

InGaP/GaAs HBT를 이용한 900 MHz 대역 1 W급 고선형 전력 증폭기 MMIC 설계

Highly Linear 1 W Power Amplifier MMIC for the 900 MHz Band Using InGaP/GaAs HBT

주소연 · 한수연 · 송민건 · 김형철 · 김민수 · 노상연 · 유형모 · 양영구

Soyeon Joo · Suyeon Han · Mingeun Song · Hyungchul Kim · Minsu Kim · Sangyoun Noh · Hyungmo Yoo · Youngoo Yang

요 약

본 논문에서는 InGaP/GaAs hetero-junction bipolar transistor(HBT)를 이용하여 900 MHz에서 동작하는 1 W급 선형 전력 증폭기를 설계 및 검증하였다. 온도 변화에 따른 증폭기의 특성 변화를 최소화하기 위해 능동 바이어스 회로를 구성하였다. 전류 붕괴(current collapse)와 열 폭주(thermal runaway)를 방지하기 위하여 ballast 저항을 삽입하여 전력 증폭기의 성능 및 신뢰성을 최적화하였다. 제작된 선형 전력 증폭기는 중심 주파수 900 MHz의 one-tone 신호를 사용하였을 때, 17.6 dB의 전력 이득과 30 dBm의 OP1dB를 가지며, 이때 44.9 %의 PAE를 갖는다. 또한, two-tone 신호를 인가하였을 때, 20 dBm의 평균 출력 전력에서 47.3 dBm의 매우 높은 OIP3를 갖는다.

Abstract

This paper presents a highly linear power amplifier MMIC, having an output power level of about 1 watt, based on InGaP/GaAs hetero-junction bipolar transistor(HBT) technology for the 900 MHz band. The active bias circuit is applied to minimize the effect of temperature variation. Ballast resistors are optimized to prevent a current collapse and a thermal runaway. The fabricated power amplifier exhibited a gain of 17.6 dB, an output P1dB of 30 dBm, and a PAE of 44.9 % at an output P1dB from the one-tone excitation. It also showed a very high OIP3 of 47.3 dBm at an average output power of 20 dBm from the two-tone excitation.

Key words : Power Amplifier Integrated Circuit, PA Driver IC, InGaP/GaAs HBT, Active Bias Circuit, MMIC

I. 서 론

CDMA, WCDMA, OFDM과 같은 현대의 무선 통신 시스템은 대용량의 데이터를 전송하고, 주파수 사용 효율을 높일 수 있도록 디지털 변조 통신 방식을 사용하고 있다. 이렇게 디지털 변조된 신호는 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 특성을 나타내고

있으며, 이에 따라 최대 출력에서 상당히 back-off된 평균 전력에서의 선형성 및 효율이 전력 증폭기의 중요한 성능 지표가 된다. 특히 소형 중계기나 기지국의 송신단에서 주 전력 증폭기를 구동하기 위한 전치 전력 증폭기는 주 전력 증폭기의 선형성에 영향을 주지 않기 위해 매우 높은 선형성이 요구된다.

InGaP/GaAs HBT는 전력 밀도 및 선형성이 좋고,

「이 연구는 서울특별시의 2010년도 중소기업 제품개선 지원사업(과제번호 : JP100140)의 지원으로 연구되었음.」

성균관대학교 정보통신공학부(School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

· 논문 번호 : 20110721-03S

· 교신저자 : 양영구(e-mail : yang09@skku.edu)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 22일

항복 전압이 높아 구동 전력 증폭기와 같이 고선형 특성을 요구하는 무선 통신 시스템의 전력 증폭기 개발에 많이 사용되어 왔다^{[1],[2]}. 하지만 InGaP/GaAs HBT는 높은 전력 밀도와 전압 특성에 의한 전류 붕괴(current collapse) 또는 열 폭주(thermal runaway) 등에 의해 증폭기의 성능이 열화될 수 있으므로 설계 시 온도 변화에 의한 증폭기의 성능 변화를 충분히 고려해야만 한다.

