

V-band MMIC Downconverter 개발에 관한 연구

준회원 김 동 기, 이 상 효, 김 정 현, 김 성 호, 정 진 호, 전 문 석, 권 영 우,
백 창 욱*, 김 년 태**

High performance V-Band Downconverter Module

Dongki Kim, Sanghyo Lee, Jeonghyun Kim, Seongho Kim, Jinho Jeong,
Moonsuk Jeon, Youngwoo Kwon, Changwook Baek*, Nyuntae Kim** Associate Members

요 약

GaAs pHEMT 기술로 V-band 수신단 각 MMIC 회로들을 설계 제작하였다. 또한 이를 집적하여 V-band downconverter module을 제작하였다. 제작된 downconverter는 24 dBm의 출력을 내는 LO 구동 전력 증폭기, 20 dB의 소신호 이득을 가지는 저잡음증폭기, -1.6dBm의 출력을 내는 active parallel type의 발진기, 6 dB 이상의 변환이득 특성을 나타내는 cascode type의 혼합기로 구성되어 있다. 이처럼 혼합기의 우수한 변환이득 특성은 밀리미터파 대역에서 변환 이득 특성을 키우기 위해 반드시 필요한 거대한 IF buffer amplifier의 필요를 없애 주었다. 완성된 downconverter module의 측정결과 별도의 IF buffer amplifier없이 57.5 GHz와 61.7 GHz 사이에서 20 dB 이상의 높은 변환이득을 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

MMIC circuits in whole receiver system was fabricated based on GaAs pHEMT technology. And a V-band downconverter module was fabricated by integrating these circuits. The downconverter module consists of a LO drive power amplifier which generates 24dBm output power, a low noise amplifier(LNA) which shows 20 dB small signal gain, an active parallel feedback oscillator which generates 1.6 dBm output power, and a cascode mixer which shows over 6dB conversion gain. The good conversion gain performance of our mixer made no need to attach any IF amplifier which grows conversion gain. Measured results of the complete downconverter show a conversion gain of over 20 dB between 57.5 GHz and 61.7GHz without IF amplifier.

I. 서 론

최근 들어 무선통신 미디어가 음성에서 데이터로, 또 단순한 데이터에서 멀티미디어 등의 광대역 데이터로 발전함에 따라 넓은 주파수 대역폭을 제공하는 밀리미터파 대역에 대한 관심과 연구가 고조되고 있다. 밀리미터파 대역을 사용하면 넓은 주파수 대역폭의 사용이 가능해질 뿐만 아니라 안테나의 크기가 작아지며, 지역마다 같은 주파수를 재사

용할 수 있다는 장점들이 있으므로 전세계적으로 밀리미터파 기술 및 응용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 외국의 경우 밀리미터파 대역의 상업적 활용 움직임이 활발해지고 있으며 그 예로써 30 GHz 대역의 PCN, 60 GHz 대역의 무선 LAN, 77 GHz 대역의 자동차 충돌방지 레이더 등이 있으며 이외에도 인공위성 간의 중계기, 지상에서 인공위성으로의 uplink 등 초고속 광대역 통신을 위해서 사용되고 있다.

그러나 국내에서는 이러한 밀리미터파 대역에 관

* 서울대학교 전기컴퓨터학부(gogh1853@snu.ac.kr)

** POCOLUX Korea Team Leader

논문번호 : 010353-1123, 접수일자 : 2001년 11월 23일

※ 본 연구는 2002년도 BK21 교내 연구비에 의해 수행되었습니다.

