

논문 2005-42TC-5-8

Cascode 하모닉 발생기를 이용한 V-band MIMIC Quadruple Subharmonic 믹서

(V-band MIMIC Quadruple Subharmonic Mixer Using Cascode Harmonic Generator)

안 단*, 이 문 교*, 진 진 만*, 고 두 현*, 이 상 진*, 김 성 찬*,
채 연 식*, 박 형 무*, 신 동 훈*, 이 진 구*

(Dan An, Mun Kyo Lee, Jin Man Jin, Du Hyun Go, Sang Jin Lee, Sung Chan Kim,
Yeon Sik Chae, Hyung Moo Park, Dong Hoon Shin, and Jin Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 cascode 하모닉 발생기를 이용하여 V-band MIMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) quadruple subharmonic 믹서를 설계 및 제작하였다. 고변환 이득 특성을 위하여 cascode 하모닉 발생기를 제안하였다. 제안된 cascode 하모닉 발생기는 기존의 multiplier 구조의 비해 평균 2.9 dB 및 최대 4 dB의 높은 4차 하모닉 출력 특성을 나타내었다. 제작된 V-band subharmonic 믹서의 측정결과 14.5 GHz LO 신호를 13 dBm의 크기로 입력하였을 때 3.4 dB의 높은 변환 이득 특성을 얻었다. 또한 -53.6 dB의 LO-to-IF, -46.2 dB의 우수한 LO-to-RF 격리 특성을 나타내었다. 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서는 기존에 발표된 밀리미터파 대역의 subharmonic 믹서에 비해 우수한 변환이득 특성을 나타내었다.

Abstract

A V-band MIMIC quadruple subharmonic mixer is reported in this paper. The cascode harmonic generator is proposed for a high conversion gain. The proposed cascode harmonic generator is shown with a 4-th harmonic output characteristic that represents an average of 2.9 dB and a maximum of 4 dB higher than the conventional multiplier. The measured result of the subharmonic mixer has a conversion gain of 3.4 dB which a good conversion gain at a LO power of 13 dBm. Isolations of LO-to-IF and LO-to-RF were obtained -53.6 dB and -46.2 dB, respectively. The conversion gain of the subharmonic mixer in this study has a higher conversion gain compared with some other reports in millimeter-wave range.

Keywords : Cascode, MIMIC, Subharmonic mixer, Conversion gain

I. 서 론

최근 무선통신 시장의 증가로 인하여 30 GHz 이상의 주파수인 밀리미터파 대역의 상업적 응용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 V-band 대역(50~75 GHz)인 60 GHz는 초고속 광대역 통신을 위한 실내

Wireless LAN (Local Area Network) 및 단거리 무선 통신용 주파수로 부각되고 있다. 이러한 밀리미터파 무선 시스템의 소형화 및 저가격화를 위해 중요한 부품 중에 하나인 MIMIC 믹서의 경우 LO (Local Oscillator) 입력을 위한 양호한 특성의 밀리미터파용 발진기의 개발이 필수적이다. 그러나 밀리미터파 대역에서 높은 출력특성을 갖는 발진기의 개발은 매우 어려울 뿐만 아니라 고가이기 때문에 전체 시스템의 비용을 증가시키게 된다.

따라서 기존의 믹서에 대한 대안으로 subharmonic 믹서가 제시되고 있다. Subharmonic 믹서는 기존의 믹서에서 사용되는 LO 주파수의 1/n의 주파수를 사용하

* 정회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (Millimeter-wave Innovation Technology Research center)

※ 본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (MINT)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 (ERC) 지원금에 의하여 수행되었습니다.

접수일자: 2004년7월19일, 수정완료일: 2005년5월11일

기 때문에 상대적으로 낮은 주파수를 사용할 수 있고, LO-RF 격리 특성이 우수한 장점이 있다. 최근 subharmonic mixer의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, APD(anti-parallel diode) 구조를 이용한 연구결과가 보고되고 있다^[1].

