

5G용 RFIC 설계를 위한 GaN HEMT 소자의 고정밀 컴팩트 모델링 기법

High-Precision Compact Modeling Technique for GaN HEMT Devices in 5G RFIC Design

전 희 석¹ · 고 현 정^{2*} · 최 경 호³

Heesauk Jhon¹ · Hyeonjeong Go^{2*} · Kyoung-Ho Choi³

요 약

GaN HEMT 소자의 기존 컴팩트 모델은 S_{22} 파라미터에서 상당한 부정확성을 나타내며, 이는 출력 컨덕턴스(g_{ds}) 파라미터의 부적절한 추출에서 기인한다. 본 논문에서는 소자 특성화 중 자체 발열 효과를 효과적으로 제거하는 펄스 S -파라미터 측정을 통해 S_{22} 정확도를 향상시키는 체계적인 방법론을 제시한다. 펄스 I-V 및 S -파라미터 측정 시스템을 사용하여 정확한 바이어스 의존 g_{ds} 값을 추출하고 이를 업계에서 널리 채택되는 Angelov 컴팩트 모델에 통합하였다. 실험적 검증 결과, 10 GHz까지의 주파수 범위에서 S_{22} 예측 정확도가 크게 향상되어 오류율이 15 %에서 약 8.5 %로 감소하였으며, 실제 PA 설계 응용에 중요한 출력 정합 특성이 개선되었다.

Abstract

Accurate small-signal modeling of GaN HEMT devices is essential for RF power amplifier design. However, conventional compact models exhibit significant inaccuracies in the S_{22} parameter owing to improper g_{ds} extraction. This study presents a systematic methodology using pulsed S -parameter measurements to mitigate self-heating effects and accurately extract bias-dependent g_{ds} values for integration into an Angelov compact model. The experimental validation demonstrates significant improvements, reducing the S_{22} error rate from 15 % to 8.5 % up to 10 GHz, with enhanced output-matching characteristics crucial for 5G PA design.

Key words: GaN HEMT, Output Conductance, Pulsed Measurement, Small-Signal Model, Compact Modeling

I. 서 론

5세대(5G) 및 6세대(6G) 이동통신 시스템의 발전은 RF 전력증폭기(PA, power amplifier)에 고주파·고출력 동작 성능을 요구하고 있다. 이러한 요구를 충족하기 위한 핵

심 소자로 GaN(gallium nitride) 기반 HEMT(high electron mobility transistor)가 주목받고 있으며, GaN HEMT의 정확한 전기적 특성 모델링은 회로 설계 단계에서 신뢰성과 효율성을 보장하는 핵심 기술로 부상하였다^{[1][2]}. 특히 PA 설계에서 출력 정합 특성을 나타내는 S_{22} 파라미터는

「이 연구는 2024학년도 국립목포대학교 연구년 지원 사업에 의하여 연구되었음.」

국립목포대학교 반도체공학과(Department of Semiconductor Engineering, Mokpo National University)

*한국자동차연구원(Automotive Technology Institute)

1: 교수(<https://orcid.org/0009-0005-9007-8227>), 2: 연구원(<https://orcid.org/0009-0002-0538-8908>), 3: 교수(<https://orcid.org/0000-0001-8289-2142>)

· Manuscript received December 30, 2025 ; Revised January 10, 2026 ; Accepted February 4, 2026. (ID No. 20251230-161)

· Corresponding Author: Kyoung-Ho Choi (e-mail: khchoi@mokpo.ac.kr)

회로 전체의 전력 이득과 효율에 직접적으로 영향을 미치므로, 드레인 단자의 주파수 의존적 거동을 정밀하게 모사할 수 있는 컴팩트 모델(compact model) 개발이 필수적이다^{[3],[4]}. 본 논문에서는 실제 산업계에서 널리 사용되는 상용 Angelov model을 기반으로 gate 및 drain 바이어스에 의존하는(bias-dependent) g_{ds} 모델을 추가적으로 적용한 새로운 컴팩트 모델을 제안하였다.

