

## Ka-band high- $T_c$ superconductor and III-V semiconductor hybrid balanced mixer

S. K. Han<sup>\*,a</sup>, M. H. Kwak<sup>b</sup>, J. D. Suh<sup>a</sup>, and Kwang-Yong Kang<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Telecomm. Basic Research Lab., ETRI, Taejon 305-350

<sup>b</sup> Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National Univ. Chin-Ju 660-701

**Abstract**

We demonstrated a single balanced mixer of the combination of high- $T_c$  superconductor (HTS) and III-V GaAs beam lead Schottky diodes operating in the mini-cryogenic chamber. The HTS hybrid mixer was designed with a center frequency of 27.5 GHz and a bandwidth of 1 GHz, and consisted of a rat-race coupler circuit with beam-lead diodes attached to its balanced ports. The HTS hybrid mixer with 1 GHz RF bandwidths exhibits a conversion loss of 6 dB. A LO-to-RF isolation was greater than 40 dB in the range of operating frequencies. Since the HTS/III-V hybrid mixer devices have lower noise and conversion loss, this technique provide us with new capabilities that can be effectively utilized in the field of local-point distribution service (LMDS) systems.

*Keywords: HTS/III-V GaAs hybrid mixer, Single balanced mixer*

**I. 서론**

고온초전도(HTS) 박막의 낮은 표면저항은 다른 초고주파 소자(실리콘, 화합물, 질화물)와의 집적을 가능케 한다. 따라서 마이크로 전자 소자 분야에서 하이브리드 마이크로파 집적소자(HMIC) 기술은 밀리미터파 통신시스템의 성능을 향상시키게 한다. 집적믹서의 경우, 통신시스템의 송·수신기에서 감도(잡음)와 성능을 좌우하는 핵심부품이므로 다양한 형태가 개발되고 있다. 특히, 저온에서 GaAs의 물성인 이동도가 증가하므로 GaAs 소재로 제작한 다이오드의 고주파 특성도 향상된다. 한편, 최근에 금속박막화, 고온초전도 에피박막화, 혼성집적 및 저온기술 등이 크게 진보함에 따라 HTS와 GaAs-diode의 혼성기술은 상당한 이점을 보여주고 있다. 특히, 밀리미터파 대역용 집적소자

는 소형화 뿐만 아니라, 저잡음, 저손실 등 고성능화를 특별히 요구하므로, 마이크로파용 전치부(front-end)에 사용할 수 있는 집적믹서로서 고온초전도 혼성 집적믹서의 중요성이 증가하

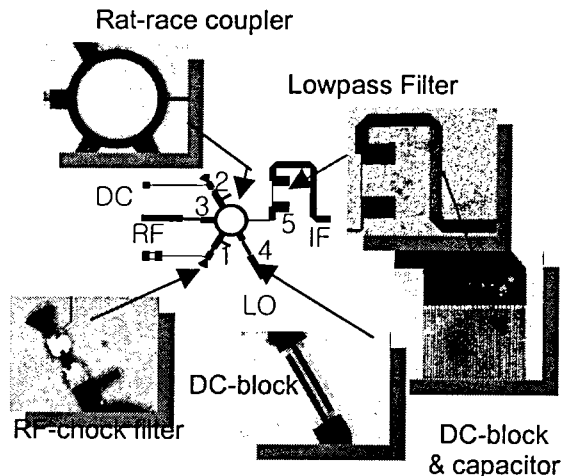


Fig. 1. A circuit layout for the HTS mixer. It consists of a rat-race coupler, filter, DC block and rf-choke.

<sup>1</sup> 한석길: Fax: +82 42 860 6836 ( 8pt)

e-mail: hansk@etri.re.kr

+ 한국전자통신연구원 근무 중

고 있다. 그리고 장수명, 고성능 및 초소형 냉각장치의 개발은 이러한 가능성을 더욱 높여주고 있다.

GaAs 빔리드(*beam-lead*) 쇼트기 다이오드는 실온에서도 우수한 잡음특성과 높은 차폐주파수 특성을 갖는데, 동작온도를 낮추면 포논과 불순물의 산란을 줄여 잡음특성을 향상시키므로 보다 나은 특성을 보여준다. 실험결과, 고온초전도 박막을 이용한 혼성 집적소자도 우수한 특성을 보이므로 저온소자(*cryodevice*) 개발에 매우 유리하다. 고온초전도 집적믹서 연구에는 소신호 모형에 적합한 비선형 다이오드인 조셉슨 접합을 이용하는 경우와 화합물 반도체 다이오드를 이용하는 방법이 주로 연구되고 있다. 전자의 경우는 일본에서, 후자의 경우는 미국에서 주로 개발되고 있지만 밀리미터파 통신시스템을 고려한 평형형 고온초전도 혼성 집적 믹서는 우리가 처음이다. 본 논문에서는 고온초전도 수동소자와 GaAs 빔-리드 쇼트기 다이오드를 집적하고 저온팩키지에 내장한 후, 소형 진공챔버에서 작동하는 것을 확인한 고온초전도 *rat-race* 형 집적믹서의 특성을 보인다.

