

2~16 GHz GaN 비균일 분산 전력증폭기 MMIC

2~16 GHz GaN Nonuniform Distributed Power Amplifier MMIC

배경태 · 이익준 · 강현석 · 김동욱

Kyung-Tae Bae · Ik-Joon Lee · Hyun-Seok Kang · Dong-Wook Kim

요 약

본 논문에서는 드레인 분기 커패시터를 사용하여 입·출력 간 동위상을 제공함과 동시에 각 트랜지스터에 최적 부하 임피던스를 제공하는 비균일 분산 전력증폭기 설계 기법을 2~16 GHz GaN 광대역 전력증폭기 MMIC 설계에 적용하고, 칩을 제작하여 결과를 평가하였다. Win Semiconductors사의 0.25 μm GaN HEMT 공정으로 제작된 MMIC 칩은 크기가 3.9 mm×3.1 mm이며, 주파수 대역 내에서 12 dB 이상의 선형 이득 및 10 dB 이상의 입력 반사 손실을 보였다. 연속파 모드 포화출력 조건에서 측정된 출력 전력은 36.2~38.5 dBm의 값을 보였고, 전력부가효율은 약 8~16 %를 나타내었다.

Abstract

In this paper, a 2~16 GHz GaN wideband power amplifier MMIC is designed and fabricated using the nonuniform power amplifier design technique that utilizes drain shunt capacitors to simultaneously provide each transistor with the optimum load impedance and phase balance between input and output transmission lines. The power amplifier MMIC chip that is fabricated using the 0.25 μm GaN HEMT foundry process of Win Semiconductors occupies an area of 3.9 mm×3.1 mm and shows a linear gain of larger than 12 dB and an input return loss of greater than 10 dB. Under a continuous-wave mode, it has a saturated output power of 36.2~38.5 dBm and a power-added efficiency of about 8~16 % in 2 to 16 GHz.

Key words: GaN, HEMT, Wideband Power Amplifier, MMIC, Nonuniform Distributed

I. 서 론

GaN HEMT(High Electron Mobility Transistor)는 Si 또는 GaAs 기반의 소자보다 큰 밴드갭의 이점으로 인해 높은 드레인 전압을 사용할 수 있어 트랜지스터의 최적 부하 저항을 크게 가져갈 수 있기 때문에, 50 Ω 시스템에 낮은 임피던스 변환비로 광대역 전력 정합을 달성하기 매우 유리한 소자이다.

100 % 이상의 비대역폭을 갖는 GaN HEMT 기반의 광대역 전력증폭기 MMIC(Monolithic Microwave Integrated

Circuit)는 리액티브 정합^[1] 또는 분산 증폭 구조^{[2]~[5]}로 연구된 바 있으며, L 대역에서 Ku 대역에 이르는 초광대역 전력증폭기는 평탄한 이득 및 대역폭 확장에 유리한 분산 증폭 구조가 비교적 적합하다고 볼 수 있다.

광대역 전력증폭기로서 최적의 성능을 보일 수 있는 비균일 분산 전력증폭기는 각 트랜지스터의 최적 부하선(load line)을 유지할 수 있도록 비균일한 드레인 인공 전송선로(artificial transmission line) 및 비균일한 크기의 트랜지스터들을 복합적으로 활용하여 설계가 이루어진다. 그러나 기존의 비균일 분산 전력증폭기 설계 방식은 입

충남대학교 전자정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received September 19, 2016 ; Revised October 18, 2016 ; Accepted October 31, 2016. (ID No. 20160919-100)

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

력과 출력 사이의 위상 속도 균형을 맞추는 과정이 불분명하기 때문에 설계 절차가 체계적이지 못하고, 초기 설계 후 번거로운 최적화 과정을 수반하게 된다.

본 논문에서는 드레인 분기(shunt) 커패시터를 추가하여 입·출력 위상 균형을 맞추고, 동시에 최적 출력 정합을 만족시킬 수 있도록 제한된 설계 기법^[6]의 대역폭 확장 가능성을 검증하고자 2~16 GHz 5 W급 비균일 분산 전력증폭기 MMIC의 설계 및 제작 결과를 제시한다.