본 논문에서는 InGaP/GaAs HBT 공정을 이용하여 900 MHz 대역에서 동작하는 1 W급 선형 전력 증폭기를 설계 및 검증하였다. 온도 변화에 따른 전력 증폭기의 특성 변화를 최소화하기 위해 능동 바이어스 회로와 안정 저항(ballast resistor)을 최적화하였으며, 궤환 회로를 이용하여 고선형 특성을 얻을 수 있도록 하였다.

II. 회로 설계 및 시뮬레이션

2-1 회로 설계

그림 1은 설계된 선형 전력 증폭기의 회로도이다. 선형 전력 증폭기는 파워 셀과 능동 바이어스 회로, 입출력 정합 회로(L_1, L_2, L_3, C_1, C_2)로 구성된다. 파워 셀은 1 W의 출력 전력을 고려하여 에미터 면적이 $80 \mu\text{m}^2$ ($2 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \times 2$ fingers)인 단위 셀 44개를 내부적으로 병렬 연결하여 총 $3,520 \mu\text{m}^2$ 의 에미터 면적을 갖도록 구성하였다.

HBT로 설계된 전력 증폭기는 출력 전력이 증가함에 따라 파워 셀의 베이스에 공급되어야 하는 전류 또한 증가하게 된다^[3]. 따라서 파워 셀의 베이스에 능동 바이어스 회로를 적용하여 충분한 바이어스 전류

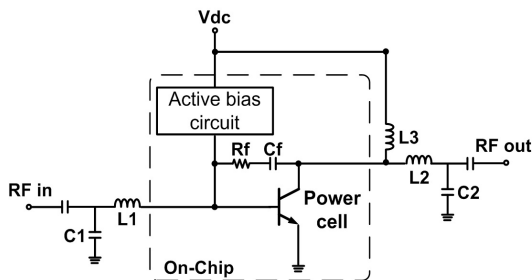


그림 1. 설계된 선형 전력 증폭기의 회로도
Fig. 1. A schematic diagram of the linear power amplifier.

를 공급함과 동시에 온도 변화에 따른 전력 증폭기의 RF 특성 변화를 최소화하고자 하였다. 그리고 파워 셀을 구성하는 단위 셀의 베이스와 에미터에 안정 저항(ballast resistor)을 삽입하여 전류 붕괴(current collapse)와 열 폭주(thermal runaway)에 의한 회로 파괴를 방지하였다. 또한, 파워 셀의 콜렉터-베이스 간에 2,200 Ω 의 저항(Rf)과 10 pF의 캐패시터(Cf)를 연결하여 궤환 회로를 구성하여 전력 증폭기의 안정성과 선형성을 향상시킬 수 있도록 하였다. 그리고 칩의 외부에서 입력 정합 회로와 출력 정합 회로를 사용하여 전력 증폭기가 최적의 출력과 선형성을 가질 수 있도록 설계하였다.

2-2 안정 저항(Ballast Resistor)과 능동 바이어스 회로

그림 2는 파워 셀을 구성하고 있는 단위 셀의 회로도이다. HBT의 경우 반도체 표면의 trap에 의해 콜렉터에 인가되는 전압이 일정 전압 이상으로 증가하면 콜렉터 전류가 급격히 감소하는 전류 붕괴(current collapse) 현상이 발생한다. 이러한 전류의 감소는 전력 증폭기의 출력을 낮아지게 하여 전력 증폭기의 온도를 상승시켜 소자의 파괴를 발생시킨다. 그리고 내부적으로 병렬 연결된 다수의 단위 셀들 중 일부에만 온도 및 전류가 증가하게 되어 국부적으로 소자가 파괴되는 열 폭주(thermal runaway) 현상이 발생할 수 있다. 이러한 악영향으로부터 전력 증폭기를 안정적으로 동작시키기 위해 단위 셀의 베이스와 에미터에 각각 400 Ω 과 30 Ω , 3 Ω 으로 최적화된 안정 저항(ballast resistor)(R_{B1}, R_{B2}, R_E)을 삽입하였다. 특정 단위 셀의 콜렉터 전류가 상승하게 되면 R_E 에 의해 에미터 전압이 상승하여 베이스-에미터 간의 전압이 작아지면서 콜렉터 전류가 감소하게 된다. R_B 는 증가하는 바이어스 전류에 의한 전압 강하에 의해 단위 셀의 베이스 전압을 낮추어 베이스-에미터 간의 전압을 감소시킨다. 이러한 부궤환 작용을 통하여 단위 셀을 전류 붕괴(current collapse)와 열 폭주(thermal runaway)로부터 보호하였다^{[3],[4]}.

