

논문 2015-52-2-6

낮은 변환 손실 및 높은 격리 특성의 W-band MMIC 믹서 모듈

(Low Conversion Loss and High Isolation W-band MMIC Mixer Module)

안 단*, 이 진 구**

(Dan An and Jin-Koo Rhee[©])

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 센서 응용을 위한 낮은 변환손실 및 높은 LO-RF 격리도 특성의 W-band MMIC 믹서 모듈을 설계 및 제작하였다. MMIC 믹서는 0.1 μm MHEMT를 이용하여 설계 및 제작되었다. MMIC 믹서는 낮은 변환손실과 높은 LO-RF 격리도 특성을 얻기 위해 RF 입력단에 MHEMT를 추가하여 설계하였다. 제작된 MMIC 칩을 모듈화 하기 위해 CPW-도파관 변환기를 설계 및 제작하였으며, 최종적으로 MMIC 믹서 모듈을 개발하였다. MMIC 믹서 모듈의 측정결과 변환 손실 특성은 94 GHz에서 MMIC 칩은 6.3 dB, MMIC 모듈은 9.5 dB의 양호한 특성을 나타내었다. MMIC 믹서 모듈의 LO-RF 격리도는 94 GHz에서 30.4 dB의 양호한 측정 결과를 얻었다. 본 논문에서 개발된 W-band MMIC 믹서모듈은 기존의 발표된 W-band(75-110 GHz) MMIC 믹서와 비교하여 우수한 성능을 나타내었다.

Abstract

In this paper, we report on a high performance 94 GHz MMIC mixer module using 0.1- μm metamorphic high electron mobility transistors (MHEMTs). A modified resistive mixer with a RF amplifier was proposed in this work for low conversion loss and high LO-RF isolation. The MMIC mixer module was fabricated using a MMIC chip and CPW-waveguide transitions. The fabricated mixer chip and module showed a low conversion loss of 6.3 dB and 9.5 dB, and LO-RF isolations of 24.8 and 30.4 dB at 94 GHz, respectively. This results are superior to those of previously W-band (75-110 GHz) MMIC mixers.

Keywords : MMIC, Mixer module, MHEMT, Conversion loss, Isolation

I. 서 론

군사과학 기술의 혁신적 발전으로 21세기의 전쟁양

상은 이전에 보여주었던 물량위주의 대량 화력 집중의 전쟁양상과는 판이하게 다른 정밀 타격의 양상으로 진행될 것으로 예상된다. 따라서 기존의 일반포탄 대신 정밀 유도무기나 정밀 지능형 탄약으로 표적을 파괴하는 것이 시간을 절약하고 탄약 소모를 최소화하여 효율적이고 경제적인 전쟁 수행을 가능하게 한다고 할 수 있다.

이러한 측면에서 정밀 타격체계의 핵심적인 부분은 표적을 탐색/추적하는 센서이며, 센서의 종류에 따라 적외선/광학, 레이더 센서로 분류할 수 있다. 이중 레이더 센서의 경우 최근 밀리미터파 센서에 대한 연구가

* 정회원, 국방기술품질원 탑재장비전력팀 (Defense Agency for Technology and Quality)
** 평생회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (Millimeter-wave INnovation Technology research center, Dongguk University)
[©] Corresponding Author(E-mail: jkrhee@dongguk.edu)
접수일자: 2014년09월17일, 수정일자: 2015년01월08일
게재확정: 2015년01월28일

활발히 진행되고 있다.

밀리미터파 센서는 마이크로파에 비하여 탐지거리가 짧지만 우수한 분해능 특성을 갖고 있으며, 작은 안테나 사이즈로도 샤프한 빔을 형성시킬 수 있다. 또한 작은 크기로 제작이 가능하기 때문에 소형 유도폭탄의 종말단계 탐색기나 지능탄용 센서로도 적용되고 있다. 대표적인 적용 예로 헬파이어 대전차 유도탄 및 PAC-3 유도탄은 Ka-band 대역의 밀리미터파 탐색기를 적용하였으며, 독일의 Smart155 지능탄의 경우 94GHz 밀리미터파 센서를 장착하고 있다.

