Gallium Nitride)-SBD를 사용하였을 때는 주파수 특성이 Si-SBD에 비해 떨어진다. 따라서, 이러한 두 소자들의 주파수 특성을 비교 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 실리콘에 비하여 GaN는 녹는 점이 높고 높은 온도에 강하며, 전달 속도가 빠르면서 전달 전류의 양도 실리콘에 비해 많은 GaN-SBD 소자[5]를 사용해 기존의 RF-DC 변환기 회로들[4]의 주파수 특성 및 고전력 무선전송으로 인한 수신된 고전압에 따른 전류 특성을 PSpice 회로 시뮬레이션[6]을 통해 실리콘-SBD 소자와 비교 분석하였다.

<sup>†</sup>E-mail: sonms@sunchon.ac.kr

## 2. GaN-SBD PSpice 소자 모델링

### 2.1 GaN-SBD 소자 구조 및 I-V 특성

시뮬레이션을 위해 사용한 GaN-SBD 소자[5]는 그림 1에 보인 바와 같은 에피 구조와 측면 구조를 가지고 있으며 쇼트키 접착을 위해 TiN/Ni/Au구조의 3층으로 이루어진 금속 접착으로 구성되었다. 논문에서 분석된 TiN의 쇼트키 장벽 높이는 0.6eV로 설정되었다.

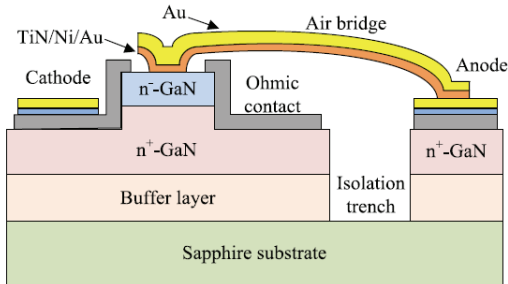


Fig. 1. Cross sectional view of the GaN-SBD [5].

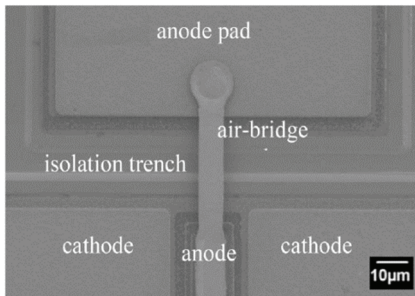


Fig. 2 Top view of one-finger GaN-SBD from scanning electron microscope [5].

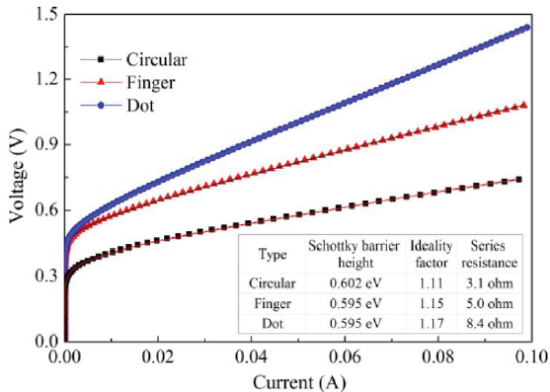


Fig. 3. I-V characteristics of TiN GaN-SBD[5].

그림 2와 같은 위에서 본 연결 구조에서 쇼트키 접착을 이루는 형상에 따라서 Circular 형, Finger형, 그리고 Dot 형으로 구분된 소자로 나뉘게 된다. 그림 3에서는 이러한 쇼트키 접착 형상에 따른 전류-전압 순방향 특성을 보였다.

이 그림에서 그들 논문 [5]의 분석에 의하면 Ideality factor N과 Series resistance Rs의 영향을 가장 많이 받는 것으로 분석되었고 그림 위에 정리한 쇼트키 장벽 높이와 N 및 Rs 파라미터를 사용하여 실험 데이터와 일치시킨 그림이다.

