

논문 2007-44TC-11-7

높은 격리도 특성의 W-밴드용 MIMIC 단일 평형 주파수 혼합기의 설계 및 제작 연구

(A Study on Design and Fabrication of High Isolation W-band
MIMIC Single-balanced Mixer)

이 상 용*, 이 문 교**, 안 단****, 이 복 형****, 임 병 옥**, 이 진 구***

(Sang-Yong Yi, Mun-Kyo Lee, Dan An, Bok-Hyung Lee, Byeong-Ok Lim, and Jin-Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 branch line coupler와 $\lambda/4$ 전송라인을 이용한 94 GHz 발룬 회로를 설계하였고, 이를 이용하여 높은 LO-RF 격리도 특성을 갖는 W-밴드용 MIMIC 단일 평형 주파수 혼합기를 개발하였다. 혼합기는 0.1 μm InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT 다이오드를 적용하였다. 혼합기에 사용된 MHEMT는 전류이득차단 주파수가 154 GHz, 최대공진 주파수 특성이 454 GHz의 특성을 나타내었다. 제작된 혼합기의 특성 측정 결과 LO 입력 전력이 8.6 dBm일 때 12.8 dB의 변환 손실 특성을 나타내었으며, 입력 및 출력 P1 dB는 각각 5 dBm, -8.9 dBm의 특성을 나타내었다. 또한 LO-RF 격리도 특성은 94 GHz에서 37.2 dB로 높은 격리도 특성을 나타내었다. 격리도 특성을 고려할 때, 본 논문에서 설계 및 제작된 W-밴드용 MIMIC 단일 평형 주파수 혼합기는 기존의 밀리미터파 대역 혼합기와 비교하여 높은 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, a high LO-RF isolation W-band MIMIC single-balanced mixer was designed and fabricated using a branch line coupler and a $\lambda/4$ transmission line. The W-band MIMIC single-balanced mixer was designed using the 0.1 μm InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT diode. The fabricated MHEMT was obtained the cut-off frequency(f_T) of 154 GHz and the maximum oscillation frequency(f_{max}) of 454 GHz. The designed MIMIC single-balanced mixer was fabricated using 0.1 μm MHEMT MIMIC process. From the measurement, the conversion loss of the single-balanced mixer was 12.8 dB at an LO power of 8.6 dBm. P1 dB(1 dB compression point) of input and output were 5 dBm and -8.9 dBm, respectively. The LO-RF isolations of single-balanced mixer was obtained 37.2 dB at 94 GHz. We obtained in this study a higher LO-RF isolation compared to some other balanced mixers in millimeter-wave frequencies.

Keywords : Single-balanced mixer, MIMIC, MHEMT, Balun, High Isolation

I. 서 론

최근에 군사용 뿐 아니라 상업적으로도 많은 연구가 이루어지고 있는 W-band(75~110 GHz) 대역은 94 GHz의 경우 이전부터 신호 흡수 감쇠가 적어 밀리미터 파 레이더 및 센서, 77 GHz는 차량 충돌 방지 레이더 등의 응용을 위해 연구가 진행되고 있다^[1]. 그러나 W-band 대역에서 동작하는 회로의 경우 75 GHz 이상의 높은 주파수 대역에서 동작을 해야 하기 때문에 우수한 특성을 갖는 회로를 제작하기 어려우며, 고속 동작이 가능한 능동소자의 설계, 제작기술이 필요하다. 따

* 정회원, 국방과학연구소
(ADD)

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

**** 정회원, 국방기술품질원
(DAPA)

***** 정회원, 삼성탈레스
(Sam-sung Thales)

※ 본 연구는 동국대학교 ERC 센터인 밀리미터파 신
기술연구센터(MINT)의 지원에 의하여 수행되었습
니다.

접수일자:2007년 9월20일, 수정완료일:2007년11월17일

라서 현재 일반적으로 많이 사용되는 MHEMT (Metamorphic HEMT) 소자가 아닌 InP HEMT를 이용한 결과들이 보고되고 있다^[2~3]. 그러나 InP의 경우 매우 고가이며 3인치 이상의 기판에서 성장하는 것이 어려운 단점이 있어, 기존의 GaAs 기판위에서 성장시킬 수 있는 MHEMT가 최근 활발히 연구되고 있다^[1].