본 논문에서는 cascode 하모닉 발생기 구조를 이용한 V-band quadruple MIMIC subharmonic 믹서를 설계 및 제작하였다. 고변환 이득 특성을 위하여 cascode 하모닉 발생기를 제안하였다. 제안된 cascode 하모닉 발생기는 기존의 multiplier 구조와 출력 특성을 비교·분석하였다. 또한 이를 적용하여 subharmonic 믹서를 설계 및 제작하였으며, 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서는 측정 및 분석되었다.

II. 밀리미터파 subharmonic 믹서의 설계

제안된 cascode 하모닉 발생기의 표면사진과 회로도를 그림 1에 나타내었다. Subharmonic 믹서에서 높은 변환이득은 입력된 LO 신호를 원하는 n차배 되는 주파수에 대해서 큰 전력 특성을 얻어야 가능하다. 이러한 이유로 quadruple subharmonic 믹서의 양호한 변환이득 특성을 얻기 위해서 하모닉 발생기가 높은 4차 하모닉 출력 특성을 얻도록 설계하였다. 그림 1에서 입력된 fo 신호는 fo(1)과 fo(2) 신호로 분배되며, fo 신호 입력시 일반적인 HEMT의 하모닉 출력특성은 다음과 같다.

$$P_{out(HEMT)} = P_{f_o} + P_{2f_o} + P_{3f_o} + P_{4f_o} + \dots + P_{nf_o} \quad (1)$$

여기서 P_{nf_o} 은 HEMT에서 발생하는 n차 하모닉 성분이다(n=1, 2, 3, 4...). 그림 1의 Cascode 구조에서는 fo(1)으로 인하여 HEMT1에서 하모닉 성분이 발생하며, HEMT2에서 주요하게 하모닉 성분들이 증폭되게 된다. 따라서 fo(2)로 인하여 HEMT2에서 발생하는 n차 하모닉 성분을 포함하여 전체 n차 하모닉 성분은 다음과 같다.

$$P_{out(cascode)} = P_{f_{o(2)}} + P_{2f_{o(2)}} + \dots + P_{nf_{o(2)}} + P_{f_{o(1)}} + P_{2f_{o(1)}} + \dots + P_{nf_{o(1)}} \quad (2)$$

여기서 $P_{nf_{o(2)}}$ 은 fo(2)에 의한 HEMT2에서의 n차 하모닉 (n=1, 2, 3, 4...), $P_{nf_{o(1)}}$ 은 fo(1) 때문에 HEMT1에서 발생한 하모닉 성분이 HEMT2에서 증폭된 n차 하모닉이다(n=1, 2, 3, 4...). 식 (2)에서 cascode

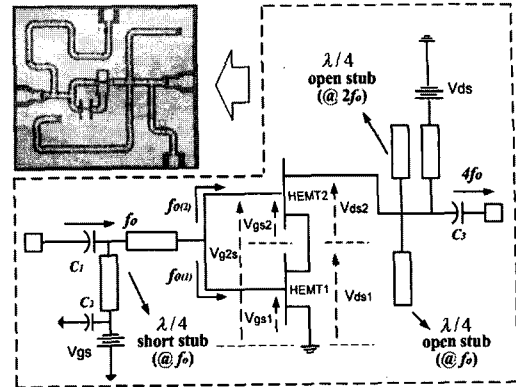


그림 1. 제안된 cascode 하모닉 발생기.

Fig. 1. The proposed cascode harmonic generator.

구조의 경우 HEMT1에서 발생한 하모닉 성분들을 HEMT2에서 증폭하기 때문에 더 높은 n차 하모닉 성분을 얻어낼 수 있다. 더 나아가 4차 하모닉 성분이 3차나 5차 하모닉 성분보다 높은 출력이 나오도록 HEMT의 바이어스를 Class AB인 $V_{gs} = -1.2$ V로 최적화 하였다^[2]. 또한 4차 하모닉 성분만을 얻어내기 위해, 입력단의 fo에 대한 $\lambda/4$ short stub와 출력단에 fo와 2fo에 대한 $\lambda/4$ open stub를 추가적으로 설계하였다. 입력단의 short stub는 입력된 fo 신호를 손실 없이 전달시켜 주게 되며, 출력단의 open stub는 출력된 신호중에서 fo와 2fo 신호를 억압시켜 4차 하모닉 성분만 통과시키게 된다.