II. 제안된 RF GaN HEMT 모델링 기법

본 논문에서는 상용모델과 측정 간의 정합성(MHC, model-to-hardware correlation)을 우선 분석·평가하기 위해 Focus 社에서 제공하는 "compact modeling" system을 활용하여, extrinsic parameter, C_{GD} , C_{GS} 및 I_{ds} 와 같은 등가회로상의 전기적 파라미터를 추출한 후 ADS 시뮬레이터로 이를 구성하였다^[5]. 측정을 위해 Winsemi에서 제작된 GaN 트랜지스터($W/L=400/0.25 \mu\text{m}$)를 활용하였고, 계측 중에 발생할 수 있는 온도효과를 배제하기 위해 그림 1에 제시된 바와 같이 pulsed IV 기반의 RF 계측시스템을 구성하였다. 측정조건은 pulse width 4 μs , pulse period 4,000 μs , duty cycle 0.1 %로 설정 후 포화영역($V_{gs}=-3.0 \sim -2.8 \text{ V}$, $V_{ds}=10 \sim 40 \text{ V}$)으로 한정하고, G-S-G패턴의 on-wafer probing방식을 채택하였다. 측정결과, 그림 2에서 확인할 수 있듯이, 저주파수 대역에서 S_{22} 파라미터의 모델링 정확도가 S_{11} 에 비해 현저히 낮게 나타났다. 이러한 부정합성은 GaN HEMT에 내재된 deep trap site에 의한 g_{ds} dispersion 효과에 기인한다^[6]. 이를 개선하기 위해 diode, R-C 및 전류원으로 조합된 sub-circuit을 기존모델에 추가하는 방식을 주로 채택하고 있다^[7]. 그러나 sub-circuit 구조의 복잡성과 기존 상용모델과의 호환성으로 인해 상용 모델을 수정보완하기에 어려움을 갖고 있다. 특히, 이러한 보정 방식은 trap-induced g_{ds} dispersion과 self-heating으로 인한 g_{ds} 감소를 각각의 RC 네트워크로 모델링하므로 파라미터 추출이 복잡하고, S_{22} 의 실제 오차 정도를 정량적으로 반영하기 어렵다는 한계를 갖는다. 결국, g_{ds} 의 바이어스 및 주파수 의존성을 정밀하게 모사하고, 이를 기존 컴팩트 모델에 손쉽게 반영 가능한 추가적인 모델링 작업이 필수적이다. 본 연구에서는 복잡한 sub-circuit 구

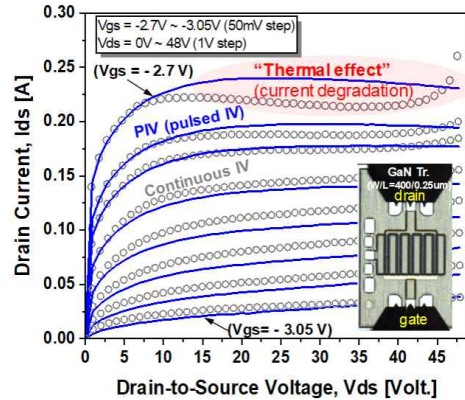
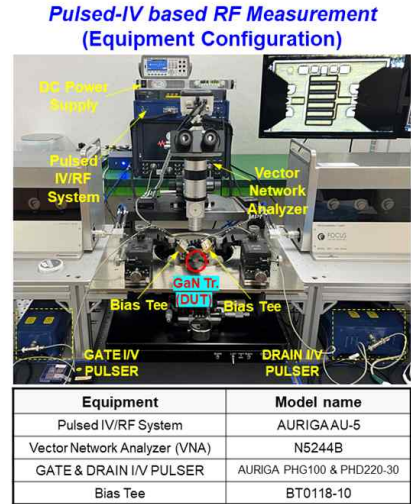


그림 1. GaN HEMT 소자의 RF 측정시스템
Fig. 1. RF measurement system for GaN HEMT.

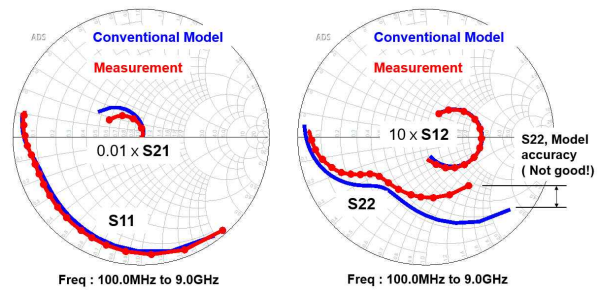
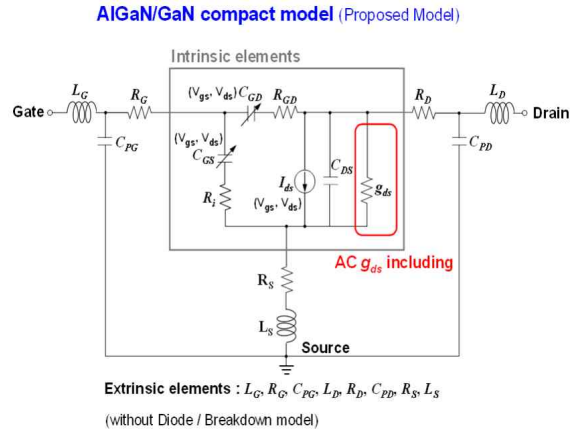


그림 2. 0.25 μm RF GaN HEMT 소자의 S-parameter 측정 및 상용모델 비교결과(@ $V_{gs}=-2.9 \text{ V}$, $V_{ds}=20 \text{ V}$)
Fig. 2. S-parameter comparison of measurement and conventional model for 0.25 μm RF GaN HEMT device from 100 MHz to 9 GHz (@ $V_{gs}=-2.9 \text{ V}$, $V_{ds}=20 \text{ V}$).