## II. 고온초전도 집적믹서의 설계 및 제작

### 1. 집적믹서 설계

#### 1-1. 개관

고온초전도 집적믹서는 단일 평형형 *rat-race* 결합기를 중심으로한 구조이다. 원천소자(*element device*)로는 DC-바이어스용 포트(*sigma-port* 및 *delta-port*)에 두개의 갈륨비소 다이오드와 RF chock-필터를 가진 *rat-race* 형 결합기, 금속 패드가 도포되어 있는 RF-포트와 국부발진기 포트에 결합된 밀리미터파용 마이크로스트립 DC-블럭, 그리고 무손실 캐패시터( $5 \mu\text{m}$  선폭)가 부착된 저역통과 필터로 구성되어 있다. 27.5 GHz 에서 동작하도록 설계한 고온초전도 집적믹서 회로패턴을 <그림 1>에 나타내었다. IF-출력단에 저역통과 필터를 결합한 것은 낮은 주파수 신호의 역류를 방지하고, RF-신호와 LO-신호의 단락(*short*)을 방지하기 위함이다. 그리고 DC-블럭을 통해 RF 전력과 LO 전력의

격리도를 높였다. 설계시 높은 주파수에서의 유전 손실을 줄이기 위해 MgO 기판(유전율 : 9.6, 두께: 0.5 mm)을 고려하였고, 초전도 박막의 두께는 300 nm(표면저항 :  $0.5 \mu\Omega$ )로 하였다. 27 GHz 용 고온초전도 믹서와 IF 저잡음 증폭기의 설계목표는 다음과 같다.

(1) 단일 평형형 믹서의 변환손실은 5 dB 이하이고, (2) 순간적인 IF(0.1~6 GHz) 대역폭은 30 dB, (3) RF 대역폭은 기계적인 재튜닝없이 1 GHz, (4) 요구되는 국부 발진기의 파워는 10 dBm 이고 (5) LO/IF 격리도는 40 dB 이하이다. 제작할 각각의 요소소자(*element devices*)의 설계명세를 나타내기로 한다.

#### 1-2. Rat-race 결합기

그림 1에 나타난 *Rat-race*(*ring hybrid*) 결합기는 평면형(마이크로스트립)으로 설계제작하기 쉬운 180도 결합기이다. 기본구조는 대칭적 고리(*ring*)형이며,  $1.5\lambda$  의 전송선이다(27 GHz 에서). 이의 임피던스는 포트 임피던스의  $\sqrt{2}$  배이며 4개의 포트가 링 결합기에 연결되어 있으며, 2개 포트 간의 간격은  $0.75\lambda$  이고 다른 2개 포트간의 간격은  $0.25\lambda$  이다. 동시에 포트 임피던스는  $50 \Omega$ , *Rat-race* 결합기의 하이브리드 링의 임피던스는  $70.7 \Omega$  으로 설계하였다. 즉, 포트 3에 입사파가 들어오면 링 접합에서 두파로 분배되고, 포트 3에 대해 포트 1과 포트 2는 위상이 같고(*in phase* :  $0.25\lambda$ ), 4 포트의 경우 위상이 180도(*out of phase*)가 되어, 포트 4의 전압은 영이 된다. 따라서 포트 4의 종단 임피던스는 무한대가 되어 다른 포트(1, 2)에는 영향이 없게된다. 결국 입력 포트가 매칭이 되면 포트 4는 격리되고 입력 파워는 위상이 결맞은 포트 1과 포트 2로 나뉘어 진다.

#### 1-3 저역통과 필터

IF 단에 부착되는 저역통과 필터는 차단주파수 이상의 저지대역에서 감쇄를 크게하고자 한다. 따라서 마이크로스트립 오픈 스텐브(*open stub*)를 갖는 체비세프형 3-극 저역통과 필터를 설계하였으며, 차단주파수(*cutoff frequency*)를 10 GHz, 통과 대역의 삽입

손실이 0.1 dB 가 되도록 하였다. 이 저역통과 필터에는 선폭 5 $\mu$ m, 선폭간 겹 5 $\mu$ m, 총 길이 3 mm 가 되는 빗살형(interdigital) 캐패시터를 부착하여 삽입손실을 줄이고자 하였다.

