

논문 2006-43TC-6-6

마이크로 머시닝 링 커플러를 사용한 낮은 변환 손실 및 높은 격리 특성의 94 GHz MHEMT 믹서

(Low Conversion Loss and High Isolation 94 GHz MHEMT Mixer Using Micro-machined Ring Coupler)

안 단*, 김 성 찬*, 박 정 동**, 이 문 교*, 이 복 형*, 박 현 창*, 신 동 훈*, 이 진 구***

(Dan An, Sung-Chan Kim, Jung-Dong Park, Mun-Kyo Lee, Bok-Hyung Lee, Hyun-Chang Park, Dong-Hoon Shin, and Jin-Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 70-nm metamorphic high electron mobility transistor (MHEMT)와 W-band 마이크로 머시닝 링 커플러를 이용하여 낮은 변환손실 및 높은 격리특성의 94 GHz MMIC 믹서를 설계 및 제작하였다. 높은 LO-RF 격리도 특성을 얻기 위하여 마이크로 머시닝 링 커플러를 사용한 새로운 3차원 구조의 resistive 믹서 구조를 제안하였다. 제작된 94 GHz MMIC 믹서는 94 GHz에서 8.9 dB의 낮은 변환 손실과 29.3 dB의 높은 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다. 본 논문에서 제안된 믹서는 기존의 보고된 W-band 대역 믹서와 비교하여 양호한 변환 손실 뿐 만 아니라 우수한 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다.

Abstract

We report on a high performance 94 GHz MMIC resistive mixer using 70-nm metamorphic high electron mobility transistor (MHEMT) and micro-machined W-band ring coupler. A novel 3-dimensional structure of resistive mixer was proposed in this work, and the ring coupler with the surface micro-machined dielectric-supported air-gap microstrip line (DAMLs) structure was used for high LO-RF isolation. The fabricated mixer showed an excellent LO-RF isolation of -29.3 dB and a low conversion loss of 8.9 dB at 94 GHz. To our knowledge, compared to previously reported W-band mixers, the proposed MHEMT-based resistive mixer using micro-machined ring coupler has shown superior LO-RF isolation as well as similar conversion loss.

Keywords : resistive mixer, micro-machined ring coupler, LO-RF isolation

I. 서 론

Single-ended resistive 믹서는 양호한 변환손실 및

선형성 특성을 가지고 있어 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 Single-ended 구조는 LO-RF 격리도 특성이 낮은 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 single-balanced 구조의 믹서가 사용되지만, single-balanced 믹서는 2개 이상의 소자와 커플러 및 IF 발룬 구조가 필요하기 때문에 회로 구조가 복잡하고 칩크기가 커지는 단점을 가지고 있다^[1-2].

본 논문에서는 이러한 점을 해결하고 balanced 구조를 사용하지 않으면서도 우수한 LO-RF 격리도 특성을 얻기 위해 마이크로 머시닝 링 커플러를 사용한 3차원 구조의 resistive 구조를 제안한다. 이를 위해 마이크로 머시닝 기술을 이용한 W-band 대역의 링 커플

* 정희원, *** 평생회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
(Millimeter-wave INnovation Technology research center)

** 정희원, 국방과학연구소
(Agency for Defense Development)

※ 본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (MINT)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터(ERC) (R11-1999-058-01005-0) 지원금에 의해 수행되었습니다.

접수일자: 2006년1월4일, 수정완료일: 2006년6월9일

러를 설계 및 제작하였다. 제안된 믹서는 흡수 감쇠가 적은 특성을 가지고 있어 밀리미터파 FMCW 레이더 및 센서 등의 응용을 위해 연구가 진행되고 있는 94 GHz 대역의 믹서를 설계하였다. 또한 낮은 변환 손실 특성을 얻기 위해 밀리미터파 대역에서 가장 우수한 성능을 나타내는 InP HEMT와 대등한 성능을 나타내면서, GaAs 기판에서 성장이 가능하여 저가격 구현이 가능한 Metamorphic HEMT(MHEMT)을 설계 및 제작하였다.

