

LMDS용 저잡음 MMIC 증폭기 설계 및 제작

정회원 최우성*, 염경환*, 박순**

The design and fabrication of low noise MMIC amplifier for LMDS

Woo-Sung Choe, Kyung-Whan Yeom, Sun Park *Regular Member*

요약

본 연구에서는 GEC-Marconi사의 pHEMT foundry service를 이용하여 Ka-band 3단 저잡음 증폭기를 설계하였다. 저잡음 증폭기(Low Noise Amplifier) 설계에 있어서 안정도를 향상시키기 위해서 소스단에 인덕터를 직렬케한 시켰고 24.25 GHz에서 27.5 GHz 대역에서 15 dB 이상의 이득과 1 dB 이하의 평탄도를 얻기 위해 트레인단에 저항을 feedback요소로 사용하였으며 reactive matching technique을 이용하여 임피던스를 정합 시켰다. 제작된 저잡음 증폭기는 이득이 19 dB 이상, 잡음지수는 4 dB 이하, 입·출력 반사손실은 각각 -10 dB 이하, 그리고 1 dB 이하의 평탄도를 보였다.

ABSTRACT

In this paper, 3-stage low noise amplifier(LNA) in Ka-band is designed using pHEMT foundry service of GEC-Marconi. Series inductive feedback is employed to improve stability. In order to get the gain above 15 dB and the gain ripple under 1 dB over the wide bandwidth, resistors at drain were used as feedback elements. Using reactive matching technique, impedance is matched. The fabricated LNA shows the gain over 19 dB, the noise figure under 4 dB, the return loss blow -10 dB, and the gain flatness less than 1 dB.

I. 서론

최근 정보화와 더불어 통신 기술의 비약적인 발전으로 인하여 방송과 통신의 융합이 가속화되고 있는 상황이다. 그 중 방송분야의 기술 발전은 크게 디지털화, 고선명화, 다채널화, 양방향화 등 네 가지로 집약될 수 있으며, 향후 진정한 양방향 멀티미디어 서비스를 실현을 위한 해결책으로 무선 CATV가 가장 강력한 후보자로 등장하고 있다. 그러나 무선 CATV 주파수 대역이 28 GHz 대역으로서 아직 국내에서는 이 주파수대를 이용하기 위한 기술적인 기반이 부족하여 활용하지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 저잡음 증폭기를 구현하는데 있어 여러 가지 형태의 증폭기와 정합회로 설계 방법이 있

다. 증폭기 형태로는 balanced 증폭기, feedback 증폭기 등이 있는데 balanced 증폭기는 최소의 잡음지수와 매우 좋은 VSWR을 동시에 만족시킬 수 있지만 소요되는 트랜지스터의 수가 두배이기 때문에 회로가 복잡하고 전력소비가 많아진다. 또한 두 개의 hybrid coupler가 사용되게 되는데 coupler의 대역폭이 매우 넓지 않기 때문에 회로의 대역폭에 영향을 줄 수가 있다. Feedback 증폭기는 넓은 주파수 대역에서 이득의 평탄도가 매우 좋고 소자의 변수에 덜 민감하지만 이득이 감소하게 된다. 그러나 다단으로 설계함으로써 원하는 이득을 얻을 수 있다.^{[1][2]}

정합회로 설계 방법으로는 트랜지스터를 등가회로화 하지 않고 측정된 2 port S-parameter와 noise

* 충남대학교 전자공학과

** SK Telecom 중앙연구원

논문번호 : 98468-1027 접수일자 : 1998년 10월 27일

parameter로부터 임피던스의 실수부를 구하여 정합 회로를 구성하는 real frequency technique이 있는데 이는 실수부를 다항식으로 근사화 하기 위한 최적화를 거쳐야 한다.^{[3][5]} 임피던스 정합회로의 또 다른 설계 방법은 대역통과 분포회로 합성법으로 원점과 무한대에서 zero를 가지고 있고 상대적으로 짧은 transmission line element의 위치를 조정할 수 있기 때문에 복수 임피던스의 광대역 정합에 유용하지만 전달합수를 근사하여야 한다.^[6] 이외에도 Smith chart상에서 트랜지스터의 gain circle과 noise circle로부터 설계사양을 만족하도록 임피던스를 결정하고 그 임피던스 값을 이용해 reactive element를 적절히 사용하여 정합회로를 구성하는 방법이 있다.^[7]