#### 1-4 DC 바이어스와 RF/LO/IF 복귀회로

빗살형(interdigital) 캐패시터를 부착한 저역통과 필터로 구성된 IF 단은 RF 단 및 LO 단과 격리된다. 그림 1 에 보는 것과 같이, 집적 믹서를 구성하는 각 단에는 마이크로스트립형 DC-블록, IF-복귀회로, RF-쇼크 스티브 등이 필요하다. 즉, 단순한 마이크로스트립 결합선인 IF 복귀회로는 평행선 방식의 DC-블록보다 RF 및 LO 주파수에 대응되는 길이보다 길다(1.25  $\lambda$  정도가 되게 설계함). 따라서 IF 단은 단순한 칩 캐패시터를 사용할 경우보다 더 좁은 대역폭을 갖게 된다.

(RF-쇼크 스티브에 대한 설명이 요구됨)  
그림 1 에는 DC- 바이어스를 위한 공급 공간을 볼 수 있다.

#### 1-5. GaAs 빔-리드 다이오드

다이오드(쇼트키 다이오드, 조셉슨 접합 등)는 믹서의 핵심부분을 구성하기 때문에 믹서설계를 완성하기 전에 철저한 특성규명이 요구된다. 본 연구에서는 MBE 장비로 성장한 다중 금속막형 GaAs 빔-리드 다이오드(HP 사 제품)를 사용하였고 제시된 주요 명세로는 바이어스가 없을 때, 접합 캐패시턴스는 평균 40 fF 이고 DC 직렬 저항은 평균 6 $\Omega$  이었다. 믹서의 변환손실을 줄이고, RF-쇼크 스티브에 다이오드를 집적시키기 위하여 쌍곡선 기하학 기법과 AC 회로 모형[5]을 사용하여 매칭망 회로를 설계하였다.

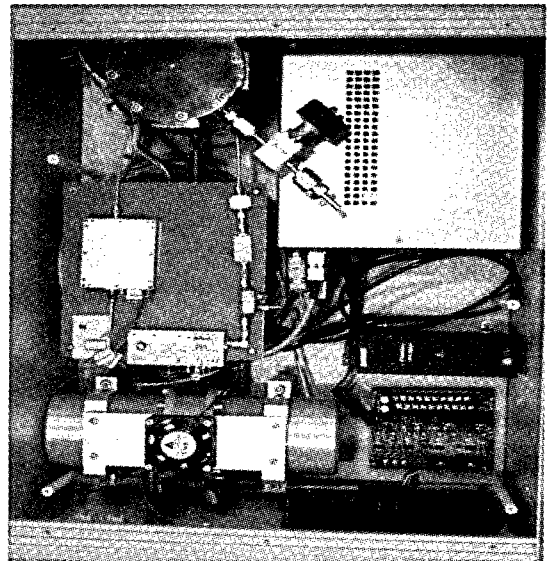
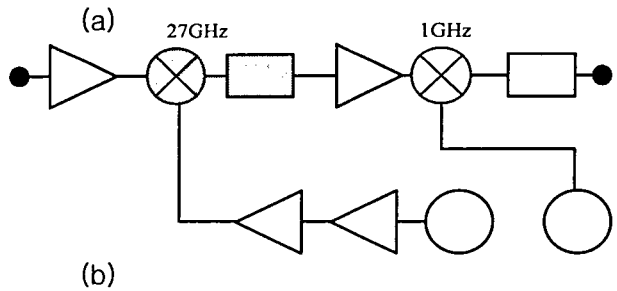
## 2. 박막성장 및 소자제작

### 2-1. 박막성장

*In-situ* DC 할로우 캐소드 스퍼터링 방법을 사용하여, 유전체 기판인 MgO 상에 고온초전도 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  (YBCO) 에피박막을 성장하였다. 사용한 기판의 두께는 0.5 mm 이고, 유전

상수( $\epsilon$ )는 9.8 이었다. 박막은 알곤과 산소의 혼합(1 : 1) 기체 분위기 속에서 증착되었고, 기판은 고온용 히터블록에 은접착제를 사용하여 부착하였으며 성장 온도는 780  $^{\circ}$ C 정도, 열처리 온도는 550  $^{\circ}$ C 정도로(1 시간) 유지하였다. 성장한 공논초전도 박막의 두께는  $\alpha$ -step 프로파일메타로 측정하여 약 4000 $\text{\AA}$ 임을 확인하였다. 박막의 특성인 임계온도와 임계전류밀도는 각각 87 K와 106 A/cm<sup>2</sup> 이상이었으며 온도에 따른 저항의 감소경향은 충분한 금속거동을 보여주었다.

