

論文2003-40TC-5-4

## Cascode형 하모닉 발생기를 이용한 고변환이득 특성의 밀리미터파 단일칩 Subharmonic 믹서

### (High Conversion Gain Millimeter-wave Monolithic Subharmonic Mixer With Cascode Harmonic Generator)

安 壇 \*\*, 金星燦 \*\*, 薛宇皙 \*\*, 韓孝宗 \*\*, 李漢信 \*\*,  
嚴元永 \*\*, 朴亨茂 \*, 金三東 \*, 李鎭九 \*

(Dan An, Sung Chan Kim, Woo Suk Sul, Hyo Jong Han, Han Shin Lee,  
Won Young Uhm, Hyung Moo Park, Sam Dong Kim, and Jin Koo Rhee)

#### 요 약

본 논문에서는 cascode 하모닉 발생기를 이용하여 고변환이득 특성의 밀리미터파 subharmonic 믹서를 설계 및 제작하였다. 밀리미터파 subharmonic 믹서는 0.1  $\mu\text{m}$  GaAs PHEMT와 CPW 라이브러리를 이용하여 설계되었다. 설계된 cascode 하모닉 발생기의 출력 특성 측정결과, 14.5 GHz의 신호를 10 dBm 전력으로 인가하였을 때, 1차, 2차 및 4차 하모닉 성분은 각각 -21.62 dBm, -32.65 dBm 및 -13.45 dBm의 결과를 얻어 가장 큰 4차 하모닉 성분을 얻었으며, 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서의 측정결과 14.5 GHz LO 신호를 13 dBm의 크기로 입력하였을 때 3.4 dB의 높은 변환이득 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 가장 높은 변환이득 특성을 나타내었다.

#### Abstract

In this paper, we have presented millimeter-wave high conversion gain quadruple subharmonic mixers adopting the cascode harmonic generator. The subharmonic mixers were successfully integrated by using 0.1  $\mu\text{m}$  GaAs pseudomorphic HEMTs(PHEMTs) and coplanar waveguide(CPW) structures. Measured output of 1st, 2nd and 4th harmonics of the fabricated cascode 4th harmonic generator are -21.42 dBm, -32.65 dBm and -13.45 dBm, respectively, for an input power of 10 dBm at 14.5 GHz. We showed that the highest conversion gain of 3.4 dB has obtained thus far at a LO power of 13 dBm from the fabricated subharmonic mixers. The millimeter-wave subharmonic mixer also ensure a high degree of isolation showing -53.6 dB in the LO-to-IF and -46.2 dB in the LO-to-RF, respectively, at a frequency of 14.5 GHz. The high conversion gain achieved in this work is the first report among the millimeter-wave subharmonic mixers.

**Keywords** : cascode harmonic generator, MIMIC, subharmonic mixer, conversion gain

\* 正會員, \*\* 學生會員, 東國大學校 밀리미터파 新技術  
研究센터  
(Millimeterwave INnovation Technology research  
center(MINT), Dongguk Univ.)

※ 본 연구는 동국대학교 ERC 센터인 밀리미터파 신기술  
술연구센터(MINT)의 지원에 의하여 수행되어졌습  
니다.

接受日字:2003年3月12日, 수정완료일:2003年5月14日

I. 서론

밀리미터파 대역은 최근 무선통신 시장의 확대와 함께 민간 부문의 응용을 위한 연구가 진행되고 있다. 특히 V-band 대역(50~75 GHz)인 60 GHz는 초고속 광대역 통신을 위한 실내 및 단거리 무선 통신용 주파수로 부각되고 있다. 이러한 밀리미터파 초고속 무선 시스템의 소형화 및 저가격화를 위해 중요한 부품 중에 하나인 MMIC 믹서의 경우 동작을 위해 필수적인 LO 입력을 위한 양호한 특성의 밀리미터파용 발진기의 개발이 필요하다. 그러나 밀리미터파 대역에서 양호한 출력특성을 갖는 발진기의 개발은 매우 어려울 뿐만 아니라 고가이기 때문에 전체 시스템의 비용을 증가시킨다. 이런 이유로 기존의 믹서에 대한 대안으로 subharmonic 믹서가 제시되고 있다. subharmonic 믹서는 기존의 믹서에서 사용되는 LO 주파수의 1/n의 주파수를 사용하기 때문에 상대적으로 낮은 주파수를 사용할 수 있고, LO-to-RF 격리 특성이 우수한 장점이 있다. 따라서 최근 subharmonic mixer의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, APD(anti-parallel diode) 구조를 이용한 연구결과가 발표되고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 APD를 이용한 subharmonic mixer의 경우 일반적으로 큰 변환손실 특성을 가지기 때문에 추가적인 신호 증폭이 요구된다.