### 2.2 GaN-SBD 소자 모델링 및 파라미터 결정

PSpice회로 시뮬레이션을 위해서 논문 [5]에서 분석된 파라미터를 사용하여 PSpice의 SBD 파라미터를 설정한 경우 그림 3의 각 소자의 I-V특성을 정확하게 시뮬레이션 할 수 없었다. 이는 Pspice의 SBD 다이오드 모델에 사용하는 다이오드 방정식과 논문 [5]에서 분석한 다이오드 방정식의 차이로 예상하여 N 및 Rs 파라미터를 논문 [5]에서의 파라미터 값을 기준으로 변화시키면서 그림 3의 실험 데이터에 일치시키는 파라미터를 표 1에 보인 바와 같이 결정하였다.

Table 1. Parameters used for Si-SBD and GaN-SBDs.

	Parameters
HS-286	+IS=5E-8 RS=6 N=1.08 EG=0.69 +XTI=2 BV=7 IBV=1E-5 CJO=0.18p +VJ=0.65 M=0.5 FC=0.5 TT=0 +KF=0 AF=1
Circular	+IS=5E-8 RS=2.94 N=1.2 EG=0.69 +XTI=2 BV=40 IBV=1E-5 CJO=23p +VJ=0.60 M=0.5 FC=0.5 TT=0 +KF=0 AF=1
Finger	+IS=5E-8 RS=4.5 N=1.7 EG=0.69 +XTI=2 BV=40 IBV=1E-5 CJO=23p +VJ=0.60 M=0.5 FC=0.5 TT=0 +KF=0 AF=1
Dot	+IS=5E-8 RS=8 N=1.75 EG=0.69 +XTI=2 BV=40 IBV=1E-5 CJO=23p +VJ=0.60 M=0.5 FC=0.5 TT=0 +KF=0 AF=1

표 1에서 Si-SBD로서 HS-286 소자[7]를 사용하였고, GaN-SBD는 Circular, Finger, Dot 형 소자를 사용하였다. Si-SBD와 GaN-SBD의 BV(Breakdown voltage)은 7V와 40V로 설정되었다[4,5]. 따라서, GaN-SBD 소자들은 Si-SBD 소자 보다 더 큰 전압에서 동작시킬 수 있다.

그림 4에서는 Si-SBD(HS-286)과 GaN-SBD 소자들(Circular, finger, Dot)의 순방향 Turn-On 특성을 비교하기 위해 표1의 파라미터를 사용하여 순방향 Turn-On 특성을 나타내었다. Circular 형은 0.38V, Finger 형은 0.5V, Dot 형은0.56V로 그림

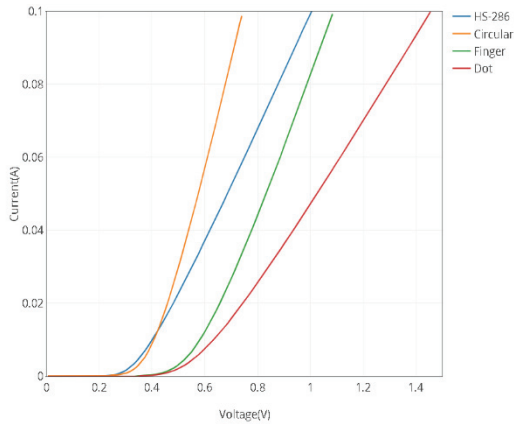


Fig. 4. I-V characteristics of Si-SBD and GaN-SBDs [5].

3에서의 Turn-On 특성과 아주 잘 일치하는 결과를 얻었다.

HS-286 Si-SBD소자와 Circular형 GaN-SBD소자의 Turn-On 전압은 비슷하나  $R_s$  저항이 HS-286소자가 크므로 전압에 따른 전류 상승 기울기가 작음을 알 수 있다.