한 연구가 매우 미흡한 실정이다. 외국의 down-converter 연구결과를 살펴보면^{[1]-[4]}, InP HEMT 기술로 제작된 V-band monolithic downconverter의 경우^[1], LO 주파수가 54 GHz 일 때, RF 주파수 56 GHz와 64 GHz 사이에서 20 dB이상의 변환이득을 보였으며, W-band에서 제작된 monolithic downconverter의 경우^[2], LO 주파수가 93 GHz일 때 RF 주파수 85 GHz와 92 GHz 사이에서 7 dB에서 11 dB 사이의 변환 이득을 보였다. Q-band monolithic AlGaAs/GaAs CPW HEMT down-converter의 경우^[3], RF 주파수가 46 GHz 일 때 IF 주파수 2 GHz와 4 GHz 사이에서 8에서 12dB의 변환이득을 나타내었으며, 44 GHz monolithic HEMT downconverter의 경우^[4] RF 주파수가 44 GHz 일 때 IF 주파수 2.3 GHz와 4.3 GHz 사이에서 약 15dB의 변환이득을 나타내었다. 그러나 이런 밀리미터파 대역에서 변환 이득 특성을 키우기 위해 반드시 거대한 IF buffer amplifier가 필요하다^{[1]-[4]}. 이는 이 주파수 대역에서의 혼합기가 원하는 충분한 변환이득 특성을 보여 주지 못하고 손실을 가지기 때문이다. 물론 최근, 50 GHz에서 8 dB의 높은 변환 이득 특성을 가지는 balanced gate HEMT 혼합기가 소개되었다^[5]. 그러나 이 혼합기의 경우 거대한 IF balun의 사용이 변환 이득을 위해 불가피하였다. 본 연구에서는 RF 59 GHz에서 6 dB의 높은 변환 이득 특성을 갖는 cascode 혼합기가 제작되었고, 또한 본 혼합기에서는 IF 정합 회로가 포함시켜 별도의 IF 회로가 필요 없게 하였다. 이 혼합기를 사용한 본 연구의 downconverter module은 LO 주파수가 59.57 GHz일 때, RF 주파수 57.5 GHz와 61.7 GHz 사이에서 20 dB 이상의 변환이득을 나타내었다. 또 혼합기의 경우, 별도의 IF buffer amplifier를 사용하지 않아도 충분한 변환 이득을 가지도록 설계하여 전체 모듈의 크기가 커지는 것을 막을 수 있었다.

본 논문은 downconverter module의 제작에 사용된 각 회로들의 특성에 대한 설명 (2장), 완성된 downconverter의 특성 (3장), 그리고 결론의 순서로 구성되었다.

II. Circuit Description

일반적인 downconverter는 간단히, 낮은 레벨의 RF 신호를 증폭하기 위한 RF 저잡음 증폭기(LNA : Low Noise amplifier)와 LO 주파수를 생성하기

위한 발진기(oscillator), 그리고 이들 신호를 낮은 IF 주파수로 변환하기 위한 혼합기(mixer)로 구성되어 있다. V-band와 같이 밀리미터파 대역에서의 발진기는 혼합기를 구동시키기에 필요한 큰 LO 신호를 생성하기 매우 힘들므로, 대부분 구동 전력 증폭기(driver amplifier)가 발진기에 뒤따르게 된다. 마찬가지로 밀리미터파에서의 혼합기는 대부분 변환 손실(conversion loss)이 상당하므로, 혼합기에서 생성된 낮은 레벨의 IF 신호를 증폭하기 위한 IF buffer amplifier가 필요하다. 앞서 간단히 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 충분한 변환 이득을 가지는 최적화된 혼합기의 개발로 인하여, 전체 downconverter module에 있어서 거대한 크기를 차지하는 IF buffer amplifier를 사용하지 않고도 충분한 변환 이득을 얻을 수 있었다. 이에 대한 구체적인 설명은 아래에서 기술될 것이다.

이번 장에서는 V-band downconverter를 구성하는 각 단의 단위 회로들, 즉, RF 저잡음 증폭기(LNA:Low Noise amplifier), 발진기(oscillator), 구동 전력 증폭기(driver amplifier), 그리고 혼합기(mixer)에 대한 구체적인 설계와 결과를 설명할 것이다. 설계, 제작된 모든 단위 회로들의 측정은 본 연구실에서 수행되었으며, 0.15 μ m GaAs pHEMT commercial foundry를 이용하였다.

