

밀리미터파용 고온초전도 다운-컨버터의 제작 및 고주파 특성 평가

강광용*, 김호영*, 김철수*, 곽민환**

*한국전자통신연구원 반도체·원천기술연구소, **경상대학교 전기공학과

High- T_c Superconducting down-converter for Millimeterwave

Kwang-Yong Kang*, Ho Young Kim*, Chul-Soo Kim*, Min Hwan Kwak**

*Semiconductor · Basic Res. Institute, ETRI

**Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University

kykang@etri.re.kr

Abstract - The millimeterwave high- T_c superconducting(HTS) down-converter sub-system with the HTS/III-V integr-ated mixer as the central device is demonstrated first. The constituent components of HTS down-converter sub-system such as a single balanced type integrated mixer with rat-race coupler, a cavity type bandpass filter (26 GHz), and a HTS planar lowpass filter(1 GHz), semiconductor LNA and IF-power amplifier, a driving electro- nic module for A/D converter, and a Stirling type mini-cooler module were combined into an international stand-ard rack of 19-inch. From the RF(-61 dBm, 26.5GHz)and LO signal(-1 dBm, 25.6 GHz), IF signal(0dBm, 0.9 GHz) agreed with simulated results is obtai- ned.

1. 서 론

고온초전도(HTS) 에피박막의 낮은 표면저항은 실리콘, 화합물 및 질화물 반도체로 제조한 고주파 소자와의 집적을 가능케 한다. 따라서 미세 전자소자 분야에서 단일칩 고주파 집적회로(MMIC) 기술 및 하이브리드 고주파 집적회로(HMIC) 기술은 밀리미터파 통신시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 핵심요소기술이다. 특히, 고온초전도체와 화합물반도체를 혼성한 HTS/III-V 집적믹서를 개발할 경우, 이를 채택한 통신시스템용 송·수신기의 감도(잡음)와 성능이 향상될 수 있기때문에 다양한 구조가 개발되고 있다. 그리고 저온에서는 GaAs의 주요물성인 이동도가 크게 증가하므로 GaAs 박막 소재로 제작한 다이오드의 고주파 특성도 향상된다[1-3].

최근에 금속 및 고온초전도체의 박막화 기술, 혼성집적 및 저온기술 등이 크게 진보함에 따라, 고온초전도 평면형 수동소자와 갈륨비소형 다이오드(diode)를 이용한 혼성 집적기술도 초고주파 모듈 개발에서 크게 중요시되고 있다. 밀리미터파 통신시스템의 전치부(front-end)용 핵심소자들

은 소형화 뿐만 아니라, 저잡음 및 저손실 등 고성능화가 특별히 요구되므로 HTS/III-V 혼성 집적믹서의 개발은 절실하며 장수명, 고성능 및 초소형 냉각장치의 발전에 힘입어 이러한 가능성은 더욱 높아지고 있다[4-5].

본 논문에서는 고온초전도 링결합기에 갈륨비소형 빔-리드 쇼트기 diode를 집적하고 저온 패키지에 내장한 후, 소형 진공챔버에서 작동하는 것을 확인한 칩바퀴(rat-race) 회로 방식을 채택한 고온초전도 단일 평형형(single balanced type) 집적믹서를 근간으로 하여 HTS-RF 모듈을 제작하고, 밀리미터파 대역용 RF-모듈 및 소형 쿨러와 결합시켜 서브-시스템화(국제표준랙)한 밀리미터파 대역용 고온초전도 다운-컨버터 서브-시스템의 특성을 보였다.