GaN HEMT, $L_{gr}=250nm, W=4.0mm$ @ $V_{gs}=-2.8V, V_{ds}=40V$							
Intrinsic parameters				Extrinsic parameters			
$R_{gd}[\Omega]$	$R_i[\Omega]$	$C_{gs}[pF]$	$C_{gd}[pF]$	$R_g[\Omega]$	$R_d[\Omega]$	$R_s[\Omega]$	$L_g[pH]$
35.059	1.180	6.834	1.980	0	0	1.011	1.253
$C_{ds}[pF]$	$g_m[mS]$	$g_d[mS]$	$\tau[psec.]$	$L_d[pH]$	$L_s[pH]$	$C_{pd}[fF]$	$C_{pg}[fF]$
1.901	0.422	0.004	6.625	1.542	0	0	2.631

* $g_d (=1/r_o)$, r_o is output ac-resistance

그림 3. RF GaN HEMT 소자의 제안모델과 추출파라미터
Fig. 3. RF GaN HEMT proposed model and extracted parameters.

성 대신 pulsed S-parameter 측정으로부터 추출된 바이어스에 의존적인 g_{ds} 를 Angelov 컴팩트 모델에 직접 통합하는 방식을 제안한다. 이를 통해 trap-induced dispersion으로 인한 g_{ds} 변동을 Y_{22} level에서 정밀하게 모델링하여, S_{22} 에 대한 모델의 부정확성을 보완할 수 있는 RF 컴팩트 모델을 그림 3에 제안한다.

본 연구에서는 상용모델의 S_{22} 저주파 부정합성을 보완하기 위해, 다중 바이어스(V_{gs}, V_{ds})에서 pulsed S-parameter 측정을 통해 추출된 소신호등가회로 파라미터를 바이어스에 의존적인 함수로 표현하고 이를 범용 대신호모델에 통합하는 방법을 채택하였다^[7]. g_{ds} 는 출력전압 V_{ds} 에 대한 출력 전류 I_{ds} 의 변화량을 의미하는 전기적 파라미터이지만, 측정결과로부터 게이트 및 드레인 바이어스에 따라 그림 4와 같이 비선형적으로 변화함을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 바이어스에 따른 g_{ds} 거동을 모사하기 위해, 그림 5에 묘사된 바와 같이 게이트 및 드레인 바이어스에 따라 각각의 의존성을 수식화한 후, 이 두 개의 관계식을 최종적으로 식 (1)과 같이 통합하였다.

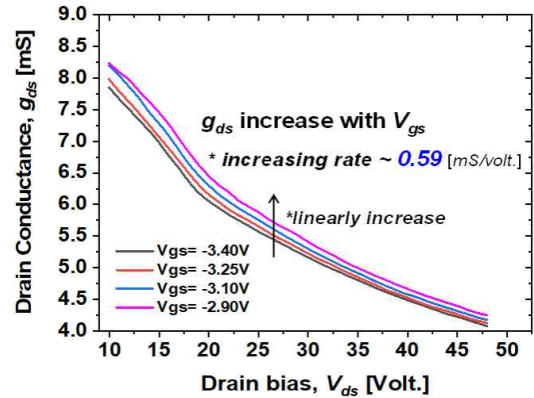


그림 4. g_{ds} 의 게이트 및 드레인 바이어스 의존성
Fig. 4. Gate and drain bias dependency of g_{ds} .

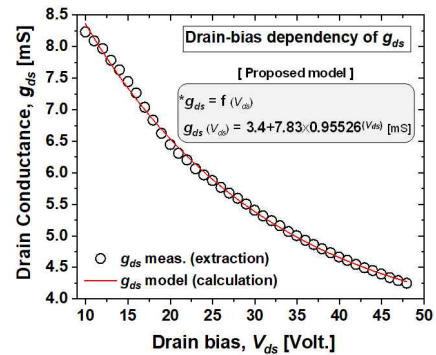
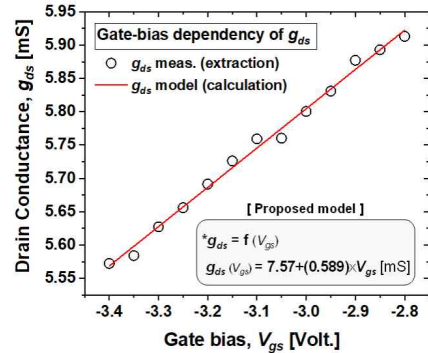