본 논문에서는 cascode 하모닉 발생기 구조를 이용한 고변환이득 특성의 밀리미터파 subharmonic 믹서를 제안한다. subharmonic 믹서는 자체 개발된 0.1 um GaAs PHEMT와 CPW 라이브러리를 이용하여 설계 및 제작되었으며, 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서는 측정 및 분석되었다.

II. 밀리미터파 subharmonic 믹서의 설계

Subharmonic 믹서에서 높은 변환이득은 입력된 LO 신호를 원하는 n차배 되는 주파수에 대해서 큰 전력 특성을 얻어야 가능하다. <그림 1>은 본 논문에서 제안된 cascode 하모닉 발생기 구조로 입력된  $f_0$  신호는  $f_{0(1)}$ 과  $f_{0(2)}$  신호로 분배되며, 각각의 FET1과 FET2의 고조파 성분들은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

$$P_{(FET1)} = P_{f_{0(1)}} + P_{2f_{0(1)}} + P_{3f_{0(1)}} + P_{4f_{0(1)}} + \dots \quad (1)$$

$$P_{(FET2)} = P_{f_{0(2)}} + P_{2f_{0(2)}} + P_{3f_{0(2)}} + P_{4f_{0(2)}} + \dots \quad (2)$$

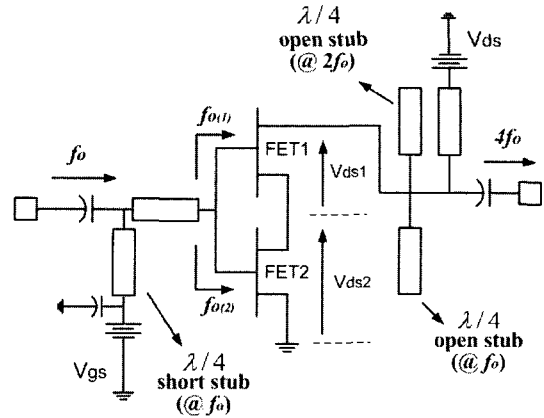


그림 1. 제안된 cascode 하모닉 발생기 구조  
Fig. 1. The proposed cascode harmonic generator in this paper.

Cascode 구조의 경우 FET1과 FET2의 전압차로 인하여 FET2로 입력된 신호가 FET1의 소스단을 구동시키게 되므로 전체 4차 고조파 성분은 다음과 같다.

$$P_{4f} = P_{4f_{0(1)}} + P_{4f_{0(1)}}(P_{4f_{0(2)}}) + P_{4f_{0(1)}}(P_{2f_{0(2)}}) + P_{4f_{0(1)}}(P_{f_{0(2)}}) + \dots \quad (3)$$

여기서  $P_{4f_{0(1)}}$ 은  $f_{0(1)}$ 에 의한 FET1에서의  $f_0$ 의 4차 고조파,  $P_{4f_{0(1)}}(P_{4f_{0(2)}})$ 는  $f_{0(2)}$ 의 4차 고조파에 의한 FET1에서의  $f_0$ 의 4차 고조파,  $P_{4f_{0(1)}}(P_{2f_{0(2)}})$ 는  $f_{0(2)}$ 의 2차 고조파에 의한 FET1에서의  $f_0$ 의 4차 고조파이며,  $P_{4f_{0(1)}}(P_{f_{0(2)}})$ 는  $f_{0(2)}$ 에 의한 FET1에서의  $f_0$ 의 4차 고조파이다.