2. 고온초전도 집적믹서의 설계·제작 및 특성 평가

HTS/III-V 혼성 집적믹서는 칩바퀴 회로방식을 채택한 단일 평형형 믹서이다. 이러한 칩바퀴형 결합기를 중심으로 하는 집적믹서에는 DC-바이어스단, RF-단, LO-단 그리고 IF-단으로 구성되며, 각 端에는 기본소자(element device)가 있다. DC-바이어스단의 포트(sigma-port 및 delta-port)에는 갈륨비소(GaAs) 다이오드와 RF-초크 필터가 집적되고, RF-단에는 금(Au)패드가 도포되어 있으며 결합기의 한 가지(branch)와 연결된다. 국부발진기(local oscillator, LO)단에도 밀리미터파 대역용 마이크로스트립 DC-블럭이 있고 결합기의 다른 가지와 연결된다. 그리고 IF-단에는 빗살(Interdigital) 형태의 캐패시터(5 μm 선폭을 가짐)와 저역통과 필터가 구현되었다. 약 26 GHz에서 동작하도록 설계한 고온초전도 혼성 집적믹서 회로패턴을 그림 1에 나타내었다.

RF와 LO 단의 DC 블럭을 위해 결합선로(coupled-line)를 채택하였고 높은 주파수에서의 유전손실을 고려하여 MgO기판(유전율: 9.6, 두께: 0.5 mm)을 그리고 고온초전도 박막의 두께는

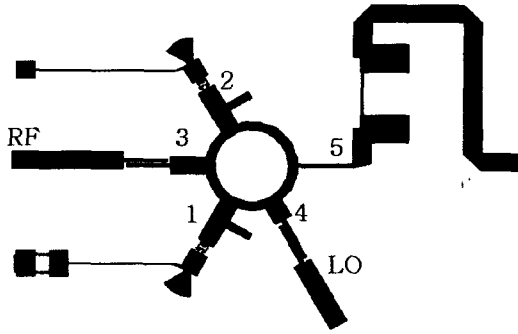


Fig. 1. HTS mixer pattern with a rate-race coupler

300 nm(표면저항: $0.5\mu\Omega$)로 하였다. 마스크 제작을 하고, 표준 광리소그래픽 공정과 RF 이온-밀링 공정을 통해, 고온초전도 집적믹서를 제조하였다. 고온초전도 YBCO 박막을 식각한 후, 저온패키지(cryo-package)에 부착된 K-커넥터뿐만 아니라 GaAs 빔-리드 다이오드와의 우수한 저항 접촉을 위하여 입·출력단(edges)에 패드용 이중금속박막(금(3000 Å)/Cr(10 Å))을 증착하였고, MgO 기판의 뒷면에는 접지평면용 3중 금속박막(금(3000 Å)/은($2\mu\text{m}$)/Cr (10 Å))을 DC-스퍼터링 장비로 증착하였다. 특히, 갈륨비소형 다이오드의 취급에는 설계와는 달리 상당한 주의가 필요하므로 현미경 하에서 본딩을 하였고 高負荷에 따른 손상에 특별히 유의해야 한다. 사용된 다이오드의 크기는 $0.2\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ 이고 전도성 접착제(epoxy: H20E)를 사용하여 140°C 정도에서 접착 시킴으로서 고온초전도 믹서를 제작하였다. 그림 3과 4는 측정된 칩바퀴 회로방식의 단일평형형 고온초전도 혼성 집적믹서의 고주파 특성중 변환손실과 RF 입력에 대한 IF 출력파워의 선형 응답특성을 나타내었다.

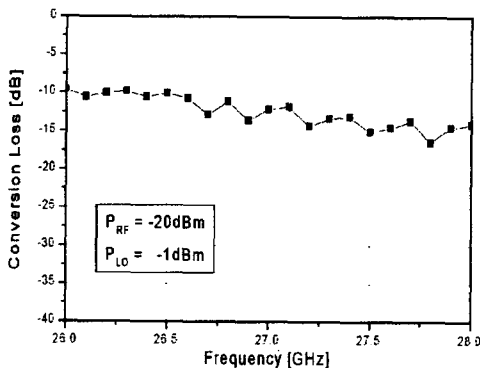
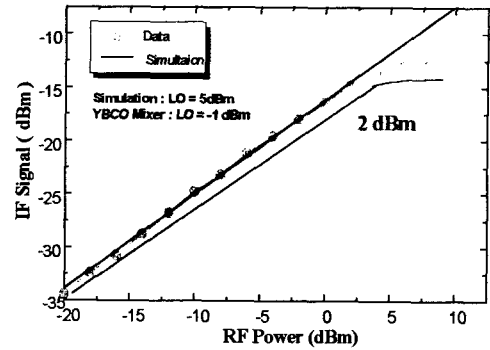


