

Ka-대역 위성중계기용 저잡음 증폭기 모듈 개발

○ 유영근*, 염인복**, 임종식**, 엄만석**, 강 성준**

* 현대전자(주) 위성사업단
 ** 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 위성통신시스템연구부

LNA Module Development for the Ka-Band Satellite Transponder

○ Young-Kun Yoo*, In-Bok Yom**, Jong-Sik Lim**, Man-Seok Uhm** and Sung-Choon Kang**

* Satellite Business Division, Hyundai Electronics Industries Inc.
 ** Satellite Communications System Dept., ETRI-Radio & Broadcasting Research Lab.

Abstract

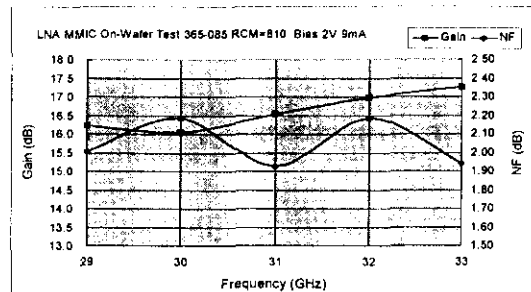
A LNA(Low Noise Amplifier) module for the Ka-band satellite transponder has been developed, which is composed of developed two MMIC chips and 50Ω line. This LNA exhibited noise figure less than 3.12dB, linear gain higher than 32dB from 30.085GHz to 30.885GHz frequency range. Temperature test from 20° to 60 °C of the LNA Module showed very small noise figure and linear gain variation of 0.2dB and 0.4dB.

MMIC chip 등과 함께 1000개 두께의 3인치 GaAs wafer로 제작되었다. 제작된 chip은 동작 주파수 29~32GHz에서 잡음지수 2.2dB 이하, 선형이득 16dB 이상, 입력 반사손실 -15 dB 이하와 출력 반사손실 -10dB 이하의 성능을 갖고 있다. 바이어스 조건은 2V, 18mA이다[3]. 그림1에 wafer 상에서 DC probe를 이용하여 측정된 잡음지수와 선형이득을 나타내었다. 제작된 Chip의 크기는 그림2의 사진에 나와 있듯이 3000×1300μm²이다.

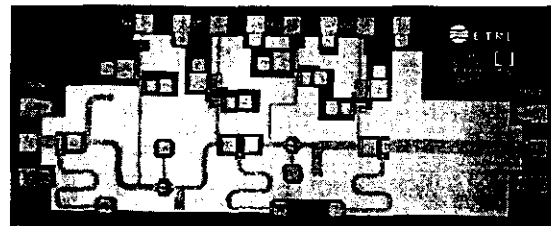
머리말

위성중계기의 첫 단에 위치하는 저잡음 증폭기는 위성중계기의 전체 G/T(양호도)를 결정해 준다. 저잡음 증폭기는 안테나로부터 수신된 미약한 신호를 증폭하여 복조 가능한 S/N비(신호 대 잡음지수)를 보장하기 위해, 잡음이 매우 낮고 이득이 높은 증폭소자로 설계하여야 한다. K-대역 이하의 저잡음 증폭기에는 GaAs FET가 많이 이용되어 왔고, 대부분 하이브리드 MIC 형태로 제작되었다. 그러나 Ka-대역 이상의 주파수에서는 GaAs FET 보다 잡음과 이득 특성이 우수한 HEMT(High Electron Mobility Transistor)가 많이 사용되며, 본딩이나 soldering에 의한 특성의 저하를 피하고 동작의 신뢰도를 확보하기 위해, MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 형태로 제작하여 사용한다[1][2].