그림 3은 설계된 능동 바이어스 회로도이다. HBT 소자는 온도 변화에 민감하여 발생하는 열로 인해 증폭기의 효율 및 선형성이 악화되기 쉽다. 따라서 온도 보상을 위하여 파워 셀을 구성하고 있는 단위 셀

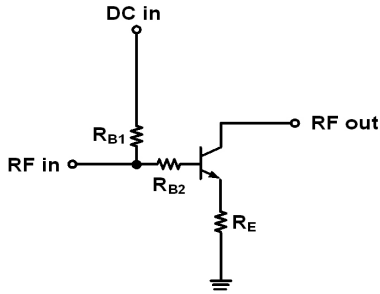


그림 2. 단위 셀의 회로도
Fig. 2. A schematic diagram of the unit cell.

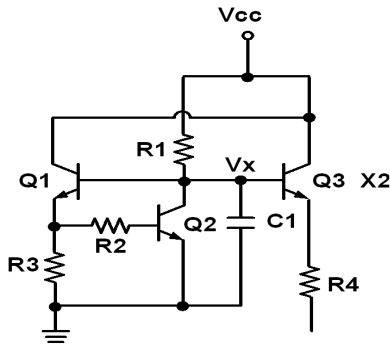


그림 3. 능동 바이어스 회로
Fig. 3. A schematic diagram of the active bias circuit.

표 1. 소자값
Table 1. Value of components.

R_1	R_2	R_3	R_4	C_1
450 Ω	4,200 Ω	800 Ω	10 Ω	4 pF

과 온도 특성 및 RF 특성이 동일한 트랜지스터를 이용하여 능동 바이어스 회로를 설계하였다. 설계된 능동 바이어스 회로는 온도 상승에 의해 HBT의 turn-on 전압이 감소하여 파워 셀의 콜렉터 전류가 증가하면 Q2의 콜렉터 전류도 역시 증가하여 Q3의 바이어스 전압(V_x)을 감소시킴으로써 온도 변화에 따른 전력 증폭기의 RF 특성 변화를 최소화할 수 있다^[5].

그림 4는 온도 변화에 따른 파워 셀의 콜렉터 전류 변화를 시뮬레이션한 결과이다. $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 까지 온도를 변화시켰을 때 DC 전압원을 사용하여 파워 셀의 베이스에 바이어스를 인가한 경우에는 온도가 상승함에 따라 파워 셀의 콜렉터 전류가 약

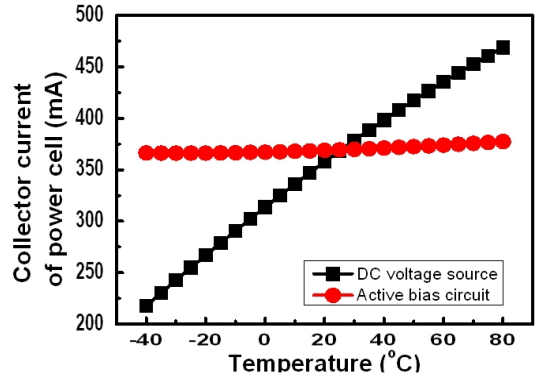


그림 4. 온도 변화에 따른 파워 셀의 콜렉터 전류 변화
Fig. 4. Collector current of power cell according to the temperature variation.

220 mA에서 470 mA까지 큰 폭으로 변화하였다. 반면, 온도 보상 회로가 포함된 능동 바이어스 회로를 사용하여 파워 셀의 베이스에 바이어스 전류를 인가한 경우에는 파워 셀의 콜렉터 전류의 변화폭이 약 366 mA에서 377 mA로 상당히 감소하여 DC 전압원을 사용한 경우에 비해 파워 셀의 콜렉터 전류가 매우 일정하게 유지되었다.

