

국내 개발 GaN HEMT 소자 비선형 모델링 및 검증

Nonlinear Modeling and Verification of a Domestically Developed Gallium Nitride High-Electron-Mobility Transistor

김상훈¹ · 정종현² · 이호연³ · 임평순⁴ · 최길웅⁵ · 권호상^{6*} · 김동욱^{7**} · 이상민^{8***} · 전병철^{9***}Sang-Hoon Kim¹ · Jong-Hun Jung² · Ho-Yeun Lee³ · Pyung-Soon Im⁴ · Gil-Wong Choi⁵ ·
Ho-Sang Kwon^{6*} · Dong-Wook Kim^{7**} · Sang-Min Lee^{8***} · Byoung-Chul Jun^{9***}

요 약

본 논문은 국내 개발된 GaN(gallium nitride) HEMT(high electron mobility transistor) 소자를 이용하여 비선형 모델링을 위한 파라미터 측정과 모델링 과정 및 검증 결과에 대하여 기술하였다. 선형/비선형 파라미터들을 추출하기 위해 여러 조건에서 Pulsed I-V 및 S-parameters 들을 측정하였고, 모든 바이어스 점들에 대해서 비선형 모델링을 통해 선형/비선형 파라미터들을 추출하였다. 비선형 모델링을 수행한 결과를 이용하여 능동 로드-풀 측정 결과를 비교하여 비선형 모델의 신뢰성을 검증하였다.

Abstract

This paper discusses the parameter measurement, modeling process, and verification results for nonlinear modeling using a domestically developed gallium nitride high-electron-mobility transistor device. To extract linear and nonlinear parameters, the pulsed I-V and S-parameters were measured under various conditions, and nonlinear modeling was conducted for all the bias points. The results of the nonlinear modeling were compared with those of the active load-pull measurements to verify the reliability of the nonlinear model.

Key words: Domestically Developed GaN HEMT, Pulsed I-V, Active Load-Pull, Nonlinear Modeling

I. 서 론

GaN HEMT 소자는 높은 전자이동도, 열전도도 및 항복전압 등의 특성을 가지고 있어 최근 능동 위상배열 레이다 안테나 시스템에 사용되어지는 송수신모듈의 전력

증폭기에 적용이 되는 추세이다^{[1],[2]}. GaN HEMT 소자를 사용한 고출력 전력증폭기 설계에서 입력력 정합회로를 이용하여 트랜지스터의 최적 소스 및 로드 임피던스에 정합시키는 과정은 필수이다. 이러한 최적의 임피던스를 구하기 위해서는 소자의 비선형 특성들이 반영된 시뮬레

한화시스템(Hanwha Systems)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

***웨이비스(Wavice)

1: 전문연구원(<https://orcid.org/0000-0001-6866-5998>), 2: 전문연구원(<https://orcid.org/0000-0003-2407-5851>), 3: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-6404-3881>),

4: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-0801-0970>), 5: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-5386-852X>), 6: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0001-5133-296X>),

7: 교수(<https://orcid.org/0000-0003-1913-4714>), 8: 연구소장(<https://orcid.org/0000-0002-1227-993X>), 9: 이사(<https://orcid.org/0000-0002-0641-9035>)

· Manuscript received November 12, 2019 ; Revised December 24, 2019 ; Accepted July 21, 2020. (ID No. 20191112-003S)

· Corresponding Author: Sang-Hoon Kim (e-mail: sanghoon12.kim@hanwha.com)

이선 모델이 필요하다. 이러한 비선형 모델을 이용하여 시뮬레이션을 통해 최적의 임피던스를 구하거나 실험적으로 로드-풀 측정을 통해 각 임피던스 점에 대한 트랜지스터의 출력 전력, 전력 이득 및 효율 성능을 측정하여 요구 성능을 만족하는 최적의 부하 임피던스가 결정된다.

본 논문에서는 비선형 모델링을 위한 Pulsed I-V 및 S-parameters 측정을 하고, 측정값을 이용하여 선형/비선형 파라미터 추출을 하는 비선형 모델링 방법 및 과정들에 대해서 기술한다. 다양한 비선형 모델링 기법 중에서 본 논문에서는 컴팩트 모델링 기법을 적용하였다. 물리적 모델이나 PHD(polyharmonic distortion) 모델에 비해 모델링 구현이 용이하고, 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있다^[3]. 최종적으로는 비선형 모델을 검증하기 위해 비선형 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 능동 로드-풀 측정 결과를 통해 얻은 GaN HEMT 소자의 성능을 비교하여 소자의 측정 및 비선형 모델링에 대해서 검증한다.