그림 2는 기존의 multiplier 구조의 표면사진과 회로도를 나타내었다. multiplier 하모닉 발생기는 오직 하나의 HEMT1만을 사용하여 설계되었으며, 다른 구조는 cascode 하모닉 발생기와 같게 설계되었다. fo 신호가 HEMT1으로 입력되면 소자의 비선형 특성으로 인하여 하모닉 성분들이 발생하게 되며, cascode 하모닉 발생기와 같이 입력단의 fo 신호의 손실 없는 입력을 위한 $\lambda/4$ short stub와 fo와 2fo의 억압을 위한 $\lambda/4$ open stub를 출력단에 추가적으로 설계하였다.

두 가지 종류의 하모닉 발생기를 분석 및 비교하기 위해 14.5 GHz 신호를 0~15 dBm의 영역에서 입력시키고, 하모닉 출력 특성을 측정하였다. cascode 하모닉 발생기의 출력특성 측정결과 입력이 5 dBm 이상에서 가장 높은 4차 하모닉 출력 특성을 얻었으며, 3차, 1차, 2차 순으로 출력 특성을 나타내었다. 그림 3에 cascode 하모닉 발생기의 출력특성을 나타내었다. 그림 4에 multiplier 구조의 출력특성을 나타내었다. Multiplier 하모닉 발생기의 출력특성 측정결과 6 dBm 이상의 입력에서 가장 큰 4차 하모닉 출력 특성을 얻었으며, 1차, 2차, 3차 순으로 출력 특성을 나타내었다. 하모닉 발생기

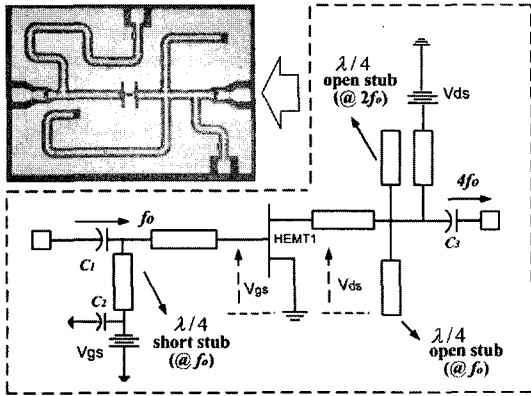


그림 2. 기존의 multiplier 하모닉 발생기.
Fig. 2. The conventional multiplier harmonic generator.

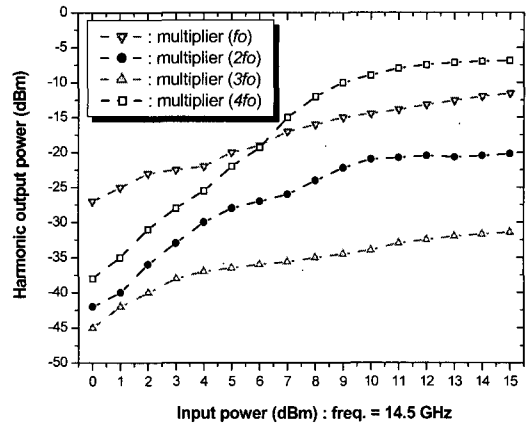


그림 4. multiplier의 출력특성 측정결과.
Fig. 4. The measured result of multiplier harmonic output.

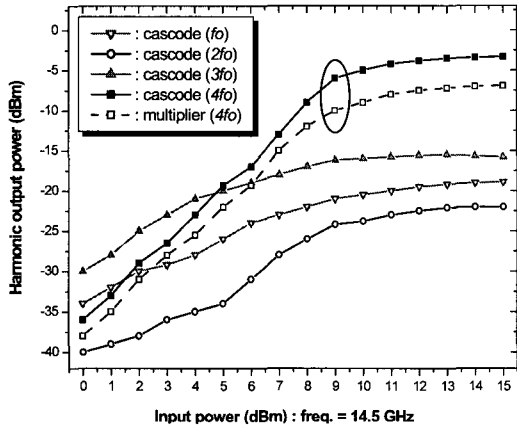


그림 3. cascode 하모닉 발생기의 출력 특성 측정결과.
Fig. 3. The measured result of cascode harmonic output.

