

논문·2004-41TC-4-6

고효율 및 저전압 동작 특성의 Q-band MIMIC HEMT 발진기

(High Efficiency Q-band MIMIC HEMT-Oscillator Operating at Low Voltages)

이 문 교*, 안 단*, 이 복 형*, 김 성 찬*, 임 병 옥*, 한 효 중*, 채 연 식*,
신 동 훈*, 김 용 호**, 박 형 무*, 이 진 구*

(Mun-Kyo Lee, Dan An, Bok-Hyung Lee, Sung-Chan Kim, Byeong-Ok Lim, Hyo-Jong Han,
Yeon-Sik Chae, Dong-Hoon Shin, Yong-Hoh Kim, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 소자 결합 구조를 통해 발진전력이 합쳐지는 회로를 이용한 저전압, 고효율 Q-band MIMIC 발진기를 제안한다. 0.1 μm GaAs PHEMTs와 CPW 전송라인을 사용하여 제안된 구조의 발진기를 성공적으로 집적화하였다. 제작된 발진기는 34.56 GHz 주파수에서 2.6 dBm의 출력 전력일때 19 %의 높은 효율특성을 갖었다. 이때 회로에 인가된 전압은 2.2 V로 현재까지 Q-band에서 발표된 발진기보다 낮은 구동전압 특성을 얻었다. 또한 최대 출력 전력은 34.56 GHz 주파수에서 6.7 dBm을 얻었다.

Abstract

In this paper, we present the low voltage and high efficiency Q-band MIMIC oscillator using device-level power combined structure. The oscillator was successfully integrated by using 0.1 μm GaAs PHEMTs and the CPW transmission line. We show that the highest efficiency is 19 % with an output power of 2.6 dBm at a frequency of 34.56 GHz. The operating voltage of the oscillator is 2.2 V which is lower voltage than that of previously reported oscillators at Q-band. And the maximum output power of 6.7 dBm was obtained at a frequency of 34.56 GHz.

Keywords : Oscillator, Efficiency, MIMIC, HEMT

I. 서 론

저가격 소형의 휴대용 통신 시스템을 구현하기 위해서는 RF (Radio Frequency) front-end 회로들이 저전압, 고효율 특성으로 집적화되어야 할 필요가 있다. 무선통신 시스템의 RF 회로는 주로 증폭기, 믹서, 발진기

로 구성된다. 이들 회로중 저전압, 고효율 특성을 갖는 Q-band 증폭기에 대한 연구 결과들이 발표되고 있다^[1]. 또한, DC 전력을 필요로 하지 않는 여러 종류의 수동믹서가 발표되고 있다^[2]. 이러한 종류의 믹서는 DC 전력을 필요로 하지 않는 장점이 있는 반면, LO(Local Oscillator) 입력에서 발진기의 높은 출력전력을 필요로 한다. 유전체 혹은 공동 공진기를 이용한 발진기는 높은 발진전력과 좋은 위상잡음 특성을 만족한다. 하지만, 대량생산의 어려움과 적용한 시스템의 크기가 커져서 회로를 집적화 할 수 없는 단점이 있다. 이러한 관점에서, 고효율과 고효율 특성을 갖는 MIMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 발진기의 개발은 매우 중요하다. 밀리미터파 주파수 대역에서 공진기의

* 정회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터 (Millimeter-wave INnovation Technology research center, Dongguk University.)

** 정회원, 배재대학교 전자공학과 (Electronic Engineering, Paichai University.)

※ 본 연구는 동국대학교 ERC 센터인 밀리미터파 신기술연구센터(MINT)의 지원에 의하여 수행되었음.
접수일자: 2004년1월19일, 수정완료일: 2004년3월31일

낮은 Q값과 소자의 구동전력 한계 때문에 고출력, 고효율의 MIMIC 발진기를 구현하는데 어려움이 있다. 상대적으로 낮은 주파수 대역인 C-band에서 소자의 class E, F 바이어스 조건을 이용한 고효율의 발진기 연구가 발표되었다³⁻⁴⁾.