1. 저잡음 증폭기(low noise amplifier : LNA)

5-stage LNA가 혼합기 앞단에서 RF 신호를 증폭하기 위하여 제작되었다. 모든 matching 회로는 높은 이득 특성과 낮은 잡음 지수(noise figure), return loss를 고려하여 설계되었다. 이를 위해 작은 사이즈의 트랜지스터, 즉, 50 μ m와 80 μ m가 각 stage에 사용되었다. 5-stage LNA의 소신호 특성에 대한 설계와 측정의 결과를 그림 1에 나타내었다. Matching 회로는 주로 마이크로스트립 라인으로 이루어졌으며, 불연속이 큰 경우 momentum 해석을 병행하였다. 설계 결과 56 GHz에서 64 GHz의 넓은 주파수 대역에서 25 dB 이상의 이득 특성을 가졌다. 그러나 실제 제작된 회로는 59 GHz에서 62 GHz 까지 20 dB를 넘어서는 특성을 보여주고 있다. 이는 높은 주파수에서의 회로 설계에 있어서 쉽게 예측할 수 없는 기생 성분에 그 원인을 들 수 있다. 본 회로의 경우는 동작 주파수 근처에서 미세한 발진 현상이 발견되었고, 이를 억제하기 위해 높은 이득 특성을 얻을 수 있는 동작 영역에서 동작시킬 수 없었다. 동작 drain 인가 전압은 2V이고,

전체 전류는 50 mA 이하였다. 측정은 HP8510XF 를 이용하여 on-wafer 상에서 측정되었다. 제작된 MMIC의 회로는 그림 2에 제시하였다. 전체 chip size는 2.8×1.5mm² 이다.

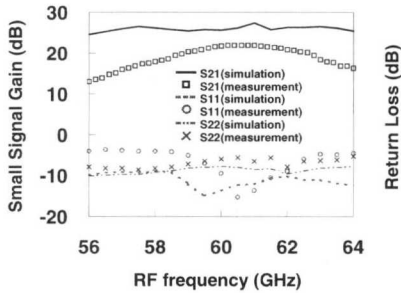


그림 1. LNA의 소신호 특성

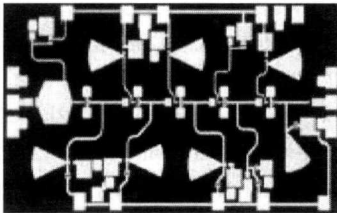


그림 2. LNA의 MMIC chip

2. 발진기 (Oscillator : OSC)

Active-parallel-feedback OSC가 phase-locking 개념을 이용하여 설계되었다. 구체적인 회로도를 그림 3에 제시하였다. coupler나 공진기를 이용한 parallel feedback 발진기의 경우 drain 신호가 gate 로 feedback될 뿐 아니라 gate 신호도 feedback 경로를 통해 전달되어 MAG가 작은 대역에서 설계 하기가 쉽지 않다. 하지만 active parallel feedback 발진기의 경우 능동소자의 특성상 gate단의 신호는 상대적으로 적은 양만이 drain 단에 영향을 주게 되므로 발진기 제작에 보다 용이하고 안정적인 회로를 구성할 수 있다. 그리고 feedback 경로에 능동소

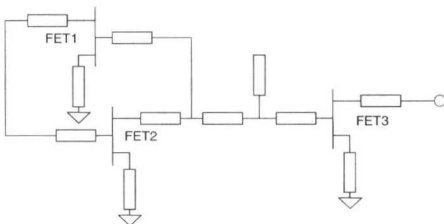


그림 3. Active-parallel-feedback 발진기의 구조도

자를 이용하여 feedback의 세기를 증가시켜 보다 큰 신호를 얻을 수 있다. 또 feedback loop의 길이를 조절해서 상대적으로 넓은 부성저항을 얻을 수 있다. 그림 3에서, FET1은 active-feedback transistor를, FET2는 main transistor, 그리고 FET3는 buffer-amplifier transistor를 각각 나타내고 있다. Feedback loop의 line 길이는 발진 주파수에서 looping phase가 locking 될 수 있도록 설계되었다.

그림 4와 그림 5에서와 같이, 제작된 발진기는 59.57 GHz에서 발진하였고 (실제 목표된 발진 주파수는 60 GHz였다), control 전압 조절로 인하여 1.6 dBm ± 1.6 dBm의 출력 전력을 59.4 에서 60 GHz 까지의 tuning 주파수 범위에서 얻을 수 있었다. 그림 4의 spectrum은 8566B spectrum analyzer 와 harmonic mixer를 통해 측정되었고, 이는 coupler loss (~ 9.3 dB)와 V-band harmonic mixer 와 병행하는 8566B spectrum analyzer의 compensation factor(~ 10 dB)를 포함한 spectrum 을 나타내고 있다. 또한 측정된 phase noise는 10 MHz offset에서 109 dBc/Hz의 특성을 보여주었다. 제작된 MMIC의 회로는 그림 6에 제시하였다. 전체 chip size는 1.5×2.0 mm² 이다.