식 (3)에서 cascode 구조의 경우 FET2에 의해 추가적으로 발생하는 비선형 성분으로 인하여 FET1 하나를 사용한 경우에 비하여 높은 4차 고조파 성분을 얻어낼 수 있다. 또한 <그림 1>의 회로에서 4차 고조파 성분만을 얻어내기 위해, 입력단의  $f_0$ 에 대한  $\lambda/4$  short stub와 출력단에  $f_0$ 와  $2f_0$ 에 대한  $\lambda/4$  open stub를 추가적으로 설계하였다. 입력단의 short stub는 입력된  $f_0$  신호를 전달시켜 주게 되며, 출력단의 open stub는 출력된 신호중에서  $f_0$ 와  $2f_0$  신호를 억압시켜 4차 고조파 성분만 통과시키게 된다.

Subharmonic 믹서의 RF, LO 및 IF 주파수는 각각 60.4 GHz, 14.5 GHz 및 2.4 GHz로 설계하였으며, 본 연구에서 개발된 0.1 um GaAs PHEMT와 CPW 라이브러리를 사용하여 설계되었다<sup>[3]</sup>. RF와 LO단의 정합회로는 CPW 전송선로를, IF 주파수는 상대적으로 낮은 주

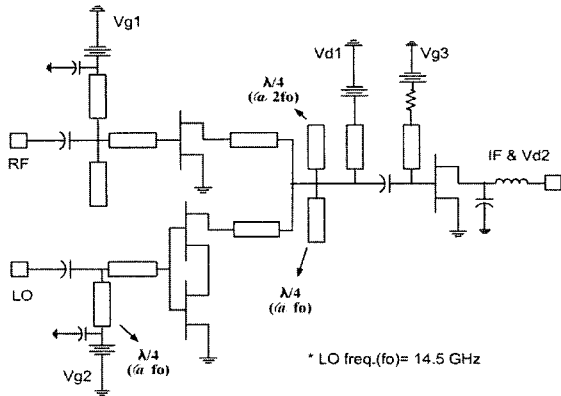


그림 2. 설계된 밀리미터파 subharmonic 믹서의 회로도  
Fig. 2. Circuit of the designed millimeter-wave subharmonic mixer.

과수이기 때문에 칩크기의 최소화를 위해 인덕터와 캐패시터 등의 집중형 소자를 사용하여 정합회로를 설계하였다. 또한 RF단의 PHEMT는 RF 신호를 증폭시킬 뿐만 아니라 소자의 S<sub>12</sub> 특성으로 인해 LO-to-RF 격리 특성을 향상시키게 된다. <그림 2>에 설계된 밀리미터파 subharmonic 믹서의 회로도도를 나타내었다.

### III. Subharmonic 믹서의 제작 및 측정분석

밀리미터파 subharmonic 믹서의 제작은 본 논문에서 연구된 MIMIC 표준공정을 사용하여 제작하였다<sup>[4][6]</sup>.