II. 본 론

2-1 파라미터 측정

대신호 모델링에 사용된 단위소자는 웨이비스에서 제작한 GaN HEMT 소자이고, 그림 1은 단위소자의 광학현미경 사진을 나타낸다. $0.4\ \mu\text{m}$ 의 게이트를 가지는 GaN HEMT소자로 4인치 반절연 SiC 기판위에 제작되었다. 10개의 게이트 핑거를 가지고 있으며, 각각의 게이트의 폭

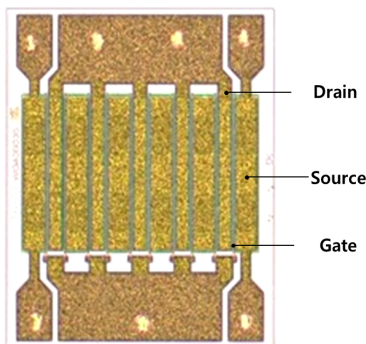


그림 1. 모델링에 사용된 단위소자의 광학현미경 사진
Fig 1. An optical microscope picture of the unit cell devices fabricated by wavice.

은 $350\ \mu\text{m}$ 이다. 금도금으로 형성된 소스연결필드 플레이트를 가지고 있고, 후면금속막은 전면 소스오믹금속에 관통비아로(through hole via) 연결되어 있다. 제작된 GaN HEMT 소자를 이용하여 비선형 모델링에 필요한 파라미터들을 추출하기 위해 여러 조건에서 Pulsed I-V 및 S-parameters를 측정하였다. 파라미터 측정은 AMCAD사 PIV200과 키사이트 테크놀로지스 PNA-X를 측정 제어 시뮬레이션 툴인 AMCAD사 IVCAD를 이용하여 측정하였다. Pulsed bias 및 RF source의 측정 조건으로는 각각 $1\ \mu\text{s}$ 의 펄스 폭과 3 % 듀티 사이클 및 $0.6\ \mu\text{s}$ 의 펄스 폭과 2 % 듀티 사이클의 조건으로 측정을 하였다.

비선형 모델링을 위한 파라미터 측정은 먼저 샘플 선택을 위한 Idss (포화 드레인 전류)와 g_m (트랜스컨덕턴스)을 측정한다. 본 논문에서는 웨이비스 GaN HEMT 샘플 10개를 이용하여 각각의 평균값에서 편차가 큰 샘플을 제외하는 방법을 선택하였다. 선택된 샘플을 이용하여 선형 및 비선형 모델 파라미터를 추출하기 위하여 상온에서 Pulsed I-V와 S-parameters를 측정한다. 그 다음은 드레인 전압 40 V와 드레인전류 350 mA일 때, 상온에서 측정 한 다음으로 열 저항(Rth) 값을 추출하기 위해 전력 소모에 따른 드레인 펄스 전류를 측정한 값과 칩의 온도 가변에 따른 드레인 전류 값을 측정하여 Del Alamo method를 이용하였고^[4], 본 논문에서는 $3.74\ ^\circ\text{C/W}$ 값의 열 저항 값을 얻었다. 열 커패시턴스(Cth) 값을 구하기 위해서는 상온에서 장 펄스(10 s) 특성 측정값을 이용한다.

지금까지 측정한 결과들을 이용하여 다음 절에서 비선형 모델링을 진행한다.

2-2 비선형 모델링 및 검증

본 논문의 비선형 모델은 AMCAD HEMT1 model을 이용하였으며, AMCAD HEMT1 model은 펄스 전압 전류 측정들에 최적화 되어 있는 GaN HEMT 비선형 모델링 방법을 제공한다. 비선형 모델링의 절차는 먼저, 측정된 S-parameters를 이용하여 선형 파라미터를 추출하고, 측정된 Pulsed I-V를 이용하여 IV 모델을 추출한다. 그 다음으로 측정된 Pulsed I-V와 S-parameters를 이용하여 비선형 커패시턴스를 추출하고, 열 모델을 위해 Rth와 Cth를 추출한다. 이러한 모델링 과정을 거쳐 Load-pull을 통해 소자 모

델링을 검증하게 되는데, 측정값과 모델링한 값이 유사하지 않는다면 처음의 단계로 돌아가 다시 모델링을 진행한다.