밀리미터파 시스템을 구현하기 위해 소자 기술과 함께 회로 설계 측면에서 혼합기는 입력신호를 LO 신호를 이용하여 상향 혹은 하향 주파수로 변환 시켜주는 회로로 전체 시스템에서 매우 중요한 회로이다. 그러나 입력신호를 변환시켜 주기 위한 LO 신호의 경우 일반적으로 매우 큰 출력 특성을 갖기 때문에 LO 신호가 입출력포트로 누설될 경우 신호전송이 왜곡을 받게 된다. 따라서 이러한 신호 누설을 막기 위해 balanced 타입의 혼합기 구조가 많이 사용되고 있다. Balanced 혼합기의 경우 높은 LO 신호의 격리도 특성을 가지기 위해 우수한 특성의 발룬 회로가 필요하게 된다. 이러한 발룬 회로는 일반적으로 라인사이의 coupling 이용한 구조가 많이 사용되고 있으나, 30 GHz 이상의 밀리미터파 대역의 경우 라인간격이 수 마이크로제작이 어렵기 때문에 정확한 위상차 및 낮은 삽입손실 특성을 구현하기 어렵다.

본 논문에서는 이러한 문제를 개선하고 우수한 성능의 balanced 혼합기의 설계 및 제작을 위해 라인 사이의 coupling을 이용한 구조가 아닌 제작이 용이하고 정확한 위상차 구현이 가능하도록 branch line coupler와 $\lambda/4$ 전송라인을 이용한 94 GHz 발룬 회로를 설계하였다. W-대역 MIMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 단일평형 혼합기는 설계된 발룬 회로를 이용하여 설계되었다. 또한 우수한 성능의 혼합기를 개발하기 위해 Metamorphic HEMT 다이오드를 설계, 제작하였으며, 소자 모델링을 수행하였다. 회로 설계를 위한 수동소자로는 CPW 라이브러리를 구축한 후 이를 이용하여 W-대역 MIMIC 단일 평형 혼합기를 설계하였다. 제작된 단일평형 혼합기는 높은 LO-RF 격리도 특성과 함께 IF 발룬이 필요 없는 구조로 설계하여 시스템에 쉽게 응용 수 있도록 하였다.

II. W-대역 MIMIC 단일평형 주파수 혼합기의 설계

단일평형 주파수 혼합기는 입력된 신호를 180° 위상차를 갖도록 분리하여 IF주파수로 변환한 후 최종적으로

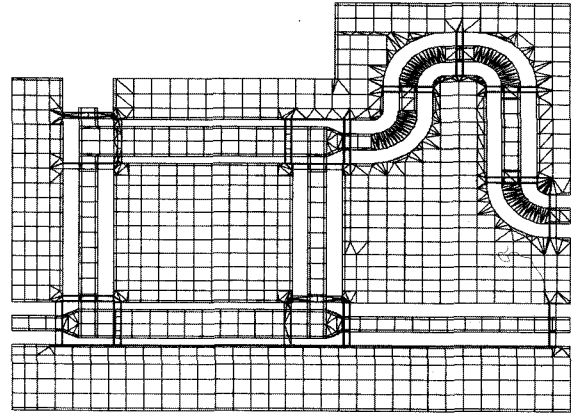
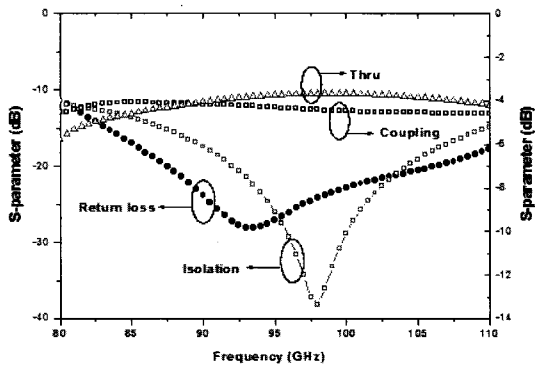