의 출력특성 측정결과, cascode 하모닉 발생기가 기존의 multiplier 구조에 비하여 평균 2.9 dB, 입력이 10 dBm 일때 최대 4 dB 높은 4차 하모닉 출력특성을 나타내었다.

전체 subharmonic 믹서는 양호한 변환이득 특성을 얻기 위해 높은 4차 하모닉 출력 특성을 갖는 cascode 하모닉 발생기를 적용하여 설계하였다. Subharmonic 믹서는 변형된 게이트 믹서 구조로 설계되었으며, cascode 하모닉 발생기에서 발생된 4차 하모닉 신호와 입력된 RF 신호가 IF단의 HEMT에서 혼합되게 된다. 또한 양호한 변환이득과 LO-RF 격리도 특성을 위해 RF단에 HEMT 소자를 추가하였으며, 추가된 HEMT는 RF 신호의 증폭과 소자의 S12 격리도 특성으로 인하여 LO-RF 격리도 특성을 향상시키게 된다. RF, LO 및 IF 주파수는 각각 60.4 GHz, 14.5 GHz 및 2.4 GHz로 설계하였으며, 본 연구에서 개발된 0.1 um GaAs PHEMT 와 CPW 라이브러리를 사용하여 설계되었다^[3].

밀리미터파 subharmonic 믹서의 제작은 본 논문에서

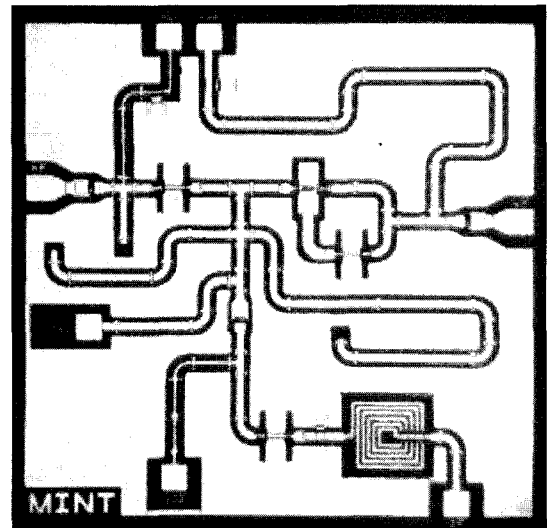


그림 5. 제작된 V-band MIMIC subharmonic 믹서.
Fig. 5. Photograph of the fabricated V-band MIMIC subharmonic mixer.

연구된 MIMIC 표준공정을 사용하여 제작하였다^[4-6]. Subharmonic 믹서의 제작공정은 능동소자인 PHEMT 제작공정과 CPW 전송선로 및 MIM 캐패시터 등의 수동소자 제작공정을 통합한 일괄공정으로 제작하였다. 제작된 subharmonic 믹서의 칩크기는 1.9×1.8 mm²이며, 그림 5에 칩 사진을 나타내었다.

III. Subharmonic 믹서의 측정 및 분석

제작된 subharmonic 믹서는 60.4 GHz의 RF 신호를 Agilent 83623B 신호발생기와 83557A 밀리미터파 모듈을 이용하여 입력하고, 14.5 GHz의 LO 신호는 Agilent 83630B 신호발생기를 이용하여 인가하였다. 측정은 on-wafer 상태에서 수행되었으며, probe와 cable 손실을 보상하여 측정하였다. subharmonic 믹서의 측정 블