Fig. 2. Measured conversion losses of HTS/III-V integrated mixer

변환손실은 측정 주파수 대역에서는 6 dB 이내로 변화하였고 인가된 RF 입력파워는 -20 dBm , LO 입력파워는 -1 dBm 이었으며 출력되는 IF 신호의 주파수는 930 MHz 였다. 그리고 -40 dBm 에서 10 dBm 까지의 IF 신호의 출력파워가 보여

주는 선형응답을 RF 주파수 26.6 GHz 에서 측정하여 그림 3에 나타내었고 약 5 dBm 에서 1 dB 억압점(compression point)을 관측할 수 있었다.



@ $f_{LO} = 25.67\text{ GHz}$, $f_{RF} = 26.6\text{ GHz}$, $P_{LO} = -1\text{ dBm}$

Fig. 3. Linear Responses of IF output power for HTS/III-V mixer

한편, RF($=26.6\text{ GHz}$), LO($=25.6\text{ GHz}$) 그리고 IF(1 GHz)에서 측정된 IF의 크기(이득)를 그림 4에 나타내었다. 파란선은 금/크롬 이중박막형 집적믹서를 제작하여 측정된 이득이고, 赤線은 칩바퀴 회로방식의 고온초전도 집적믹서에서 얻은 측정결과이다. 강조되는 점은 배경잡음에 대해 고온초전도체를 이용할 경우, 상당한 특성향상($\sim 13\text{ dB}$)이 있음을 알 수 있으며, 고온초전도 집적믹서와 금/크롬 집적믹서의 신호대비 잡음비(SNR)는 각각 70 dB 와 35 dB 였다.

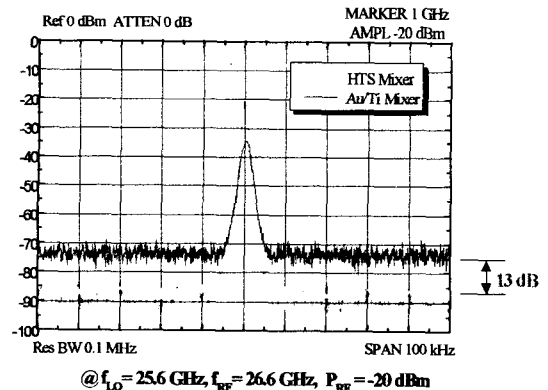


Fig. 4. IF-gain of HTS-mixer and Au-version measured

3. 고온초전도 다운-컨버터의 제작 및 특성 평가

밀리미터파용 고온초전도 다운-컨버터 서브-브-시스템 개발에 적용되는 부품기술은 저잡음 증폭기, 혼성 집적믹서, 여파기, IF 증폭기, 국부발진기 기술과 고주파 특성평가 기술 등으로 압축된다. 26 GHz 대역용 고온초전도 다운-컨버터를 구현하기 위하여 설정한 설계사양을 <표 1>에 나타내었다.

표 1. 밀리미터파용 고온초전도 다운-컨버터의 설계 명세

규격	MMW 통신
RF input frequency	26.5 GHz
IF output frequency	0.9 GHz
Noise figure	2 dB
Local oscillator frequency	25.6 GHz
L. O. leakage @IF port	- 40 dBm
L. O. leakage @RF port	- 40 dBm
Image rejection	40 dB min.
I.M.D.(2 tone)@P _{out} =0dBm	- 50 dBc
Third order intercept point	15 dBm
1dB gain compression point	5 dBm