II. 마이크로 머시닝 기술을 이용한 W-band 링 커플러의 설계 및 제작

그림 1에 제작되어진 dielectric-supported air-gap microstrip lines (DAMLs)의 SEM 사진을 나타내었다. DAML 라인은 GaAs 기판위에 유전체 포스트를 통해 공기 중에 떠 있는 구조로 대부분의 전자기파가 GaAs

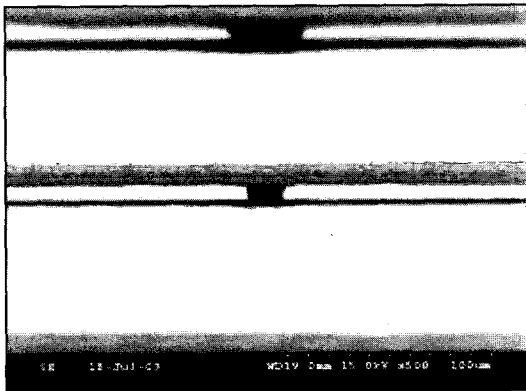


그림 1. 제작된 DAML 라인의 SEM 사진
Fig. 1. The SEM of the fabricated DAML structure.

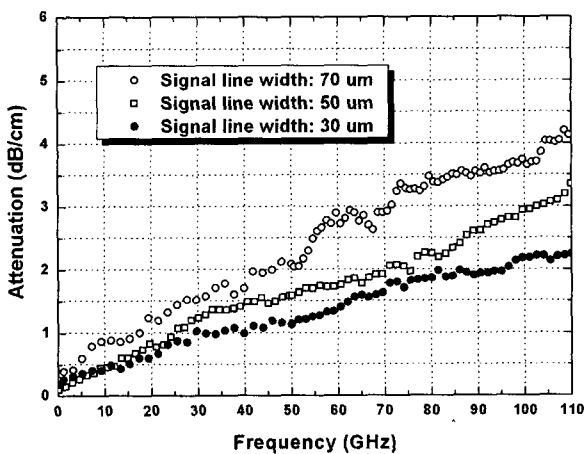


그림 2. 제작된 DAML의 삽입손실 측정결과
Fig. 2. Insertion loss of the fabricated DAMLs (Signal line height: 10 μm , metal thickness: 5 μm).

기판에 영향을 받지 않기 때문에 기판으로 인한 유전

체 손실을 감소시킬 수 있다. 또한 기존의 마이크로 스트립 구조와 달리 같은 GaAs 기판 위에 Ground와 Signal 라인이 제작이 되기 때문에 후면 공정이 필요 없는 장점이 있다^[3].

제작된 DAML 라인을 on-wafer 측정시스템을 이용하여 삽입손실 특성을 측정하였다. 삽입손실 측정결과 라인폭이 30, 50과 70 μm 라인에 대하여 94 GHz에서 각각 3.5, 2.7 및 1.9 dB/cm의 낮은 삽입손실 특성을 나타내었다. DAML 라인의 삽입손실 측정 결과를 그림 2에 나타내었다. 마이크로 머시닝 링 커플러는 라인 임피던스와 파장의 중심주파수를 94 GHz로 설계 하였다. 설계된 링 커플러는 개발된 마이크로 머시닝 기술을 이용하여 제작되었으며, 측정결과 coupling 손실과 transmission 손실이 85 ~ 105 GHz의 주파수 영역에서

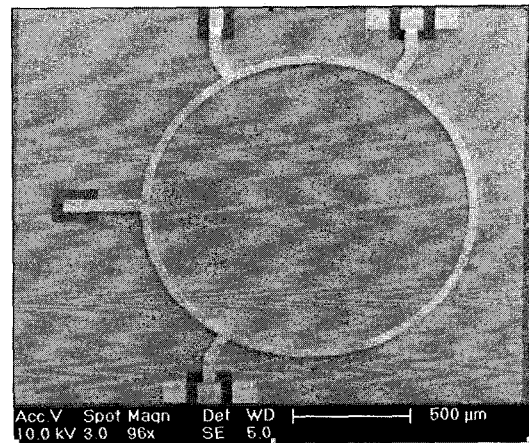


그림 3. 제작된 W-band 링 커플러의 SEM 사진
Fig. 3. The SEM photograph of the fabricated W-band ring coupler.