II. 광대역 전력증폭기 설계 및 측정

2-1 비균일 분산 전력증폭기 설계

그림 1에 나타난 드레인 분기 커패시터를 추가한 비균일 분산 전력증폭기는 입력의 위상 속도를 기준으로 출력의 위상 속도를 맞추고 동시에, 각 트랜지스터 드레인 노드마다 요구되는 최대 출력 조건의 최적 부하를 제공할 수 있다. 회로의 게이트 및 드레인 인공 전송선로를 구성하는 파라미터들은 식 (1)~(4)를 통해 계산될 수 있다^[6].

$$Z_{d,n} = \frac{W_{Qn} R_{opt,n}}{\sum_{i=1}^n W_{Qi}} = \frac{R_{opt}(\Omega - mm)}{\sum_{i=1}^n W_{Qi}} \quad (1)$$

$$L_g = 50^2 \times C_{in} \quad (2)$$

$$L_{d,i} = (Z_{d,i})^2 \times (C_{out} + C_{sh,i}) \quad (3)$$

$$C_{sh,i} = \frac{\sqrt{L_g C_{in}}}{Z_{d,i}} - C_{out} \quad (4)$$

여기서 $Z_{d,n}$ 은 n 번째 트랜지스터의 드레인 노드에서 요구되는 임피던스이고, W_{Qn} 과 $R_{opt,n}$ 은 n 번째 트랜지스터의 게이트 폭과 최대 출력 조건의 최적 부하저항, $R_{opt}(\Omega-mm)$ 은 단위 게이트 폭(mm)으로 정규화한 트랜지스터의 최적 부하저항이다. 또한, C_{in} 과 C_{out} 은 최대 출력 조건에서의 트랜지스터 입·출력 등가 캐패시턴스이며, $C_{sh,i}$ 는 각 드레인 노드에 추가되는 분기 캐패시턴스이다. L_g 와 $L_{d,i}$ 는 게이트 및 드레인 인공 전송선로를 구성하는 인덕턴스이다.

일반적으로 트랜지스터의 크기가 클수록 높은 출력을 얻을 수 있지만, 큰 게이트 표면 둘레(periphery)로 인해 게이트-소스 캐패시턴스 C_{gs} 가 큰 값을 가지게 되어 게이

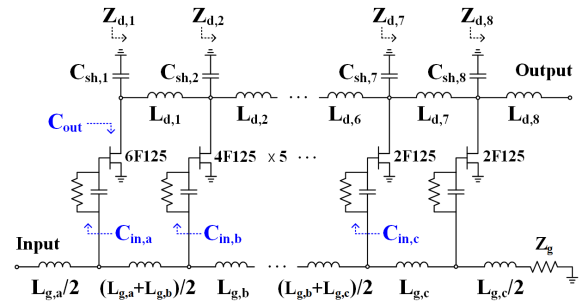


그림 1. 비균일 분산 전력증폭기 회로도

Fig. 1. A schematic circuit of the nonuniform distributed power amplifier.

트 인공 전송선로의 차단 주파수를 감소시키므로 증폭기의 대역폭을 감소시키게 된다. 따라서 요구되는 출력 전력에 대한 게이트 폭이 산정되면, 작은 크기의 트랜지스터들을 다수 배열하여 게이트 폭을 분배하는 것이 합당한 설계 전략이 된다.

표 1에 나타난 바와 같이, 균일한 크기의 트랜지스터를 배열할 경우 첫 번째 드레인 인공 전송선로의 임피던스 $Z_{d,1}$ 이 150 Ω 으로 큰 값을 가져 인공 전송선로 구현을 어렵게 만든다. 또한, n 번째 드레인 인공 전송선로의 임피던스 $Z_{d,n}$ 이 최종 출력 임피던스로 종단되기 때문에 $Z_{d,n}$ 의 값이 작을수록 50 Ω 으로 변환할 때 임피던스 변환비가 커지게 된다. 따라서 첫 번째 트랜지스터의 게이트 폭을 $6 \times 125 \mu m$ 로, 7, 8번째 트랜지스터의 게이트 폭을 $2 \times 125 \mu m$ 로

표 1. 트랜지스터의 게이트 폭 분배에 따른 드레인 노드에서 요구되는 임피던스 비교

Table 1. Comparison of impedances required at the drain nodes with respect to the transistor's gate width.

N	균일 분배		비균일 분배	
	W_{Qi} [μm]	$Z_{d,i}$ [Ω]	W_{Qi} [μm]	$Z_{d,i}$ [Ω]
1	4×125	150	6×125	100
2	4×125	75	4×125	60
3	4×125	50	4×125	42.9
4	4×125	37.5	4×125	33.3
5	4×125	30	4×125	27.3
6	4×125	25	4×125	23.1
7	4×125	21.4	2×125	21.4
8	4×125	18.8	2×125	20

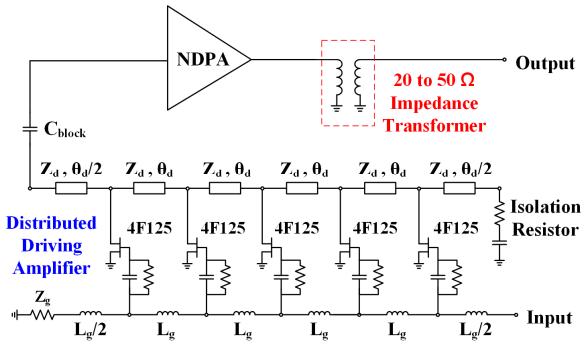


그림 2. 간략화된 2단 전력증폭기 회로도

Fig. 2. A simplified schematic circuit of the two-stage power amplifier.