### 2-2. 소자제조



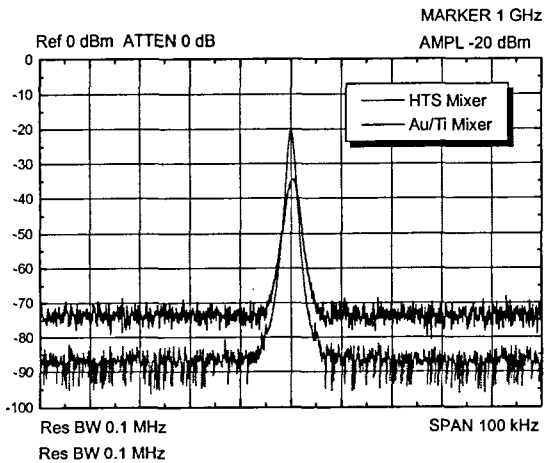
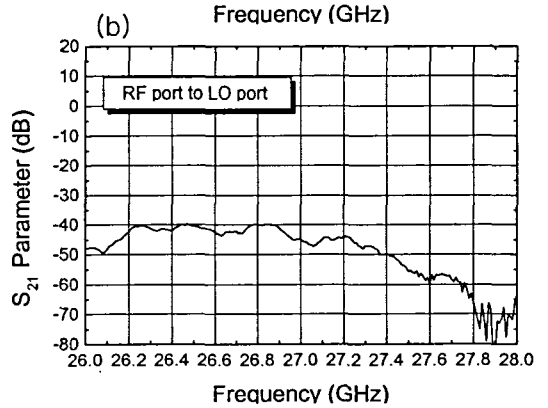
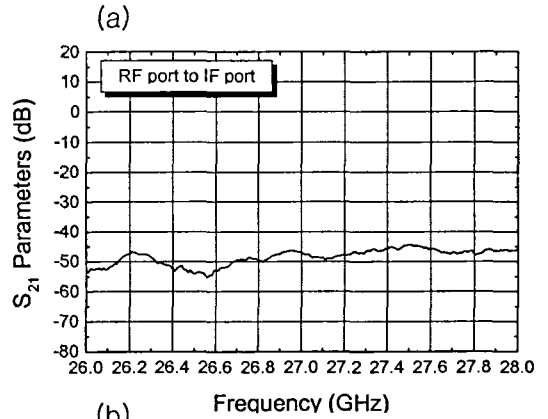
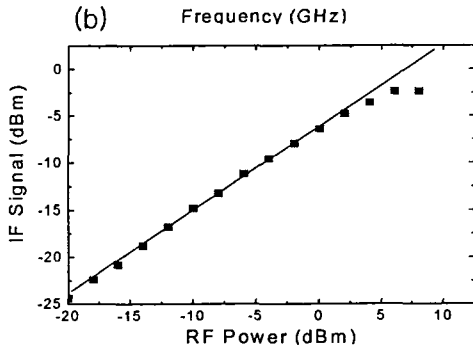
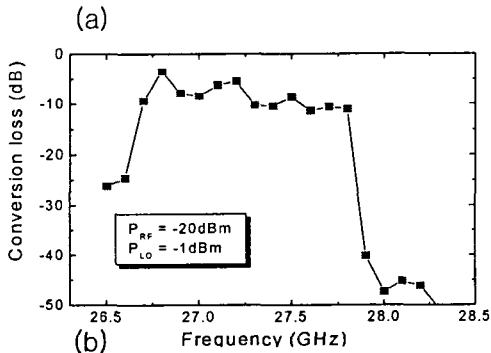


Fig. 5. (a) The isolation responses for the RF port to IF port, and (b) the isolation responses from the RF port to the LO port.