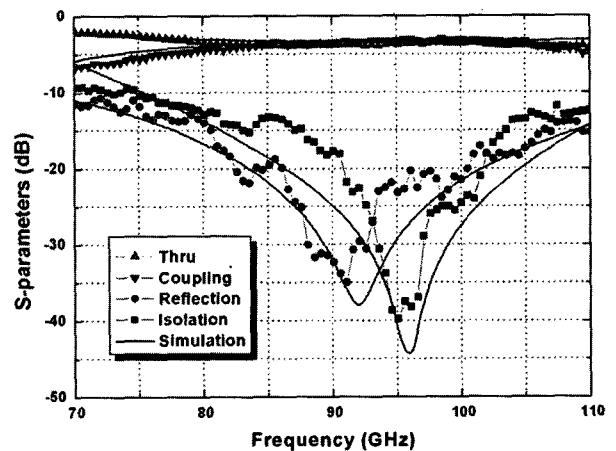


그림 4. 제작된 W-band 링 커플러의 측정결과
Fig. 4. The measured result of the W-band ring coupler.

각각 3.57 ± 0.22 및 3.80 ± 0.08 dB 양호한 특성을 나

타내었다. 또한 94 GHz에서 34 dB의 높은 격리도 특성을 얻었으며, coupling 및 transmission 2개의 포트간의 위상차는 $180 \pm 1^\circ$ 의 측정결과를 얻었다^[4]. 그림 3과 4에 제작된 링 커플러의 SEM 사진 및 측정결과를 나타내었다.

III. 94 GHz MMIC resistive 믹서의 설계

믹서의 우수한 변환 손실 특성을 얻기 위하여 PHEMT에 비해 성능이 우수한 70-nm MHEMT를 설계 및 제작하였다. MHEMT의 에피층 구조는 높은 electron sheet density 및 transconductance를 얻기 위해 silicon double delta-doping 구조로 설계 하였으며, indium mole fraction을 0에서 0.5까지 선형적으로 변화시키면서 $In_xAl_{1-x}As$ 버퍼 레이어를 GaAs 기판위에 성장시키는 구조로 설계하였다^[5]. MHEMT의 공정은 소자의 전기적 격리를 위한 MESA 에칭 공정, AuGe/Ni/Au 계의 금속층을 이용한 오믹 공정, 70-nm T-gate 공정, 노출된 소자 채널을 보호하기 위한 Si_3N_4 적층 공정 및 RIE (Reactive Ion Etching), 격리된 전극의 연결을 위한 Air-bridge 공정 순으로 제작되었다. 제작된 MHEMT의 측정결과 단위 게이트 폭이 $70 \mu m$ 이고 핑거 수가 2개인 소자의 I-V 및 전달컨덕턴스 특성으로 드레인 전류 밀도는 607 mA/mm 이며, 1015 mS/mm 의 높은 최대 전달컨덕턴스(G_m) 특성을 얻었다. 그림 5에 제작된 70-nm MHEMT의 DC 특성 측정결과를 나타내었다.

제작된 MHEMT의 RF 특성은 ME7808A Vector

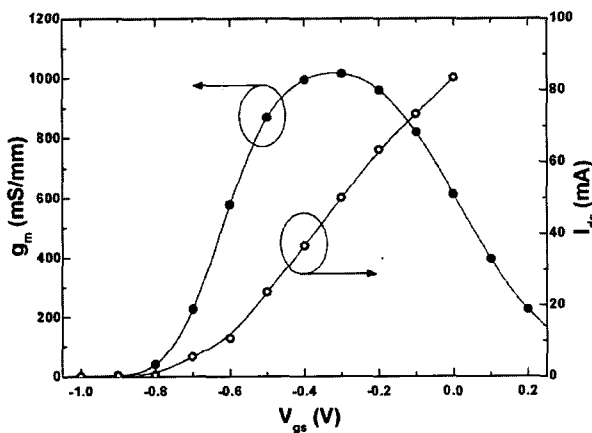


그림 5. 70-nm MHEMT의 DC 특성 측정결과
Fig. 5. The DC characteristics measured result of the fabricated 70-nm Metamorphic HEMT.

Network Analyzer를 이용하여 0.1~75 GHz의 주파수

영역에서 측정하였다. 그림 6은 MHEMT의 RF 특성을 나타낸 것으로 전류이득 차단주파수(f_T)는 330 GHz, 최대공진 주파수(f_{max})는 425 GHz의 양호한 측정결과를 얻었다.