본 논문에서는 p-HEMT(Pseudomorphic HEMT) 소자를 사용하여 개발한, 동작주파수 29~32GHz의 저잡음 증폭기 MMIC chip과 동작주파수 25~35GHz인 광대역 저잡음 증폭기 MMIC chip의 on-wafer 측정 결과와, 이 두 chip들을 사용하여 개발한, 설계주파수 30.085~30.885GHz의 Ka-대역 저잡음 증폭기 모듈의 설계 및 제작 방법에 대해 다루었다. 특히, 제작과 측정 방법에 대한 경험들을 얻기 위해 본딩 방법과 재료들을 다르게 하여 제작한 후, 측정 결과들을 비교하였고, thermal chamber를 이용, 20°C~60°C 범위의 온도 변화에 대해서도 성능 변화를 측정하였다.



<그림 1> 저잡음 증폭기 MMIC Chip의 On-wafer test 결과



<그림 2> 제작된 저잡음 증폭기 MMIC Chip의 사진 (size = 3000×1300μm²)

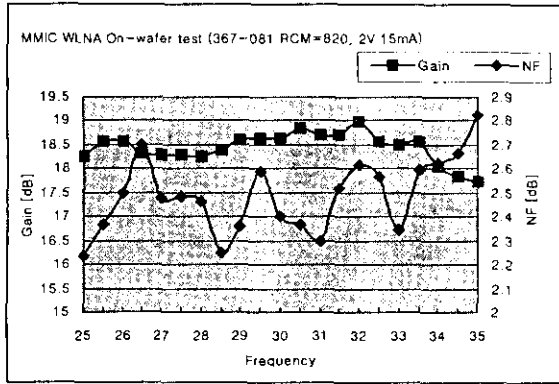
광대역 저잡음 증폭기 MMIC chip

광대역 저잡음 증폭기 MMIC chip은 25~35GHz의 주파수대에서 선형이득 16dB, 잡음지수 2.5dB, 입출력 반사손실 -20dB를 목표로 Lange 결합기를 사용하여 2단 평형구조로 설계하였다[4]. 제작 후 wafer 상에서 DC probe를 이용하여

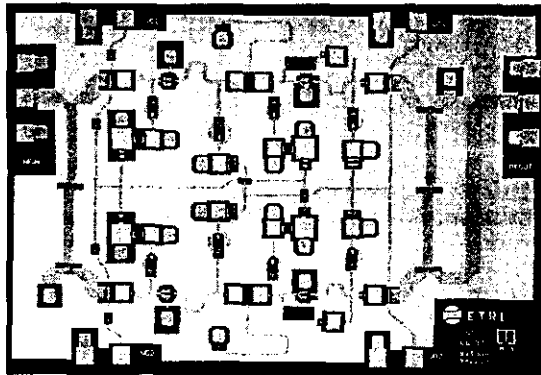
저잡음 증폭기 MMIC chip

저잡음 증폭기 MMIC Chip은 p-HEMT 소자를 이용하여 single ended 구조로 설계 되었으며, 광대역 저잡음 증폭기

성능을 측정한 결과 잡음지수와 선형이득 및 입출력 반사 손실이 설계치 보다 증가하여 최대 잡음지수 2.8dB, 최소 선형이득 17.5dB, 최소 입출력 반사손실 -15dB로 측정되었다. 그림3에 chip의 바이어스 조건인 2V, 60mA에서 측정된 잡음지수와 선형이득을 나타내었다. 제작된 chip의 크기는 3000×2200μm²이며, 그림4에 chip의 사진을 나타내었다.



<그림 3> 광대역 저잡음 증폭기 MMIC Chip의 On-wafer test 결과



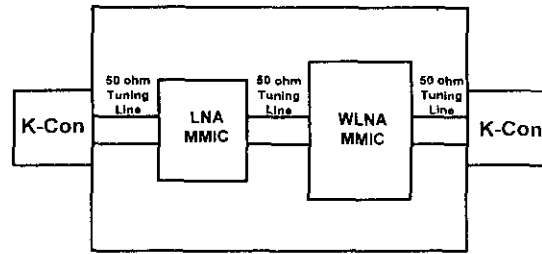
<그림 4> 제작된 광대역 저잡음 증폭기 MMIC Chip의 사진(size = 3000×2200μm²)

