

Ka 대역 위성통신 및 BWLL 시스템용 3단 MMIC 저잡음 증폭기 설계 및 제작

A 3 Stage MMIC Low Noise Amplifier for the Ka Band Satellite Communications and BWLL System

염인복 · 정진철 · 이성팔

In-Bok Yom · Jin-Cheol Cheong · Seong-Pal Lee

요 약

Ka 대역 위성통신 및 BWLL 시스템용 3단 저잡음증폭기가 MMIC 기술로 설계 및 제작되었다. MMIC 저잡음증폭기는 잡음지수와 높은 이득 그리고 진폭 선형성을 만족하기 위하여 2단의 single-ended 형태의 증폭단과 1단의 balanced 형태의 증폭단으로 구성되었다. 낮은 잡음지수와 높은 이득을 얻기 위하여 0.15 μm pHEMT 소자가 사용되었다. DC에서 80 GHz 대역까지의 안정도 확보를 위하여 직렬 및 병렬 레환 회로와 $\lambda/4$ short 라인이 삽입되었다. 설계된 MMIC 저잡음증폭기의 크기는 3.1 mm \times 2.4 mm(7.44 mm²)이다. 제작된 MMIC 저잡음증폭기의 wafer상에서의 측정 결과, 22~30 GHz의 주파수 대역에서 잡음지수는 2.0 dB 이하이고 이득은 26 dB 이상으로 설계 결과와 일치하였다.

Abstract

A Ka Band 3-stage MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits) LNA(Low Noise Amplifiers) has been designed and fabricated for the Ka band satellite communications and BWLL(Broad Band Wireless Local Loop) system. The MMIC LNA consists of two single-ended type amplification stages and one balanced type amplification stage to satisfy noise figure, high gain and amplitude linearity. The 0.15 μm pHEMT has been used to provide a ultra low noise figure and high gain amplification. Series and Shunt feedback circuits and $\lambda/4$ short lines were inserted to ensure high stability over the frequency range form DC to 80 GHz. The size of the MMIC LNA is 3.1 mm \times 2.4 mm(7.44 mm²). The on wafer measured performance of the MMIC LNA, which agreed with the designed performance, showed the noise figure of less than 2.0 dB, and the gain of more than 26 dB, over frequency ranges from 22 GHz to 30 GHz.

I. 서 론

주파수 자원의 고갈과 광대역 멀티미디어 서비스 수요의 증가로 인해 위성통신 및 BWLL 시스템과 같은 지상무선통신 시스템에서 Ka 대역과 같은 높은 주파수 사용이 점차로 증가하고 있으며, 이에 따

라 RF증폭 모듈도 기존의 MIC형태에서 MMIC 형태로 전환되고 있는 추세이다^{[1],[2]}. 특히 Ka 대역과 같이 높은 주파수 응용에서는 MMIC에 대한 초기 투자가 이루어질 경우, RF모듈 구현의 용이, 제작된 RF모듈의 안정된 성능 확보, 대량생산 및 제품 단가 측면에서 기존의 MIC 형태의 RF모듈보다 유리

한국전자통신연구원 무선방송기술연구소(Radio & Broadcasting Technology Laboratory, ETRI)

· 논 문 번 호 : 20001104-10S

· 수정완료일자 : 2000년 12월 20일

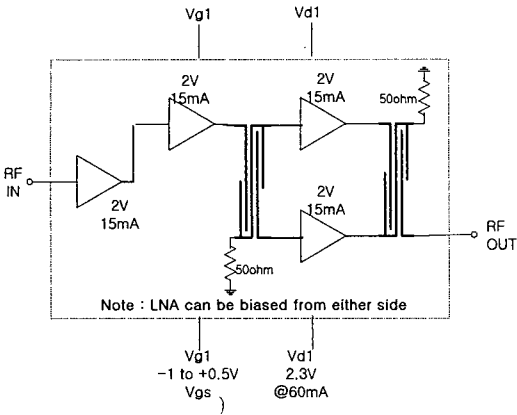


그림 1. Ka 대역 3단 MMIC 저잡음증폭기의 구성도
Fig. 1. Diagram of the Ka band 3 stage MMIC LNA.