본 연구에서는 설계 사양을 고려하여 reactive element를 적절히 사용하여 정합회로를 구성하는 reactively matching 기술과 안정도와 대역폭을 향상시키기 위한 feedback 기술로 24.25 GHz 에서 27.5 GHz 대역에서의 3단 저잡음 증폭기를 설계·제작하였다. 제작된 저잡음 증폭기는 이득이 19 dB 이상, 잡음지수 4 dB 이하, 입·출력 반사손실은 각각 -10 dB 이하, 그리고 이득 평탄도는 1 dB 이하를 나타내었다.

II. pHEMT 및 수동소자의 특성

설계에 사용된 pHEMT는 gate length가 0.25 μm 이고 총 gate width는 160 μm 이며 이 pHEMT의 전류-전압 특성곡선을 보면 그림 1과 같다.

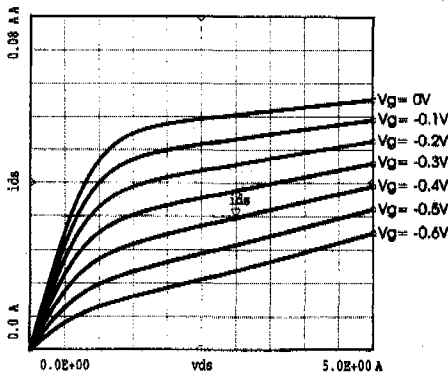


그림 1. pHEMT의 전류-전압 곡선
Fig. 1 The I-V characteristics of pHEMT

본 연구에서의 저잡음 증폭기는 multiple carrier 환

경에서 사용되는 것이고 이 환경 하에서는 다수의 반송파가 존재하기 때문에 bias point를 1dB compression이 가장 좋은 점 $V_d = 3\text{ V}$, $V_g = -0.4\text{ V}$ 를 선택하였다. 이 bias 조건하에서 pHEMT의 소신호 등가회로 parameter를 보면 표 1과 같다. (여기서 NFmin은 최소 잡음 지수를 나타내고 NF[2]는 port 2에서의 최소 잡음 지수, K는 stability factor 그리고 MSG는 maximum stable gain을 나타낸다.)

표 1. pHEMT의 특성
Table 1. Characteristic of pHEMT

Frequency (GHz)	NFmin (dB)	NF[2] (dB)	K	MSG (dB)
23	1.51	2.11	0.46	14
24	1.57	2.21	0.49	13.8
25	1.63	2.3	0.51	13.7
26	1.69	2.4	0.53	13.5
27	1.75	2.5	0.55	13.4
28	1.8	2.6	0.57	13.2

수동소자는 MIM capacitor, 저항, 전송선 등을 설계에 사용하였다. MIM capacitor는 polyimide capacitor와 silicon nitride capacitor가 있는데 DC block, bypass 그리고 정합회로에 사용하였다. 저항은 단위면적당 50 Ω 의 저항값을 갖는 nichrome 저항을 사용하였고, 전송선은 MIM capacitor의 위 (M3)·아래(M2) metal로 사용되는 M2와 M3라 불리는 layer의 전송선을 사용하였다. M2의 단위면적당 저항값은 $55 \pm 10\text{ m}\Omega/\text{sq}$ 이고 M3의 단위면적당 저항값은 $10 \pm 2.5\text{ m}\Omega/\text{sq}$ 이다. 각 전송선의 최대 허용 전류는 10 A/mm 이고, 대부분의 전송선은 손실이 적은 M3를 사용하였다.