μm 로 대체함으로써 인공 전송선로 구현 및 광대역 임피던스 변환이 용이한 임피던스를 갖도록 트랜지스터 게이트 폭을 재분배하였다. MMIC에 사용되는 나선형 인덕터는 구조상 포화출력 모드에서 높은 드레인 전류에 취약한 부분이 있으므로 드레인 분기 커패시터를 일부 남기고, 드레인 직렬 인덕터와 분할된 병렬 커패시터를 마이크로스트립 선로로 변환하였다^[6].

2-2 2단 전력증폭기 설계

그림 2에 임피던스 변환기와 구동 증폭단이 추가된 2단 전력증폭기의 회로도를 나타내었다. 비균일 분산 전력증폭기의 출력 임피던스 20 옴을 50 옴으로 변환하는 광대역 임피던스 변환기는 다수의 병렬 커패시터와 짧은 길이의 마이크로스트립 선로를 활용한 π 형 회로로 구현되었으며, 임피던스 변환기가 차지하는 면적을 줄일 수 있도록 설계되었다. 전력 정합 위주의 비균일 분산 전력증폭기의 낮은 선형 이득을 보완하기 위한 구동 증폭단은 $4 \times 125 \mu\text{m}$ 의 게이트 폭을 갖는 트랜지스터 5개를 사용하여 균일 분산증폭기 구조로 설계되었다. 균일 분산증폭기는 출력 정합 특성이 좋아 2단 전력증폭기 구성 시 별도의 단간(interstage) 정합회로가 요구되지 않는 장점이 있다. 여기서 균일 분산증폭기의 드레인 및 게이트 인공 전송선로를 구성하는 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스 Z_d 와 전기적 길이 θ_d 및 직렬 인덕터 L_g 의 값은 일반적인 균일 분산증폭기 설계 기법을 통해 도출하였다.

2-3 제작 및 측정 결과

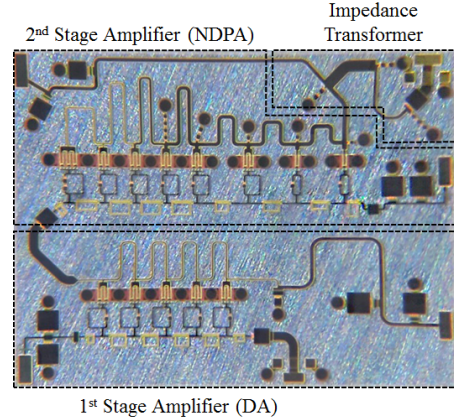


그림 3. 제작된 비균일 분산 전력증폭기 MMIC 칩 사진

Fig. 3. A microphotograph of the fabricated nonuniform distributed power amplifier MMIC.

설계된 광대역 전력증폭기는 Win Semiconductors사의 $0.25 \mu\text{m}$ GaN HEMT 파운드리 공정을 사용하여 제작되었으며, 제작된 칩의 사진이 그림 3에 나타나 있다. 제작된 전력증폭기 MMIC 칩의 크기는 $3.9 \times 3.1 \text{ mm}^2$ 이다.

그림 4는 온-웨이퍼로 측정된 칩의 S-파라미터 결과와 설계 결과를 비교하고 있다. 시뮬레이션 #2와 같이 18 GHz까지 엄두에 두고 설계되었으나, 그림 4(a)와 같이 2 GHz 정도 하향 차단(cut-off)된 측정 결과를 보였다. 이는 게이트 정합회로에서 회로 특성에 민감한 부분만 전자파 시뮬레이션을 수행한 결과로, 회로 전체에 대한 전자파 시뮬레이션을 통해 시뮬레이션 #1과 같이 나타남을 역추

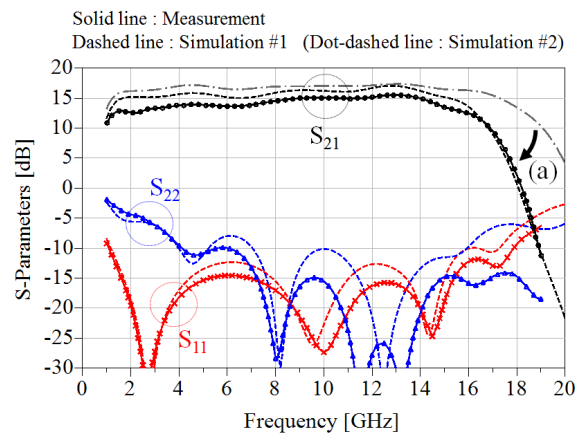


그림 4. S-파라미터 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 4. Simulated and measured S-parameter results.