하므로 국내 및 여러 선진국에서 개발 중인 Ka 대역 RF모듈은 대부분 MMIC를 사용하고 있다.

본 논문에서는 위성통신 및 BWLL 시스템용으로 설계 및 제작한 Ka 대역 3단 MMIC 저잡음증폭기에 대해 다루었다. MMIC 저잡음증폭기의 설계 규격은 22~30 GHz의 주파수 대역에서, 이득 26 dB 이상, 잡음지수 2.0 dB 이하이며, 이러한 규격을 만족하기 위하여 gate 길이가 0.15 μm 이고 gate폭이 120 μm 인 pHEMT를 이용하여 3단 증폭구조로 설계하였다. 설계한 저잡음증폭기는 그림 1에 나타난 바와 같이 3단으로 구성되며, 초단과 둘째단은 single ended 형태이며, 증폭기의 선형성 확보 및 출력 반사 손실 개선을 위해 마지막 단은 Lange 결합기를 사용하여 balanced 형태로 구현되었다. 설계는 Libra를 사용하였으며, 단순 직선 라인이 아닌 모든 구성회로에 대해 EM 시뮬레이션 결과를 적용하였다.

II. MMIC 저잡음증폭기 회로 설계

2-1 소자 선택

MMIC 저잡음증폭기 회로에 사용한 소자는 높은 주파수 대역에서도 낮은 잡음 지수 구현이 가능한 gate 길이가 0.15 μm 이고 gate폭이 120 μm 인 pHEMT이다. Gate 폭이 80 μm 인 소자를 사용할 경우 gate 폭이 120 μm 인 소자를 사용할 때보다 잡음지

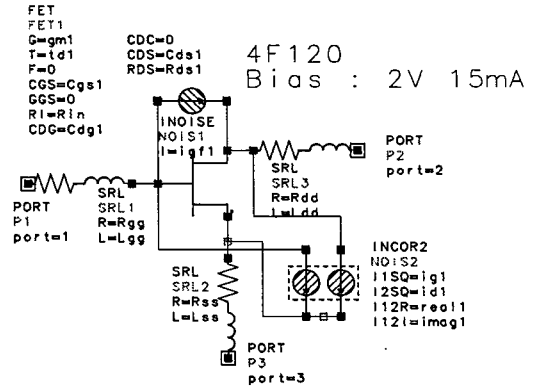


그림 2. Gate 폭이 120 μm 인 사용된 저잡음 pHEMT의 등가 회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the low noise pHEMT with 120 μm of gate width.

수 simulation 결과는 우수하나 제작한 후의 결과는 거의 유사하므로 출력 특성이 우수한 120 μm pHEMT를 사용하였다^{[3]~[5]}. 그림 2에 사용된 소자의 등가회로를 나타내었다. 등가회로의 파라미터는 최소의 잡음지수 값을 갖는 바이어스 조건에 대해 시험을 통하여 추출한 것으로써, 최소의 잡음지수 특성을 보이는 바이어스 조건은 drain 전압이 2 V, drain 전류가 15 mA일 때이며, 이 때의 잡음지수, 안정도 및 이득 특성을 그림 3에 나타내었다. 소자의 등가회로 파라미터 값들 중 컨덕턴스(gm1), 인덕턴

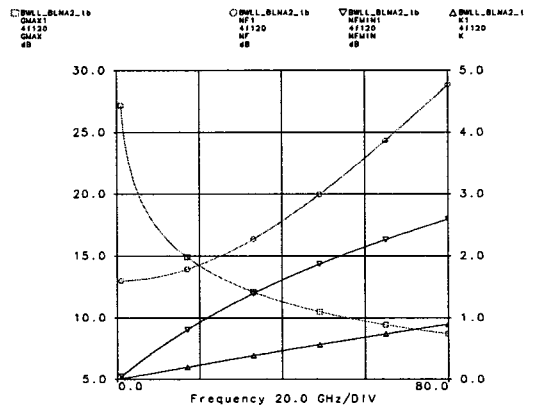


그림 3. pHEMT의 잡음, 안정도 및 이득 특성
Fig. 3. Noise, stability and gain characteristics of the pHEMT.