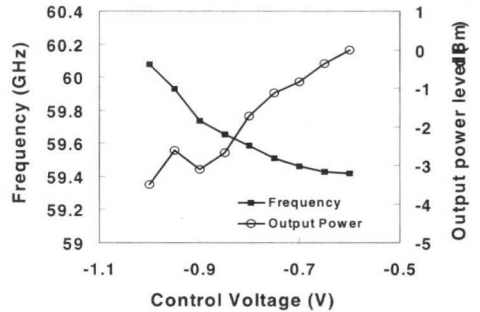


그림 4. Oscillation frequency와 power의 관계

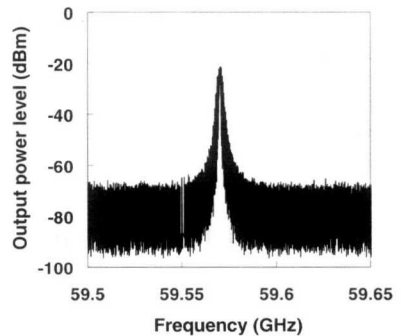


그림 5. Unmodified Spectrum

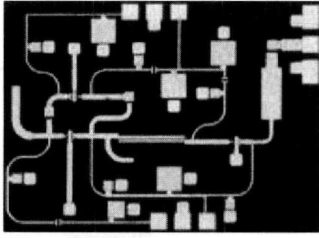


그림 6. 발진기의 MMIC chip

3. LO 구동 전력 증폭기(LO driver amplifier)

발진기에서 출력된 최대 1.6 dBm의 출력 전력은 다음에 설명될 혼합기가 최적의 변환 이득을 얻기에는 부족한 크기이므로 본 연구에서는 간단한 구동 증폭기를 발진기 후단에 제작하여 집적하였다. 사용된 단위 소자의 크기는 20 dBm 이상의 전력을 출력할 수 있도록 200um의 gate width를 선택하였고, 본 down converter의 구동 전력 증폭기 외에 여러 용도의 높은 전력을 요하는 V-band 전력 증폭기를 구현하기 위해서 주 증폭단에는 4×200 um 크기의 트랜지스터를 사용하였다. 따라서 출력되는 전력은 26 dBm 이상을 예상할 수 있었다. 그러나 그림 7에서 보는 바와 같이 실제 제작되어 측정된 전력은 24 dBm 정도였고, 이는 측정을 위해 모듈을 제작할 경우에 최적의 정합조건이 어긋나서 생기는 현상으로 고려할 수 있다. 제작된 MMIC의 회로는 그림 8에 제시하였다. 전체 chip size는 2.9×1.6 mm²이다.

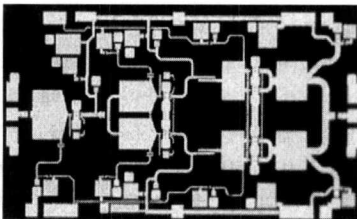


그림 7. 구동 전력 증폭기의 MMIC chip

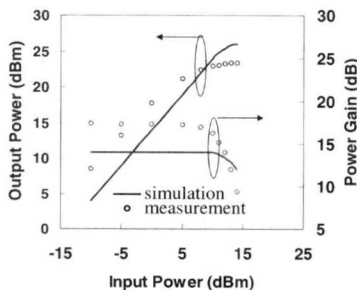


그림 8. 구동 전력 증폭단의 전력 특성

4. 혼합기 (Mixer)