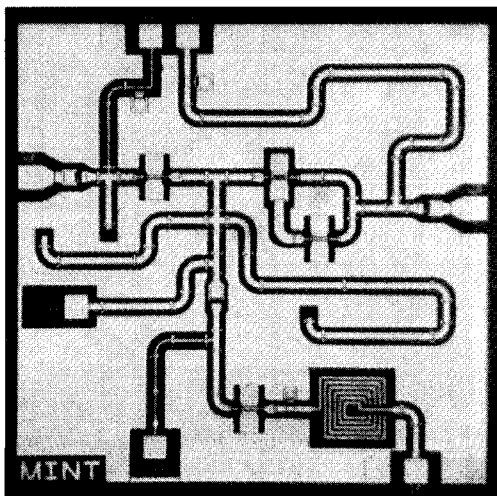
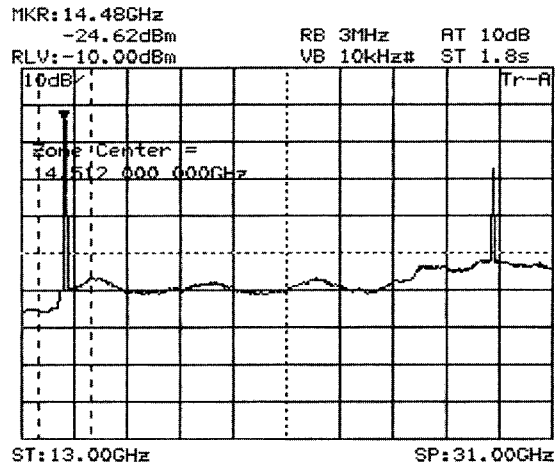
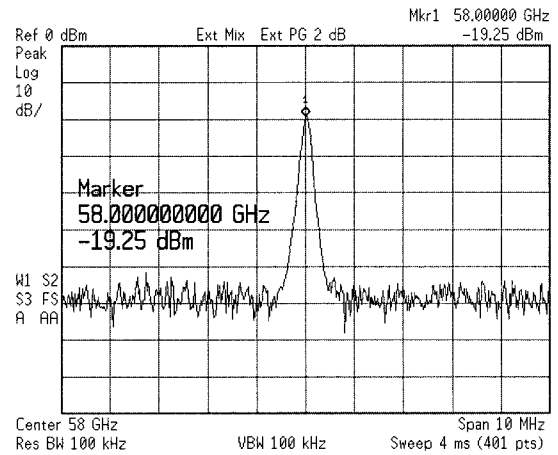


그림 3. 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서  
Fig. 3. Photograph of the fabricated millimeter-wave subharmonic mixer.



(a)



(b)

그림 4. Cascode 하모닉 발생기의 출력스펙트럼 (a)  $f_0$  와  $2f_0$ 의 출력특성, (b)  $4f_0$ 의 출력특성, (cable loss: @ 14.5 GHz = 3.2 dB, @ 29 GHz = 4.6 dB, @ 58 GHz = 5.8 dB)

Fig. 4. The output spectrum of cascode harmonic generator, (a) The output spectrum of  $f_0$  and  $2f_0$ , (b) The output spectrum of  $4f_0$ , (cable loss: @ 14.5 GHz = 3.2 dB, @ 29 GHz = 4.6 dB, @ 58 GHz = 5.8 dB).

Subharmonic 믹서의 제작공정은 능동소자인 PHEMT 제작공정과 CPW 전송선로 및 MIM 캐패시터 등의 수동소자 제작공정을 통합한 일괄공정으로 제작하였다. 제작된 subharmonic 믹서의 칩크기는  $1.9 \times 1.8 \text{ mm}^2$ 이며, <그림 3>에 칩사진을 나타내었다.

제작된 subharmonic 믹서는 60.4 GHz의 RF 신호를 Agilent 83623B 신호발생기와 83557A 밀리미터파 모듈

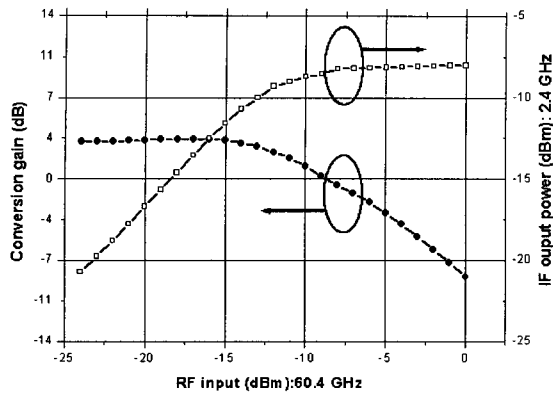


그림 5. 변환이득 및 IF 출력특성 측정결과  
 Fig. 5. Conversion gain and IF output vs. RF input. (LO frequency : 14.5 GHz, LO power : 13 dBm)

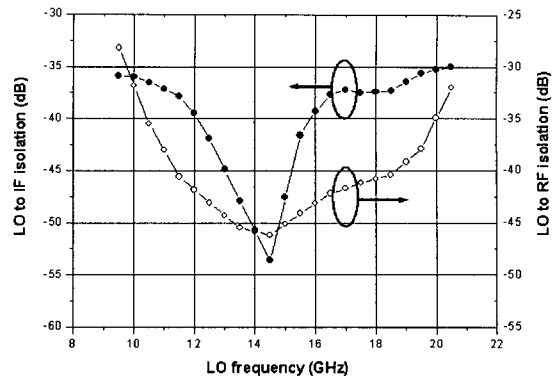


그림 8. Isolation 특성 측정결과  
 Fig. 8. Measured results of isolation characteristics.

