

0.2W급 Ka-band MMIC CPW 전력증폭기 설계 및 제작

정희원 정 상 화*, 이 상 호*, 김 대 현**, 홍 성 철**, 권 영 우*, 서 광 석**

0.2W Ka-band MMIC CPW Power Amplifier Design and Fabrication

Sanghwa Jung*, Sanghyo Lee*, Dae-hyun Kim**, Sung-Chul Hong**, Youngwoo Kwon*, and

Kwang-Seok Seo** *Regular Members*

요 약

SNU-ISRC 0.25 μ m pHEMT 표준 공정을 사용하여 Ka-band에서 동작하는 0.2W급 MMIC CPW 전력증폭기를 설계, 제작하였다. 기존의 MMIC 공정에서 사용되는 마이크로스트립 전송선 대신 CPW 전송선을 사용함으로써 보다 간단하고 저가의 공정이 가능하였다. 전력증폭기의 설계에서는 보다 넓은 주파수 대역에서 원하는 출력전력을 얻기 위해서 출력단을 Wilkinson coupler를 사용하였는데, 일반적으로 Wilkinson coupler에 사용되는 50 Ω 특성임피던스 전송선 대신에 25 Ω 특성임피던스 전송선을 사용하여 좋은 출력단 전력 정합과 출력 반시손실을 동시에 얻을 수 있었다. 제작된 전력증폭기의 측정결과, 주파수 27GHz에서 출력전력 23.4dBm과 Power-added Efficiency 21.7%의 결과를 보였다.

ABSTRACT

0.2W Ka-band MMIC CPW power amplifier was designed and fabricated using SNU-ISRC 0.25 μ m pHEMT standard process. Because microstrip transmission line in conventional MMIC process was replaced with CPW transmission line, it was possible to fabricate with simple and low cost process. For power amplifier design with broad band performance of output power, Wilkinson coupler comprising 25 Ω characteristic impedance transmission line instead of 50 Ω characteristic impedance line was utilized. Designed Wilkinson coupler satisfied the conditions for optimum output power matching and good output return loss simultaneously. The fabricated power amplifier showed the measured results of output power 23.4dBm and Power-added Efficiency 21.7% at 27GHz.

I. 서 론

근래 급격히 발전하는 통신기술은 이전에 사용되어지고 있던 기존의 낮은 주파수 대역의 포화로 인하여 보다 높은 주파수의 사용을 크게 요구하게 되었다. 특히 통신을 통한 정보량의 폭발적인 증가는 현재 1-2GHz 대역의 낮은 주파수에서는 도저히 수용할 수 없게되었고, 이를 위해서 밀리미터파 부근의 주파수의 사용을 유도하게 되었다. 외국의 경우

밀리미터파 대역을 사용한 상업적 활용 연구가 크게 증가하고 있는데, 그 대표적인 예로는 30GHz 대역의 PCN, 60GHz 대역의 무선 LAN, 77GHz 대역의 자동차 충돌방지 시스템 등을 들 수 있다. 최근 들어서 한국에서도 밀리미터파 대역에서의 연구가 진행되어지고 있는데, 특히 Ka-band 주파수 대역이 광대역 무선 가입자망(B-WLL: Broadband Wireless Local Loop) 서비스를 위해 할당되었고, 많은 통신업체의 연구가 진행되어지고 있다.^[1]

* 서울대학교 전기컴퓨터공학부 밀리미터파 집적시스템 연구실(pusan77@snu.ac.kr),

** 서울대학교 전기컴퓨터공학부 밀리미터파소자 및 회로 연구실(kdh01@snu.ac.kr)

논문번호 : 00402-1016, 접수일자 : 2000년 2월 8일

※ 본 논문은 과학기술부가 지원하는 국가지정 연구실사업 과제를 수행한 결과입니다.