본 연구팀에서 처음에 개발한 HTS 다운-컨버터의 개요도를 그림 5에 나타내었으며, 다운-컨버터에 대한 동작은 다음과 같다. 안테나로부터 수신된 26 GHz의 신호가 다운-컨버터에 입력되면, 입력신호는 다운-컨버터 내의 LNA에 의해 저잡음으로 증폭된다. 저잡음 증폭기는 특정 대역에서의 신호를 최소 잡음 전력으로 증폭시키는 역할을 하기 때문에 신호전력은 증폭되는 반면, 잡음전력은 대역제한(band limited) 되는 과정을 거치게 되므로 RF 신호의 신호 대 잡음비는 초단의 LNA에 의해 결정되며 전체시스템의 잡음특성을 좌우한다. 또한, 다운-컨버터는 RF 신호를 IF(intermediate frequency) 대역 신호로 변환하는데 필요한 신호전력 레벨을 제공하는 역할도 하게 된다.

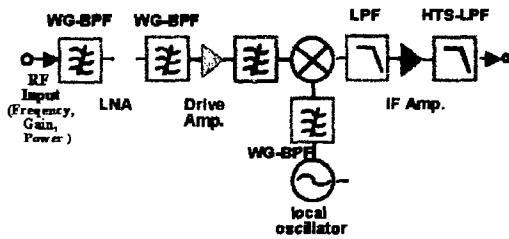


Fig. 5. Schematic diagram of HTS down-converter

RF 신호주파수는 26.5 GHz, 국부발진기 주파수는 25.6 GHz로 하여 두 주파수 성분이 주파수 혼합기(믹서)에서 혼합되고, 혼합기 내의 저역통과 여파기와 IF-단의 저역통과 여파기(차단주파수 : 0.9 GHz)를 통하여 IF 신호로 주파수 하향 변환된다. 주파수 혼합기 및 저역통과 필터를 거친 IF 주파수는 IF 증폭기에 의해 증폭되어 출력하게 된다.

그림 6에는 본 연구팀에서 개발한 그리고 초소형 냉각기(mini-cooler)가 결합된 고온초전도 다운-컨버터 서브-시스템(6(a))을 나타내었다. 제작한 고온초전도 혼성 집적믹서는 무산소銅으로 제작한 저온패키지에 내장하였고, 고온초전도 RF-모듈을 구성하기 위해 저역통과 필터와 함께 저온 헤드 위에 결합시켰다. 다시 소형 진공챔버

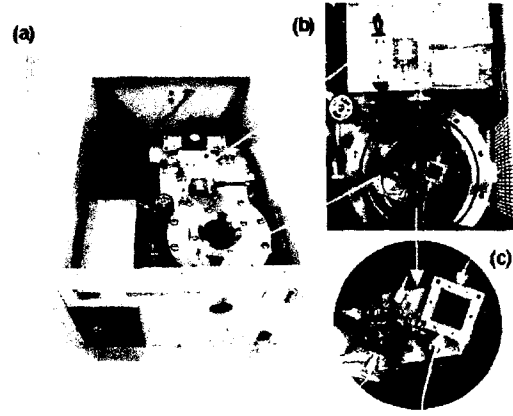


Fig. 6. (a)Photograph of the HTS down-converter sub-system, (b) RF- module and small vacuum chamber, (c) HTS RF-module

속에 초전도 모듈은 장착되고(그림 6(c)), 소형 진공챔버 내에냉각헤드(cold-head)를 위치시키는 소형 냉각기(Leybold 社)가 서브-시스템 내에서 결합된다. 소형냉각기를 통해 저온패키지는 70 K 까지 냉각하게 된다. 이러한 부품들 외에 냉각용 콤프레샤, RF-부품류(그림 6(b)), 냉각기의 제어 장치, 온도제어기 및 DC-전원장치들을 19-인치 국제 표준랙 내에 결합·조립하였다.