III. 회로의 설계

본 연구에서는 다음과 같은 회로 사양을 만족하도록 설계하였다.

- 1) 주파수 대역 : 24.25 ~ 27.5 GHz
- 2) 이득 : 15 dB 이상
- 3) 잡음지수 : 4 dB 이하
- 4) 이득 slope : 3 dB 이하
- 5) 반사손실 : -10 dB 이하

저잡음 증폭기 설계에 있어 앞의 표 1을 보면 설계에 사용된 pHEMT는 모든 주파수 영역에서 불만

정하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 무조건적인 안정($K > 1$)을 갖도록 하기 위해서는 트랜지스터의 입력-출력에 적은 직렬 저항을 달아주거나 값이 큰 병렬 저항을 달아 주면은 된다. 그러나 이 방법은 저항이 잡음지수에 큰 영향을 미치므로 저잡음 증폭기에는 사용하지 않는다. 또 다른 방법은 저항대신 소스단에 인덕터를 직렬케환 시켜주는 방법이 있는데 삽입된 인덕터로 인해 잡음지수가 개선되고 또한 잡음 정합 임피던스 점과 전력 정합 임피던스 점이 가까워진다.^[2] 그림 2는 직렬케환된 인덕터의 값의 변화에 따른 안정도와 잡음지수의 변화를 나타내었다. 그림에서 보면 인덕터의 값이 47 pH 일 때 안정도가 가장 좋게 나타났으며 잡음지수도 약간 감소한 것을 볼 수 있다. 직렬케환된 인덕터는 layout 상에서 pHEMT의 소스와 via hole사이의 두 개의 전송선으로 구현되었고 그 길이는 124 μm 이다.

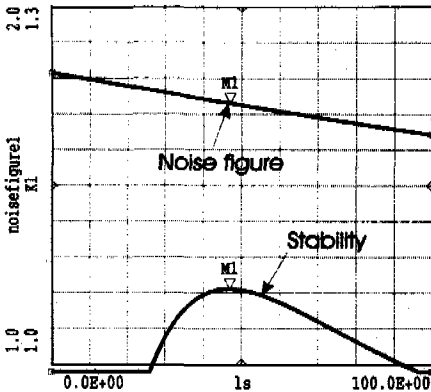


그림 2. 인덕턴스 값에 따른 안정도와 잡음지수의 변화
Fig. 2 Stability and noise figure vs the feedback inductance

소자의 tolerance를 고려한다면 봉우리가 공정에 따라 이동하는 것을 예상할 수 있고 만약의 경우 중심주파수가 어긋난 경우 다른 주파수에서 이득이 발생할 수 있다. 그러므로 넓은 주파수 대역에서 이득이 평탄하기 위해서는 증폭기의 선택도를 낮출 필요가 있으므로 드레인단에 저항을 병렬로 삽입하였다. 저항은 설계 사양을 고려하여 잡음지수에 영향을 크게 주지 않는 200 Ω 으로 하였고 저항삽입으로 인해 약간의 이득 손실을 가져왔다. 소스단에 인덕터를 직렬케환 시키고 드레인단에 저항 200 Ω 을 병렬로 삽입하였을 때의 주파수에 대한 이득의 변화를 보면 그림 3과 같다. 그림에서 보면 주파수가 높아질수록 이득이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러

므로 높은 주파수에서 reactive 정합을 함으로써 낮은 주파수에서의 이득을 감소시켜 평탄도를 좋게 할 수 있으므로 정합회로는 28 GHz에서 설계하였다.