저잡음 증폭기 모듈 설계 및 제작

모듈의 RF부는 그림5와 같이 입출력 K-커넥터, 3개의 MIC 기판, 그리고 제작된 저잡음 증폭기 MMIC chip과 광대역 저잡음 증폭기 MMIC chip으로 구성되어 있다. MIC 기판은 ε_r=9.8인 10MIL alumina를 이용 50Ω 선로로 제작되었다. 설계 주파수는 Ka-대역 무궁화3호 위성중계기의 상향 링크 주파수인 30.085~30.885GHz 이며, 잡음지수 3.2dB, 선형이득 30dB, 입출력 반사손실 -15dB를 목표로 설계되었다.

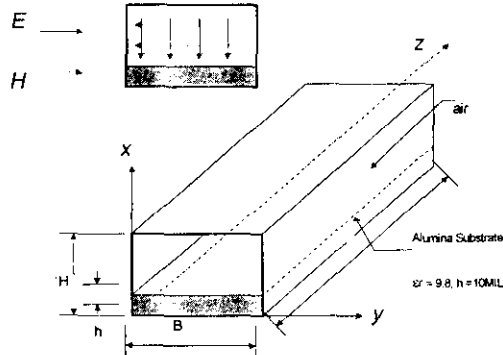
모듈의 RF부에서 MMIC chip과 MIC 기판으로 구성된 RF Path는 벽을 세워 외부와 격리되게 해야 하는데, 이것은 사용주파수 이하의 잡음과 spurious 성분들을 차단하기 위함이다. 이로 인해, 기구물은 내부에 유전체가 채워진 도파관 공진기 형태와 비슷한 구조를 갖게 된다. 내부에 스트립 회로가 놓여진 도파관 공진기에는 정재파가 발생하고, 이 때문에 차단 주파수 이상에서 스트립 회로와 수직 방향

으로 LSM (Longitudinal Section Magnetic) 모드가 발생한다 [5][6].



<그림 5> 저잡음 증폭기 모듈의 RF부 구성도

기본적인 마이크로스트립 모드와 결합한 LSM 모드는 신호의 전송을 왜곡하여 공진이나 성능의 저하를 가져오므로, 기구물을 설계할 때 원하는 주파수 대역에서 마이크로스트립 도체상에 LSM 모드가 존재하지 않게 하여야 한다.



<그림 6> 기구물의 LSM 모드

LSM 모드의 차단주파수와 공진주파수를 해석하기 위한 구조를 그림6에 나타내었다. LSM 모드의 차단주파수는 식 (1)과 (2)로 부터 구하며,

$$f_{z,LSM11} = \sqrt{1 - \frac{h}{H} \times \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right)} \times f_{z,JE10} \quad (1)$$

$$f_{z,JE10} = \frac{c_0 \times \sqrt{\left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{B}\right)^2}}{2\pi} \quad (2)$$

여기서, c₀ = 3×10¹¹ [mm/s]; 빛의 속도

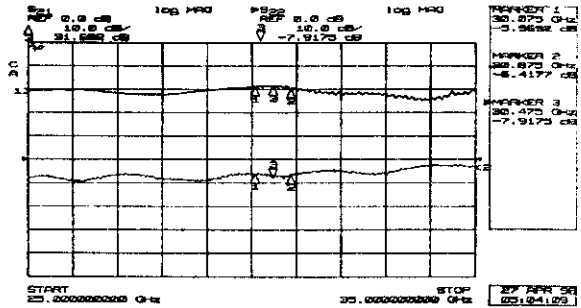
공진주파수는 식 (3)으로 부터 구한다.

$$f_{R,LSM11q} = \sqrt{1 - \frac{h}{H} \times \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \times \left\{1 + \left(\frac{L \times m}{B \times q}\right)^2\right\}} \times f_{z,JEq0} \quad (3)$$

LSM 모드에 의한 신호의 왜곡을 방지하기 위해서는 차단주파수를 사용주파수 대역 이상으로 높여 주어야 한다. 이런 이유로 RF부에서 MIC 기판이 놓여지는 부분의 벽면은 좁게 설계한다. 그러나 기구물과 MIC 기판과의 간격이 너무 좁을 경우, 스트립 선로의 특성 임피던스가 영향을 받게 되므로, 벽면의 간격이 스트립 선로 폭의 약 9배 이상은 되게 해야 한다[5].