일반적으로 MMIC 회로 설계에서 마이크로스트립(Microstrip) 전송선이 널리 사용되고 있는데, 최근 들어 마이크로스트립 전송선을 CPW(Coplanar Waveguide) 전송선으로 대체하여 사용한 MMIC 회로들이 많이 개발되어지고 있다^{[2][3]}. CPW 전송선은 마이크로스트립 전송선을 사용하는 공정과 비교할 때, 기판 thinning 공정, via-hole 공정, 기판 후면 금속화 공정이 불필요하게 되어서 저가의 공정이 가능하다. 또한 전기적 특성 면에서 밀리미터파 대역이나 그이상의 높은 주파수 범위에서 전송선의 손실과 산란(Dispersion) 특성이 마이크로스트립 전송선보다 매우 우수하다. 반면에 CPW 전송선은 몇 가지 큰 단점을 가지고 있다. 그중 대표적인 것은 열방출(heat sink) 문제이다. 전력용 소자는 높은 DC 전력을 사용하며, 소모 전력의 상당부분이 열로써 방출되는데, CPW 전송선을 사용하는 회로에서는 via-hole이 없으므로 열전달이 크게 떨어지게 된다. MMIC 회로에 일반적으로 사용되는 GaAs 기판은 Si 기판에 비교할 때 열전도도가 매우 불량하기 때문에 GaAs 기판을 사용하는 MMIC 회로에서 열전달은 큰 문제점 중에 하나이다. 그렇기 때문에 와트(W)단위의 큰 출력전력을 갖는 전력증폭기에서는 CPW 전송선의 사용은 크게 제한되어지며, 그보다 작은 출력전력을 갖는 중간 전력증폭기 정도로 활용되어지고 있다.

본 논문에서는 CPW 전송선을 사용하여 Ka-band 주파수 대역에서 동작하는 0.2W급 MMIC 전력증폭기를 설계, 제작하였다. 사용된 PHEMT(Pseudomorphic High Electron Mobility)는 측정을 통해서 비선형 모델을 얻게되고, 이 모델을 이용하여 전력증폭기 설계를 하였다. 또한 출력단에 사용된 2개의 PHEMT를 특성임피던스를 바꾼 Wilkinson coupler를 사용하여 결합시켜서, 넓은 주파수 범위에서 원하는 전력과 출력 반사손실을 얻도록 하였다. 그 결과, MMIC 형태로 구현된 전력증폭기는 7GHz에서 31GHz까지의 넓은 대역에서 13dB 이상의 이득을 보였으며, 27GHz에서 23dBm 이상의 출력전력과 21%이상의 Power-added efficiency의 특성을 보였다.

II. 전력 소자의 특성

전력증폭기의 경우 원하는 출력 전력을 위해서 사용될 전력 소자의 선택과 그 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 설계에 사용될 pHEMT의 비선

형 모델은 on-wafer 측정을 하여 cold-바이어스와 멀티바이어스 S-parameter 측정결과를 받아서, 측정으로부터 얻은 데이터를 본 실험실에서 개발된 table based 방법과 curve fitting 방법을 동시에 사용하는 비선형 모델링 방법을 통해서 얻어진다^[4]. 본 논문에서는 Gate width 6 x 75 μm 인 pHEMT를 선택하여 설계에 사용하였으며, 비선형 모델을 사용하여 소자의 특성을 살펴보았다. HP Eesof Libra CAD 툴을 사용하여 전력소자의 Load-pull 시뮬레이션은 한 결과는 그림 1과 같으며, 이때 전력소자의 바이어스는 $V_{gs} = -0.4V$, $V_{ds} = 3.5V$ 이고, 시뮬레이션 주파수는 27GHz이다. Load-pull 시뮬레이션 결과 전력소자의 최적 출력전력 정합 조건이 $\Gamma_{opt} = 0.63 \angle 161^\circ$ 임을 알 수 있었다.