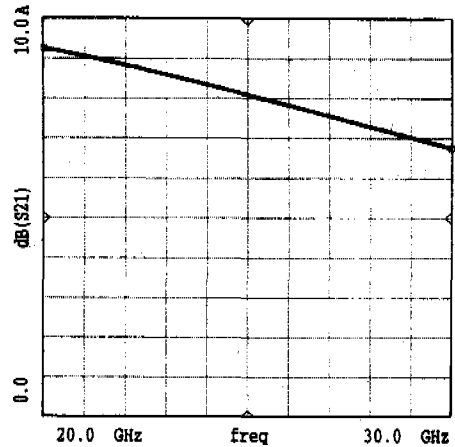


그림 3. 인덕터와 저항을 삽입하였을 때 주파수 변화에 대한 이득의 변화
Fig. 3 Gain variation with the insertion of inductor and resistor

주파수가 28 GHz 에서 입력단의 이득제거와 잡음지수 제거 그리고 최소 잡음을 주는 점, 최대 이득을 주는 점을 그림 4에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 최소 잡음을 주는 점에서 정합 시키면 잡음 특성은 우수하지만 이득의 감소와 VSWR이 나빠지는 것을 감수해야 하고 최대 이득을 주는 점에서 정합시키면 잡음지수가 나빠지는 것을 감수해야 한다. 최소 잡음 점으로 정합하면 VSWR을 만족시킬 수 없어서 최대 이득을 주는 점에서 reactive 정합하였다.

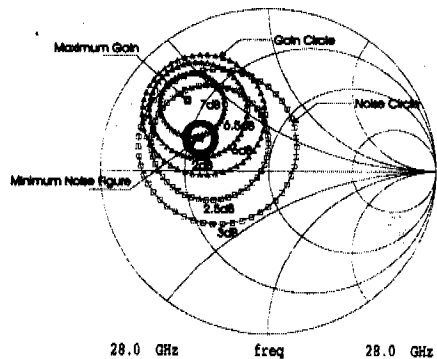


그림 4. 28 GHz에서 이득 제제과 잡음 제제
Fig. 4 Available gain circles and noise circles at 28 GHz

출력단은 잡음지수와 관련이 없으므로 최대이득을 주는 점에서 정합시켰다. 원하는 주파수 대역에서 15 dB 이상의 이득을 얻기 위해 3단으로 설계하였고 중간단 정합회로는 회로의 구조를 간단하게 하기 위해 앞에서 구현한 입·출력 정합회로를 bypass capacitor로 연결하였고 각 소자값은 최적화를 거쳐 구하였다.

설계된 3단 저잡음 증폭기의 회로도에는 그림 5에 나타내었고 증폭기 특성은 그림 6에 나타내었다. 공정의 오차를 고려하여 22.5 GHz에서 29.5 GHz까지의 대역을 simulation 하였으며 모든 대역에서 19 dB 이상의 이득을 보이고 있고 반사손실도 -10 dB 이하를 나타내고 있었다.



그림 5. 저잡음 증폭기 회로도
Fig. 5 LNA circuit

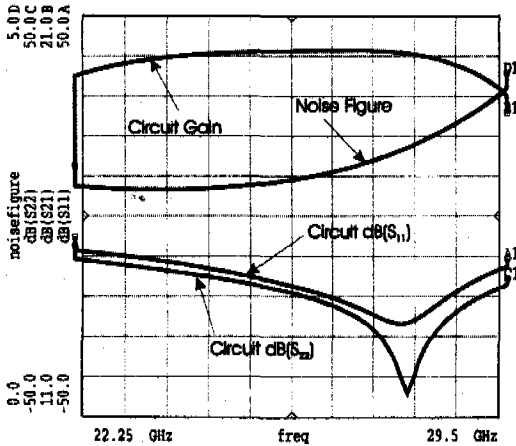


그림 6. 저잡음 증폭기의 특성
Fig. 6 The performance of the designed LNA

IV. 저잡음 증폭기의 제작 및 측정결과

설계된 저잡음 증폭기는 GEC-Marconi사의 H40 Foundry를 이용하여 제작하였다. MMIC 제작 방법을 살펴보면 다음과 같다. GaAs wafer 위에 M2층(MIM capacitor의 바닥 금속)이라는 금속층이 형성되고 그 위에 Nitride층이 형성되어 표면에 발생하는 손상이나 산화를 방지하며 MIM capacitor의 절