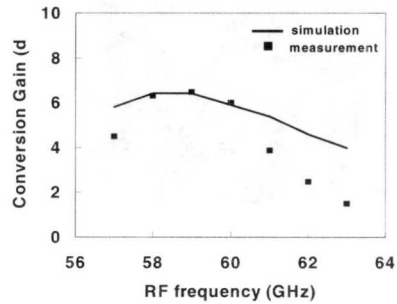


그림 9. 혼합기의 변환 이득

최적의 변환이득을 가지는 혼합기가 설계, 제작되었다. 본 연구에서는 cascode 구조를 이용한 혼합기를 제작하였는데, 이는 그림 9에서 보는 바와 같이, RF와 LO 단이 각각 다른 단으로 인가되므로, 흔히 높은 변환 이득을 얻기 위해 사용되는 gate 혼합기에서 LO-RF 간을 분리하기 위해서 불가피하게 사용되는 coupler를 필요로 하지 않는다. 또한 이는 FET의 transconductance로 인하여 혼합되는 메커니즘을 가지고 있기 때문에 gate 혼합기와 마찬가지로 최적화된 동작영역에서는 탁월한 변환 이득 특성을 가질 수 있다. 또한, Cascode topology는 구조적으로 발진 위험성이 높아서, 설계시 이를 고려하여 최대의 conversion gain을 얻을 수 있는 knee voltage보다 약간 낮은 bias point에서 수행하였다. LO 신호에 대한 short 회로가 IF port에 적용되었고 입력 port에 IF 신호를 막을 수 있도록 큰 capacitor를 부착하였다. 본 혼합기의 자세한 비선형 동작 메커니즘은 본 연구자에 의해 자세히 분석되었으며^[6] 그에 대한 내용은 본문에서는 생략하기로 한다. 그림 10에서 본 혼합기는 57~63 GHz의 넓

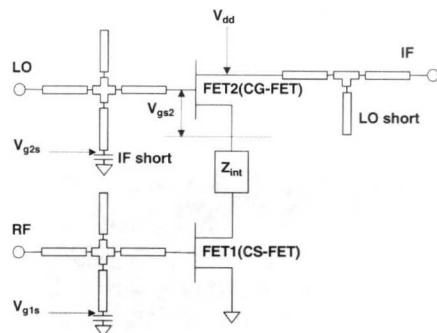


그림 10. cascode 혼합기의 구조도

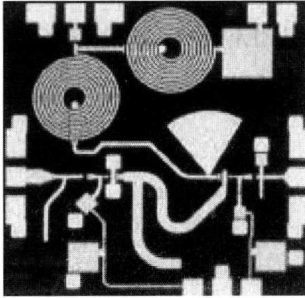


그림 11. 혼합기의 MMIC chip

은 RF 대역에서 변환이득을 가짐을 볼 수 있고, 특히 59 GHz 근처에서는 6 dB 가량의 변환이득을 볼 수 있다. 이는 저자가 알기로는 이제껏 보고된 V-band 이상의 혼합기 중에서 최고의 변환 이득으로 사료된다. 이 때의 LO 주파수는 59.57 GHz로 고정하였고, LO 단 입력 신호는 3 dBm이다. 제작된 MMIC의 회로는 그림 11에 제시하였다. 전체 chip size는 1.6×1.6mm 이다.

III. V-band Downconverter module

앞서 기술한 각 단의 회로들을 이용하여 V-band downconverter module을 제작하였다. 간단한 구조도를 그림 12에 제시하였다. 성취도가 뛰어난 각 단의 회로들은 downconverter를 제작하여 동작시키는데 충분하였으며, 특히, 높은 변환 이득을 가지는 최적화된 혼합기는 별도의 IF buffer amplifier가 없이도 충분한 변환 이득을 가질 수 있도록 하였다.