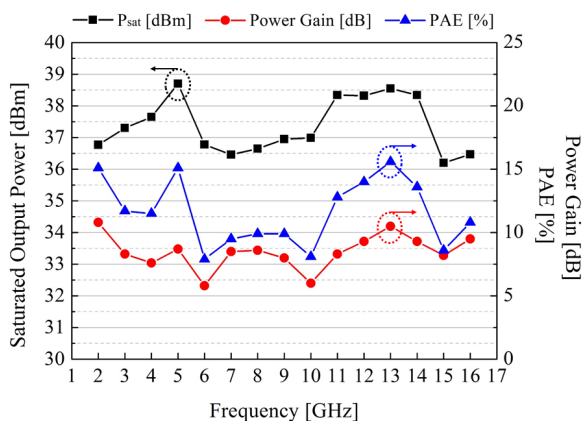


그림 5. 포화 출력전력, 전력이득, 전력부가효율 측정 결과
Fig. 5. Measured saturated output power, power gain and power-added efficiency results.

표 2. 기존 유사 전력증폭기 MMIC들과 제작된 전력증폭기 MMIC의 비교

Table 2. Comparison of the fabricated power amplifier MMIC and previously published similar power amplifier MMICs.

항목	본 논문	Ref. [2]	Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]
주파수 [GHz]	2~16	2~15	2~17	2~18	2~12
드레인 전압 [V]	30	20	30	10	40
포화전력 [W]	4~7	5~7	8~15	1~2	5~8
PAE [%]	8~16	20~29	19~39	5~15	5~35
선형이득 [dB]	12~15	10~13	10~14	18~21	7~15
반사손실 [dB]	≥ 10	≥ 5	≥ 9	≥ 10	≥ 3
칩 크기 [mm ²]	12.1	10.1	15.3	8.0	4.3

적할 수 있었다. 2단 전력증폭기의 S_{21} 은 12.5~15.4 dB의 측정 결과를 보였고, 입력 반사손실은 10 dB 이상의 값을 보였다.

그림 5는 연속파의 입력 전력을 인가할 때 포화출력 조건의 측정 결과를 보여주고 있으며, 36.2~38.5 dBm의 출력 전력과 7.9~15.6 %의 전력부가효율을 6~10.8 dB의 포화출력의 전력이득 결과와 함께 보여주고 있다. 표 2에는 제작된 전력증폭기 MMIC와 기존 발표된 유사한 성능의 GaN 분산 전력증폭기 MMIC들을 비교한 결과를 보였다.

III. 결 론

본 논문에서는 0.25 μm GaN HEMT 공정을 사용하여

2~16 GHz의 광대역에서 동작하는 비균일 분산 전력증폭기 MMIC를 설계 및 제작하였다. 드레인 분기 커패시터를 추가한 비균일 분산 전력증폭기 설계 기법의 대역폭 확장 가능성을 검증하기 위해 제작된 전력증폭기는 12 dB 이상의 선형이득과 10 dB 이상의 입력 반사손실을 가지며, 5 W 정도의 포화출력 전력을 보였다.

References

- [1] U. Schmid, H. Sledzik, P. Schuh, J. Schroth, M. Oppermann, P. Brückner, F. van Raay, R. Quay, and M. S. Eggerbert, "Ultra-wideband GaN MMIC chip set and high power amplifier module for multi-function defence AESA applications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 8, pp. 3043-3051, Aug. 2013.
- [2] J. Gassmann, P. Watson, L. Kehias, and G. Henry, "Wideband, high-efficiency GaN power amplifiers utilizing a non-uniform distributed topology", *IEEE MTT-S International Microw. Symp. Digest*, pp. 615-618, Jun. 2007.
- [3] C. Campbell, C. Lee, V. Williams, M. Kao, H. Tserng, P. Saunier, and T. Balisteri, "A wideband power amplifier MMIC utilizing GaN on SiC HEMT technology", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 10, pp. 2640-2647, Oct. 2009.
- [4] R. Santhakumar, B. Thibeault, M. Higashiwaki, S. Keller, Z. Chen, U. K. Mishra, and R. A. York, "Two-stage high-gain high-power distributed amplifier using dual-gate GaN HEMTs", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 8, pp. 2059-2063, Aug. 2011.
- [5] E. Ersoy, S. Chevtchenko, P. Kurpas, and W. Heinrich, "A compact GaN-MMIC non-uniform distributed power amplifier for 2 to 12 GHz", *German Microwave Conf. 2014(GeMIC 2014)*, Mar. 2014.
- [6] K. T. Bae, D. W. Kim, "2~6 GHz GaN distributed power amplifier MMIC with tapered gate-series/drain-shunt capacitors", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 26, no. 5, pp. 456-465, Mar. 2016.