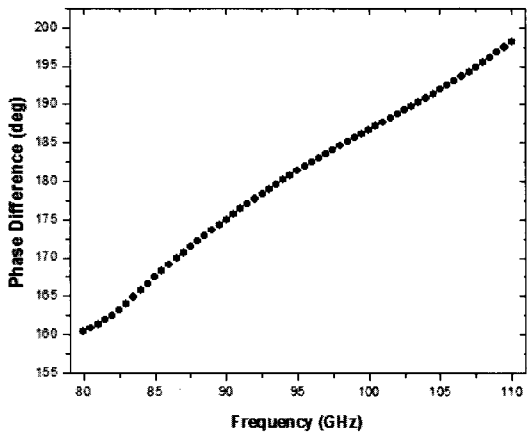
그림 1. 설계된 W-대역 발룬 레이아웃
Fig. 1. Layout of W-band Balun.

로 LO 신호는 180° 위상차로 인해 상쇄되어 LO-RF 격리도를 향상시키는 구조이다. 본 논문에서는 이를 위해 2개의 MHEMT 다이오드를 W-대역 발룬 회로에 anti-parallel로 연결하는 구조로 설계하여 일반적으로 단일평형 주파수 혼합기가 IF 발룬 회로를 필요로 하는데 반해, IF 발룬 회로가 필요 없는 구조로 설계하였다. 그림 1에 단일평형 주파수 혼합기를 위해 설계된 94 GHz 발룬의 레이아웃을 나타내었다. 제안된 발룬 회로는 branch line coupler과 $\lambda/4$ 전송라인을 이용하여 설계되었다. 발룬 회로는 1차적으로 branch line coupler를 통해 90° 위상차가 발생하게 되며, 다음에 라인의 길이를 동작주파수에서 $\lambda/4$ 차이가 발생하도록 설계하여 전체적으로 180° 의 위상차를 갖도록 설계하였다. 설계된 발룬은 coupling을 이용한 구조에 비해 공정이 용이하고 정확한 위상차를 구현하여 믹서의 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 설계된 발룬의 시뮬레이션 결과 94 GHz에서 반사계수는 -27.9 dB를 얻었으며, coupling은 -4.26 dB, thru 특성은 -3.77 dB의 결과를 얻었다. 반사 손실 특성은 92 GHz에서, 격리도 특성은 97 GHz에서 우수하나 신호의 전달 특성 및 coupling 특성을 고려하여 94 GHz에 최적화 시켰다. 격리도와 위상차는 94 GHz에서 각각 23.5 dB 및 180.2° 의 결과를 얻어 이상적인 특성인 180° 에서 0.2% 이내의 오차 특성을 얻어 양호한 위상차 특성을 얻었다. 그림 2에 W-대역 발룬의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

그림 3에 설계된 W-대역 MIMIC 단일 평형 주파수 혼합기의 회로를 나타내었다. 능동소자는 추출된 MHEMT 소자 비선형 모델의 소스-드레인을 연결한 MHEMT 다이오드를 사용하여 설계하였으며, 다이오드를 anti-parallel로 연결하여 LO 신호에 대하여 180° 위



(a)



(b)

그림 2. 94 GHz 발룬 시뮬레이션 결과; (a) 반사계수, 전송특성, 격리도 특성 (b) 위상차 특성

Fig. 2. The simulated results of 94 GHz Balun.

- (a) Return loss, Thru, Isolation characteristics
- (b) Phase difference characteristic

상차를 가져 LO 신호가 서로 상쇄되게 설계하였다. RF 포트에는 설계된 발룬 회로를 삽입하여 입력된 신호가 MHEMT 다이오드에서 같은 위상을 갖도록 하였다. 또한 IF 발룬 회로가 필요 없도록 설계하여 시스템에 용이하게 적용할 수 있도록 하였다.

혼합기 회로의 LO 및 RF 정합회로는 CPW 라인을 이용하여 설계하였으며, 게이트 바이어스 회로는 LO 신호에 대해 $\lambda/4$ short stub를 사용하여 설계하였다. IF 단에는 low pass filter 구조 및 94 GHz $\lambda/4$ open stub를 추가하여 LO, RF 신호 및 고주파 신호의 IF단으로의 누설을 방지하도록 설계하였다. 설계된 전체 회로 패턴은 모멘텀 시뮬레이션을 이용하여 최적화를 수행하였다.