MMIC 믹서의 설계를 위해 본 논문에서는 MHEMT의 비선형 모델을 추출하였다. 비선형 모델링은 단위 게이트 폭이 $70 \mu m$ 이고 핑거 수가 2개인 MHEMT 소자를 추출하였다. 또한 MMIC 믹서의 설계 및 제작을 위해 CPW (coplanar waveguide) 라이브러리를 구축하였다. CPW는 마이크로 스트립 라인에 비하여 후면 공정

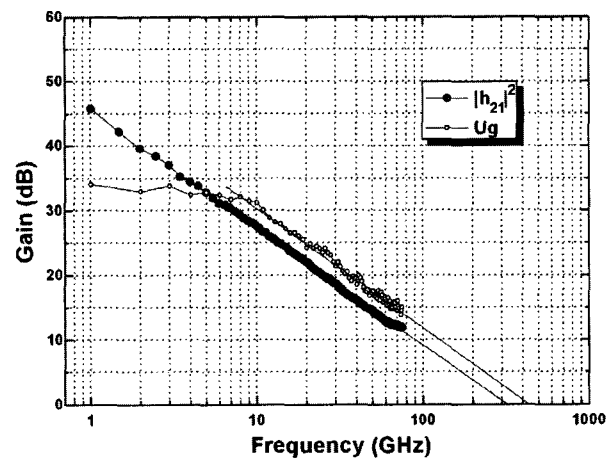


그림 6. 70-nm MHEMT의 RF 특성 측정결과
Fig. 6. The RF characteristics measured result of the fabricated 70-nm Metamorphic HEMT.

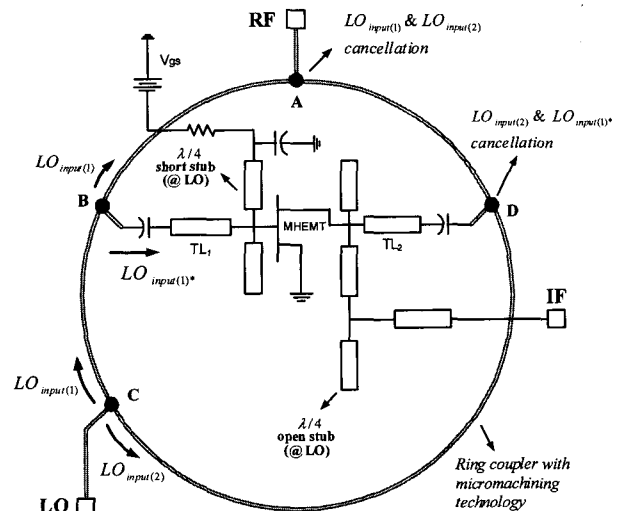


그림 7. 제안된 마이크로 머시닝 링 커플러를 사용한 94 GHz MMIC resistive 믹서의 회로도.
Fig. 7. The circuit diagram of the proposed 94 GHz MMIC resistive mixer using micro-machined ring coupler.

이 필요 없는 장점이 있어 밀리미터파 대역에서 많이

응용되고 있다. CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70 Ω 의 특성 임피던스를 갖는 전송 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위하여 Curve, Tee, Cross의 CPW 라이브러리를 구축하였다.

제안된 마이크로 머시닝 링 커플러를 사용한 resistive 믹서의 회로도들을 그림 7에 나타내었다. 믹서의 동작 원리는 LO 입력 신호가 링 커플러의 Point C에서 $LO_{input(1)}$ 과 $LO_{input(2)}$ 으로 분리되어 입력되게 된다. 또한 Point B에서 $LO_{input(1)}$ 은 $LO_{input(1)}$ 에서 나누어져 MHEMT의 게이트로 입력이 되게 되고, 반면에 나머지 $LO_{input(1)}$ 신호는 Point A로 가게 된다. $LO_{input(1)}$ 과 $LO_{input(2)}$ 은 Point A에서 두 개의 신호의 180° 다른 위상차 때문에 서로 상쇄가 되게 된다.

추가적으로 TL1 및 TL2 전송라인을 조절하여 Point D에서 $LO_{input(1)}$ 과 $LO_{input(2)}$ 이 서로 180° 위상차를 가지도록 설계하였다. 따라서 $LO_{input(2)}$ 과 $LO_{input(1)}$ 은 Point D 지점에서 서로 상쇄되어 LO-RF 격리도 특성이 향상되게 된다.

Resistive mixer는 70-nm MHEMT, coplanar waveguide, MIM 캐패시터, Ti 박막저항 및 DAML 라이브러리를 사용하여 설계하였다. 게이트 바이어스 회로는 $\lambda/4$ (at LO frequency) short stub를 사용하여 설계되었다. 또한 IF 단의 $\lambda/4$ (at LO frequency) open stub를 추가하여 LO 신호가 IF 포트에 누설되는 것을 방지하였다. 제안된 구조는 MHEMT 및 정합회로가 링 커플러 안에 위치하기 때문에 기존의 single-balanced 믹서 구조와 비교하여 더 간단하고 효율적으로 칩 크기를 감소시킬 수 있다.