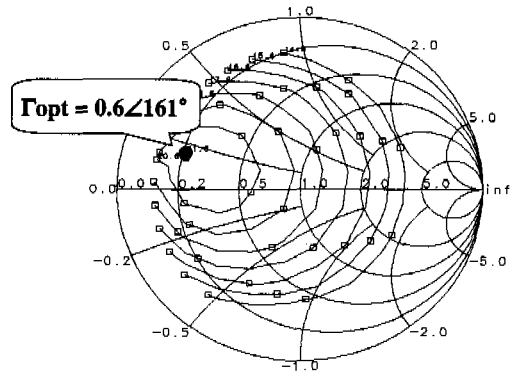


그림 1. 6x75 μm pHEMT Loadpull 시뮬레이션 결과 (f=27GHz)

III. 전력증폭기의 설계

1. Wilkinson Coupler

Wilkinson coupler는 전력 분배와 결합을 위해서 전력증폭기에 자주 이용되는 수동소자이다. Branch-line coupler, rat-race coupler, lange coupler 등의 4 port coupler와는 달리 Wilkinson coupler는 isolation port가 없는 3 port coupler이다^[5]. 그림2에서 보듯이 Wilkinson coupler는 특성임피던스 $\sqrt{2}Z_0$ 를 갖는 $\lambda/4$ 전송선과 출력단 이격도(isolation)을 위한 $2Z_0$ 의 저항으로 구성되어 있다. 통상적으로 Z_0 은 50 Ω 임피던스가 사용되는데, 만일 전력증폭기의 출력단의 트랜지스터를 결합하는데 사용한다면 최적의 출력전력을 위해서는 coupler와 트랜지스터 출력 측 사이에 정합회로가 반드시 필요하게 된다. 그런데 전력소자의 최대 출력전력을 얻을 수 있는 최적

의 부하 임피던스는 50 Ω 보다 매우 작은 값이므로, 출력정합을 하면 큰 대역폭을 기대하기가 어렵다. 이렇게 되면 출력전력 측면에서 볼 때 Wilkinson coupler를 사용하는 장점을 얻기 힘들어진다. 그래서 Z_0 을 일반적으로 사용되는 50 Ω 대신 25 Ω을 사용하면, coupler와 전력소자 사이에 더 용이한 정합회로가 가능하며, 더 넓은 대역폭에서 원하는 출력전력을 얻을 수 있다.

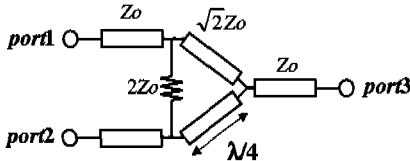


그림 2. Wilkinson Coupler

그러나 25 Ω 특성임피던스를 갖는 Wilkinson coupler를 사용할 경우, 전력증폭기의 출력반사계수는 손해를 입게되는데, 좋은 출력반사계수를 위해서 출력소자를 coupler를 통해서 결합한 후에 정합회로를 사용해야 한다. 그렇지만, 25 Ω에서 50 Ω으로 작은 임피던스 변환비를 갖기 때문에 간단히 정합특성을 만족시킬 수 있다. 결국 25 Ω 특성임피던스 Wilkinson coupler의 사용함으로써 넓은 대역폭에서 최적의 출력전력 조건과 전력증폭기의 출력반사계수를 동시에 얻게된다.

2. 전력증폭기의 설계

전력증폭기는 HP Eesof Libra CAD 툴의 harmonic-balance simulator를 사용하여 설계하였다. 설계에 사용된 비선형 소자의 모델은 앞서 설명한 모델을 CAD 툴에 사용자 정의 모델로 연결하여 이용하였다. 또한, CPW의 정확한 해석을 위해서 IMST사의 Coplan을 사용하였고, 이것은 Libra의 CPW 불연속 해석의 부정확성을 보완해 주었다. 그림3은 Ka-band CPW MMIC 전력증폭기의 회로 사진이다. 전력증폭기는 구동단과 출력단의 2단으로 설계되었는데, $V_{gs}=-0.4V$, $V_{ds}=3.5V$ 에서 하나의 Gate width $6 \times 75 \mu m$ pHEMT가 가지는 P_{1dB} 는 21.5dBm이므로 23dBm의 출력전력을 위해서 두 개의 Gate width $6 \times 75 \mu m$ pHEMT를 출력단에 사용하여 전력결합을 하였고, 한 개의 Gate width $6 \times 75 \mu m$ pHEMT를 사용하여 출력단을 구동하였다. 구동단에서는 발진을 막기 위해 병렬 되먹임을 사용하여, 회로를 안정화 시켰다.