발진기를 포함한 RF front-end의 SOC (System-On-Chip) 적용은 패키징에 의한 변환손실을 줄이고 시스템의 크기를 줄여서 소형, 고효율의 시스템 구현을 가능하게 할 수 있다. 최근, 데이터 전송을 위해 위상변조를 사용하는 통신 시스템은 매우 낮은 위상잡음 특성을 필요로 한다. 일반적으로, HEMT 이용한 발진기의 위상잡음 특성은 HEMT의 높은 flicker noise(1/f) 특성으로 인해 HBT를 이용한 발진기보다 높은 위상잡음 특성을 갖는다. 따라서 위상변조를 사용하는 SOC 시스템에 HEMT 발진기를 집적화하는 것은 매우 어려운 일이지만, 위상잡음에 영향을 받지 않는 Double-Side-Band Millimeter-wave Self-Heterodyne 방식의 시스템에는 HEMT 발진기를 포함한 SOC의 적용이 저가격, 소형의 안정한 시스템을 위해 매우 좋은 구조가 될 수 있다⁵⁾.

본 연구에서는 소자 결합 구조를 통해 발진전력이 합쳐지는 회로를 이용한 저전압, 고효율의 Q-band MIMIC HEMT 발진기를 보고한다. 발진기 설계는 MINT (Millimeter-wave INnovation Technology research center)의 0.1 μm GaAs PHEMTs (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors)와 CPW (Coplanar Waveguide) 라이브러리를 사용하였으며, 제작 후 측정, 분석하였다.

II. Q-band MIMIC HEMT 발진기의 설계

70 \times 2 PHEMT내에서 발진전력이 합쳐진 구조로 설계된 발진기 회로를 그림 1에 나타내었다. HEMT 소자의 발진을 얻기 위해서, 적절한 피드백 소자와 임피던스를 형성시켜 부성저항 특성을 유도하였다. 부성저항 발진기의 발진조건은 식 1과 같다⁶⁾.

$$\Gamma_L \cdot \Gamma_R = 1 \quad (1)$$

단, Γ_L 은 부하에 대한 반사계수, Γ_R 은 공진기에 대한 반사계수이다. 발진 주파수에서 식 1은 공진기의 반사손실과 능동소자의 반사이득이 같고, Γ_L 과 Γ_R 의 편각의 합이 360°의 정수배임을 나타낸다. 발진기는 다음과

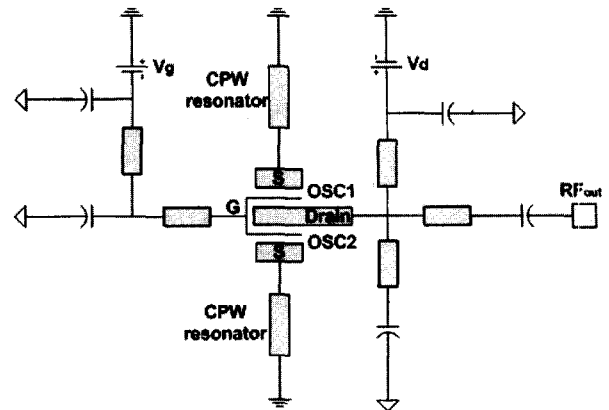


그림 1. 소자 결합 구조를 통해 발진전력이 합쳐진 발진기 회로

Fig. 1. The circuit of device-level power combined oscillator.

같은 순서로 설계하였다⁷⁾.

- 1) 공진기를 분석하고 등가회로를 유도한다.
- 2) HEMT를 분석하고 등가회로를 유도한다.
- 3) HEMT에 공진기를 연결하고, 공진기의 공진주파수 부근에서 주파수에 따른 출력 임피던스를 분석한다.
- 4) 발진 주파수 영역에 대해서 $1/\Gamma_R$ 궤적을 도시한 후, Γ_L 에 임피던스 정합을 한다.