IV. 94 GHz MMIC resistive 믹서의 제작 및 특성

설계된 94 GHz MMIC 믹서는 MHEMT MMIC 공정을 사용하여 제작되었다^[6]. 그림 8은 제작된 94 GHz MMIC resistive 믹서의 표면사진으로 칩 면적은 $1.9 \times 1.8 \text{ mm}^2$ 이다. 제작된 resistive 믹서는 on-wafer 측정 시스템을 이용하여 측정을 수행하였으며, probing 및 cable 손실을 보상하여 측정하였다.

LO 입력전력에 대한 변환손실 측정결과, LO 입력이 8 dBm 일 때 8.9 dB의 양호한 변환손실 특성을 나타내었다. 또한 93.0~95.0 GHz의 RF 주파수 영역에서 8.9 ~ 9.3 dB의 변환 손실 특성을 나타내었다. LO 입

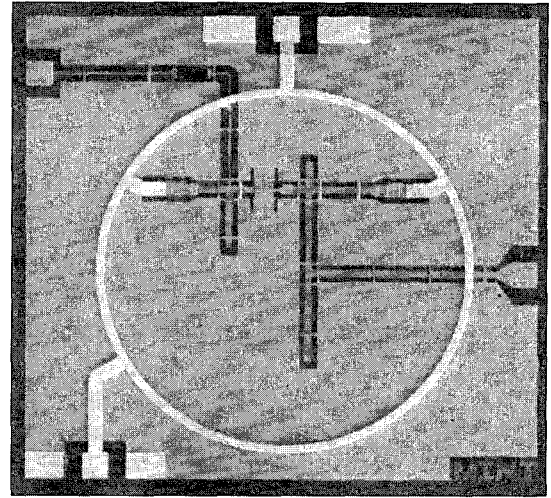


그림 8. 제작된 94 GHz MMIC resistive 믹서의 칩사진.
Fig. 8. The micrograph of fabricated 94 GHz MMIC resistive mixer.

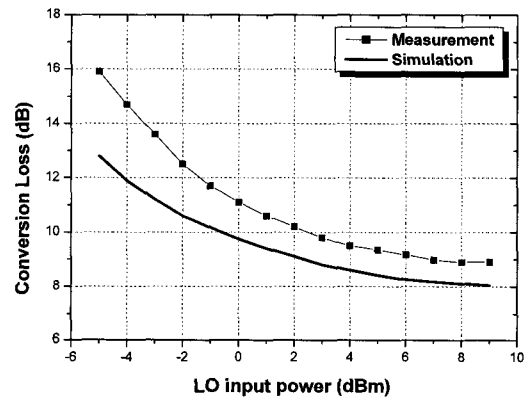


그림 9. LO 입력에 대한 변환손실 특성 측정결과 (RF freq. : 94 GHz, LO freq. : 94.3 GHz, RF 입력 : -10 dBm)
Fig. 9. Measured result of the LO input versus conversion loss (RF freq. : 94 GHz, LO freq. : 94.3 GHz, RF input : -10 dBm).

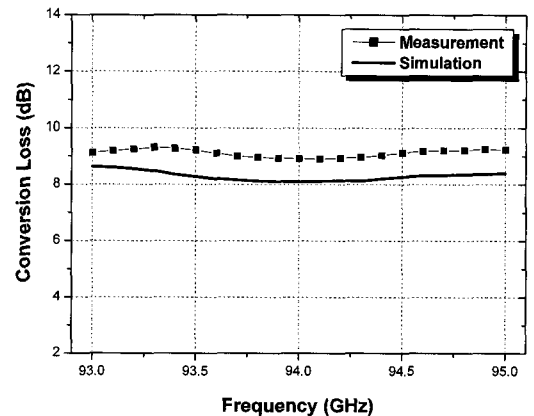


그림 10. RF 주파수에 대한 변환손실 특성 측정결과 (RF 입력 전력 : -10 dBm, LO 입력 전력 : 8 dBm).
Fig. 10. Measured result of the RF frequencies versus conversion loss (RF input power : -10 dBm, LO input power : 8 dBm).