2-3 시뮬레이션 결과

그림 5는 설계된 전력 증폭기의 gain과 PAE의 시뮬레이션 결과이다. 전력 증폭기는 중심 주파수 900 MHz의 one-tone 신호를 인가하였을 때 상온($25\text{ }^\circ\text{C}$)에서 17.6 dB의 전력 이득을 가지고 P1dB 지점인 출력 전력 32 dBm에서 50.4 %의 높은 효율을 나타냈다. 또한, 온도가 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 일 때와 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 일 때에도 상온에서와 유사한 성능을 나타내 온도 변화에 둔감한 특성을 보였다. 그림 6은 설계된 전력 증폭기에 1 MHz의 tone-spacing을 가지는 two-tone 신호를 인가한 경우의 OIP3와 IMD3의 시뮬레이션 결과이다. 설계된 전력 증폭기는 상온($25\text{ }^\circ\text{C}$)일 때 평균 전력 20 dBm에서 49.1 dBm의 매우 높은 OIP3를 가지며, 평균 전력 22 dBm까지 IMD3를 -60 dBc 이하로 유지하여 매우 선형적인 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 또한 온도가 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 일 때와 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 일 때 모두 평균 전력 20 dBm에서 48 dBm 이상의 OIP3와 그 때까지 약 -60 dBc 이하의 IMD3를 유지하여 온도 변화에 따라서도 매우 선형적인 특성을 나타냈다.

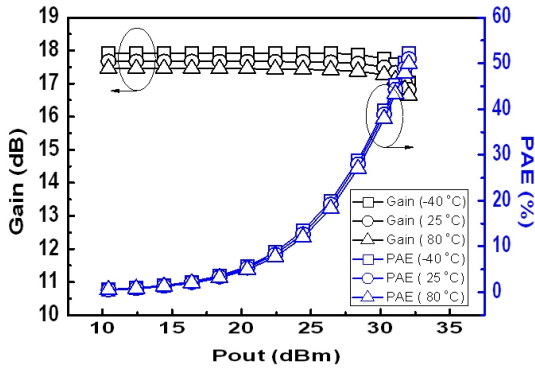


그림 5. Gain과 PAE의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation results of gain and PAE.

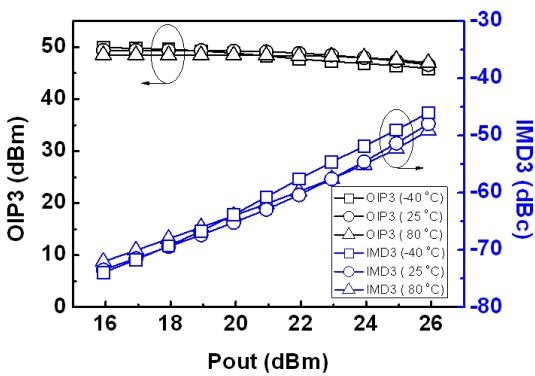


그림 6. OIP3와 IMD3의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of OIP3 and IMD3.

III. 제작 및 측정

그림 7은 제작된 선형 전력 증폭기의 칩 사진이다. WIN semiconductor corporations의 InGaP/GaAs HBT 공정을 통해 제작되었다. 출력 신호의 불일치를 최소화하기 위해 단위 셀을 일렬로 배열하지 않고 11 개씩 세로로 배치하여 이를 4열로 배열하였다. 또한, 발생하는 열의 효과적인 방출을 위해 각 열의 에미터가 마주 보는 위치에 비아를 넓게 삽입하였다. 패드를 포함한 칩의 사이즈는 $1,090 \times 1,090 \mu\text{m}^2$ 이다. 중심 주파수 900 MHz에서 5 V 단일 전압을 인가하여 측정되었고, 정동작 전류(quiescent current)는 382 mA이다.

그림 8은 제작된 선형 전력 증폭기의 이득과 효율의 측정 결과이다. 제작된 전력 증폭기는 중심 주파수 900 MHz의 one-tone 신호를 인가하였을 때 17.6

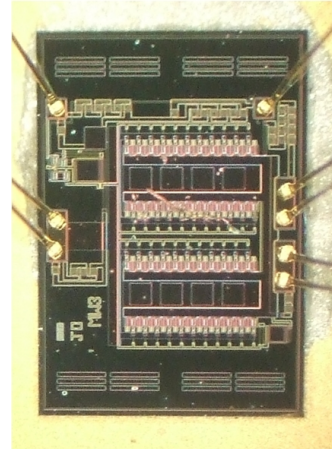


그림 7. 제작된 선형 전력 증폭기의 칩 사진
Fig. 7. The microphotograph of the fabricated linear power amplifier IC.