모듈의 RF부는 별도의 캐리어를 사용하지 않고, 기구물 바닥에 개별 소자를 직접 부착하는 형태로 제작하였다. 입출력 K-커넥터와 MIC 기판은 10 MIL Gold 리본을 사용 S자 형태로 연결하여 손실이 최소가 되도록 하였고, MIC 기판과 MMIC Chip들 간의 연결이 성능에 어떠한 영향을 미치는가를 확인하기 위해 1MIL Gold 와이어와 3MIL Gold 리본을 각각 사용하여, 두 모듈을 제작하였다.

모듈의 DC부는 벽을 세워 RF부와 간섭이 발생하지 않도록 하였다. Feed through를 통해 HEMT 소자에 인가되는 바이어스에는 순수한 DC 성분 이외에 다수의 고조파 성분들이 포함되어 있기 때문에 커패시터를 병렬로 연결하여 고조파 성분들을 bypass시켜 주었다.

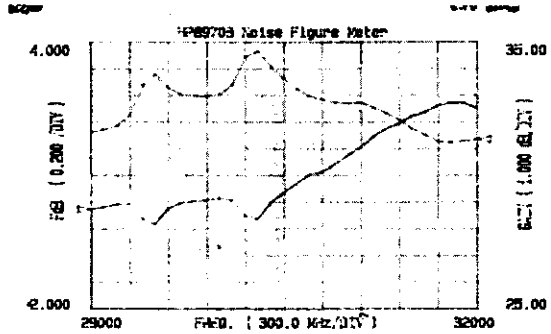


<그림 9> 1MIL gold 와이어로 연결하였을 때 측정된 선형이득과 출력 반사손실

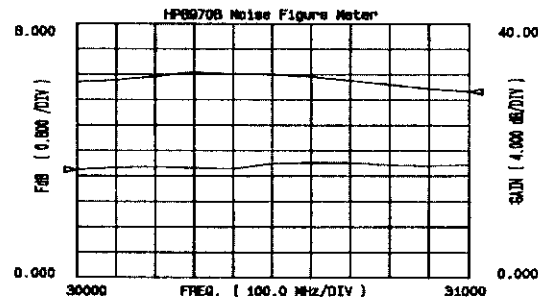
저잡음 증폭기 모듈 시험 결과

MMIC chip을 이용한 30GHz 이상의 저잡음 증폭기 모듈 제작은 아직까지 국내에서 보고된 바가 없기 때문에, 제작 방법과 측정방법에 대한 경험을 얻기 위하여, 다양한 방법을 통하여 측정하였다. K-커넥터와 MIC 기판과의 연결을 도전성 에폭시와 10MIL gold 리본을 교대로 연결하여 성능을 측정하여 보았고, 또 10MIL gold 리본의 연결 방법을 wrap around 방식과 S자 방식을 사용하였을 때의 성능을 비교 측정하여 보았다. 본 논문에서는 MIC 기판과 MMIC chip을 1MIL gold 와이어와 3MIL gold 리본으로 연결했을 때의 성능 변화만을 비교하여 나타내었다. MMIC chip에는 RF 입력력과 DC 입력을 위해 각각 4MIL 크기의 정방형 패드가 만들어져 있다.