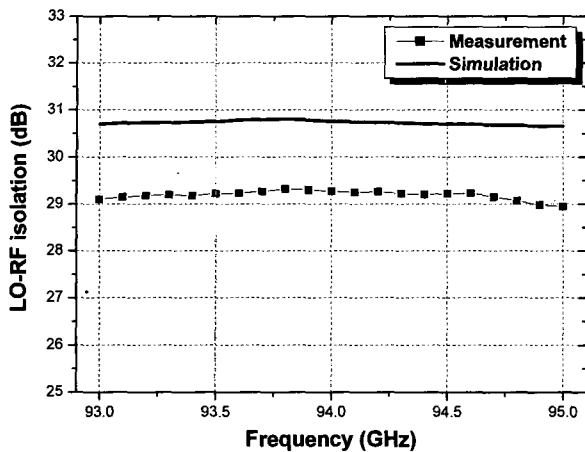


그림 11. 주파수에 대한 LO-RF 격리도 특성 측정결과.
Fig. 11. Measured result of the frequencies versus LO-RF isolation characteristics.

표 1. 기존의 보고된 W-band 대역 믹서의 비교.
Table 1. Comparison of reported W-band mixers.

Ref.	Freq. (GHz)	Circuit structure	LO-RF Isolation (dB)	Conversion loss (dB)
[7]	92-96	single ended	< 13	< 8
[7]	92-96	single balanced	< 27	< 10
[8]	90-98	single balanced	16-27	< 9
[9]	95	single balanced	27	8.8
This Work	93-95	using micro-machined ring coupler	29-29.4	8.9-9.3

력에 따른 변환손실 측정결과를 그림 9에 RF 주파수에 따른 변환손실 측정결과를 그림 10에 나타내었다.

제작된 resistive 믹서의 LO-RF 격리도 측정 결과를 그림 11에 나타내었으며, 93~95 GHz의 주파수 영역에서 29.0~29.4 dB의 매우 우수한 LO-RF 격리도 특성을 얻어, 본 논문에서 제안된 마이크로 머시닝 링 커플러를 사용한 resistive 믹서가 낮은 변환 손실 뿐만 아니라 높은 LO-RF 격리도 특성을 나타냄을 증명하였다.

표 1에 본 논문에서 제안된 믹서와 기존에 발표된 W-band 대역의 믹서를 비교하였다^[7-9]. 기존의 발표된 믹서와의 비교 결과, W-band single-ended 믹서 및 single-balanced 믹서에 비해서도 제안된 마이크로 머시닝 링 커플러를 이용한 MHEMT-based resistive 믹

서가 양호한 변환 손실 뿐만 아니라 우수한 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 70-nm metamorphic HEMT와 마이크로 머시닝 링 커플러를 이용하여 낮은 변환손실 및 높은 격리특성의 94 GHz MMIC 믹서를 설계 및 제작하였다. 높은 LO-RF 격리도 특성을 얻기 위하여 마이크로 머시닝 링 커플러를 사용한 새로운 3차원 구조의 resistive 믹서 구조를 제안하였다. 제작된 94 GHz MMIC 믹서는 94 GHz에서 8.9 dB의 낮은 변환 손실과 29.3 dB의 높은 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다. 본 논문에서 제안된 믹서는 기존의 보고된 W-band 대역 믹서와 비교하여 양호한 변환 손실 뿐만 아니라 우수한 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] Masayuki Kimishima, Tsuyoshi Ataka, and Hideyuki Okabe, "A Family of Q, V and W-band Monolithic Resistive Mixers," in *2001 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 115-118.
- [2] K. W. Chang, E. W. Lin, H. Wang, K. L. Tan, and W. H. Ku, "A W-band Monolithic, Singly Balanced Resistive Mixer With Low Conversion Loss," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 4, no. 9, pp. 301-302, Sep. 1994.
- [3] H. S. Lee, D. H. Shin, Y. H. Chun, S. C. Kim, B. O. Lim, T. J. Beak, S. K. Kim, H. C. Park, and J. K. Rhee, "Design and characterization of micromachined transmission line with dielectric post for millimeter-wave applications," *IEE Electronics Lett.*, vol. 39, no. 25, pp.1827-1828, 2003.
- [4] Sung-Chan Kim, Baek-Seok Ko, Tae-Jong Baek, Byeong-Ok Lim, Dan An, Dong-Hoon Shin, and Jin-Koo Rhee, "Hybrid Ring Coupler for W-band MMIC Application Using MEMS Technology," *IEEE Microwave and Wireless Component Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 652-654, Oct. 2005.
- [5] Dan An, Bok-Hyung Lee, Byeong-Ok Lim, Mun-Kyo Lee, Sung-Chan Kim, Jung-Hun Oh, Sam-Dong Kim, Hyung-Moo Park, Dong-Hoon Shin, and Jin-Koo Rhee, "High Switching Performance 0.1-um Metamorphic HEMTs for Low Conversion Loss 94 GHz Resistive Mixers," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 26, no. 10, pp.