발진기 회로는 common 게이트 구조로 설계하였으며, HEMT의 부성저항을 유도하기 위해서 게이트단에 적절한 길이의 stub를 사용하였다. 35 GHz에서 공진을 위해서 CPW 전송라인 공진기를 소스단에 사용하였다. 회로의 동작은 두개의 70 \times 1 HEMT에서 발진이 일어나며, 소자내의 드레인단에서 각각의 발진전력이 합쳐져서 출력되는 원리이다. OSC1과 OSC2에서 발진이 일어났을 때, 각 단의 발진기 하모닉전력은 식 2, 식 3과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{\text{OSC1}} = P_{f_{o(1)}} + P_{2f_{o(1)}} + P_{3f_{o(1)}} + \Delta \quad (2)$$

$$P_{\text{OSC2}} = P_{f_{o(2)}} + P_{2f_{o(2)}} + P_{3f_{o(2)}} + \Delta \quad (3)$$

단, P_{OSC1} 는 OSC1의 전체 발진전력, P_{OSC2} 는 OSC2의 전체 발진전력, $P_{f_{o(1)}}$ 는 OSC1의 기본파 발진전력, $P_{2f_{o(1)}}$ 는 OSC1의 두번째 하모닉 발진전력, $P_{f_{o(2)}}$ 는 OSC2의 기본파 발진전력, $P_{2f_{o(2)}}$ 는 OSC2의 두번째 하모닉 발진전력이다.

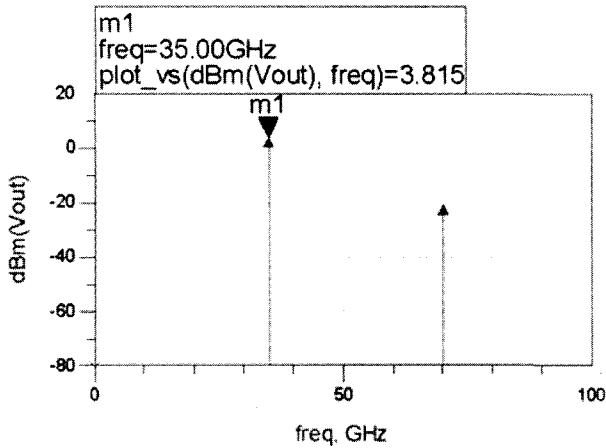


그림 2. 설계된 발진기의 시뮬레이션 결과
Fig. 2. The simulation of designed oscillator.

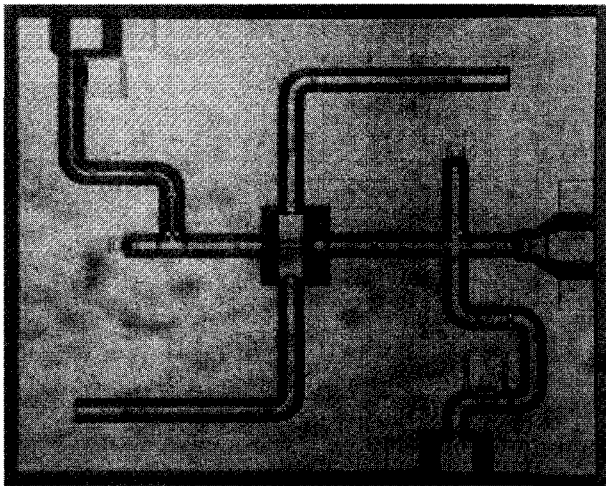


그림 3. 제작된 Q-band MIMIC 발진기의 사진
Fig. 3. Photograph of the fabricated Q-band MIMIC oscillator.

따라서, 전체 발진전력은 식 4와 같이 표현할 수 있다.

$$P = (P_{f_{\alpha(1)}} + P_{f_{\alpha(2)}}) + (P_{2f_{\alpha(1)}} + P_{2f_{\alpha(2)}}) + \Lambda \quad (4)$$

식 4에서와 같이 발진기의 출력전력은 OSC1과 OSC2의 기본파 발진전력의 합과 같아서, 출력파워가 증가하게 된다. 따라서, 식 5에 의해서 DC to RF 효율도 증가한다.

$$\eta = \frac{P_{f_{\alpha(1)}} + P_{f_{\alpha(2)}}}{P_{DC}} \quad (5)$$

단, η 는 DC to RF 효율이고, P_{DC} 는 회로에 인가된 DC 바이어스 전력이다.