설계된 단일평형 주파수 혼합기의 변환손실 시뮬레이션 결과 RF 입력 주파수가 93.5 GHz, LO 주파수가 94.08 GHz 일 때 11.5 dB의 결과를 얻었으며, 동일 RF

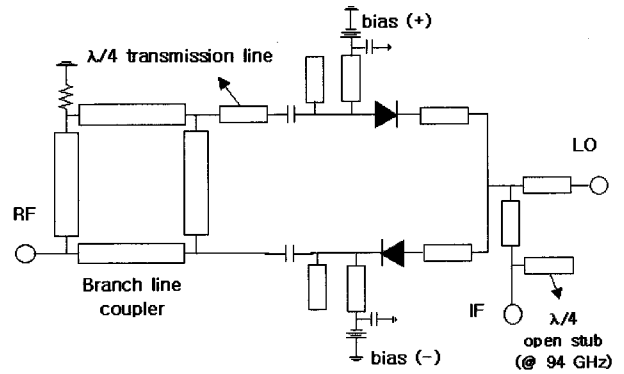


그림 3. W-밴드 MIMIC 단일 평형 주파수 혼합기의 회로도

Fig. 3. A schematic of the designed W-band MIMIC singled-balanced mixer.

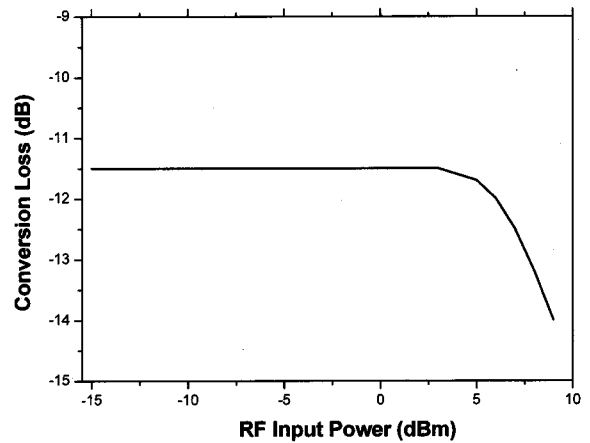


그림 4. RF 입력에 대한 변환손실 시뮬레이션 결과

Fig. 4. The simulated results of conversion loss versus RF input power.

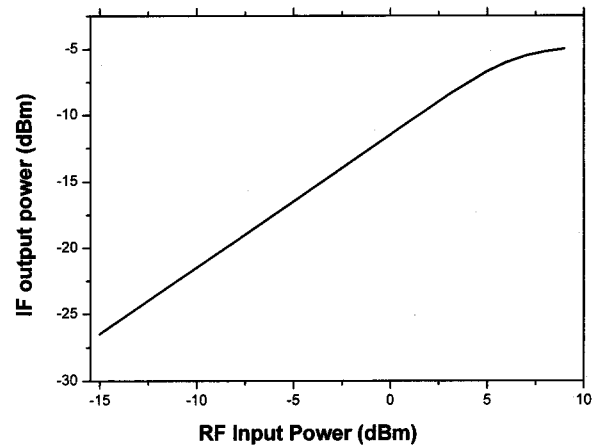


그림 5. RF 입력에 대한 IF 출력 전력 시뮬레이션 결과

Fig. 5. The simulated results of IF output power versus RF input power.

주파수에서 입력 및 출력 P1 dB(1dB compression point)는 각각 7 dBm 및 -18.5 dBm의 시뮬레이션 특성을 나타냈다. 그림 4와 그림 5에 단일평형 주파수 혼합기의 RF 입력에 대한 변환손실 및 RF 입력에 대한 IF 출력 전력 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

설계된 단일평형 주파수 혼합기를 제작하기 위하여 광조사 묘화공정에 필요한 마스크 제작이 필요하게 된다. 게이트 묘화공정은 전자빔을 이용하여 패턴을 형성하므로 마스크 제작이 필요 없으며 광 조사 마스크인 메사공정용 마스크, 저항공정용 마스크, 오믹 공정용 마스크, 첫 번째 층 금속증착을 위한 마스크, 유전체 비어홀 공정을 위한 마스크, 에어 브리지 비어홀 공정용 마스크, 두 번째 층 금속증착을 위한 마스크 등 총 7장의 마스크를 설계하였다. MIMIC 단일평형 주파수 혼합기의 마스크의 제작은 MHEMT의 제작공정과 수동소자 제작공정을 통합하여 동시에 제작되도록 하였다. 또한 게이트 묘화공정에서 정확하게 노광하기 위한 칩 마크와 제작된 후 각각의 칩을 절단하기 위한 절단 패턴 및 마스크 패턴 정렬을 위한 정렬 마크를 추가적으로 설계하였다^[4].