그림 2는 GaN HEMT 소자의 비선형 모델링 결과를 이용한 S -parameters 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 나타낸다. 측정 및 시뮬레이션은 0.5 GHz에서 26 GHz까지 0.25 GHz 간격으로 드레인 전압 40 V 및 드레인 전류 350 mA의 조건에 맞게 게이트 전압을 조정하여 결과를 얻었다. 측정값과 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 그림 3은 Pulsed 전압 전류 측정 및 시뮬레이션 결과 비교를 나타낸다. 측정 및 시뮬레이션은 3.2 GHz에서 드레인 전압 및 게이트 전압을 가변하며 진행하였다.

앞에서 비선형 모델링을 위한 측정과 그 측정값을 이

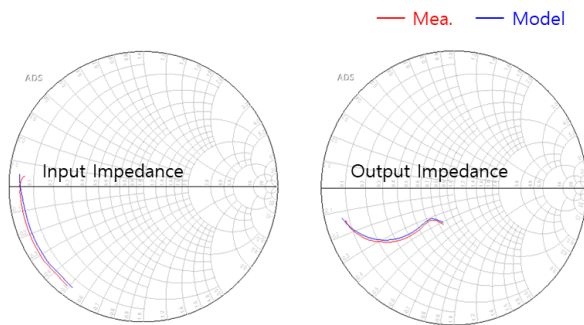


그림 2. S -parameters(S_{11} and S_{22}) 비교
Fig. 2. The comparison of S -parameters.

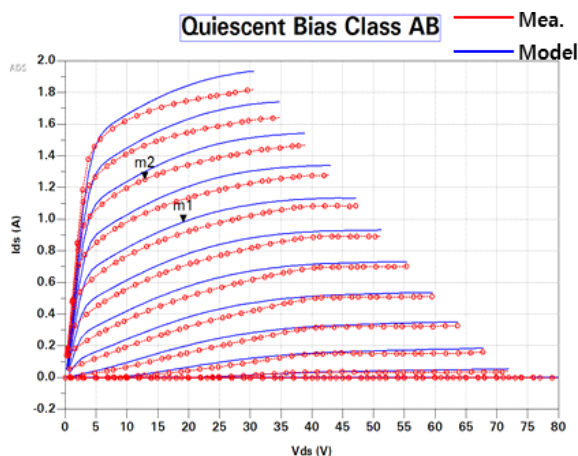


그림 3. Pulsed 전압-전류 측정 및 시뮬레이션 결과
Fig. 3. The results of pulsed IV.

용하여 비선형 모델링한 결과를 최종적으로 검증하기 위해 본 논문에서는 Maury Microwave사의 MT1000 하이브리드 능동 로드-풀 시스템과 GaN HEMT 단위 소자를 측정하기 위한 프로브 스테이션을 이용하였다. 하이브리드 능동 로드-풀 시스템은 능동 로드-풀 시스템 출력쪽에 자동 튜너를 추가하여 능동 로드-풀 시스템에 필요한 RF 전력보다 더 적은 출력 전력을 갖는 증폭기를 시험구성에 사용할 수 있다. 시험 구성은 PXI baseband synthesizer / analyzer, RF test set, 자동 튜너 및 펄스 바이어스 인가와 측정을 위한 AMCAD PIV 장비로 구성된다. 그림 4는 능동 로드-풀 측정 결과를 나타낸다. 최대 출력점과 최대 효율점을 나타내었으며, 최대 효율 임피던스는 소스 임피던스 $2.358+3.865i$ Ω 과 로드 임피던스 $20.02+20.87i$ Ω 일 때 최대 22 W의 출력 전력, 16.1 dB 전력 이득 및 62.2 %의 드레인 효율을 얻을 수 있었다. 최대 출력 임피던스 조건은 소스 임피던스는 최대 효율 임피던스와 동일하게 고정시키고, 로드 임피던스를 가변시키며, 찾은 점은 $17.43+10.09i$ Ω 이고, 최대 25.6 W의 출력 전력, 17.1 dB의 전력 이득 및 56 %의 드레인 효율을 얻었다.