4. 고온초전도 다운-컨버터 서브- 시스템의 특성평가

고온초전도 집적믹서를 이용하여 다운-컨버터 서브-시스템을 구축하고 수신된 RF 신호를 IF 신호로 바꾸는 주파수 하향 변환을 측정하였다. 이 경우 RF 신호의 입력은 -61 dBm, 주파수는 26.5 GHz로 하였으며 LO 신호의 입력은 -1dBm, 주파수는 25.6 GHz로 설정하였다.출력 IF 신호의 주파수는 0.9 GHz이며 전력은 0 dBm을 갖도록 설계하였다. 그림 7은 위의 조건으로부터 고온초전도 집적믹서와 IF 증폭기 및 저역통과 여파기를 거친 최종 IF 신호를 측정한 결과를 보여주고 있다.

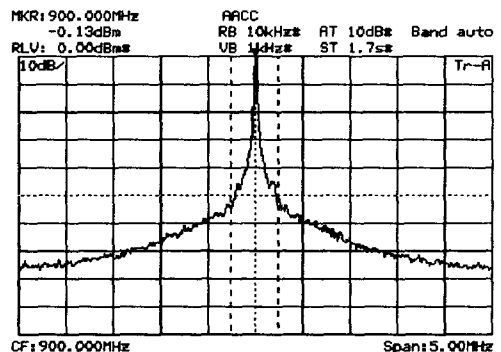


Fig. 7. IF output signal measured from HTS down-converter sub- system

고온초전도 다운-컨버터 서브-시스템의 잡음지수 측정은 직접 수행하지 못했으나, 동일한 조건 하에서 고온초전도 박막과 금(Au) 박막으로 제작한 집적믹서들의 고주파 특성을 측정한 결과, 고온초전도 부품이 신호 대 잡음비를 크게 개선할 수 있었다. 이러한 현상은 저역통과 여파기에서도 확연히 나타나는데 7-극 저역통과 여파기의 삽입 손실을 측정한 경우, 각각 0.2 dB(HTS-버전)와 3.2 dB (Au-버전)으로 측정되므로 고온초전도 부품이 우수한 특성을 가짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

고온초전도 수동소자와 고주파용 화합물(III-V) 반도체 diode(GaAs beam-lead diode)를 집적시킨 고온초전도 단일 평형형(single balanced type) 혼성 집적믹서를 이용하여 밀리미터파용 다운-컨버터(하향 변환기)를 개발하였다. 고온초전도 혼성 집적믹서의 사용주파수는 26.5 GHz이며 변환손실은 10 dB를 갖는다. 다운-컨버터는 LNA, 혼성 집적믹서, 공동(cavity) 대역통과 필터, 국부발진기, IF 증폭기와 저역통과 필터로 구성하였다. 측정결과는 -61 dBm의 RF 신호와 -1 dBm의 LO 신호입력으로 -0.13 dBm의 0.9 GHz의 IF 출력 신호를 얻었다. 이러한 고온초전도 소자와 화합물 고주파 소자의 집적은 저온에서 잡음특성과 손실특성을 향상시키므로, 향후 LMDS용 통신시스템 및 밀리미터파 통신 기지국의 핵심부품으로써 활용될 수 있다.

[감사의 글]

본 연구는 정보통신부의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1]Hamid H. S. Javadi, James G. Bowen, Daeil L. Rascoe, Rovert R. Romanofsky, Chris M. Choery and Kul B. Bhasin, IEEE Trans. on MTTs, vol **44(7)**, 1279 (1996).
- [2]Z-Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, C. F. Carter III, V. X. Nguyen, and D. B. Laubacher, Microwave and Optical Technology Letters, **6**, 732 (1993).
- [3]Z-Y. Shen, P. Pang, C. Wilker, D. B. Laubacher, W. L. Holstein, C. F. CarterIII, IEEE Trans on Applied Superconductivity, vol **3(1)** 2832 (1993).
- [4]Danil. N. Held, and Antohny. R. Kerr, IEEE trans of MTTs, vol **26(2)** 49 (1978).
- [5]Stephen A. Mass, *Microwave Mixer 2nd*, Artech House, INC., (1993).
- [6]Jeha Kim, Seok Kil Han, Kwang- Yong Kang and Dal Ahn, ETRI Journal, vol **19(2)**, 48 (1997).