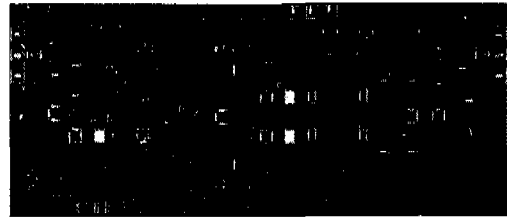


그림 3. CPW MMIC 전력증폭기 회로사진

전력증폭기의 정합 회로는 출력 정합회로, 중간단 정합 회로, 입력 정합 회로 순서로 설계를 하였다. 출력 정합 회로는 앞서 기술한 특성 임피던스가 변형된 Wilkinson coupler와 35 Ω 전송선을 사용하여 최적 출력 전력 정합 조건과 출력 반사 계수를 동시에 만족시키도록 하였다. 중간단 정합 회로는 출력단 트랜지스터의 낮은 입력 임피던스를 구동단 트랜지스터의 최적 출력 전력 조건에 정합 시키도록 했는데, 개방 스텐브(Open stub)와 MIM(metal-insulator-metal) 커패시터를 이용하여 정합 회로를 구성하였다. 입력 정합회로는 두 개의 개방 스텐브를 사용하여 설계하였다. 또한 출력단의 2개의 전력소자를 결합하는 구조가 전력소자 앞뒤로 loop를 형성하기 때문에 전력증폭기에서 자주 볼 수 있는 odd mode 발진의 가능성이 크다. 그러므로 odd mode 발진을 막기 위해 odd mode 저항을 전력소자 앞뒤로 위치시켜서 발진을 방지하였다. 전력증폭기의 게이트 바이어스는 바이어스 회로의 크기를 줄이기 위해서 300 Ω의 큰 저항을 사용하였으며, 드레인 바이어스는 $\lambda/4$ 전송선과 RC 회로를 병렬로 연결하여 회로의 안정도를 확보하면서 설계하였다.

그림 4는 설계된 전력증폭기의 소신호 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 설계 주파수에서 소신호 이득 17dB, 입력 반사계수 10dB, 출력 반사계수

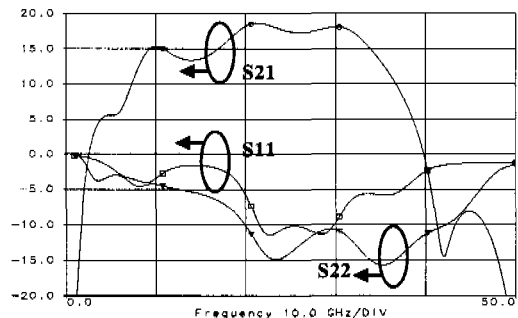


그림 4. 전력증폭기의 소신호 특성 시뮬레이션 결과 ($V_{gs}=-0.4V$, $V_{ds}=3.5V$)

10dB의 특성을 보인다. 그림5는 대신호 특성으로 주파수에 따른 출력전력을 보여주고 있다. 입력전력이 10dBm 일 때, 전력증폭기는 23dBm이상의 출력전력을 나타낸다.