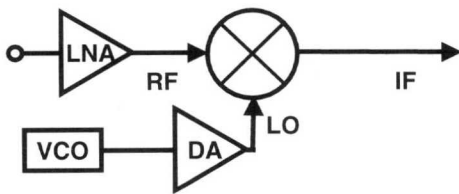


그림 12. 간단한 Downconverter의 블록도

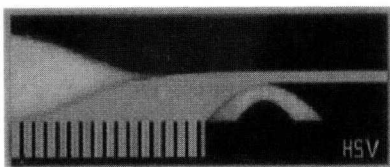


그림 13. Finline 변환 구조의 chip 사진

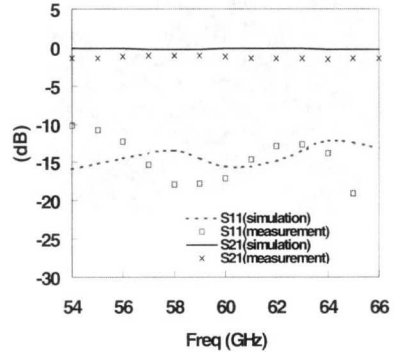


그림 14. Finline 변환 구조의 손실 특성

앞서 설명한 구동 전력 증폭기(driver amplifier) 뿐만 아니라, 본 downconverter를 측정하기 위해서 각 MMIC chip들이 WR-15 waveguide 위에서 제작, 측정되었다. metal waveguide는 좋은 열 방출 효과를 가지고 있다. Waveguide는 millimeter 주파수 대역에서는 전형적인 전송선이며 이 주파수 대역에서 대부분의 측정 요소들이므로, MMIC chip들의 전력을 측정하기 위해서는 microstrip-to-waveguide 변환 구조(transition)가 불가피하다. 따라서 본 연구에서의 변환 구조는 전형적인 finline 변환 구조를 이용하여 설계, 제작되었다(그림 13). Waveguide의 E-plane으로 삽입된 Metal-patterned-substrate는 waveguide의 전기장을 microstrip line의 전기장으로 돌리게 한다. 본 변환 구조는 in-house 3-D structure simulator를 이용하여 설계되었고, 5-mil quartz substrate (dielectric constant=3.8) 가 V-band에서 변환 손실을 줄이기 위해 채택되었다. back-to-back 연결된 변환구조의 측정 결과가 그림 14에 제시되었다. 50~66 GHz에 걸쳐 1.6 dB 이하의 변환 손실과 10 dB 이하의 반사 계수라는 탁월한 결과를 얻었다. 물론 설계값에 비해 특성이 떨어지나, 이는 bonding parasitic 효과를 포함한 측정 결과이다. V-band 이상의 주파수에서 bonding parasitic effect는 회로의 RF 특성에 현저히 영향을 미치게 되는데, 보통 bonding line 0.1mm 당 0.2~0.4 nH의 효과를 주고 있는 걸로 알고 있다.

그림 15는 각 단의 회로들과 변환구조 사이의 interconnection에 의한 손실을 포함한 전체 package에 대한 변환 이득을 보여주고 있다. 이 때 LO 주파수는 59.57 GHz로 고정되어 있다. 집적된 전체 변환 이득은 별도의 IF amplifier 없이 4.2 GHz(57.5~61.7 GHz)의 RF 주파수 대역에서 20

dB 이상의 높은 변환 이득을 나타내고 있다. 이 결과는 이 주파수 대역에 있어서 세계 유수에서 보고된 연구 중에 변환 이득이 가장 특성이 뛰어난 downconverter이다. 62 GHz 이상의 주파수에서의 roll off는 LNA와 혼합기 간의 제한된 주파수 특성에 기인한 것이다. 그림 16는 완성된 down converter receiver module의 사진이다.

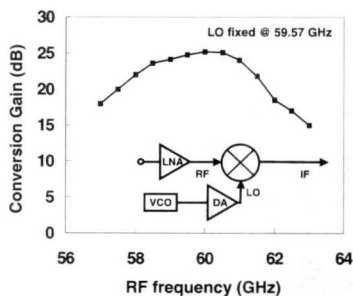


그림 15. 전체 Downconverter의 변환 이득 특성

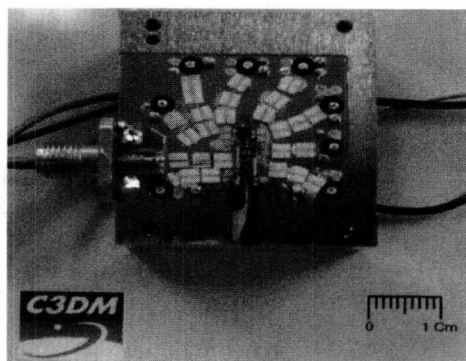


그림 16. 전체 Downconverter module의 사진

IV. 결론

본 연구를 통하여 V-band에서 동작하는 down-converter module이 제작되었다. 충분한 변환 이득을 가지는 최적화된 혼합기의 개발로 인해 전체 downconverter module에 있어서 거대한 크기를 차지하는 IF buffer amplifier를 사용하지 않고도 4.2 GHz(57.5~61.7 GHz)의 RF 주파수 대역에서 20 dB이상의 높은 변환 이득을 얻을 수 있었다. 본 연구를 통해 그 동안 국내에서는 연구성고가 미진했던 밀리미터파 대역에서의 연구가 더욱 활발해질 것으로 기대한다.