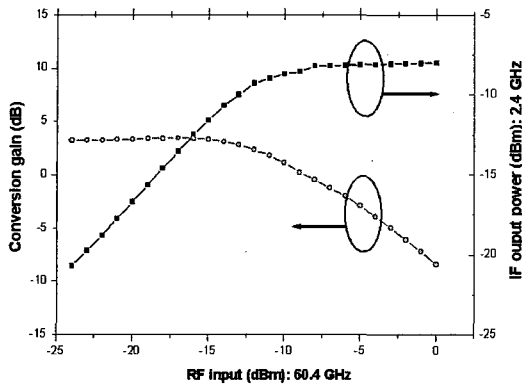


그림 7. 변환이득 및 IF 출력특성 측정결과.
Fig. 7. Conversion gain and IF output vs. RF input. (LO frequency : 14.5 GHz, LO power : 13 dBm)

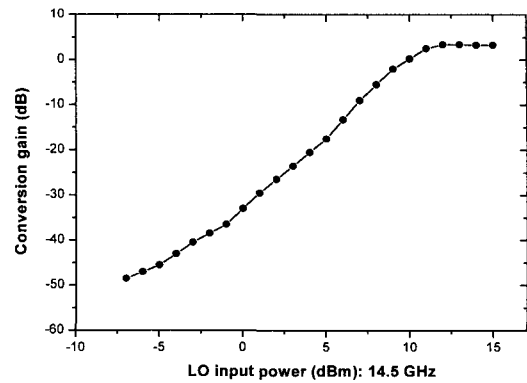


그림 8. LO 입력전력에 대한 변환이득 특성 측정결과.
Fig. 8. Conversion gain vs. LO input power. (RF frequency : 60.4 GHz, RF power : -15 dBm)

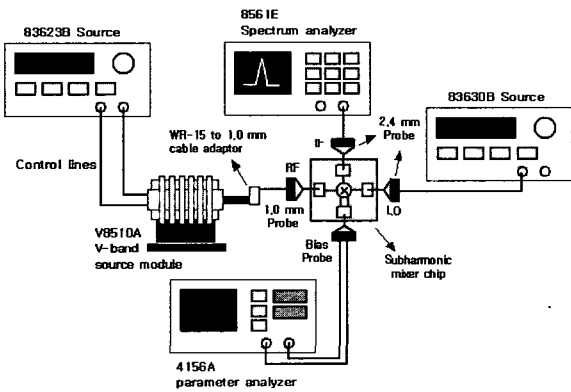


그림 6. V-band subharmonic 믹서의 측정 블록도.
Fig. 6. Measurement set-up for V-band MIMIC subharmonic mixer.

록도를 그림 6에 나타내었다. 제작된 subharmonic 믹서의 출력 및 변환이득 특성 측정결과 14.5 GHz의 LO 신호를 13 dBm 전력으로 인가할 때 3.4 dB의 높은 변환이득 특성을 얻었으며, P_{1dB} (1 dB compression point)는 -9.0 dBm의 결과를 얻었다. 그림 7에 RF 입력전력에 대한 변환이득과 IF 출력특성을 각각 나타내었다. 그림 8은 LO 입력전력에 대한 변환이득 특성의 측정결과로 LO 입력이 증가할수록 변환이득 특성이 증가하다 13 dBm 이상이 되면 포화되는 특성을 나타내었다.

그림 9은 subharmonic 믹서의 격리 특성으로 LO 주파수인 14.5 GHz에서 LO-RF 격리 특성은 -46.2 dB, LO-to-IF 격리 특성은 -53.6 dB의 양호한 특성을 나타내었다. 설계 및 제작된 subharmonic 믹서는 큰 LO와 RF 주파수의 차이로 인하여 기존의 믹서에 비하여 우수한 LO-RF 격리 특성을 나타낸 것으로 분석되었다. 표 1에 본 논문에서 제작된 subharmonic 믹서와 기존의 밀리미터파 대역에서 발표된 subharmonic 믹서 회

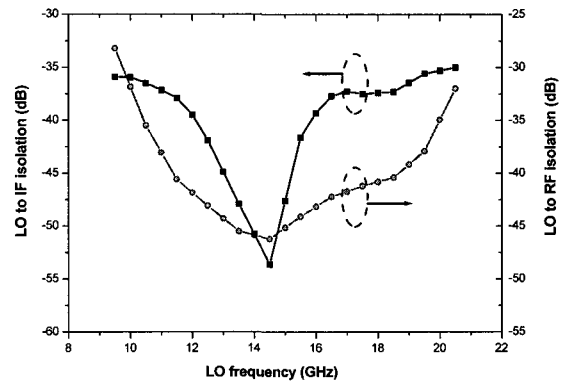


그림 9. Isolation 특성 측정결과.
Fig. 9. Measured results of isolation characteristics.