스(Lgg, Ldd), 캐패시턴스(Cgs1, Cdg1) 등은 공정에 따라 변할 수 있으므로 설계시 이들 값이 어느 정도 ($\pm 15\%$) 변하더라도 성능 변화가 크지 않도록 반영하였다.

2-2 첫번째 및 두번째 증폭단

첫번째 증폭단의 잡음지수는 전체 시스템의 잡음지수를 좌우하므로 최소의 잡음지수를 얻을 수 있도록 설계하여야 한다. 그러나 입력반사손실(S_{11})이 나쁠 경우 MMIC 저잡음증폭기 자체의 잡음지수 특성이 우수하더라도 RF 모듈레벨 조립시 반사손실에 의한 손실증가로 RF 모듈의 잡음지수가 나빠지므로, MMIC 저잡음증폭기 설계시 RF 모듈레벨의 조립까지 고려하여 입력반사손실과 잡음지수 간의 trade-off를 수행하여야 한다. 본 설계에서는 반사손실을 10 dB 이하로 유지하면서도 최소의 잡음지수 특성을 얻기 위하여 source단에 inductor를 연결하는 직렬궤환방식을 채택하였다.

선택된 소자는 높은 이득을 제공할 수 있으나 조건부 안정하다. 직렬궤환회로만 연결한 소자의 안정도 특성은 그림 4에 나타난 바와 같이 설계주파수 대역에서는 안정하나, 낮은 주파수 영역과 높은 주파수 영역에서 불안정하다.

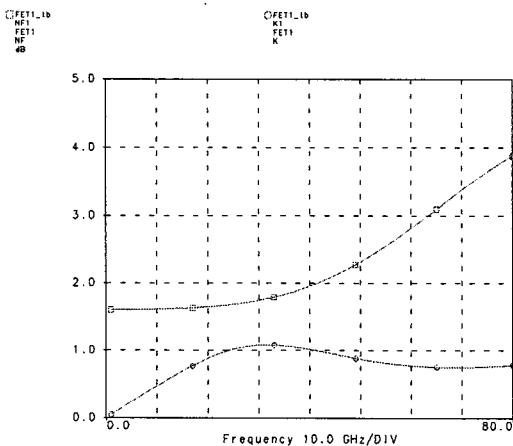


그림 4. 직렬궤환회로를 연결하였을 때의 소자의 안정도 및 잡음지수 특성

Fig. 4. Stability and noise figure Characteristics of the device with series feedback circuit.

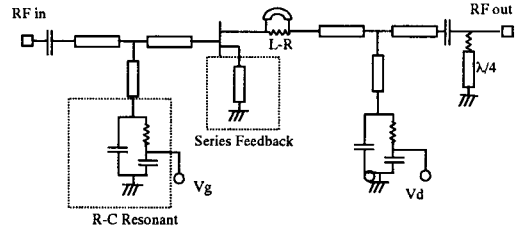


그림 5. 첫번째 증폭단 회로도

Fig. 5. Schematic of the first amplification stage.