### 3. RF-DC 회로 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션할 RF-DC 변환기 회로들[3,4]을 그림 5와 6 및 7에 각각 나타내었다. 그림 5는 브리지 정류 회로(Bridge rectifier)이고, 그림 6은 반파 더블러 회로(Half-wave doubler), 그리고 그림 7은 전파 더블러 회로(Full-wave doubler)이다. 그림 5, 6, 및 7의 RF-DC 변환 회로들을 실리콘-SBD 소자인 HS-286 및 GaN-SBD 소자인 Circular 형, Finger형 및 Dot형 소자에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 위해 주파수는 60Hz, 900MHz, 2.4GHz, 5.8GHz를 사용하였으며 회로내의 각 커패시터는 낮은 주파수인 60Hz와 900MHz에서는 4800nF를 사용하였고, 2.4GHz 및 5.8GHz에서는 4800pF으로 설정하여 사용하였다.

RF-DC 브리지 회로 시뮬레이션 결과를 각 주파수 별로 변환된 DC 전압과 전류로 정리하여 표 2에 정리하였다. 또한, 2.4GHz에서의 실리콘-SBD 소자인 HS-286 및 GaN-SBD 소자인 Circular 형 소자의 결과를 표 3에 정리하였다.

표 2의 RF-DC 회로 시뮬레이션 결과를 보면 수전 전압이 3V인 경우 Si-SBD 소자와 GaN-SBD 소자들이 주파수가 2.4GHz까지 증가함에 따라서 출력 전압이 조금씩 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 주파수가 증가함에 따라서 RF-DC 변환 회로의 효율이 떨어진다는 것을 의미한다.

또한, GaN-SBD 소자들인 Circular, Finger, Dot를 비교해 보면 Circular형이 출력 전압 및 전류가 제일 좋고 그 다음이

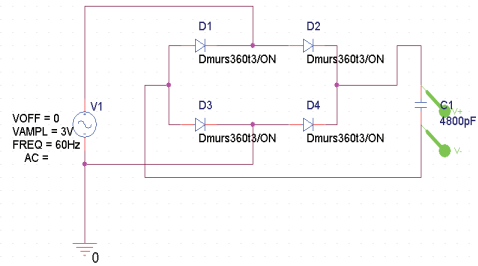


Fig. 5. The circuit of Bridge rectifier (Bridge).

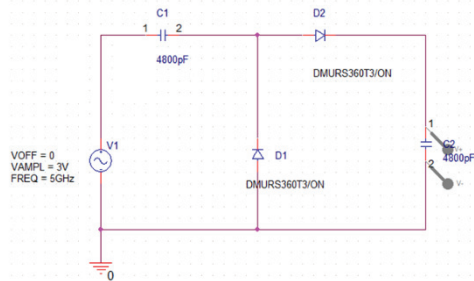


Fig. 6. The circuit of Half-wave doubler (Half-D).

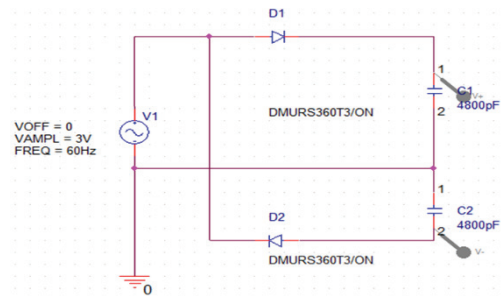


Fig. 7. The circuit of Full-wave doubler (Full-D).

Finger형 마지막이 Dot형인 것을 알 수 있었다. 또한, 5.8GHz에서는 수전된 전압이 30V로 가정한 경우, 실리콘 소자인 HS-286 소자에 비해 Circular형 GaN 소자가 월등히 좋은 변환 효율을 나타냄을 알 수가 있다.

따라서, GaN 소자는 2.4GHz에서 HS-286 실리콘 소자에 비해 RF-DC 변환 효율이 떨어지나 대전력 마이크로파 무선전력전송(30V 수전 입력) 같은 경우에는 5.8GHz에서의 변환 효율이 실리콘 소자에 비해 뛰어난 특성을 나타내었다.

표 3에서는 Si-SBD 소자 및 GaN-SBD 소자를 직접적으로 비교하기 위하여 2.4GHz에서 3V입력시의 결과를 각 RF-DC 회로에 대해서 시뮬레이션한 결과를 정리하였다.