표 1. 밀리미터파 subharmonic 믹서의 변환이득 특성
Table 1. Conversion gain of subharmonic mixers.

Ref.	freq. (GHz)	Type	Circuit structure	LO-RF isolation(dB)	Conversion gain(dB)
[7]	58.5	4	APD	-33.0	-13.2
[8]	77.0	2	Self Oscillating	-	-11.0
[9]	94.0	4	APD	-	-11.4
[10]	89.0	2	APD	-41.0	-7.0
[11]	60.0	2	Self Oscillating	-	-15.0
This work	60.4	4	Cascode	-42.6	+3.4

로를 비교하였다^[7-11]. 기존에 보고된 믹서 회로는 APD 및 self-oscillating 구조로 설계 되었으며, 변환이득 특성이 -15 ~ -7.0 dB, LO-RF 격리도 특성은 -41 ~ -33.0 dB를 나타내었다. 본 논문에서 설계 제작된 subharmonic 믹서는 3.4 dB의 변환이득과 -42.6 dB의 LO-RF 격리도 특성을 나타내어 기존의 믹서에 비하여 우수한 특성을 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 cascode 하모닉 발생기를 이용하여 V-band MMIC quadruple subharmonic 믹서를 설계 및 제작하였다. 고변환 이득 특성을 위하여 cascode 하모닉 발생기를 제안하였다. 제안된 cascode 하모닉 발생기는 기존의 multiplier 구조의 비해 평균 2.9 dB 및 최대 4 dB의 높은 4차 하모닉 출력 특성을 나타내었다. 제작된 V-band subharmonic 믹서의 측정결과 14.5 GHz LO 신호를 13 dBm의 크기로 입력하였을 때 3.4 dB의 높은 변환이득 특성을 얻었으며, P_{1dB}는 -9.0 dBm을 나타내었다. LO 입력전력에 대한 변환이득 특성의 측정결과 LO 입력에 따라 변환이득 특성이 증가하다 13 dBm 이상이 되면 포화되는 특성을 나타내었다. 또한 -53.6 dB의 LO-IF, -46.2 dB의 우수한 LO-RF 격리 특성을 나타내었다. 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서는 기존에 발표된 밀리미터파 대역의 subharmonic 믹서에 비해 우수한 변환이득 및 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] Babak Matinpour, Neeraj Lal, Joy Laskar, Robert E. Leoni, and Colin S. Whelan, "K-Band Receiver Front-Ends in a GaAs Metamorphic HEMT Process," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, no. 12, pp. 2459~2463, Dec. 2001.

[2] Steven C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House.

[3] Dan An, Bok Hyung Lee, Yeon Sik Chae, Hyun Chang Park, Hyung Moo Park and Jin Koo Rhee, "Low LO Power V-band CPW Down-Converter Using a GaAs PHEMT," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 41, no. 6, pp. 1013~1016, Dec. 2002.

[4] 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.

[5] J. W. Shin, Y. S. Yoon, S. D. Lee, H. C. Park and J. K. Rhee, "Effects of He gas on hydrogen content and passivation of GaAs PHEMT with SiN films," *2000 Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices (AWAD)*, pp. 121~124, 2000.

[6] Il-Hyeong Lee, Seong-Dae Lee, and Jin-Koo Rhee, "Studies on Air-Bridge Processes for mm-wave MMIC's Applications," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 35, no. 12, pp. S1043~S1046, 1999.

[7] Michael W. Chapman, and Sanjay Raman, "A 60 GHz Uniplanar MMIC 4 Subharmonic Mixer," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 95~98, 2001.