RF라인상의 정합회로만으로는 최적의 잡음지수 및 반사손실 특성을 유지하면서 전 주파수 대역에서 무조건 안정하게 하기가 곤란하므로, 본 설계에서는 그림 5에 보인 같은 $\lambda/4$ short 라인과 바리어스 라인 상의 RC 공진회로를 이용하여 낮은 주파수 영역의 안정도를 개선하였으며, RF 출력상에 라인과 저항을 병렬로 연결(L-R 병렬회로)하여 높은 주파수 영역의 안정도를 개선하였다. L-R 병렬 회로는 설계 주파수 대역에서는 라인으로만 보이며, 높은 주파수 대역에서는 저항이 작용하여 신호를 감쇠시키므로써 높은 주파수 대역에서의 안정도가 개선되게 한다.

두번째 증폭단은 잡음지수보다는 광대역 주파수 특성 확보를 위하여 직렬궤환회로 이외에 병렬궤환회로를 추가하였다. 병렬궤환회로를 추가할 경우 안정도도 증가하므로^[6], 바이어스 라인상의 R-C 공진회로만으로도 증폭기가 전 주파 대역에서 무조건 안정하게 되므로 별도의 안정화 회로를 사용하지 않았다.

2-3 세번째 증폭단

저잡음증폭기 설계의 경우 직렬궤환을 사용하면 최소의 잡음지수 특성을 유지하면서 입력 반사손실 특성을 개선할 수 있지만, 설계 주파수 대역이 넓은 경우 출력 반사 손실특성 개선이 용이하지 않다. 출력 반사손실이 좋지 않을 경우 RF 모듈 구현시 반사손실로 인해 평탄한 주파수/이득 특성이 나빠진다. 본 설계에서는 이러한 문제점도 해결하고 출력 특성도 개선하기 위하여 세번째 증폭단은 Lange 결합기를 이용한 balanced 구조로 설계하였다. Lange 결합기는 광대역 특성이 우수하나 높은 주파수 응

용일 경우 인접 선폭간의 간격이 좁아 반드시 EM 시뮬레이션 결과와 제작 공정 데이터를 활용하여야 한다^[5].

III. MMIC 저잡음증폭기 설계 결과

본 저잡음증폭기 설계는 낮은 잡음지수, 고 이득, 및 광대역의 주파수 응답 특성을 만족하는 한편 chip의 크기를 줄이기 위하여 첫째단과 둘째단은 single ended 형태로 구성하였으며, 세번째단은 balanced 형태로 구현하였다. MMIC 저잡음증폭기의 경우 외부에서 튜닝이 거의 불가능하므로 전 주파수 대역(dc-80 GHz)에서 무조건 안정하도록 설계하여야 한다. 따라서, 증폭기 전체의 안정도가 1보다 크도록 하는 것은 물론이고, 각 증폭단마다 안정도가 1보다 크게 하는 한편, dc 바이어스 라인을 입출력으로 한 안정도 검사를 수행하여 응용시 외부 바이어스 인가에 의한 발진 가능성도 배제하였다. 그림 6에 설계한 3단 MMIC 저잡음증폭기의 이득/주파수 특성을 나타내었으며, 그림 7에 잡음지수 및 안정도 특성을 나타내었다. 설계된 MMIC 저잡음증폭기의 이득은 설계 주파수 대역인 22~30 GHz에서 26 dB 이상이고, 입력반사손실은 7 dB 이하, 출력반사손실은 15 dB 이하이다. 잡음지수는 2.0 dB 이하이다.

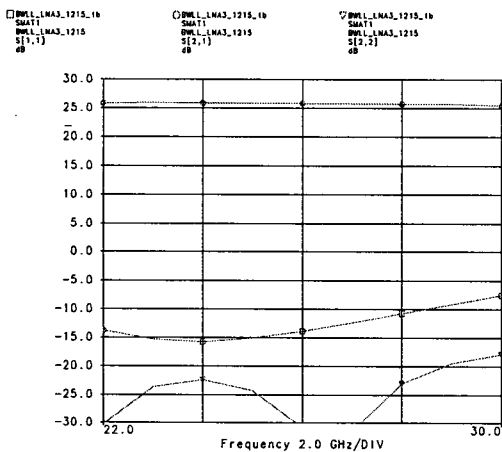


그림 6. 설계한 MMIC 저잡음증폭기의 이득/주파수 특성
Fig. 6. Simulated gain/frequency response of the MMIC LNA.