그림 2는 설계한 회로의 시뮬레이션 결과로서, 35 GHz에서 3.8 dBm의 출력파워를 얻었다.

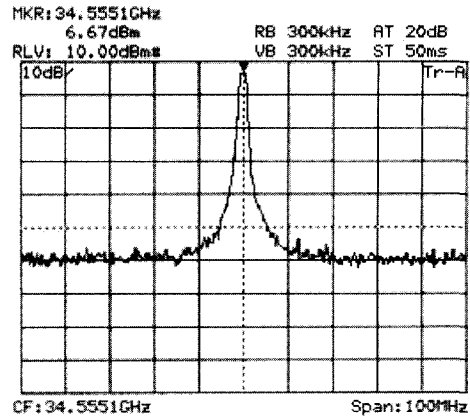


그림 4. 발진기의 출력전력 스펙트럼
Fig. 4. The spectrum of output power of oscillator
(Gate voltage: -1 V, Drain bias: 11.1 mA @ 3.6 V)

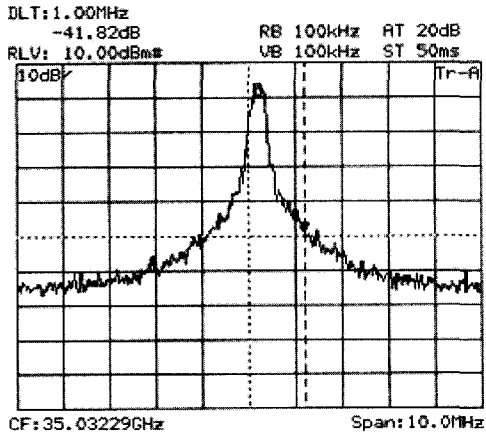


그림 5. 발진기의 위상잡음 스펙트럼
Fig. 5. The spectrum of phase noise of oscillator.
(Gate voltage: -1.25 V, Drain bias: 5.58 mA @ 3.2 V)

III. 제작 및 측정결과

설계된 Q-band 발진기는 MINT의 MIMIC 공정을 이용하여 제작하였다^[8]. 집적화 공정은 0.1 μm GaAs PHEMTs와 CPW 전송라인 그리고 MIM (Metal-Insulator-Metal) 커패시터로 구성된다. 그림 3은 제작된 발진기의 표면 사진이고, 전체 칩 크기는 1.7 mm \times 1.4 mm이다.

측정은 Anritsu사의 스펙트럼 분석기 MS2668C와 Agilent사의 V-band 스펙트럼 분석기 8561E로 On-wafer 측정하였다. 그림 4는 34.56 GHz 주파수에서 6.7 dBm의 최대 출력 전력이 측정된 스펙트럼이다. 위상잡음 특성은 1 MHz 오프셋 주파수에서 -91.8 dBc/Hz의 특성을 얻었다. 측정된 위상잡음 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. 그림 6는 드레인 전압에 따른 출력 전

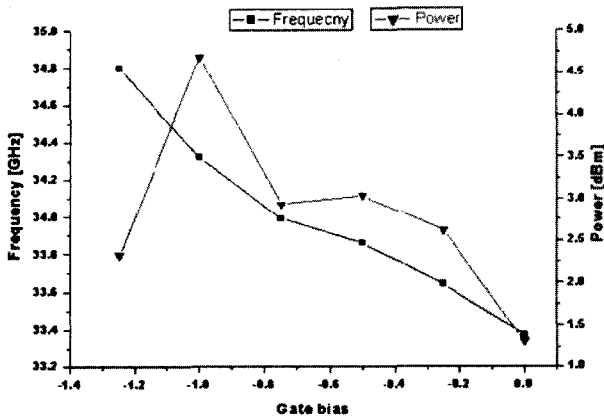


그림 7. 게이트 전압에 따른 출력 주파수와 전력 특성
Fig. 7. Output frequency and power vs. gate voltages.
(Drain voltage : 2.6 V)