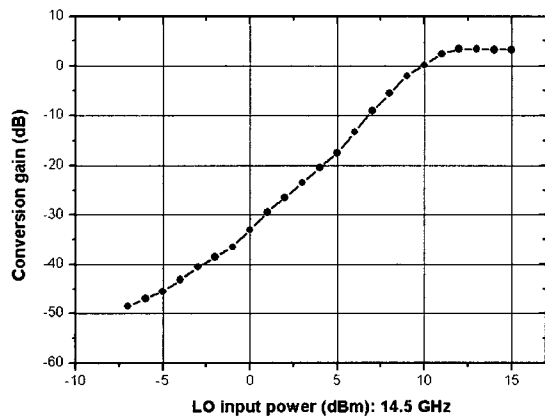


그림 6. LO 입력전력에 대한 변환이득 특성 측정결과  
 Fig. 6. Conversion gain vs. LO input power. (RF frequency : 60.4 GHz, RF power : -15 dBm)

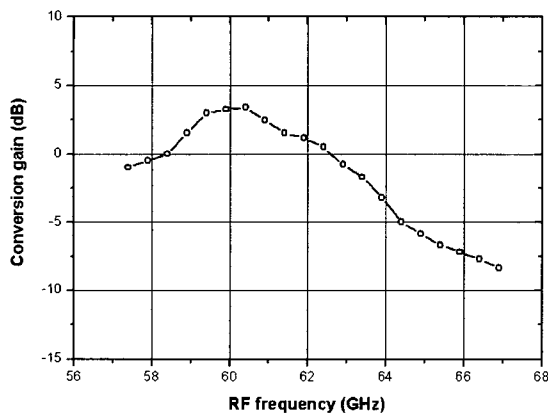


그림 7. RF 주파수에 대한 변환이득 특성 측정결과  
 Fig. 7. Conversion gain vs. RF frequency. (LO power : 13 dBm, RF power : -15 dBm)

을 이용하여 입력하고, 14.5 GHz의 LO 신호는 Agilent 83630B 신호발생기를 이용하여 인가하였다. 첫번째로 cascode 하모닉 발생기 구조의 특성 분석을 위하여 cascode 하모닉 발생기의 출력 특성을 측정하였으며, <그림 4>에 나타내었다. 출력 특성 측정결과, 14.5 GHz의 신호를 10 dBm 전력으로 인가 하였을때, 1차, 2차 및 4차 하모닉 성분은 각각 -21.62 dBm, -32.65 dBm 및 -13.45 dBm의 결과를 얻었으며, 가장 큰 4차 하모닉 출력 특성을 나타내었다. IF 출력 특성은 Agilent E4407B를 이용하여 측정하였다. 제작된 subharmonic 믹서의 출력 및 변환이득 특성 측정결과 14.5 GHz의 LO 신호를 13 dBm 전력으로 인가할 때 3.4 dB의 높은 변환 이득 특성을 얻었으며, P1dB(1 dB compression point)는 -9.0 dBm의 결과를 얻었다. <그림 5>에 RF 입력전력에 대한 변환이득과 IF 출력특성을 각각 나타내었다. <그림 6>은 LO 입력전력에 대한 변환이득 특성의 측정결과로 LO 입력이 증가할수록 변환이득 특성이 증가하다 13 dBm 이상이 되면 포화되는 특성을 나타내었다. RF 주파수에 대한 변환이득 특성은 <그림 7>에 나타내었다. RF 입력신호 및 LO 입력신호는 각각 -15 dBm과 13 dBm을 인가하였으며, RF 주파수에 대한 변환이득 측정결과 동작주파수 영역인 59.4 ~ 60.9 GHz의 주파수에서 2.5 ~ 3.4 dB의 변환이득 특성을 얻었다. <그림 8>은 subharmonic 믹서의 격리 특성으로 LO 주파수인 14.5 GHz에서 LO-to-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-to-RF 격리 특성을 나타낸 것으로 분