그림 5는 비선형 모델링 검증을 위해 로드-풀 측정 결과를 비선형 모델링 결과를 이용한 시뮬레이션과 비교하였다. 표 1과 같이 최대 출력점에서 시뮬레이션 결과는 최대 출력 22.6 W, 전력 이득 15.6 dB 및 드레인 효율 58 %의 결과를 얻었고, 이는 측정 결과와 출력은 0.54 dB, 전력 이득은 1.5 dB 및 드레인 효율은 2 % 차이가 있음을

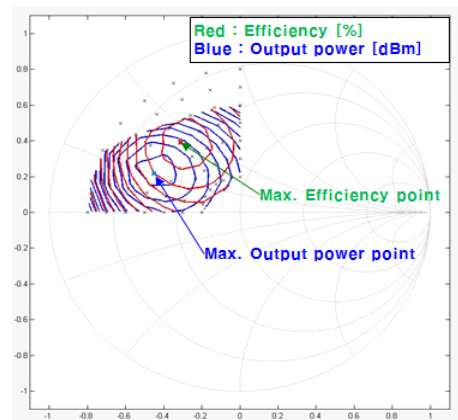


그림 4. 능동 로드-풀 측정 결과
Fig. 4. Measured results of active load-pull.

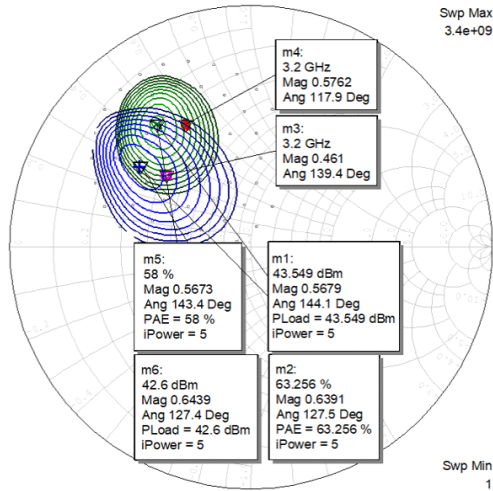


그림 5. 로드-풀 결과 비교

Fig. 5. The comparison of load-pull results.

표 1. 최대 출력점 특성 비교

Table 1. Comparison of maximum output power point.

	Measurement	Simulation
Output power [dBm]	44.09	43.55
Power gain [dB]	17.1	15.6
Drain efficiency [%]	56	58

표 2. 최대 효율점 특성 비교

Table 2. Comparison of maximum efficiency point.

	Measurement	Simulation
Output power [dBm]	43.4	42.6
Power gain [dB]	16.1	14.6
Drain efficiency [%]	62.2	63.2

확인하였다. 표 2는 최대 효율점에서 측정 결과와 시뮬레이션을 비교하였다. 비선형 모델을 이용하여 시뮬레이션한 결과는 최대 출력 18.2 W, 14.6 dB 전력 이득 및 63.2 % 드레인 효율을 얻었고, 이는 로드-풀 측정 결과와 비교

하면 출력은 0.8 dB, 전력 이득은 1.5 dB 및 드레인 효율은 1 %의 오차를 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 GaN HEMT 소자의 비선형 모델링을 위한 Pulsed I-V 및 S-parameters를 측정하고, 선형/비선형 파라미터 추출을 통해 비선형 모델링을 진행하였다. 비선형 모델링을 통해 생성된 비선형 모델의 검증을 위해 능동 로드-풀 측정을 진행하였고, 생성된 비선형 모델을 이용하여 시뮬레이션 결과와 비교를 한 결과, 유사한 특성 결과를 얻을 수 있었다. 향후에는 보다 많은 소자의 측정결과를 반영하여 모델링을 진행한다면 보다 더 정확하고 신뢰성 있는 비선형 모델을 얻을 수 있을 것이다.

References

- [1] S. M. Wood, U. Andre, B. J. Millon, and J. Milligan, "Hybrid and monolithic GaN power transistors for high power S-band radar applications," in *2012 7th European Microwave Integrated Circuit Conference*, Amsterdam, Oct. 2012, pp. 421-424.
- [2] Aethercomm, "Gallium nitride(GaN) microwave transistor technology for radar applications," *Microwave Journal*, vol. 51, no. 1, p. 106, Jan. 2008.
- [3] T. Gasseling, "Compact transistor models: The roadmap to first pass amplifier design success," *Microwave Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 74-86, Mar. 2012.
- [4] J. Joh, J. A. del Alamo, U. Chowdhury, T. Chou, H. Tserng, and J. L. Jimenez, "Measurement of channel temperature in GaN high-electron mobility transistors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 56, no. 12, pp. 2895-2901, Dec. 2009.