[8] Michael J. Roberts, Stavros Iezekiel, and Christopher M. Snowdan, "A W-band Self-Oscillating Subharmonic MMIC Mixer," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2104~2108, Dec. 1998.

[9] Ko Kanaya, Kenji Kawakami, Takayuki Hisaka, Takahide Ishikawa, and Susumu Sakamoto, "A 94 GHz High Performance Quadruple Subharmonic Mixer MMIC," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1249~1252, 2002.

[10] Sanjay Raman, Frank Rucky, and Gabriel M. Rebeiz, "A High-Performance W-Band Uniplanar Sub-harmonic Mixer," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 45, no. 6, pp. 955~959, June 1997.

[11] Mikko Sironen, Yongxi Qian, and Tatsuo Itoh, "A Subharmonic Self-Oscillating Mixer with Integrated Antenna for 60-GHz Wireless Applications," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol.49, no.3, pp. 442~450, March 2001.

저 자 소 개



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

<주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



김 성 찬(정회원)
1999년 동국대학교
전자공학과 (공학사),
2001년 동국대학교 전자공학과
(공학석사),
2001년 3월~현재 동국대학교
대학원 전자공학과 박사과정

<주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작>

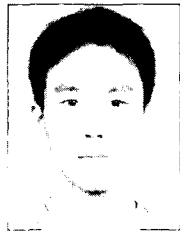
저 자 소 개



이 문 교(정회원)
 1999년 배재대학교
 전자공학과 공학사,
 2001년 동국대학교
 전자공학과 공학석사,
 2001년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정
 <주관심분야 : 무선통신 시스템, MIMIC 설계 >



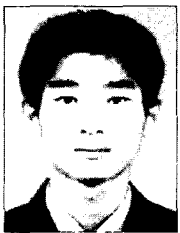
이 상 진(정회원)
 2003년 중부대학교 정보통신
 공학과 (공학사),
 2005년 동국대학교
 전자공학과(공학석사),
 2005년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정
 <주관심분야 : 반도체 및 RF 집적회로 설계>



고 두 현(정회원)
 2003년 동국대학교
 전자공학과(공학사),
 2005년 동국대학교
 전자공학과(공학석사),
 2005년~현재 에프알텍 연구원
 <주관심분야: MIMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시스템>



채 연 식(정회원)
 1993년 동국대학교
 전자공학과 졸업(공학사)
 1997년 동국대학교 전자공학과
 석사과정(공학석사)
 2002년 동국대학교 전자공학과
 박사과정(공학박사)
 2002년~현재 동국대학교 MINT 연구교수
 <주관심분야: MMIC 설계>



진 진 만(정회원)
 2003년 한경대학교
 전자공학과(공학사),
 2005년 동국대학교
 전자공학과(공학석사),
 2005년~현재 GSI 연구원
 <주관심분야 : 반도체 및 RF 집적회로 설계, MIMIC를 이용한 통신 모듈설계>



신 동 훈(정회원)
 1982년 동국대학교
 물리학과(이학사),
 1984년 동국대학교
 물리학과(이학석사),
 1999년 런던대학교 전기전자
 공학과(공학박사),
 1999년~현재 동국대학교 MINT 연구교수
 <주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작>



박 형 무(정회원)
 1978년 서울대학교
 전자공학과 졸업(공학사),
 1980년 한국과학기술원 전자공학과
 석사과정(공학석사),
 1984년 한국과학기술원 전자공학과
 박사과정(공학박사),
 1999년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



이 진 구(정회원)
 1969년 국립항공대학교
 전자공학과 졸업(공학사),
 1975년 서울대학교 전자공학과
 석사과정(공학석사),
 1982년 Oregon State Univ. 전기
 공학과(공학박사),
 1985년 Cray Research Scientist,
 1985년 Microwave Semiconductors, USA,
 Senior Engineer,
 1995년~현재 한국 전자과학회 이사,
 2005년~현재 대한전자공학회 회장,
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수,
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장
 <주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>