연체로도 사용한다. Nitride층 위에는 NiCr 같은 정밀저항 재료가 sputtering 방법에 의해 선택된 영역에 증착되며 이는 microwave용 저항으로 사용한다. 그 위에는 Polyimide 절연체가 입혀지며 MIM capacitor 중 capacitance가 적은 것을 구현하는데 사용된다. 그 다음에는 microwave용 전송선이나 연결을 위해 도전율이 좋은 금속체가 sputtering 방법으로 형성된다. 이층은 M3층이라 불리며 MIM capacitor의 위 금속층으로도 사용된다. 이 공정이 끝나면 다시 외부와의 접속부분을 제외하고는 보호시키기 위해서 Nitide층을 형성함으로써 전면 공정이 끝나게 된다. 뒷면 공정은 via 같은 low inductive through hole을 만들기 위해 chemical etching 과정을 거치게 되며 이 공정이 끝나면 마지막으로 뒷면을 금속화(metallization)하여 전 공정이 끝나게 된다. 위와 같은 공정으로 제작된 저잡음 증폭기는 그림 7에 나타내었다. 저잡음 증폭기는 chip size가 1.3 mm × 2.5 mm이고 20 GHz에서 30 GHz까지 on wafer test를 하였으며 그림 8에는 측정결과와 회로도의 결과를 비교하여 나타내었다.

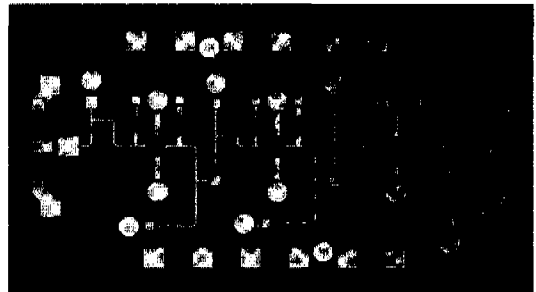
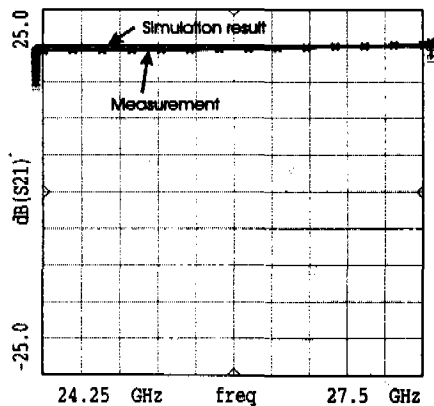
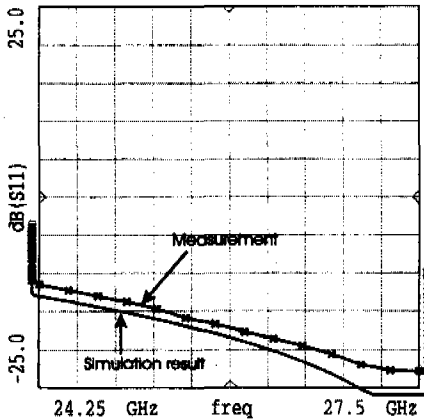