표 1. 밀리미터파 subharmonic 믹서의 변환이득 특성

Table 1. Conversion gain of subharmonic mixers

Ref.no.	Type	Frequency (GHz)	Conversion gain (dB)
[7]	×2	38.0	-11.5
[8]	×4	58.5	-13.2
[9]	×2	77.0	-11.0
[10]	×4	94.0	-11.4
[11]	×2	89.0	-7.0
[12]	×2	60.0	-11.0
<b>Thiswork</b>	<b>×4</b>	<b>60.4</b>	<b>+3.4</b>

석되었다. <표 1>은 본 논문에서 제작된 subharmonic 믹서와 기존의 밀리미터파 대역에서 발표된 subharmonic 믹서 회로와의 비교 결과로 기존의 발표되어진 회로의 변환이득 특성인 -13.2 ~ -7.0 dB에 비하여 가장 우수한 변환이득 특성을 나타내었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 cascode 하모닉 발생기를 이용하여 고 변환이득 특성의 밀리미터파 subharmonic 믹서를 설계 및 제작하였다. 밀리미터파 subharmonic 믹서는 0.1  $\mu\text{m}$  GaAs PHEMT와 CPW 라이브러리를 이용하여 설계되었다. Cascode 하모닉 발생기 출력 특성 측정결과, 14.5 GHz의 신호를 10 dBm 전력으로 인가하였을때, 1차, 2차 및 4차 하모닉 성분은 각각 -21.62 dBm, -32.65 dBm 및 -13.45 dBm의 결과를 얻어 가장 큰 4차 하모닉 성분을 얻었다. 설계 및 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서는 측정결과 LO 신호가 13 dBm 일 때 3.4 dB의 높은 변환이득 특성을 얻었으며, LO-to-RF 격리 특성은 -46.2 dB, LO-to-IF 격리 특성은 -53.6 dB의 양호한 특성을 나타내었다. 제작된 밀리미터파 subharmonic 믹서는 기존에 발표된 밀리미터파 subharmonic 믹서에 비해 높은 변환이득 특성을 나타내었으며, 낮은 LO 주파수를 사용하면서도 높은 변환이득 특성을 갖기 때문에, 고가의 밀리미터파 발진기를 저가의 발진기로 대체 할 수 있어 전체 밀리미터파 시스템의 가격을 낮출 수 있다. 또한 큰 LO와 RF 주파수 차이로 인해 우수한 LO-to-RF 격리 특성을 나타내어, 향후 큰 시장이 형성될 것으로 예상되는 밀리미터파 시스템의 저가격화와 함께 중요한 핵심 부품으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 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] Edmar Camargo, *Design of FET Frequency Multipliers and Harmonic Oscillators*, Artech House.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] H. I. Fujishiro, Y. Ogawa, T. Hamada, and T. Kimura, "SSB MMIC mixer with subharmonic LO and CPW circuits for 38 GHz band applications," *IEEE Electro. Lett.*, vol. 37, no. 7, pp. 435~436, March 2001.
- [8] Michael W. Chapman, and Sanjay Raman, "A 60

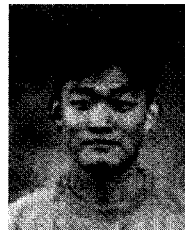
- GHz Uniplanar MMIC 4× Subharmonic Mixer,” *IEEE MTT-S Digest*, pp. 95~98, 2001.
- [9] Michael J. Roberts, Stavros Iezekiel, and Christopher M. Snowdan, “A W-band Self-Oscillating Subharmonic MMIC Mixer,” *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2104~2108, Dec. 1998.
- [10] Ko Kanaya, Kenji Kawakami, Takayuki Hisaka, Takahide Ishikawa, and Susumu Sakmoto, “A 94 GHz High Performance Quadruple Subharmonic Mixer MMIC,” *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1249~1252, 2002.
- [11] 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.
- [12] Atsushi Yamada, Yoshihisa Amano, Yoshinori Motouchi, Naoki Takahashi, Eiji Suematsu, and Hiroya Sato, “A Compact 60GHz Sub-Harmonically Pumped Mixer MMIC Integrated with an Image Rejection Filter,” *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1733~1736, 2002.