III. 단일평형 주파수 혼합기 제작

설계된 W-대역 MIMIC 단일평형 주파수 혼합기는 최종적으로 마스크를 제작하고 본 연구 그룹에서 사용하는 표준 MIMIC 공정 과정을 이용하여 제작하였다^[1]. 회로 설계를 위한 전송선은 CPW 구조를 사용하였다. CPW 구조는 후면 공정이 필요 없어 마이크로 스트립에 비해 공정이 간단하고 수율이 증가하는 장점을 지닌

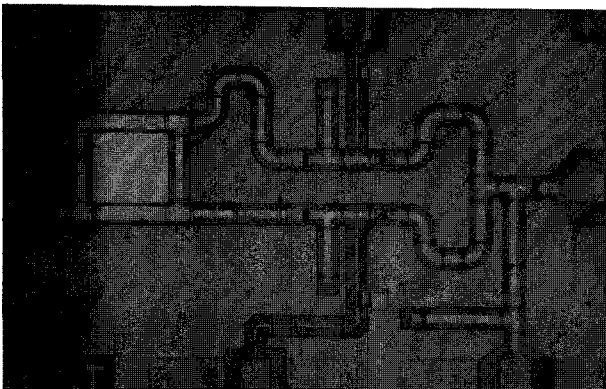


그림 6. 제작된 W-band 단일평형 주파수 혼합기의 칩 사진
Fig. 6. Photograph of the fabricated W-band single-balanced mixer MIMIC.

다. CPW 라이브러리 구축을 위해 35, 50, 70 Ω 라인 및 각 특성 임피던스 라인의 불연속 특성에 대한 모델을 구축하였다. 또한 800 Å Ti 금속을 사용한 박막 저항과 900 Å Si₃N₄ 박막을 이용한 MIM (Metal Insulator Metal) 커패시터를 설계 및 제작하여 수동소자 모델을 구축하였다. 제작된 박막 저항과 MIM 커패시터의 측정 결과 박막저항은 29.6~36.5 Å/□ 및 커패시터는 0.485~0.538 fF/μm²의 값을 가진다. 제작된 W-대역 MIMIC 단일평형 주파수 혼합기를 그림 6에 나타내었으며 칩 크기는 1.95 mm × 1.22 mm 이다.

IV. 단일평형 주파수 혼합기 측정

MIMIC 단일평형 주파수 혼합기의 변환손실 및 출력 전력 측정은 RF 입력 93.5 GHz, 94.08 GHz LO 신호를 8.6 dBm의 전력으로 입력하여 420 MHz의 IF 신호를 측정하였다. MIMIC 단일평형 주파수 혼합기의 측정결과 변환손실 특성은 12.8 dB의 특성을 나타내었으며, 입력 P1 dB는 5 dBm 이상, 출력 P1 dB는 -8.9 dBm의 결과를 얻었다. 그림 7에 RF 입력에 대한 변환손실 측정 결과 나타내었으며, 그림 8에 RF 입력에 대한 IF 출력전력 특성을 나타내었다. 그림 9는 W-대역 MIMIC 단일평형 주파수 혼합기의 LO-RF 격리도 측정결과로 94 GHz에서 37.2 dB 높은 LO-RF 격리도 측정 결과를 얻었다. 설계 및 제작된 혼합기의 우수한 LO-RF 격리도 특성은 설계된 발룬이 정확한 위상차를 구현하여 높은 LO-RF 격리도 특성을 얻은 것으로 분석되었다.