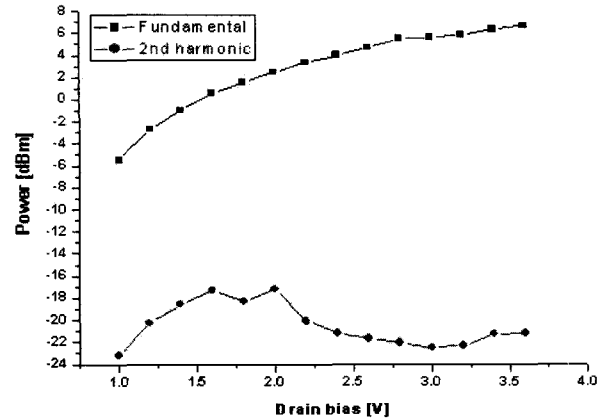


그림 8. 기본파 출력 전력에 대한 2차 하모닉 억압 특성
Fig. 8. The 2nd harmonic suppression to the fundamental output power.(Gate voltage : -1 V)

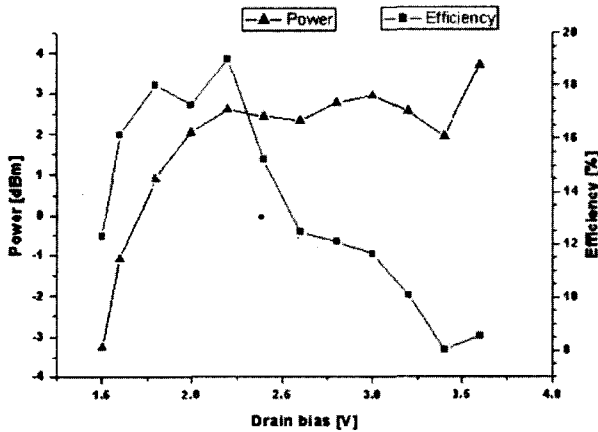


그림 6. 드레인 전압에 따른 출력전력과 효율 특성
Fig. 6. Output power and efficiency vs. drain voltages.
(Gate voltage : -1.25 V)

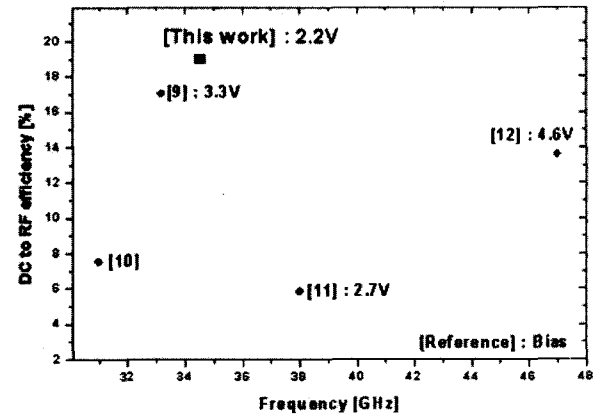


그림 9. 현재까지 발표된 Q-band MIMIC 발진기의 비교
Fig. 9. Comparison of the currently reported Q-band MIMIC oscillators.

력과 효율 특성을 나타낸 것으로 34.56 GHz 주파수에서 출력 전력이 2.6 dBm일 때 최고 효율 19 %를 얻었다. 이때 인가된 게이트 전압은 -1.25 V이고, 드레인 전압은 2.2 V 전류는 4.35 mA가 흘렀다. 그림 7은 게이트 전압에 따른 발진기의 출력 주파수와 전력 특성을 측정 한 결과이다. 발진기의 튜닝 주파수 영역은 중심 주파수 34.22 GHz에서 약 1.16 GHz이다. 튜닝 주파수 영역 내에서 출력 파워의 변화는 3.37 dB를 얻었다. 기본파 출력 전력에 대한 2차 하모닉 억압 특성을 그림 8에 나타내었다. 2차 하모닉 억압 특성은 드레인 전압 2 V 이상에서 증가하는 경향을 보였다.