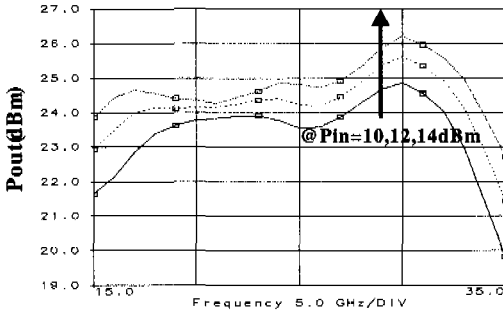


그림 5. 전력증폭기의 출력전력 특성 시뮬레이션 결과 (Vgs=-0.4V, Vds=3.5V)

IV. 전력증폭기의 제작

설계된 전력증폭기는 서울대학교 SNU-ISRC 0.25 μ m pHEMT 표준 공정을 사용하여 제작되었다. 사용된 표준 공정의 순서는 다음과 같다.

첫 번째 공정에서는 epi-layer 위에서 active device가 제작될 영역을 정의하고, 정의된 영역과 나머지 영역을 isolation하기 위해서 MESA 공정을 하게되는데, PR patterning 후 H2PO3, H2O2, DI water 혼합액으로 etching하는 방법을 사용한다. 두 번째 공정에서는 Pt/AuGe/Ni layer를 evaporation한 다음 alloy하여 active 영역의 ohmic을 형성한다. 세 번째 공정에서는 NiCr을 비저항 20ohm/sq가 되도록 evaporation하여 저항을 형성한다. 네 번째 공정은 gate를 형성하는 공정인데, 이때 recess 공정을 사용하게 되며, recess 공정은 wide recess와 narrow recess로 구성된다. Recess 공정은 e-beam을 이용하여 patterning하게 되는데, narrow recess의 경우 0.25 μ m gate length를 갖도록 patterning하게되며 그 후 RIE-80 장비를 이용하여 CC12F2와 Ar plasma를 통해 selective dry etching을 하게 된다. 다섯 번째 공정에서는 RPECVD로 passivation layer와 MIM의 dielectric으로 동시에 사용될 600 \AA SiN를 증착 한다. 여섯 번째 공정에서는 contact 부분을 opening 하게 되는데, 이를 위해서 Si3N4 etching을 하게된다. 일곱 번째 공정에서는 평면적으로 바로 연결될 수 없는 부분을 연결하기 위해 copolymer로 air-bridge를 형성한다. 마지막으로 2번

째 금속(metal2) 공정을 실시하면 MMIC 공정이 끝나게 된다. 위의 공정을 통해서 제작된 0.2W급 MMIC CPW 전력증폭기의 사진은 그림3이다. 제작된 전력증폭기의 실제 크기는 4.1 x 1.5 mm2 이다. 그림에서 보듯이 제작된 회로의 크기가 다소 큰데, 이것은 마스크에서 모든 회로의 세로 크기가 1.5mm로 고정되어 있어서 layout할 때 크게 optimize되지 못했다. 만일 세로의 길이를 늘린다면, 전체 회로의 크기가 상당히 작아질 수 있는 형태로 layout 될 수 있을 것이다.

V. 전력증폭기의 측정결과

제작된 전력증폭기는 on-wafer probing을 하여서 측정을 하였다. 측정된 전력증폭기의 소신호 특성은 그림6과 같다. 바이어스 조건은 Vgs=-0.1V, Vds=3V 인데, 실제 제작된 pHEMT의 pinch-off 전압이 높아져서 게이트 바이어스를 시뮬레이션 조건보다 높였고, 드레인 전압은 on-wafer 측정중 열스트레스(thermal stress)를 방지하기 위해서 3.5V보다 낮은 바이어스를 선택하였다⁶⁾. 전력증폭기는 설계주파수 27GHz에서 소신호 이득 14dB, 입력 반사계수 8dB, 출력 반사계수 8.5dB의 소신호 특성을 갖는다. 소신호 측정결과를 시뮬레이션과 비교해 보면, 25GHz 이상에서 이득이 2-3dB정도 감소한 차이를 보일 뿐 시뮬레이션과 매우 일치하는 모습을 보이는 것을 알 수 있다.