표 1은 밀리미터파 대역에서 보고된 단일평형 믹서

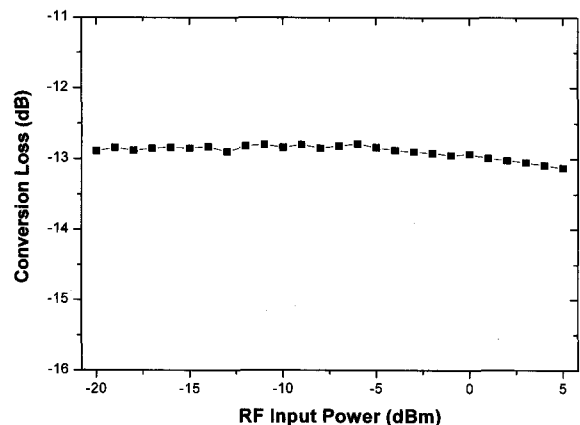


그림 7. RF 입력에 대한 변환손실 특성 측정결과
Fig. 7. Conversion loss characteristics versus RF input power(at LO frequency of 94.08 GHz, RF frequency of 93.5 GHz).

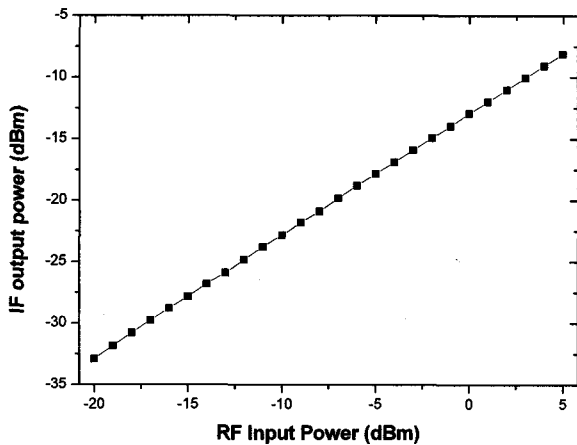


그림 8. RF 입력에 대한 IF 출력 특성 측정결과
 Fig. 8. RF input power versus IF output power. (at LO input power of 8.6 dBm)

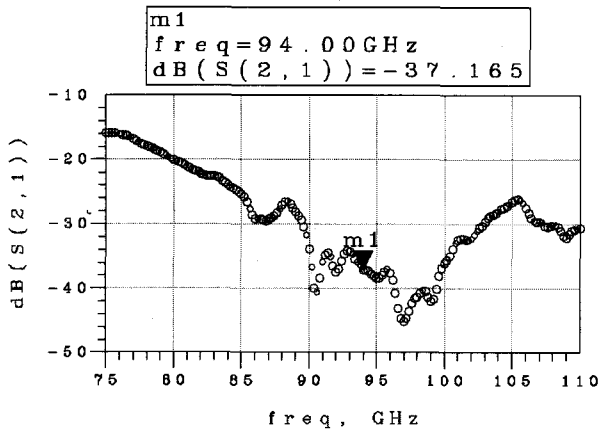


그림 9. MIMIC 믹서의 LO-RF 격리도 특성 측정결과
 Fig. 9. Isolation characteristics versus frequency. (at a RF power of -10 dBm, a LO power of 8.6 dBm)

표 1. 보고된 밀리미터파 단일평형 주파수 혼합기
 Table 1. Comparison of the single-balanced mixer with other published data.

Ref.	Frequency (GHz)	LO-RF Isolation (dB)	Device
[5]	77	30.0	GaAs MHEMT
[6]	30	22.0	GaAs FET
[7]	94	27.0	InP HEMT
This Work	94	37.2	GaAs MHEMT