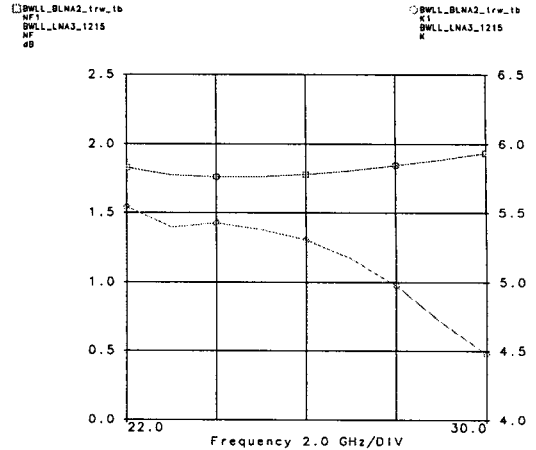


그림 7. 설계한 MMIC 저잡음증폭기의 잡음지수 및 안정도
Fig. 7. Simulated noise figure and stability of MMIC LNA.

IV. MMIC 저잡음증폭기 측정 결과

설계한 MMIC 저잡음증폭기는 TRW의 공정을 이용하여 제작되었으며, 크기는 그림 8에 나타난 바와 같이 $3.1 \times 2.4 \text{ mm}^2$ 이다. 제작한 MMIC 저잡음증폭기에 대한 on-wafer 시험이 수행되었으며, 그림 9와 그림 10에 on-wafer상에서 측정된 잡음지수와 이득/주파수 특성을 나타내었다. 측정 결과, 잡음지

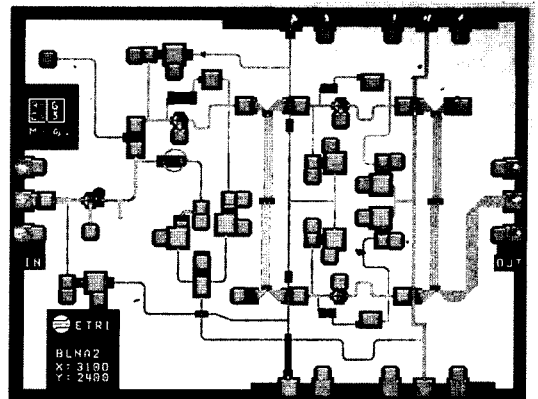


그림 8. Ka-Band 3단 MMIC LNA의 배치도(Chip size = $3.1 \times 2.4 \text{ mm}^2$)
Fig. 8. The layout of the Ka-Band 3-Stage MMIC LNA (Chip size = $3.1 \times 2.4 \text{ mm}^2$)

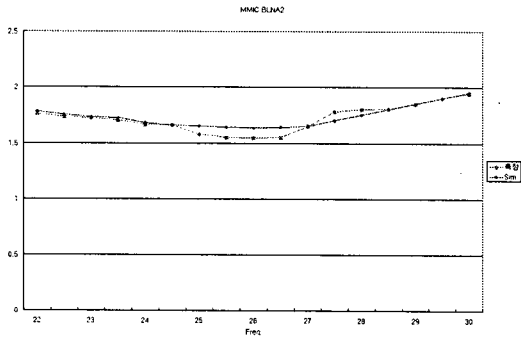


그림 9. On-wafer상에서 측정된 3단 MMIC 저잡음 증폭기의 잡음지수
 Fig. 9. Noise Figure of the 3 stage MMIC LNA measured on wafer.