통해, 고온초전도 집적믹서를 제조하였다[6]. 고온초전도 YBCO 박막을 식각한 후, 저온 패키지에 부착된 K-커넥터와 그리고 GaAs 빔-리드 다이오드와 우수한 저항접촉을 위해 입·출력단(edges)에 패드용 이중 금속박막(금(3000 Å)/Cr(10 Å)) 증착하였고 MgO 기판의 뒷면에는 접지평면용 3중 금속박막(금(3000 Å)/은(2 μm)/Cr(10 Å))을 증착하였다. 이 경우에는 DC-스퍼터링 장비가 사용되었다. 다이오드 본딩(접착)에는 설계와는 달리 상당한 주의가 필요하므로 현미경하에서 다루어야 하며, 고부하에 따른 손상에 주의해야 한다. 사용된 다이오드의 크기는 0.2 mm x 0.6 mm 이고전도성 접착제를 사용하여 140°C 정도에서 접착시켰다.

표준 광리소그래픽 공정과 이온 밀링공정을

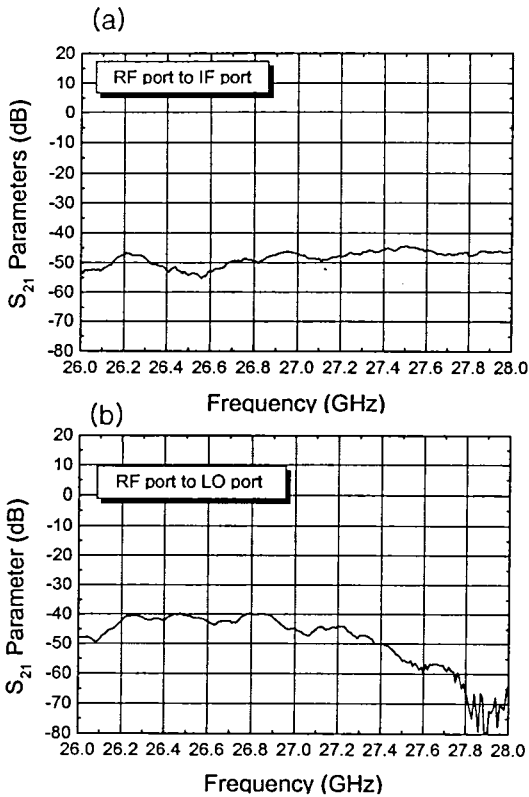


Fig. 5. (a) The isolation responses for the RF port to IF port, and (b) the isolation responses from the RF port to the LO port.

### 2-3. 믹서 서브-시스템 제작

그림 2 에는 본 연구팀에서 개발한 특히, 초소형 냉각장치가 결합된 고온초전도 믹서 서브-시스템을 나타내었다. 제작한 고온초전도 혼성 집적믹서는 무산소 동으로 제작한 저온패키지(시험치구)에 내장하였고 극한 조건에 견딜 수 있게 밀봉하였다. 시험치구는 3 부분(뚜껑, 하우징, 기저판)으로 구성되며, 기저판은 전기적 접지와 열접촉을 좋게하기 위해서이고, 하우징 자체에는 입력용(RF 및 LO) K-커넥터를 그리고 출력용(IF)으로는 SMA 커넥터가 삽입되었다. 집적믹서를 내장한 시험치구는 소형 진공 챔버 속에 다시 장착되고, 이러한 진공챔버에 같이 놓이게 되는 Stirling 냉각형 초소형 냉각기(Leybold 사)의 헤드와 접촉하게 되어 70

K 까지 냉각하게 된다. 그외에 냉각용 콤프레샤, RF-부품류, 냉각기의 제어장치 및 온도 제어기 그리고 DC-전원장치 등을 결합하여 19-인치 국제 표준랙(Rack) 내에 조립하였다. 조립된 믹서 서브-시스템의 크기는 170mm x 300 mm x 450 mm 이다.

### III. 결과 및 논의

고온초전도 믹서는 그림 2-2 의 개념도에서 볼 수 있듯이 밀리미터파 송·수신기용 Up/Down 변환기로 활용할 수 있다. 고온초전도 다운 컨버터를 고려할 때, 여기에는 고온초전도 집적믹서, 저잡음 증폭기(LNA), 체배기, 파워증폭기, 발진기(DRO) 및 여파기 등으로 구성된다. 따라서 기술력을 높이면 고감도/고성능의 밀리미터파용 고온초전도 송·수신기를 제작할 수 있다.