밀리미터파 탐색기는 주로 대기중의 흡수감쇄가 적은 35GHz나 94GHz의 주파수를 이용하고 있으며, 작은 크기에 장착되어야 하기 때문에 소형이면서도 우수한 성능과 높은 신뢰성을 가져야 한다. 따라서 밀리미터파 센서의 경우 부품의 소형화, 신뢰성, 저가격화의 장점이 있는 MMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit)로 개발하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 현재 국외에서도 일부 무기체계에만 적용되고 있는 W-band 대역의 밀리미터파 센서에 적용할 수 있는 W-band 믹서 모듈을 개발하였다. 믹서 회로는 새로운 구조를 적용하여 낮은 변환손실과 높은 격리도 특성을 얻을 수 있도록 설계하였으며, MMIC의 모듈화를 위해 도파관-CPW(coplanar waveguide) 변환기를 개발하였다. 최종적으로 제작된 MMIC를 도파관 모듈에 장착하여 W-band MMIC 믹서 모듈을 개발하였다.

II. Metamorphic HEMT의 특성

MMIC 믹서에 사용된 능동소자로 Metamorphic High Electron Mobility Transistor (MHEMT)를 설계 및 제작하였다. MHEMT의 경우 기존의 W-band 대역에서 우수한 성능을 나타내는 InP HEMT의 비해 상대적으로 가격이 저렴하며, 3인치 이상의 GaAs 기판에서 성장이 가능하면서도 InP HEMT와 대등한 성능을 갖는 결과들이 발표되고 있다^[1~2].

그림 1은 MBE(Molecular Beam Epitaxy)를 사용하여 GaAs 기판위에 성장된 에피층 구조를 나타낸 것으로 에피층과 GaAs 기판 사이의 매우 큰 격자 부정합을 완화시키기 위하여 InAlAs를 사용하여 In 몰분율이 0.01부터 0.5까지 변화하는 Inverse step graded

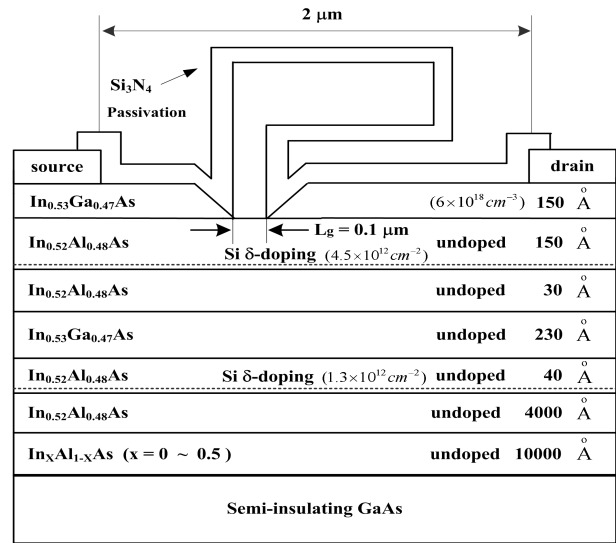


그림 1. Metamorphic HEMT의 에피 구조 단면도
Fig. 1. Epi-structure of Metamorphic HEMT.

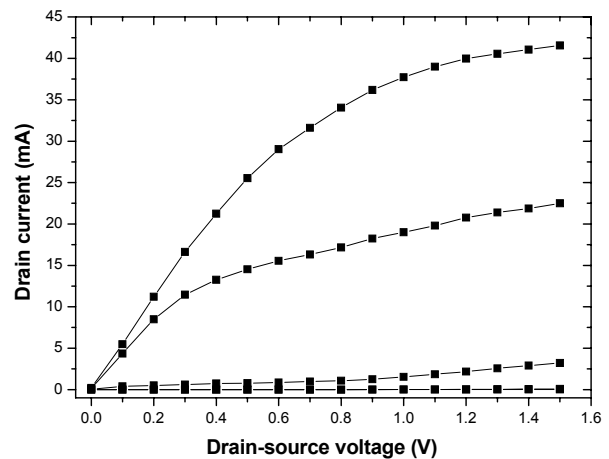


그림 2. Metamorphic HEMT의 DC 특성 측정결과
Fig. 2. Measured DC characteristics from metamorphic HEMT.

metamorphic 버퍼층을 적용하였다.

그림 1의 설계된 에피층을 이용하여 MHEMT를 제작하였으며, 제작된 MHEMT의 전압-전류 특성 측정 결과를 그림 2에 나타내었다. 단위 게이트 폭(unit gate width)이 $30\mu\text{m}$ 이고 게이트 핑거(gate finger) 수가 2개인 소자의 핀치 오프(pinch-off) 전압은 -1.0V , 드레인 전류밀도(Drain current density)는 692mA/mm 이며, 최대 전달컨덕턴스(transconductance)는 726mS/mm 를 얻었다.