저 자 소 개



安 壇(學生會員)  
1998년 2월 : 동국대학교 전자공학과(공학사). 2000년 2월 : 동국대학교 전자공학과(공학석사). 2000년 3월~현재 : 동국대학교 전자공학과 박사과정. <주관심분야 : 마이크로 파 소자 및 회로설계, MMIC 설계 및 소자 모델링>

및 소자 모델링>



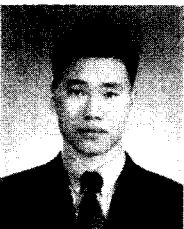
韓 孝 宗(學生會員)  
2002년 2월 : 동국대학교 전자공학과(공학사). 2002년 3월~현재 : 동국대학교 대학원 전자공학과 석사과정. <주관심분야 : MIMIC 설계 및 공정>



金 星 燦(學生會員)  
1999년 2월 : 동국대학교 전자공학과(공학사). 2001년 2월 : 동국대학교 전자공학과(공학석사). 2001년 3월~현재 : 동국대학교 대학원 전자공학과 박사과정. <주관심분야 : 밀리미터파 소자 및 회로 설계 제작>



李 漢 信(學生會員)  
2002년 2월 : 국립 한경대학교 전자공학과(공학사). 2002년 3월~현재 : 동국대학교 대학원 전자공학과 석사과정. <주관심분야 : MEMS 공정 기술 및 E-Beam lithography>

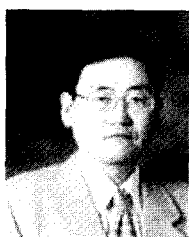


薛 宇 皙(學生會員)  
2000년 2월 : 동국대학교 전자 전기공학부(공학사). 2002년 3월 : 동국대학교 전자공학과(공학석사). 2002년 3월~현재 : 동국대학교 대학원 전자공학과 박사과정. <주관심분야 : 밀리미터파 대역용 MIMIC 부

품 설계 및 제작>



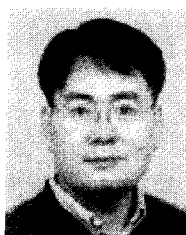
嚴 元 永(學生會員)  
2002년 2월 : 동국대학교 전자공학과(공학사). 2002년 3월~현재 : 동국대학교 대학원 전자공학과 석사과정. <주관심분야 : MIMIC 설계 및 모델링>



朴亨茂(正會員)

1999년~현재 : 동국대학교 전자공학과 부교수. 1978년 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1980년 : 한국과학기술원(KAIST) 전자공학과 졸업(공학석사). 1984년 : 한국과학기술원(KAIST) 전자공학과 졸업

(공학박사).



金三東(正會員)

2001년 3월~현재 : 동국대학교 전자공학과 조교수. 1999년 11월~2001년 2월 : 밀리미터파 신기술 연구센터 연구교수. 1983년 2월 : 서울대학교 금속공학과(공학사). 1985년 2월 : 서울대학교 금속공학과(공학

석사). 1992년 9월 : Department of Materials Science & Engineering, Stanford University(공학박사).



李鎮九(正會員)

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. 1990년~1991년 : University of Michigan, Visiting Research Scientist. 1995년~현재 : 한국 전자과학회 이사. 1996년~현재 : 한국산업인력관리공단, 기술사 겸정심의원. 2002년~현재 : 대한전자공학회 부회장. 1985년~현재 : 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수. 1999년~현재 : 밀리미터파 신기술 연구센터 소장.