120 μm 인 pHEMT를 사용하여 설계 및 제작한 Ka 대역 3단 증폭기에 대해 다루었다. 설계한 MMIC 저잡음증폭기는 잡음지수, 이득, 반사 손실, 진폭 선형성 및 크기 등의 성능 조건을 동시에 만족하기 위하여 앞의 두 증폭단은 single ended 형태이고, 마지막 증폭단은 balanced 형태인 3단 증폭 구조로 구성되었으며, 두께(t)가 100 μm 이고, 유전율(ϵ_r)이 12.9인 기판을 사용하여 제작되었다. 제작된 MMIC 저잡음증폭기의 on-wafer 측정 결과 22~30 GHz의 주파수 대역에서 잡음지수는 2.0 dB 이하, 이득은 26 dB 이상으로 설계값과 잘 일치하였다. 설계한 MMIC 저잡음증폭기는 Ka 대역 위성통신 및 BWLL 시스템용 RF모듈 구성에 활용될 수 있다.

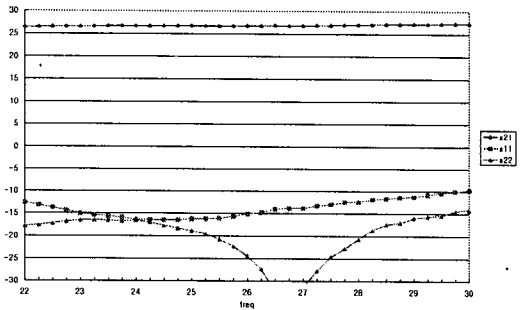


그림 10. On-wafer상에서 측정된 3단 MMIC 저잡음증폭기의 주파수/이득 특성
 Fig. 10. Gain/frequency response of the 3 stage MMIC LNA measured on wafer.

수와 이득/주파수 특성들이 설계 주파수 대역에서 설계 특성과 거의 동일한 한 특성을 보임을 확인할 수 있었다. 22~30 GHz의 주파수 대역에서 잡음지수는 2.0 dB 이하, 이득은 26 dB 이상, 입력반사손실은 10 dB 이하 그리고 출력반사손실은 15 dB 이하로 모두 설계 규격을 만족하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 gate 길이가 0.15 μm 이고 gate폭이

참 고 문 헌

- [1] Haruhiko Kato, et al., "A 30GHz MMIC Receiver for Satellite Transponders," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-38, no. 7, pp. 896-903, July, 1990.
- [2] Loral Qualcomm Satellite Service, Description of Globalstar System, June, 1994.
- [3] 임종식, 염인복 외, "위성통신용 30 GHz대 MMIC 저잡음증폭기의 설계 및 제작", 대한전자공학회 논문지, vol. 36-D, no. 9, pp.13-20, 1999년 9월.
- [4] 유영근, 임종식 외, "위성통신용 Ka-대역 MMIC 광대역 저잡음증폭기 개발", 1998년 한국통신학회 하계종합 학술대회, vol. 17, no. 2, pp. 731-734.
- [5] 염인복, 임종식 외, "위성 지구국용 20 GHz대 MMIC 저잡음증폭기 설계," 1998년도 대한전자공학회 추계종합학술 대회 논문집, pp.379-382.
- [6] E.Ulrich, "Negative Feedback to Slash Wide-band VSWR", *Microwaves*, vol. 17, Oct., 1978, pp 66-70.

염인복



1990년: 한양대학교 전자공학과(공학사)
1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 위성 RF부품연구팀장 선임연구원
1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여(영국 Matra

Marconi 사)
[주 관심분야] 위성통신중계기, MMIC 회로, 필터설계

정진철



1995년: 영남대학교 전자공학과(공학사)
1997년: 광주과학기술원 정보통신공학과(공학석사)
1999년~현재: 한국전자통신연구원 연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로의 MIC, MMIC개발, 초고주파 부품 개발

이성팔

1978년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1980년~현재: 한국전자통신연구원, 위성통신시스템연구부 책임연구원
1986년: Polytechnic Institute of New York 전기전자공학과 (공학박사)