그림 9에 지금까지 발표된 Q-band MIMIC 발진기의 효율과 동작 전압을 본 연구에서 제작한 회로와 비교하였다. 기존의 발진기가 7.5 ~ 17 %의 효율특성과 2.7 V 이상의 구동 전압 특성을 보인데 비해, 본 연

구에서 제작한 발진기는 19 % 효율특성과 2.2 V의 낮은 구동 전압 특성을 갖었다.

IV. 결론

소자 결합 구조를 통해 발진전력이 합쳐진 회로를 이용한 고효율 특성과 낮은 동작 전압 특성을 갖는 Q-band MIMIC 발진기를 설계하고, 0.1 μm GaAs PHEMTs와 CPW 전송라인으로 집적M화하였다. 최대 출력 발진전력은 34.56 GHz에서 6.7 dBm을 얻었다. 위상잡음은 1 MHz 오프셋 주파수에서 -91.8 dBc/Hz의 특성을 얻었다. 제작된 발진기는 2.2 V의 동작 전압에서 19 %의 높은 효율 특성을 얻었다. 이때 출력 전력은 완충 증폭기 없이 2.7 dBm의 양호한 특성을 나타내었다. 제작된 발진기는 낮은 동작 전압 특성과 높은 효율 특

성을 갖기 때문에, DSB Self-heterodyne 무선 통신 시스템의 front-end단 SOC에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Y. Hwang, P. D. Chow, J. Lester, J. Chi, D. Garske, M. Biedenbender, and R. Lai, "Fully-matched, high-efficiency Q-band 1 W MMIC solid state power amplifier," IEEE Monolithic Microwave Millimeter-wave Circuits Symp. Tech. Dig., pp. 167~170, June 1996.

[2] A. Cidronali, G. Collodi, N. El-Zein, V. Nair, G. Manes, H. Goronkin, "A Highly Linear Single Balanced Mixer Based on Heterojunction Interband Tunneling Diode," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 49, no. 12, pp. 2437~2445, Dec. 2001.

[3] Frank Ellinger, Urs Lott, Werner Bachtold, "Design of a low-supply-voltage high-efficiency class-E voltage-controlled MMIC oscillator at C-band," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 49, no. 1, pp. 203~206, Jan. 2001.

[4] M. Prigent, M. Camiade, G. Pataut, D. Reffet, J. Nebus, and J. Obregon, "High efficient free running class-F oscillator," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 6, pp.441~443, Dec. 1996.

[5] Y. Shoji, K. Hamaguchi, and H. Ogawa, "A Low-Cost and Stable Millimeter-Wave Transmission System Using a Transmission-Filter-Less Double-Side-Band Millimeter-Wave Self-Heterodyne Transmission Technique," IEICE Trans. Commun., vol. E86-B, no. 6, pp. 1884~1892, June 2003.

[6] I. D. Robertson, MMIC DESIGN, The Institution of Electrical Engineer.

[7] Ganesh R. Basawapatna, Roger B. Stancliff, "A Unified Approach to the Design of Wide-Band Microwave Solid-State Oscillators," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. MTT-27, no. 5, pp. 379~385, May 1979.

[8] Tae-Sin Kang, Seong-Dae Lee, Bok-Hyoung Lee, Sam-Dong Kim, Hyun-Chang Park, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee, "Design and Fabrication of a Low-Noise Amplifier for the V-band," J. Korean Phys. Soc., vol. 41, no. 4, pp. 533~538, Oct. 2002.

[9] Youngwoo Kwon, Changyul Cheon, Nyuntae Kim, Chungwoo Kim, Insang Song, and Cimoo Song, "A Ka-Band MMIC Oscillator Stabilized with a Micromachined Cavity," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 9, no. 9, pp. 360~362, Sep. 1999.

[10] Oya Sevimli, John W. Archer, and Grant J. Griffiths, "GaAs HEMT Monolithic Voltage-Controlled Oscillators at 20 and 30 GHz Incorporating Schottky-Varactor Frequency Tuning," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 46, no. 10, pp. 1572~1576, Oct. 1998.