의 특성으로 기존 혼합기의 LO-RF 격리도 특성이 22.0 ~ 30.0 dB에 비하여 본 논문에서 제작된 MIMIC 단일 평형 혼합기가 더 높은 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 branch line coupler과 $\lambda/4$ 전송라인을 이용하여 W-band MIMIC 단일평형 주파수 혼합기 (single-balanced mixer)를 설계 및 제작하였다. 단일 평형 주파수 혼합기 설계를 위해 branch line coupler와 $\lambda/4$ 전송라인을 이용한 94 GHz 발룬 회로를 설계하였으며, 시뮬레이션 결과 94 GHz에서 반사계수는 -27.9 dB를 얻었으며, coupling은 -4.26 dB, thru 특성은 -3.77 dB의 결과를 얻었다. 격리도와 위상차는 94 GHz에서 각각 23.5 dB 및 180.2° 의 결과를 얻었다. 설계된 믹서는 본 연구에서 개발된 MHEMT MIMIC 공정을 이용해 제작되었다. 94 GHz MIMIC 단일평형 주파수 혼합기의 측정결과 변환손실 특성은 94 GHz에서 12.8 dB의 특성을 나타내었으며, 입력 P1 dB는 5 dBm 이상, 출력 P1 dB는 -8.9 dBm의 결과를 얻었다. 또한 LO-RF 격리도는 94 GHz에서 37.2 dB의 높은 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다. 본 논문에서 설계 및 제작된 W-대역 MIMIC 단일평형 혼합기는 기존의 밀리미터파 대역 혼합기와 비교하여 높은 LO-RF 격리도 특성을 나타내었다. 개발된 밀리미터파 대역의 MHEMT 및 수동소자와 MIMIC 하향 주파수 혼합기는 밀리미터파 MIMIC 분야의 발전에 토대가 될 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(R11-1999-058-01005-0)

참 고 문 헌

- [1] S. C. Kim, D. An, B. O. Lim, T. J. Baek, D. H. Shin, and J. K. Rhee, "High-Performance 94 GHz Single Balanced Mixer Using 70 nm MHEMTs and Surface Micromachined Technology," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 28-30, 2006.
- [2] K. W. Chang, H. Wang, K. L. Tan, S. B. Bui, T. H. Chen, G. S. Dow, J. Berenz, T. N. Ton, D. C. Garske, T. S. Lin, and L. C. T. Liu, "A W-band Monolithic Downconverter," *IEEE Trans., Microw. Theory Tech.*, vol. 39, no. 12, pp. 1972-1979, 1991.
- [3] R. S. Vi가, L. Tran, M. Matloubian, M. Le, M. G. Case, and C. N해, "A Comparison Of W-band MMIC Mixers Using InP HEMT Technology," in *IEEE MTT-S Dig.*, pp 435-438 1997.

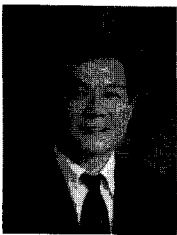
[4] S. C. Kim, B. O. Lim, H. S. Lee, T. J. Baek, D. H. Shin, and J. K. Rhee, "50 nm InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic High Electron Mobility Transistors Using Double Exposure at 50 kV Electron-beam Lithography Without Dielectric Support," *J. Vad. Sci. Technol. B*, vol. 22, no. 4, pp. 1807-1810, Jul/Aug 2004.

[5] Ludger Verweyen, Hermann Massler, Markus Neumann, Ulrich Schaper, and William H. Haydl, "Coplanar Integrated Mixers for 77-GHz Automotive Applications," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 38-40, Jan. 1998.

[6] Thomas A. Bos, and Edmar Camargo, "A Balanced Resistive Mixer Avoiding an IF Balun," in *IEEE MTT-S Digest*, pp. 245-248, 2002.

[7] A. R. Barnes, P. Munday, R. Jennings, and M. T. Moore, "A Comparison of W-band Monolithic Resistive Mixer Architectures," in *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 1867-1870, 2002.

저 자 소 개



이 상 웅(정회원)
 1985년 아주대학교 전자공학과
 공학사
 1988년 아주대학교 전자공학과
 공학석사
 2002년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정

1988년~현재 국방과학연구소
 <주관심분야 : MIMIC 설계 및 서브 시스템 설
 계>



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

<주관심분야 : 무선통신 시스템, MIMIC 설계 및
 소자 모델링>



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

2007년~현재 국방기술품질원 연구원
 <주관심분야 : 마이크로파 소자 및 회로설계,
 MMIC 설계 및 소자 모델링>



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

2006년~2007년 밀리미터파 신기술 연구센터
 연구원
 2007년~현재 삼성 탈레스
 <주관심분야: MMIC 설계 및 공정, 밀리미터파
 소자 제작>



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

<주관심분야: MMIC 설계 및 공정, RF MEMS>

이 진 구(정회원)
 대한전자공학회 논문지
 제 44 권 SD 편 제 9호 참조