Acknowledgment

본 연구는 2001년도 한국과학기술부의 창의 연구 과제 및 서울대학교 3차원 밀리미터파 집적 시스템 센터의 관리로 수행되었고, 또한 두뇌한국 21 사업에 의해 지원되었습니다.

참고 문헌

- [1] K. W. Chang et al., "A V-band monolithic InP HEMT downconverter", IEEE GaAs IC Symposium, Dig., pp.211-214, 1993
- [2] K. W. Chang et al., "A W-band Monolithic Downconverter", IEEE trans. on Microwave Theory Tech., vol. 39, no. 12, pp. 1972-1978, 1991
- [3] T. N. Ton et al., "A Q-band monolithic AlGaAs/GaAs HEMT CPW downconverter", IEEE GaAs IC Symposium, Dig., pp. 185-188, 1990
- [4] J. Berenz et al., "44 GHz monolithic HEMT downconverter", IEEE GaAs IC Symposium, Dig., pp. 189-192, 1990
- [5] K. Kawakami et al., "A High Gain 50 GHz Band Monolithic Balanced Gate Mixer With an Exteranal IF Balun", IEEE trans. on Microwave Theory Tech., vol. MTT-46, no. 6, pp.829-833, June, 1998
- [6] J. Kim and Y. Kwon, "Intermodulation Anlysis of Dual-Gate FET Mixers", to appear in IEEE trans. on Microwave Theory Tech., 2002

김 동 기 (Dongki Kim)

준회원



2001년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 학사
 2001년 3월~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정

<주관심 분야> 밀리미터파 회로 및 시스템 설계

이 상 효(Sanghyo Lee)

준회원

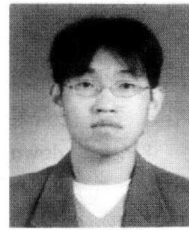


2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
2002년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2002년 3월~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정

<주관심 분야> 능동소자 모델링, RF MEMS

전 문 석(Moonsuk Jeon)

준회원



2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
2002년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2002년 2월~현재 : WavICs사 연구원

<주관심 분야> 밀리미터파 회로 및 시스템 설계

김 정 현(Junghyun Kim)

준회원



1998년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 학사
2000년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2000년 3월~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정

<주관심 분야> 밀리미터파 회로 및 시스템 설계

김 년 태(Nyuntae Kim)

준회원



1998년 8월 : 서울대학교 전기공학부 학사
2001년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2001년 2월~2002년 2월 : BIT korea 선임 연구원
2002년 3월 ~현재 : PICOLUX korea Team Leader

<주관심 분야> 초고주파 무선통신, 광통신

김 성 호(Seongho Kim)

준회원



2001년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
2001년 2월~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정

<주관심 분야> 능동소자 모델링, MMIC 설계

백 창 욱(Changwook Baek)

정회원



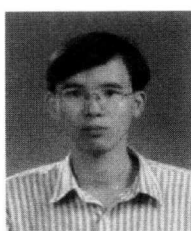
1993년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
1995년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사
2000년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2000년 2월 ~ 현재 : 서울대학교 반도체공동연구소 연구원, 서울대학교 3차원 밀리미터파 연구단 연구원

2002년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 BK21 조교수

<주관심 분야> RF MEMS device

정 진 호(Jinho Jeong)

준회원



1997년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
1999년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
1999년 3월~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정

<주관심 분야> 능동/수동 소자 모델링, MMIC/OEIC 설계, 준광학적 전력 결합기

권 영 우(Youngwoo Kwon)

정회원



1988년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사

1990년 : University of Michigan
M.S.E.E

1994년 : University of Michigan
Ph.D

1994년~1996년 : Rockwell
International Science
Center, MTS

1996년~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 조교수,
서울대학교 3차원 밀리미터파 연구단
장

<주관심 분야> MMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시스템, 능동소자 모델링, RF MEMS, Microwave cancer detecting