Bridge 회로는 Circular형이 HS-286보다 변환 효율이 좋았

**Table 2.** Simulation results of Bridge rectifier

Bridge Rectifier				HS-286	CIRCULAR	FINGER	DOT
C=4800nF	3V	60Hz	전압	2.81V	2.78V	2.67V	2.66V
			전류	166.22mA	295.35mA	167.85mA	99.25mA
		900MHz	전압	2.78V	2.75V	2.64V	2.63V
			전류	166.23mA	295.36mA	167.79mA	99.25mA
C=4800pF	30V	2.4GHz	전압	2.59V	1.61V	757.88mV	243.27mV
			전류	90.58mA	116.02mA	12.7mA	185uA
		5.8GHz	전압	6.81V	18.35V	12.64V	5.88V
			전류	837.43mA	2.06A	1.04A	341.12mA

**Table 3.** Simulation results at 2.4GHz

2.4GHz				
		Bridge	Half-D	Full-D
전압	Circular	1.61V	4.97V	4.96V
	HS-286	2.59V	5.5V	5.55V
전류	Circular	116.02mA	199.57mA	192.58mA
	HS-286	90.58mA	126.83mA	124.98mA

으며 반파 더블러(Half-D)와 전파 더블러(Full-D)는 전압 변환효율이 HS-286 실리콘 소자가 Circular형 GaN 소자에 비해 우수했으나 출력 전류 특성이 GaN 소자가 더 우수함을 보여주었다. 이는 전류 전달 특성이 GaN가 더 우수하다는 걸 의미한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 대전력 마이크로파 무선전력전송에 사용하기 위한 항복전압과 주파수 특성이 우수한 GaN-SBD 소자를 모델링하여 RF-DC변환 회로에 대해 시뮬레이션 하고 상용Si-SBD 소자와 비교 분석하였다. 모델링된 GaN-SBD 소자들은 2.4 및 5.8GHz에서 Si-SBD에 비해 RF-DC 변환 효율이 떨어졌으나 대전력 상황에서는 요구되는 응용 회로에 따라 충분히 사용될 수 있음을 PSpice 회로 시뮬레이션을 통해 확인하였다. GaN-SBD 소자의 경우 Turn-On 전압이 0.38V 정도의 Circular형 소자가 2.4GHz 및 5.8 GHz에서도 RF-DC 변환 효율이 가장 우수함을 보여주었다.

Finger형 및 Dot 형은 비교적 낮은 전류로 대전력 상황에서는 Rs 성분이 커서 2.4나 5.8GHz에서는 Circular형에 비해 변환 효율이 떨어짐을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

순천대학교 교연비 사업에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- Biao Hu, Hao Li, Tianming Li, Haiyang Wang, Yihong Zhou, Xiaoyun Zhao, Xin Hu, Xuekun Du, Yulong Zhao, Xiang Li, Tian Qi, Mohamed Helaoui, Wenhua chen, Fadhel Ghannouchi, "A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier", Energy Reports 7, pp.1154-1161, 2021.
- Seong Hun Lee and Myung Sik Son, "5.8GHz 25W Microwave Wireless Power Transmission System Development and Measurement" Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No.1, pp. 21-24, 2019.
- Seong Hun Lee and Myung Sik Son, "RF-DC Voltage Multiplier Design and Fabrication for 5.8GHz Microwave Wireless Power Transmission," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 1-4, 2017.
- Myung Sik Son, "An Analysis of Voltage Multiplier Circuits for Smart Phone RF Wireless Charging," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 20, No. 2, pp.29-33, 2021.
- Liuan Li, Akinori Kishi, Qiang Liu, Yuki Itai, Ryota Fujihara, Yasuo Ohno and Jin-Ping Ao, "GaN Schottky Barrier Diode with TiN Electrode for Microwave Rectification", Journal of the electron Devices Society, Vol. 2, No. 6, pp.168-173, 2014
- PSpice simulation tool, OrCAD ver.10.5, Cadence Design Systems, Inc.
- Spice Parameters, Datasheet of HSMS-286x, AVAGO Technology.

접수일: 2021년 11월 6일, 심사일: 2021년 12월 8일,  
게재확정일: 2021년 12월 14일