[11] C. N. Rheinfelder, F. BeiBwanger, J. Gerdes, F. J. Schmuckle, K. M. Strohm, J.-F. Luy, and W. Heinrich, "A Coplanar 38-GHz SiGe MMIC Oscillator," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 6, no. 11, pp. 398~400, Sep. 1999.

[12] C. N. Rheinfelder, K. M. Strohm, L. Metzger, H. Kibbel, J.-F. and W. Heinrich, "47 GHz SiGe-MMIC Oscillator," IEEE MTT-S Digest, pp. 5~8, 1999

저 자 소 개



이 문 교(정회원)
 1999년 배재대학교
 전자공학과 공학사
 2001년 동국대학교
 전자공학과 공학석사
 2001년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 무선통신 시스템, MIMIC 설계 및 소자 모델링>



한 효 중(정회원)
 2002년 동국대학교
 전자공학과 공학사
 2002년~현재 동국대학교 대학원
 전자공학과 석사과정
 <주관심분야 : 밀리미터파 소자 및 회로 설계>

저 자 소개



안 단(정회원)
 1998년 동국대학교
 전자공학과 공학사
 2000년 동국대학교
 전자공학과 공학석사
 2000년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 마이크로파 소자 및 회로설계, MIMIC 설계 및 소자 모델링>



이 복 형(정회원)
 1999년 동국대학교
 전자공학과 공학사
 2001년 동국대학교
 전자공학과 공학석사
 2001년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 밀리미터파 소자 및 회로 설계 제작>



김 성 찬(정회원)
 1999년 동국대학교
 전자공학과 공학사
 2001년 동국대학교
 전자공학과 공학석사
 2001년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 밀리미터파 소자 및 회로 설계 제작>



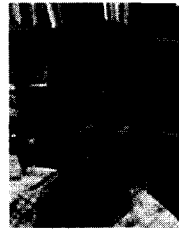
임 병 옥(정회원)
 2000년 동국대학교
 전자공학과 공학사
 2002년 동국대학교
 전자공학과 공학석사
 2002년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : MIMIC 부품 설계 및 제작>



채 연 식(정회원)
 1997년 동국대학교
 전자공학과 공학석사
 2002년 동국대학교
 전자공학과 공학박사
 2002년~현재 동국대학교
 밀리미터파 신기술연구센터 연구교수

<주관심분야 : 반도체 및 RF 집적회로 설계, MIMIC를 이용한 통신 모듈설계>



신 동 훈(정회원)
 1982년 동국대학교
 물리학과 이학사
 1984년 동국대학교
 물리학과 이학석사
 1999년 런던대학교
 전기전자공학과 공학박사

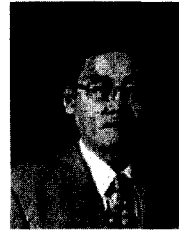
1999년 ~ 현재: 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 연구교수



김 용 호(정회원)
 1975년 연세대학교
 물리학과 이학사
 1985년 University of Wyoming
 전기 및 컴퓨터공학과 공학석사
 1998년 충남대학교
 전자공학과 공학박사

1985년~1990년 한국전자통신연구원 연구원
 2000년~2001년 San Diego State University, Visiting Professor

1990년 ~ 현재 : 배재대학교 전자공학과 교수



박 형 무(정회원)
 1978년 서울대학교
 전자공학과 공학사
 1980년 한국과학기술원
 전자공학과 공학석사
 1984년 한국과학기술원
 전자공학과 공학박사

1984년~1999년 한국전자통신연구원 연구원
 1999년~현재 : 동국대학교 전자공학과 교수



이 진 구(정회원)
 1969년 국립항공대학교
 전자공학과 공학사
 1975년 서울대학교
 전자공학과 공학석사
 1982년 Oregon State University
 전기공학과 공학박사

1985년 Cray Research, USA, Research Scientist
 1985년 Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer
 1990~1991년 University of Michigan, Visiting Research Scientist

1995년~현재 한국 전자과학회 이사
 1996년~현재 한국산업인력관리공단 기술사 검증 심의위원
 2002년~현재 대한전자공학회 부회장
 1985년~현재 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수
 1999년~현재 : 밀리미터파 신기술 연구센터 소장