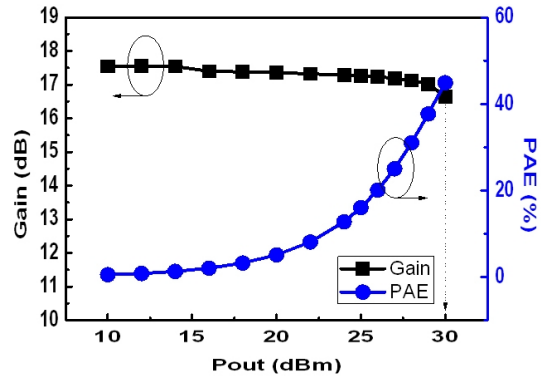


그림 8. Gain과 PAE의 측정 결과
Fig. 8. Measurement results of gain and PAE.

dB의 전력 이득을 가지고, P1dB 지점인 출력 전력 30 dBm에서 436 mA의 전류를 소비하여 44.9 %의 높은 효율을 갖는다. 그림 9는 제작된 전력 증폭기에 1 MHz의 tone-spacing을 가지는 two-tone 신호를 인가한 경우의 OIP3와 IMD3의 측정 결과이다. 제작된 전력 증폭기는 평균 전력 20 dBm에서 47.3 dBm의 OIP3를 가지며, 이때까지 IMD3는 -60 dBC 이하로 매우 좋은 선형성을 유지하였다.

표 2는 HBT 공정을 통하여 제작된 1 W급 상용 MMIC 전력 증폭기들과 본 논문에서 제작된 전력 증폭기의 성능을 비교하여 정리한 표이다. 동작 주파수는 모두 900 MHz 대역이다. 제작된 전력 증폭기는 비교적 낮은 정동작 전류(quiescent current)를 소

표 2. 상용 MMIC 전력 증폭기와의 성능 비교

Table 2. Performance comparison with representative commercial MMIC PA.

	TriQuint's AH215	RFMD's SPA-2118	Prewell's PH530	This work
Process	InGaP HBT	GaAs HBT	InGaP HBT	InGaP HBT
Frequency	900 MHz	900 MHz	900 MHz	900 MHz
Gain	18 dB	33 dB	20 dB	17.6 dB
P1dB	31 dBm	29 dBm	30 dBm	30 dBm
OIP3	46 dBm@18 dBm	47 dBm@17 dBm	45 dBm@12 dBm	47.3 dBm@20 dBm
Voltage	5 V	5 V	5 V	5 V
Current	450 mA	400 mA	260 mA	382 mA

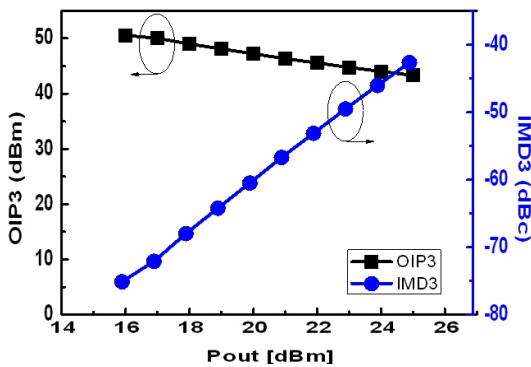


그림 9. OIP3와 IMD3의 측정 결과

Fig. 9. Measurement results of OIP3 and IMD3.