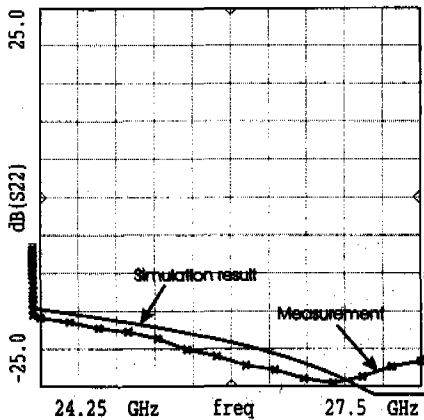
그림 7. 제작된 저잡음 증폭기
Fig. 7 Fabricated LNA



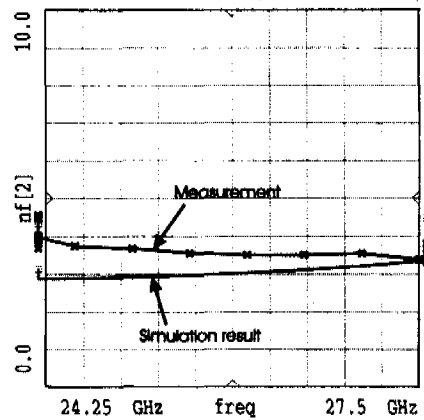
(a) S21



(b) S11



(c) S22



(d) Noise figure

그림 8. Simulation 결과와 측정결과 비교
Fig. 8 Comparison of the simulation results with the measurement results

관심있는 주파수 대역이 24.25 GHz에서 27.5 GHz 대역이므로 그림에는 위 대역에서의 이득, 반사손실, 그리고 잡음지수를 나타내었다. 24.25 GHz에서 27.5 GHz 대역에서 이득이 약 19 dB 이고 이득 평탄도는 1 dB 이하이며 반사손실은 -10 dB 이하, 잡음지수는 4 dB 이하로 설계치와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

V. 결론

Series inductive feedback과 드레인단에 저항을 feedback 요소로 사용하여 24.25 ~ 27.5 GHz 대역에서의 저잡음 증폭기를 설계·제작하였다. 제작된 저잡음 증폭기는 24.25 ~ 27.5 GHz 대역에서 19 dB 이상의 gain과 4 dB이하의 noise figure, -10 dB 이하의 반사손실을 얻을 수 있었다. 본 연구를 통해서 Ka-band 대역 저잡음 증폭기의 설계 방법을 습득하게 되었고 이는 차후에 예상되는 여러 밀리미터파를 활용한 무선통신 부품들을 설계하는데 기초가 될 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] George D. Vendelin, *Design of Amplifiers and Oscillators by the S-parameter Method*, John Willy & Sons, 1982.
- [2] I. D. Robertson, *MMIC design*, IEE Circuits and Systems Series 7, 1995
- [3] Eric Kerherve, Pierre Jarry, and Pierre-Marie Martin, "Design of broad-band matching network with lossy junctions using the real-frequency technique," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 3, pp. 242~249, March 1998.
- [4] E. Kerherve and P. Jarry, "Efficient numerical method to the design of microwave active circuits," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1611-1614, June 1997.
- [5] W. L. Jung and J. H. Chiu, "Stable broad-band microwave amplifier design using the simplified real-frequency technique," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, pp. 336-340, Feb. 1993.
- [6] M. E. Mokari-Bolhassan and Walter H. Ku, "Transfer function approximations for a new

class of bandpass distributed network structures," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-25, no. 10, pp. 837-847, Oct. 1977.

[7] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Prentice Hall, 1997.

박 순(Sun Park)

정회원

1982년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사

1984년 2월 : KAIST 전기전자과 석사

1989년 2월 : KAIST 전기전자과 박사

1983년~1992년 : 금성전기(주) 선임연구원

1992년~1993년 : LG정밀(주) 책임연구원

1993년~현재 : SK Telecom 중앙연구원 신기술 그룹장

염 경 환(Kyung-Whan Yeom)

정회원



1976~1980 : 서울대학교 공과대학 전자공학과 (학사)

1980~1982 : 한국과학기술원 전기및 전자과 (석사)

1982~1988 : 한국과학기술원 전기및 전자과 (박사)

1988. 3 : 금성전기(주) 소재부품연구소 선임연구원 (MIC팀 팀장)

1990. 3 : 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원

1991. 5 : 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원

1991. 8 : (주) LTI

1995. 10 : 충남 대학교 전파공학과 조교수

최 우 심(Woo-Sung Choe)

정회원

1997년 2월 : 충남대학교 전파공학과 학사

1997년~현재 : 충남대학교 전파공학과 대학원 석사 과정 재학중

<주관심 분야> 초고주파 회로 설계