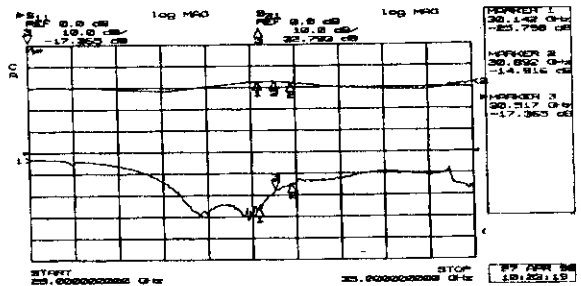
측정장비로는, 산란행렬 측정에는 HP8510C Vector Network Analyzer를, 잡음지수 측정에는HP8970B Noise Figure Meter를 사용하였다.



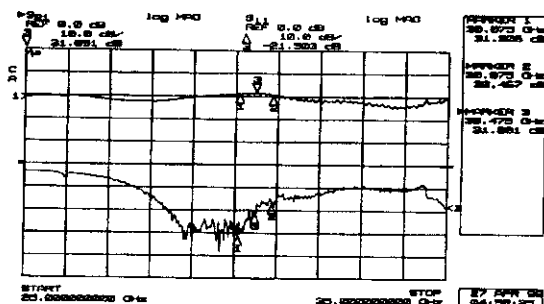
<그림 10> 3MIL gold 리본으로 연결하였을 때 측정된 선형이득과 잡음지수



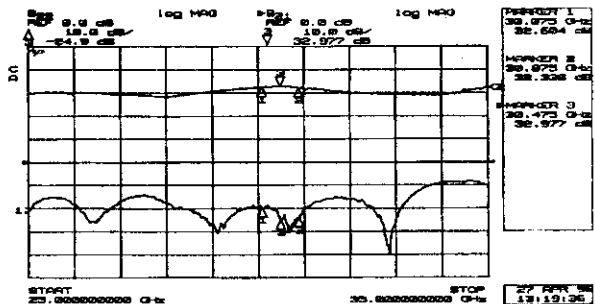
<그림 7> 1MIL gold 와이어로 연결하였을 때 측정된 선형이득과 잡음지수



<그림 11> 3MIL gold 리본으로 연결하였을 때 측정된 선형이득과 입력 반사손실



<그림 8> 1MIL gold 와이어로 연결하였을 때 측정된 선형이득과 입력 반사손실



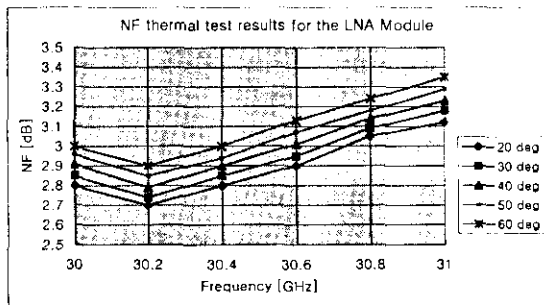
<그림 12> 3MIL gold 리본으로 연결하였을 때 측정된 선형이득과 출력 반사손실

그림 7, 그림 8, 그림 9는 MIC 기관과 MMIC chip을 1MIL gold 와이어로 연결하였을 때 측정된 결과들이고, 그림 10, 그림 11, 그림 12는 3MIL gold 리본으로 연결하였을 때의 측정 결과들을 나타낸다. 위의 그림으로부터 3MIL gold 리본을 사용하였을 때가 MMIC와의 불연속성에 의한 영향이 훨씬 적어 양호한 결과를 갖고 있음을 알 수 있다. 두 가지 형태의 연결방법에 대한 측정 결과를 표1에서 비교하였다.