비하면서 가장 높은 출력 파워에서 가장 높은 OIP3 성능을 가져 기존의 MMIC 전력 증폭기들에 비해 매우 선형적인 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 InGaP/GaAs HBT 공정을 이용하여 900 MHz 대역에서 동작하는 1 W 급 선형 전력 증폭기를 설계 및 검증하였다. 능동 바이어스 회로와 안정 저항(ballast resistor)을 최적화하여 설계된 전력 증폭기는 one-tone과 two-tone 시뮬레이션에서 온도 변화에 둔감한 특성을 나타내었다. 측정 결과, 제작된 전력 증폭기는 중심 주파수 900 MHz의 one-tone 신호를 인가하였을 때 17.6 dB의 전력 이득을 가지고, P1dB 지점인 출력 전력 30 dBm에서 44.9 %의 높

은 효율을 가지며, two-tone 평균 전력 20 dBm까지 IMD3가 -60 dBc 이하로 매우 우수한 선형성을 갖는다. 따라서, 송신단에서 고선형 구동 증폭기나 이득 단으로 사용하기에 적합하다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kim, M. Kim, K. Choi, J. Bae, H. Yoo, and Y. Yang, "1.9 GHz band highly linear 2-stage power amplifier MMIC based on InGaP/GaAs HBT", *AP-MC*, pp. 353-536, Dec. 2009.
- [2] K. Choi, M. Kim, H. Kim, S. Jung, J. Cho, S. Yoo, Y. Kim, H. Yoo, and Y. Yang, "A highly linear two-stage amplifier integrated circuit using InGaP/GaAs HBT", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 10, pp. 2038-2043, Oct. 2010.
- [3] S. Maas, "Ballasting HBTs for wireless power amplifier operation", in *Proc. IEEE Int. Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits*, pp. 2-5, Jan. 2006.
- [4] R. P. Arnold, D. Zoroglu, "A quantitative study of emitter ballasting", *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 21, no. 7, pp. 385-391, Jul. 1974.
- [5] 전주영, 김정현, 권영우, "온도 및 인가 전압 변화에 둔감한 GaAs HBT 전력 증폭기용 바이어스 회로", 한국전자과학회 추계 마이크로파 및 전파 학술대회, 27(2), pp. 221-224, 2004년 9월.

주 소 연



2011년 2월: 성균관대학교 생명공학부 (공학사)
2011년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] RFIC Design, Power Amplifier IC Design

김 민 수



2005년 2월: 인천대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 2월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] 무선 통신 송/수신기 시스템 설계, 주파수합성기 설계, RFIC Design

한 수 연



2010년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2010년 3월~2011년 8월: 성균관대학교 이동통신학과 석사과정
[주 관심분야] Power Amplifier IC Design

노 상 연



1989년 3월~1996년 2월: 성균관대학교 전자공학 (공학사)
2000년 3월~2003년 9월: 성균관대학교 전자공학과 박사수료
2001년 3월~2009년 6월: 웨이브일렉트로닉스: LD MOS를 이용한 High Power Amplifier, Linear Power Amplifier 및 Doherty Amplifier 개발.
2010년 3월~현재: BeRex Corp: Power Amplifier Module 개발
[주 관심분야] Power Amplifier Module Design, Power Amplifier IC Design, RFIC Design

송 민 건



2010년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
2010년 3월~현재: 성균관대학교 휴대폰학과 석사과정
[주 관심분야] Analog/Mixed Signal IC Design, RFIC Design

유 형 모



1974년 3월~1978년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 9월~1990년 6월: Oregon State University Electrical Engineering (공학박사)
1978년 3월~1984년 9월: 국방과학연구소 연구원
1990년 9월~1994년 6월: University of Washington Asst Prof.
1994년 6월~1997년 12월: 삼성전자 GaAs 공정개발 부장
1998년 1월~2000년 4월: Excelics Semiconductor, Inc. Fab Manager
2000년 4월~2004년 10월: Dynalinear Technologies, Inc. Director
2004년 10월~현재: BeRex Corp (GaAs Phemt MMIC, In-GaP/GaAs HBT MMIC 개발, 부사장)
[주 관심분야] 무선 통신용 RF MMIC, 고효율 RF 증폭기, High Voltage용 HBT 소자 개발, Microwave 통신용 소자 개발

김 형 철



2008년 2월: 성균관대학교 기계공학부 (공학사)
2010년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] RF Power Amplifier, Analog/Mixed Signal IC Design, RFIC Design

양 영 구



1997년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월~2002년 7월: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후연구원

2002년 8월~2005년 2월: Skyworks Solutions Inc. (Senior Electronic Engineer)

2005년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신공학부 부교수
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 무선 통신 송/수신기 시스템 설계, 비선형 회로 분석 및 시뮬레이션 기법 연구