MHEMT의 RF 특성은 Antitsu ME7808 VNA (Vector Network Analyzer)를 사용하여 $500\text{MHz} \sim$

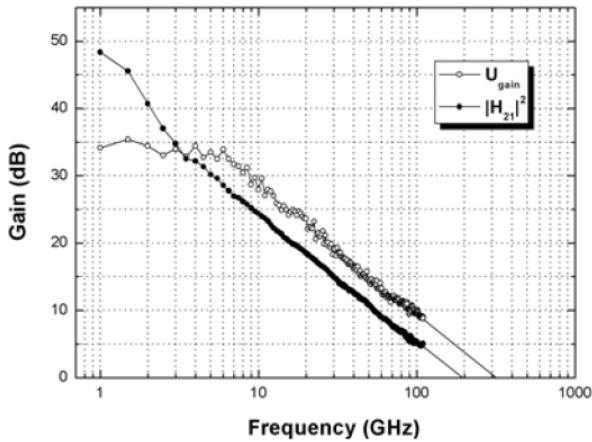


그림 3. Metamorphic HEMT의 RF 특성 측정결과
Fig. 3. The measured result of RF characteristics from metamorphic HEMT.

110GHz 주파수 영역에서 측정하였다. 측정결과, 전류이득 차단주파수(f_T)는 195GHz, 최대공진주파수(f_{max})는 305GHz를 얻었다. 그림 3에 제작된 MHEMT의 RF 특성을 나타내었다.

III. W-band 믹서 모듈의 설계 및 제작

본 논문에서는 기존에 Single-ended resistive 및 Single-balanced resistive 믹서의 문제점을 보완하고 성능을 개선하기 위해 새로운 회로를 제안하였다. 기존의 Single-ended 믹서의 경우 변환손실 특성은 양호하지만 낮은 LO-RF 격리도 특성을 갖고 있으며, Single-balanced 믹서는 커플러를 사용하여 높은 LO-RF 격리도 특성을 갖지만 커플러 삽입으로 인해 변환손실 특성이 저하된다.

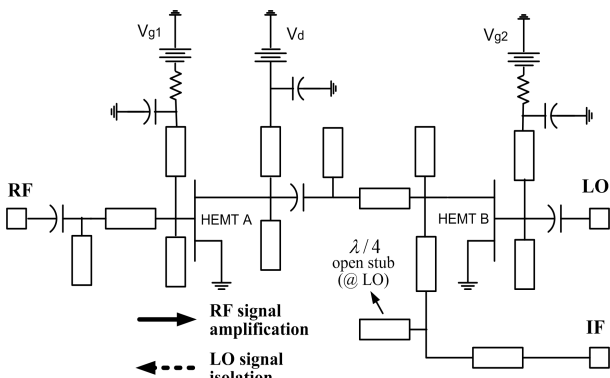
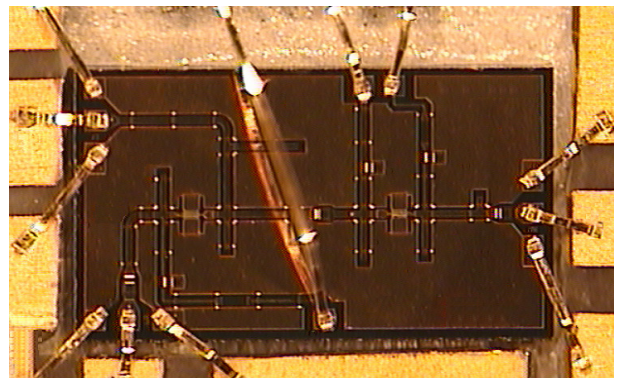


그림 4. W-band MMIC 믹서의 회로도
Fig. 4. The circuit diagram of the W-band MMIC Mixer.

그림 4는 본 논문에서 제안하는 믹서의 회로도를 나타낸 것으로 제안하는 회로 구조는 Single-ended resistive 믹서의 RF 포트에 MHEMT를 추가하는 구조이다. 추가된 MHEMT는 RF 신호를 증폭하여 변환손실 특성을 개선할 뿐만 아니라, MHEMT의 S_{12} 격리도 특성 때문에 LO-RF 격리도 특성도 개선시킬 수 있다. 제안된 회로는 구조가 간단하면서도 믹서의 성능을 개선시킬 수 있도록 설계하였다.