그림 3 에는 측정된 rat-race 형 HTS 집적믹서의 특성중 변환손실과 RF 입력에 대한 IF 출력 파워의 선형 응답특성을 나타내었다. 그림 (a) 를 통해 변환손실은 1 GHz 이상의 대역폭에 대해 4 dB 에서 8 dB 정도 변화하였음을 알 수 있다. 이 경우, RF 입력파워는 -20 dBm, IF 입력파워는 -1 dBm, IF 주파수는 930 MHz 이었다. 한편, -40 dBm 에서 10 dBm 까지의 선형 IF 응답을 RF 주파수 26.6 GHz 에서 측정하였는데, 그림 (b)에서 알 수 있듯이 5 dBm 에서 1 dB 억압점(compression point)을 관측할 수 있었다. 그림 4 로부터 알 수 있는 점은 다음과 같다. 도시한 곡선은 LO(=26.6 GHz) 및 RF(=27.53 GHz) 그리고 IF(930 MHz)에서 구한 IF 크기(이득)이다. 점선은 금/크롬 이중박막으로 제작하여 실온에서 측정된 집적믹서의 결과이고, 실선은 60 K 에서 측정된 rat-race 형 고온초전도 집적믹서의 측정결과인데 배경잡음에 대해 고온초전도체를 이용할 경우 큰 향상(13 dB 정도)이 있음을 알 수 있다. 한편, 고온초전도 집적믹서와 금/크롬 집적믹서의 신호대비 잡음비(SNR)는 각각 70 dB 와 35 dB 였다.

65 K 에서 측정된 주파수에 따른 LO 대 RF 격리도와 RF 대 IF 격리도의 결과를 그림 5 에 실었다. 설계 단계에서는 RF 단에 대한 LO 단의 길이를 최소화하기 위하여, 고온초전도 집

적믹서가 40 dB의 LO 대 RF 격리도 갖도록 설계하였는데, 실제의 측정에서는 LO/RF 격리도와 RF/IF 격리도는 각각 43 dB, 46 dB를 얻었다.

현재까지 개발된 고온초전도 집적믹서의 특성 비교는 표 1에 실었다.

#### IV. 결론

고온초전도 혼성 집적믹서의 RF 대역폭은 1 GHz가 되도록 제작하였으며 작동온도에서 측정된 결과 변환손실은 6 dB, LO/RF 격리도는 40 dB 이상이었다. 한편, 비교를 위해 제작한 금속 박막형 집적믹서에 비해, 초전도 혼성 집적믹서는 변환손실, 잡음비, SNR 및 격리도 등 전반적으로 우수하였음을 확인하였다. 표로써도 알 수 있듯이 본 연구팀의 고온초전도 혼성 집적믹서는 밀리미터파 통신 지구국용 핵심 부품으로 사용할 수 있으며 향후, LMDS(Local-point distribution service) 지구국용 뿐만 아니라 mm 이상의 주파수 대역을 고려한 통신 부품에 활용할 수 있다.

Table 1. The comparison of HTS hybrid mixer

	NASA [1]	DUPONT [2]	Ours mixer
Metal	Au/TiW	HTS (YBCO)	HTS (YBCO)
Active device	Si diode	GaAs diode	GaAs diode
Frequency	7.4 GHz	9.4 GHz	27 GHz
Conversion loss	5.5 dB	6 dB	6 dB
RF-IF isolation	40 dB	-	45 dB
Application	Satellite	Satellite	LMDS

#### <참고문헌>

- [1] Hamid H. S. Javadi, James G. Bowen, Dael L. Rascoe, Robert R. Romanofsky, Chris m. Choery and Kul B. Bhasin, "Jet propulsion Laboratory/NASA lewis researchg center space qualified hybrid high temperature superconductor/semiconducting 7.4GHz low noise down converter for NRL HTSSE-II program", *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, "High-Temperature Superconductor/III-V Hybrid Microwave Circuits", *Microwave and Optical Technology Letters*, 6, 732 (1993)
- [3]. Z-Y. Shen, P. Pang, C. Wilker, D. B. Laubacher, W. L. Holstein, C. F. Carter III, " High Temperature Superconductor and III-V Solid State microwave hybrid circuits", *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, vol 3, 1, 2832 (1993)
- [4] Danil. N. Held, and Antohny. R. Kerr, "Conversion loss and noise of microwave and millimeter wave mixer", *IEEE trans of MTTs*, vol 26, 2, 49 (1978).
- [5] Stephen A. Mass, " Microwave Mixer 2<sup>nd</sup>", Artech House, INC., (1993).
- [6] Jaha Kim, Seok Kil Han, Kwang-Yong Kang and Dal Ahn, "Temperature dependence of microwave properties of HTS multipole lowpass filters consists of microstrip open stub lines", *ETRI journal*, vol 19, 2, 48 (1997).