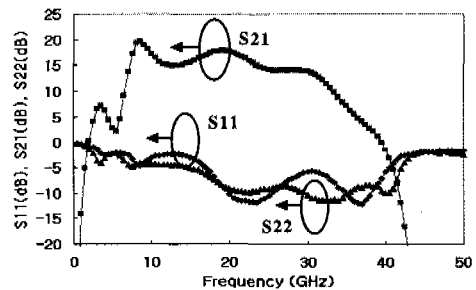


그림 6. 전력증폭기의 소신호 측정결과 (Vgs=-0.1V, Vds=3V)

전력증폭기의 전력측정은 traveling-wave tube (TWT)를 입력전력으로 사용해서, on-wafer로 측정하였다. 스펙트럼 분석기를 사용하여 발진여부를 조사하면서, HP 438A Power meter를 이용하여 출력전력을 측정하였다. 측정된 전력특성은 그림7,8과 같다. 그림7은 설계주파수 27GHz에서 입력전력에

다른 출력전력의 결과를 보여주고 있다. 바이어스 조건이 $V_{gs} = -0.3V$, $V_{ds} = 3.6V$ 일 때, P1dB 23.1dBm, 전력이득 11dB, Power-added efficiency (PAE) 21%의 결과를 갖는다. 그림8은 입력전력을 14dBm으로 고정하였을 때, 주파수에 따른 출력전력의 결과를 나타낸다. Ka-band내의 주파수 26.5-32GHz까지 주파수를 변화시켜서 측정을 하였고, 26.5-31GHz 주파수 범위에서 출력전력은 $23 \pm 0.5dBm$ 의 결과를 갖는다.

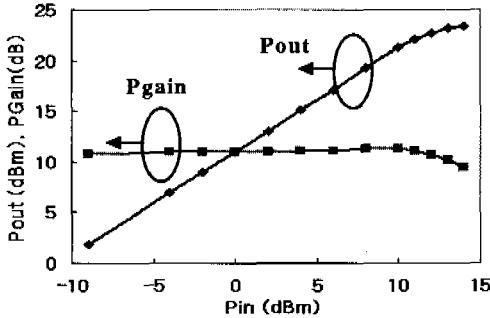


그림 7. 전력증폭기의 입력전력에 따른 출력전력과 Power-added Efficiency 측정결과 (f=27GHz)

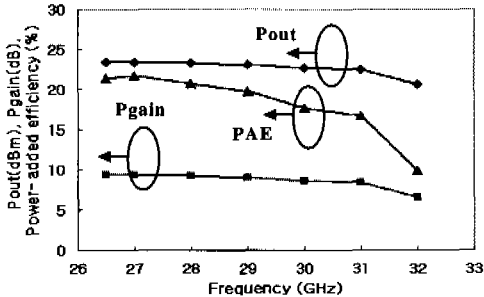


그림 8. 주파수에 따른 전력증폭기의 출력전력특성 측정 결과(입력전력=14dBm)

VI. 결론

Ka-band에서 CPW를 전송선으로 사용하는 0.2W 급 MMIC 전력증폭기를 설계, 제작하였다. 개발된 비선형 모델을 사용하여 27GHz에서 소신호 이득 17dB, 23dBm이상의 출력전력을 갖는 전력증폭기를 설계하였고, SNU-ISRC 0.25 μ m pHEMT 표준공정을 사용하여 제작하였다. 제작하여 on-wafer probing으로 측정된 전력증폭기로부터 소신호 이득 14dB, P1dB 23.1dBm의 출력전력, Power-added efficiency 21%, 전력이득 11dB를 얻을 수 있었다.