MMIC 믹서는 추출된 MHEMT 소자의 잡음 모델과 MIM(metal-insulator-metal) 캐패시터, Ti 박막 저항의 수동소자 및 CPW(coplanar waveguide) 라이브러리를 사용하여 설계하였다. CPW는 마이크로스트립에 비하여 후면공정이 필요 없는 장점이 있어 밀리미터파 대역에서 많이 응용되고 있으며, 다수의 회로들이 발표되고 있다^[3]. CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70



(a) 와이어 본딩된 MMIC 믹서 칩사진



(b) W-band MMIC 믹서 모듈

그림 5. W-band MMIC chip 및 믹서 모듈
Fig. 5. The photograph of the W-band MMIC Mixer chip and Module.

Ω의 특성임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위해 curve, tee, cross 라이드리리를 구축하였다. 설계된 전체 회로 패턴은 Momentum 시뮬레이션을 통하여 최적화를 수행하였다. W-band MMIC 믹서는 제작을 위해 CPW 전송선로와 Si3N4 유전체를 사용하는 MIM 캐패시터, Ti 박막저항, 에어브리지, 100nm MHEMT를 칩 내부에 일괄 공정으로 형성하였다^[4].

제작된 MMIC 믹서의 모듈화를 위해 antipodal finline 구조를 사용하여 CPW-도파관 변환기를 설계 및 제작 하였다. 제작된 CPW-도파관 변환기의 측정결과 S21이 94 GHz에서 1.1 dB의 삽입손실 특성을 나타내었으며 반사계수는 -23.9 dB의 양호한 결과를 얻었다. MMIC 믹서 모듈의 개발을 위해 PCB와 JIG를 설계 및 제작하였다. 설계 및 제작된 PCB와 JIG를 이용해 94 GHz MMIC 믹서 칩을 마운트하고 와이어 본딩을 수행하여 MMIC 믹서 모듈을 최종적으로 제작하였다. 그림 5에 모듈에 마운트 된 후 와이어 본딩된 MMIC 칩과 제작된 믹서 모듈의 사진을 나타내었으며, 믹서 모듈의 크기는 26.9 × 19.1 × 19.1(mm3)이다.

IV. W-band 믹서 모듈의 성능측정

제작된 W-band MMIC 믹서는 Cascade사의 on-wafer probing 시스템과 WR-10 밀리미터파 측정시스템을 사용하여 측정하였다.

제작된 MMIC 믹서의 측정결과 LO 입력이 14dBm

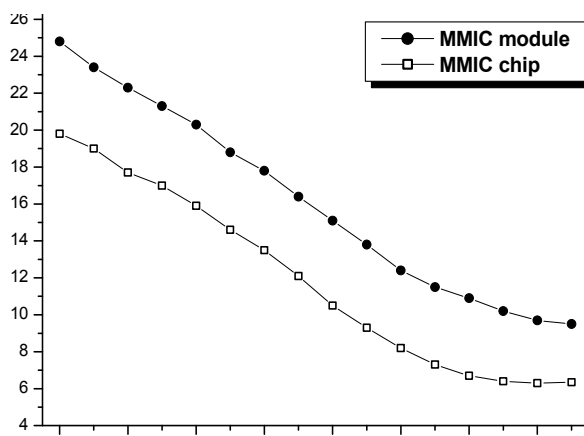


그림 6. LO 입력에 따른 변환손실 특성측정결과
Fig. 6. Conversion loss versus LO input power.

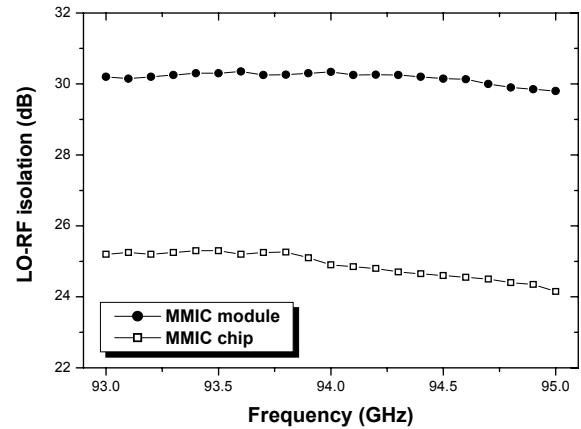


그림 7. 주파수에 따른 LO-RF 격리도 측정 결과
Fig. 7. LO-RF isolation versus frequency.

일 때, 94 GHz에서 변환손실 특성은 6.3 dB의 매우 우수한 특성을 나타내었으며, 믹서 모듈은 LO 입력이 15dBm 일 때, 94 GHz에서 9.5 dB의 낮은 변환손실 특성을 나타내었다. 그림 6에 LO 입력전력에 따른 변환손실 특성을 나타내었다.