707~709, Oct. 2005.

[6] Bok-Hyung Lee, Sam-Dong Kim, and Jin-Koo Rhee, "Small-Signal Analysis of High Maximum Frequency of Oscillation 0.1- μm Off-Set Γ -Shaped Gate InGaAs/ InAlAs/GaAs metamorphic High Electron Mobility Transistors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, pp.1914-1918, 2004.

[7] A. R. Barnes, P. Munday, R. Jennings, and M.T. Moore, "A comparison of W-band monolithic resistive mixer architectures," in *2002 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 1867-1870.

[8] Kwo Wei Chang, Huei Wang, Kin L. Tan, Stacey B. Bui, Tzu-hung Chen, Gee Samuel Dow, J. Berenz, Thuy-Nhung Ton, Diane C. Garske, T. Shyan Lin, and Louis C. T. Liu, "A W-band Monolithic Downconverter," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, no. 12, pp. 1972-1979, Dec. 1991.

[9] Hiroyuki Matsuura, Kentaro Tezuka, Ikuro Aoki, Akira Miura, Mineo Yamanaka, TsuyoshiYakihara, Shinji Kobayashi, Sadaharu Oka, Tadashige Fujita, and Daisuke Murata, "A Monolithic W-band CPW Rat-race Mixer with HBT IF Amplifier," in *1996 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 389-392.

— 저 자 소 개 —



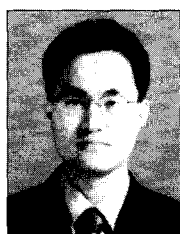
안 단(정회원)
1998년 동국대학교 전자공학과 (공학사),
2000년 동국대학교 전자공학과 (공학석사),
2006년 동국대학교 전자공학과 (공학박사),

2006년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 연구원
<주관심분야: MMIC 설계, 밀리미터파 소자 모델링>



김 성 찬(정회원)
1999년 동국대학교 전자공학과 (공학사),
2001년 동국대학교 전자공학과 (공학석사),
2006년 동국대학교 전자공학과 (공학박사),

2006년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 연구원
<주관심분야: 밀리미터파 소자 설계, 제작, MEMS 소자 설계 및 제작>



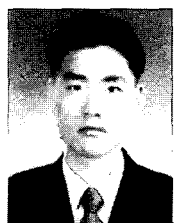
박 정 동(정회원)
1998년 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사),
2000년 광주과학기술원 정보통신 공학과(공학석사),
2000년~2002년 고등기술연구원 연구원,

2002년~현재 국방과학연구소 연구원
<주관심분야: 밀리미터파 회로/레이더 시스템>



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

<주관심분야 : 무선통신 시스템, MIMIC 설계 >



이 복 형(정회원)
1999년 동국대학교 전자공학과 (공학사),
2001년 동국대학교 전자공학과 (공학석사),
2006년 동국대학교 전자공학과 (공학박사),

2006년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 연구원
<주관심분야: MMIC 설계 및 공정, 밀리미터파 소자 제작>



박 현 창(정회원)
1986년 서울대학교 전자공학과 학사,
1989년 미국 Cornell University 전자공학과 석사,
1993년 미국 Cornell University 전자공학과 박사,

1993년 미국 University of Virginia, Research Associate,
1995년~현재 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수
<주관심분야 : 반도체 소자, MMIC, MEMS, 무선 응용시스템>

저 자 소 개



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>



이 진 구(평생회원)

1969년 국립항공대학교

전자공학과 졸업(공학사),

1975년 서울대학교 전자공학과
석사과정(공학석사),

1982년 Oregon State Univ.
전기공학과(공학박사),

1985년 Cray Research Scientist,

1985년 Microwave Semiconductors, USA,
Senior Engineer,

1995년~현재 한국 전자과학회 이사,

2005년 대한전자공학회 회장,

1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수,

1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장

<주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>