그림 5. g_{ds} 의 게이트 바이어스 의존성 모델
Fig. 5. Gate-bias dependency model of g_{ds} .

$$g_{ds} = f(V_{gs}, V_{ds}) = 3.4 + 7.83 \times 0.95526^{V_{ds}} + (1.72 + 0.593 \times V_{gs}) \quad (1)$$

식 (1)에 표현된 g_{ds} 비선형 거동을 상용모델에 추가로 반영하여 그림 6과 같이 측정과 모델 간의 S-parameter의

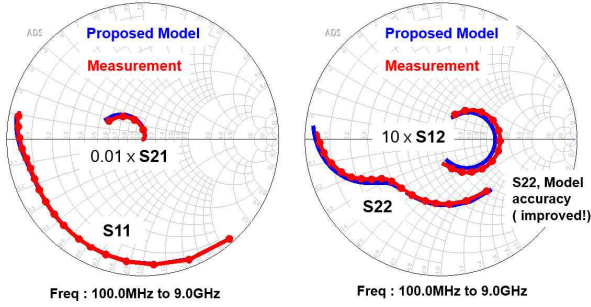


그림 6. 0.25 um RF GaN HEMT 소자의 S-parameter 측정 및 제안모델 비교결과(@ $V_{gs}=-2.9$ V, $V_{ds}=20$ V)
 Fig. 6. S-parameter comparison of measurement and proposed model for 0.25 um RF GaN HEMT device from 100 MHz to 9 GHz (@ $V_{gs}=-2.9$ V, $V_{ds}=20$ V).

정합성을 분석하였다.

그림 2 및 그림 6을 각각 비교하였을 때, 저주파영역에서도 상용모델에 비해 우수한 S_{22} 정합성을 가짐을 확인할 수 있다. 또한 0.1 GHz에서 9 GHz 주파수범위에서 정량적으로 에러율을 분석한 결과 제안한 모델의 경우 S_{22} error-rate(모델과 측정 간 오차율)이 약 6.5 %로, 기존모델(S_{22} error-rate 약 15 %) 대비 8.5 %의 개선효과를 갖는다. 그리고 게이트 및 드레인 바이어스를 각각 -2.85 V부터 -2.95 , 10 V부터 40 V까지 변화시키며 S_{22} 를 살펴본 측정결과와 모델 간에 우수한 정합성을 가짐을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서는 5G/6G용 RF 전력증폭기 설계에 필수적인 GaN HEMT 소자의 새로운 컴팩트 모델링 기법을 제안하였다. 기존 산업계에서 광범위하게 활용되고있는 Angelov 상용모델을 기반으로 트랜지스터에 내재된 g_{ds} dispersion 거동을 실험적으로 정량화하고 반영하여 9 GHz까지 S_{22} 오류율을 약 6.5 % 개선시켰다.

차후 연구에서는 제안된 모델링 기법을 class AB급 전력증폭기 설계에 확대 적용하여, load-pull 특성을 기반으

로 대신호 동작 환경에서의 모델 정확도를 재검증하고 다양한 소자(W/L)에 대한 범용성을 확보할 계획이다.

References

- [1] J. Kim, "A new GaN HEMT small-signal model considering source via effects for 5G millimeter-wave power amplifier design," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 19, p. 9120, Sep. 2021.
- [2] H. K. Ahn, S. H. Lee, S. I. Kim, Y. S. Noh, S. J. Chang, and H. U. Jung, et al., "Technological trends of C-/X-/Ku-band GaN monolithic microwave integrated circuit for next-generation radar applications," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 37, no. 5, pp. 11-21, Oct. 2022.
- [3] Keysight Technologies, "Angelov_Model(Angelov(Chalmers) Nonlinear GaAsFET Model)," Keysight Technologies Documentation, 2012.
- [4] J. Kim, K. Choi, S. Lee, H. Park, and Y. Kwon, "6-18 GHz reactive matched GaN MMIC power amplifiers with distributed L-C load matching," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 16, no. 1, pp. 44-51, Jan. 2016.
- [5] Focus Microwaves, "2023-compact-modelling," 2026. Available: <https://focus-microwaves.com/wp-content/uploads/2025/09/2023-Brochure-8-Compact-Modelling.pdf>
- [6] P. Luo, F. Schnieder, O. Bengtsson, V. Vadalà, A. Raffo, and W. Heinrich, et al., "A streamlined drain-lag model for GaN HEMTs based on pulsed S-parameter measurements," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 11, no. 2, pp. 121-129, Feb. 2019.
- [7] S. A. Ahsan, S. Ghosh, S. Khandelwal, and Y. S. Chauhan, "Physics-based multi-bias RF large-signal GaN HEMT modeling and parameter extraction flow," *IEEE Journal of The Electron Devices Society*, vol. 5, no. 5, pp. 310-319, Sep. 2017.