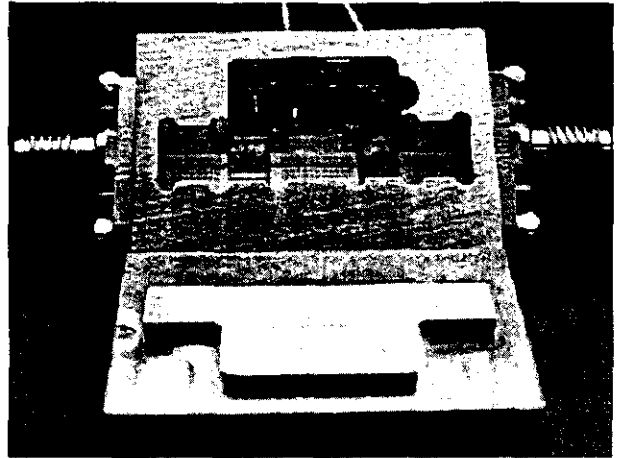
표 1. MIC 기관과 MMIC chip의 본딩 재료에 의한 측정 결과

파라미터	1MIL 와이어	3MIL 리본
잡음지수	3.6dB Max	3.12dB Max
선형이득	30.4dB Min	32dB Min
입력 반사손실	-15dB Max	-15dB Max
출력 반사손실	-6dB Max	-18dB Max
비고	다수의 리플 발생	

제작된 저잡음 증폭기 모듈은 위성중계기에 탑재된 후, 20°C~60°C의 온도 범위에서 동작하게 된다. 때문에 이러한 동작 온도 범위에서 성능의 신뢰도를 확보하기 위해, thermal vacuum 측정이 필요하다. 그러나 이번에 제작한 모듈에서는 시간과 비용의 문제로, thermal chamber만을 이용하여 온도변화에 대한 성능의 변화를 측정하였다. 측정결과 선형이득은 10°C 상승 때마다 약 0.1dB 정도 증가하였고, 잡음지수는 10°C 상승 때 약 0.05dB 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그림13에 잡음지수에 대한 온도 측정결과를 나타내었고, 그림14에 개발된 저잡음 증폭기 모듈의 사진을 나타내었다.



<그림 13> 온도 변화에 대한 잡음 지수의 변화



<그림 14> 제작된 저잡음 증폭기 모듈의 사진 (크기 = 27.3 × 18 × 8 mm³)

맺음말

본 논문에서는 자체 개발한 저잡음 증폭용 MMIC 칩들을 이용하여 개발한 저잡음 증폭기 모듈의 설계, 제작 및 측정기술에 대해 살펴보았다. 설계주파수가 30.085~30.885 GHz의 밀리미터파 대역인 관계로 기구물의 설계에서부터 측정까지 아주 세심함이 요구되었고, 원하는 성능이 나오기까지는 측정-제조립-측정의 과정이 수 차례 반복되었다. 측정결과 잡음지수 3.12dB, 선형이득 32dB, 입출력 반사손실 -15dB 이하로 원하는 성능을 만족함을 알 수 있었다.

30GHz의 저잡음 증폭기를 개발하면서 얻은, 설계 기술과 측정 경험들은 27GHz대의 LMDS용 저잡음 증폭기 모듈 개발에 유용하게 이용될 수 있고, 나아가 40GHz대의 군 통신용 중계기의 저잡음 증폭기 개발에도 응용할 수 있으리라 본다.

참고 문헌

- [1] I.D.Robertson, *MMIC DESIGN*, The Institution of Electrical Engineers, 1995.
- [2] Ravender Goyal, *Monolithic Microwave Integrated Circuits: Technology & Design*, Artech House, 1989.
- [3] 임종식, 강성춘, "Ka-Band 위성중계기용 MMIC 저잡음 증폭기의 설계," 1997년도 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, pp. 199-202.
- [4] 유영근, 임종식, 강성춘, 최영수, "위성수신기용 Ka-대 MMIC 광대역 저잡음증폭기 개발," 1998년도 한국통신학회 하계종합학술대회 논문집, pp.731-734.
- [5] Reinmut K.Hoffmann, *Handbook of Microwave Integrated Circuits*, Artech House, 1987.
- [6] Seckelmann.R, "Propagation of TE Modes in Dielectric Loaded Waveguides," *IEEE Trans. on Microwave Theory and techniques*, Vol.MTT-14, No.11, pp.518-527.