MMIC 믹서 칩의 LO-RF 격리도 측정결과 93~95 GHz의 주파수 대역에서 24.1~25.3 dB 및 믹서 모듈은 29.8~30.4 dB 의 매우 높은 LO-RF 격리도의 측정 결과를 얻었다. 그림 7에 주파수에 따른 LO-RF 격리도 특성 측정 결과를 나타내었다.

MMIC 믹서의 측정결과 기존의 Single-ended resistive 방식의 믹서에 비하여 변환손실은 2~3 dB, LO-RF 격리도는 10~12 dB 향상된 결과를 얻었다.

본 논문에서 설계 및 제작된 W-band MMIC 믹서모듈은 기존의 발표된 W-band(75-110 GHz) MMIC 믹서와 비교하여 우수한 성능을 나타내었다[5-8]. 설계 및 제작된 믹서 모듈은 낮은 변환 손실과 우수한 LO-RF 격리도 특성을 나타내어 W-band 밀리미터파 센서 수신단에 적용가능할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 센서 응용을 위한 낮은 변환손실 및 높은 LO-RF 격리도 특성의 W-band MMIC 믹서 모듈을 설계 및 제작하였다. MMIC 믹서는 0.1 μm MHEMT를 이용하여 설계 및 제작되었다. MMIC 믹서는 낮은 변환손실과 높은 LO-RF 격리도 특성을 얻기 위해 RF 입력단에 MHEMT를 추가하여 설계하였다.

제작된 MMIC 칩을 모듈화 하기 위해 CPW-도파관 변환기를 설계 및 제작하였으며, 최종적으로 MMIC 모듈을 개발하였다. 94 GHz MMIC 믹서 모듈의 측정결과 변환손실 특성은 94 GHz에서 MMIC 칩은 6.3 dB, MMIC 모듈은 9.5 dB의 양호한 특성을 나타내었다. MMIC 믹서 모듈의 LO-RF 격리도는 94 GHz에서 30.4 dB의 우수한 측정 결과를 얻었다. 본 논문에서 개발된 W-band MMIC 믹서모듈은 기존의 발표된 W-band(75-110 GHz) MMIC 믹서와 비교하여 우수한 성능을 나타내었다.

REFERENCE

- [1] Dan An, Sung-Chan Kim, Jung-Dong Park, Mun-Kyo Lee, Hyun-Chang Park, Sam Dong Kim, Wan-Joo Kim, and Jin Koo Rhee, "A Novel 94-GHz MHEMT Resistive Mixer Using a Micromachined Ring," IEEE Microwave and Wireless Components Lett., vol. 16, no. 8, pp. 467-469, Aug. 2006.
- [2] Sung Chan Kim, Dan An, Byeong Ok Lim, Tae Jong Baek, Dong Hoon Shin, and Jin Koo Rhee, "High-Performance 94-GHz Single Balanced Mixer Using 70-nm MHEMTs and Surface Micromachined Technology," IEEE Elec. Device Lett., vol. 27, no. 1, pp. 28-30, Jan. 2006.
- [3] 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- μ m Metamorphic HEMT for Low Conversion Loss 94-GHz Resistive," IEEE Elec. Device Lett., vol. 26, no. 10, pp. 707-709, Jan. 2006.
- [4] Bok-Hyung Lee, Sam-Dong Kim, and Jin-Koo Rhee, "Small-Signal Analysis of High Maximum Frequency of Oscillation 0.1- μ m Off-Set Γ -Shaped Gate InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic High Electron Mobility Transistors," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 43, pp.1914-1918, 2004.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] Eric W. Lin, and Walter H. Ku, "Device Considerations and Modeling for the Design of an InP-Based MODFET Millimeter-Wave Resistive Mixer with Superior Conversion Efficiency," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, no. 8, pp. 1951-1959, Aug. 1995.
- [8] 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.

저 자 소 개



안 단(정회원)

1998년 동국대학교 전자공학과
공학사
2000년 동국대학교 전자공학과
공학석사
2006년 동국대학교 전자공학과
공학박사

2006년~2007년 동국대학교 연구교수

2007년~현재 국방기술품질원 선임연구원

<주관심분야: 밀리미터파 탐색기, 적외선 탐색기>



이 진 구(평생회원)

1969년 국립항공대학교
전자공학과 공학사
1975년 서울대학교 전자공학과
공학석사

1982년 Oregon State University
전기공학과 공학박사

1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수

1999년~현재 동국대학교 밀리미터파신기술
연구센터 소장

2004년 대한전자공학회 수석부회장

2005년 대한전자공학회 회장

<주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로설계>