위 결과로부터 알 수 있듯이, 큰 출력전력을 필요로 하는 전력증폭기에서는 열(heat) 문제로 CPW 전송선을 사용하기 어렵지만, 본 연구와 같은 중간 출력전력을 갖는 전력증폭기에서는 CPW 전송선을 충분히 사용 가능함을 보였으며, 밀리미터파 대역의 높은 주파수에서 모든 핵심 부품들을 CPW를 전송선으로 사용하는 송수신 시스템의 구현이 가능하다고 하겠다.

참고 문헌

- [1] 김동욱, 백승원, 이재학, 임채록, 전계익, 최형규, 정기용, "B-WLL용 광대역 MMIC 저잡음 증폭기", 2000년도 춘계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, pp.22-25.
- [2] S. Koßlowski, R. Bertenburg, N. H. L. Koster, I. Wolff, F. -J. Tegude, P. Narozny, J. Wenger, and H. Dämbkes, "Advance in CPW-design applied to monolithic integrated Ka-Band MESFET and HEMT-Amplifier on GaAs," *GaAs IC Symp.*, pp.119-122, 1992.
- [3] Y. Kalayci, R. Tempel, W. Lütke, M. Akpınar, and I. Wolff, "A miniaturized Ka-Band MMIC high-gain medium power amplifier in coplanar line technique by using a conventional 0.5 μ m MESFET technology," *IEEE Int. Micro-wave Symp.*, pp.1623-1626, 1995.
- [4] 김경진, "열 및 Dispersion 효과를 포함한 하이브리드 Table-Based GaAs FET 대신호 모델", 전기공학 석사논문, 서울대학교 대학원, 2000.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
- [6] Youngwoo Kwon, Kyungjin Kim, Emilio A. Sovero, and Don S. Deakin, "Watt-Level Ka- and Q-Band MMIC power amplifier operating at low voltages," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.48, pp.891-897, June, 2000.

정 상 화(Sanghwa Jung)

정회원

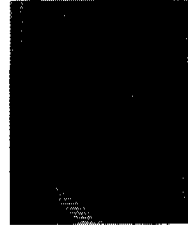


1999년 2월 : 서울대학교
전기공학부 학사
2001년 2월 : 서울대학교
전기컴퓨터공학부 석사
2001년 2월~현재 : WavICs사
연구원

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

권 영 우(Youngwoo Kwon)

정회원



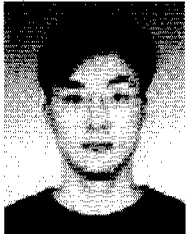
1988년 2월 : 서울대학교
전자공학과 학사
1990년 : University of
Michigan M.S.E.E
1994년 : University of
Michigan Ph.D

1994년~1996년 : Rockwell International Science
Center, MTS

1996년~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 조교수
<주관심 분야> MMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시
스템, 능동소자 모델링, RF MEMS

이 상 효(Sanghyo Lee)

정회원



2000년 2월 : 서울대학교
전기공학부 학사
2000년 2월~현재 : 서울대학교
전기컴퓨터공학부
석사과정

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 능동소자 모델링,
밀리미터파 회로 및 시스템

서 광 석(Kwang-Seok Seo)

정회원



1976년 2월 : 서울대학교
전자공학과 학사
1978년 : KAIST M.S.E.E
1987년 : University of Michigan
Ph.D

1978년~1982년 : Senior engineer of Korea Institute
of electronics Technology

1988년 : Postdoctoral fellow at the IBM T.J.
Watson Research Center

1989년~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
<주관심 분야> 초고속 소자 제작 기술, 화합물 반
도체 물성 연구, MMIC 설계 및 제작

김 대 현(Dae-hyun Kim)

정회원



1998년 8월 : 서울대학교
전기공학부 학사
2001년 2월 : 서울대학교
전기컴퓨터공학부 석사
2001년 2월~현재 : 서울대학교
전기컴퓨터공학부
박사과정

<주관심 분야> MMIC 설계 및 제작, 화합물 반도체
특성 연구

홍 성 철(Sung-Chul Hong)

정회원