# 산화물 고온 초전도 Mixer

이상헌 교수 (선문대학교 전자공학과)

현재 사용되고 있는 무선 주파수대역은 급속도로 변혁하고 있는 정보화사 회로의 진입이라는 시대적 요구와 함께 필요한 주파수의 channel 폭과 channel 수를 확보하기 위하여 지속적으로 상승하고 있다. 마이크로파 주파수를 이용한 광대역 정보전송 기능의 눈부신 발전과 고도의 디지털 신호 처리 기술의 개발로 인하여 주파수 대역 압축이 가능하게 되었으며, 준 마이크로파 주파수 대역을 사용할 수 있게 되어 셀룰러 폰 등의 이동통신 매체, 마이크로파 대역의 전화회선, TV 중계회선, 위성 방송, 위성중계 등으로 급속도로 보급되고 있다. 무선 통신 주파수는 정보의 멀티 미디어화와 수요의 급증으로 인하여, 만성적인 주파수 부족현상을 불러와 사회적 문제로 대두되고 있다. 따라서 미래의 고도 정보화 사회를 염두에 둔 광대역 및 다수의 전송 channel의 확보가 시대적 요구로 나타나고 있다. 이러한 상황에서 현재 사용되고 있지 않은 무선 주파수 영역, 밀리파, 서브 밀리파, 적외선범위에까지 이르게 된 광대역 주파수영역 (이후 미이용 주파수 영역 이라고 한다.)을 이용한 새로운 통신방식의 개발이 요구되고 있다. 미이용 주파수 영역은 통신 분야뿐만 아니라 자원 탐색, 환경조사, 천문 관측 등의 리모트 센싱, 밀리파 화상처리에 의한 항공기 유도 및 X선으로는 검출이 불가능한 불심물의 발견 등에 있어서도 매우 유용하게 쓰일 수 있다. 이러한

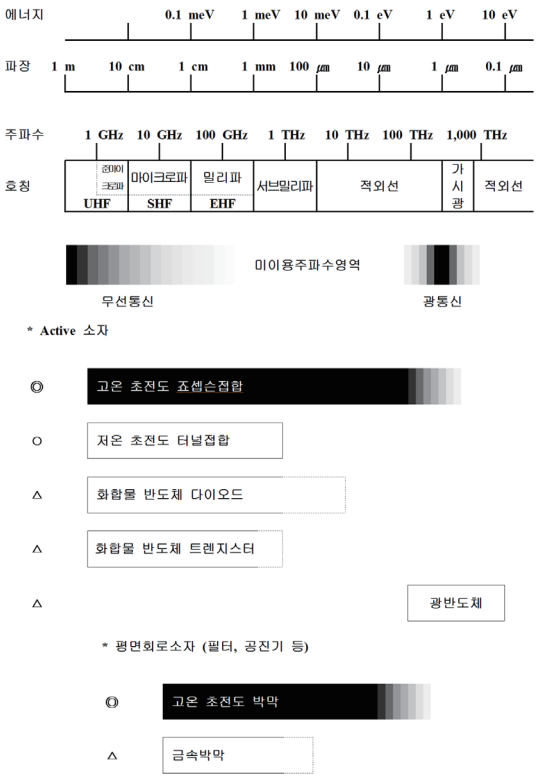



그림 1. 주파수 대역과 각종 device의 동작 범위 (◎: 최적합, ○: 적합, △: 곤란).

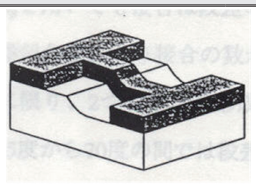
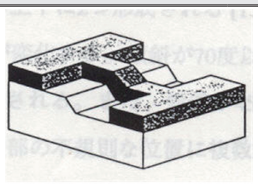
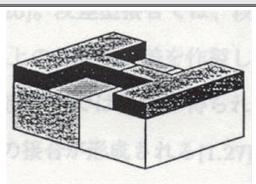
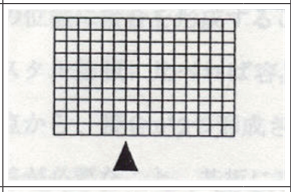
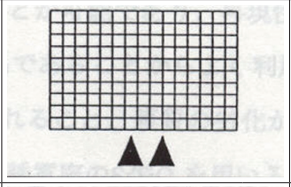
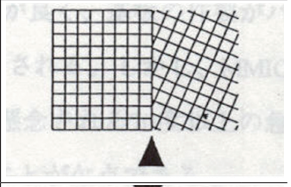
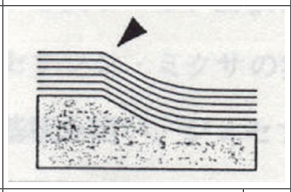
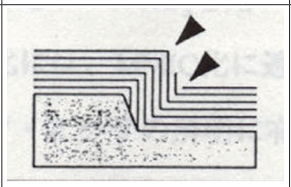
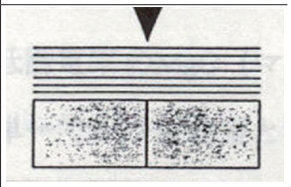
주파수영역의 개척으로 새로운 기술 분야의 대두가 기대된다, 상용무선 통신시스템의 사용 주파수 상한은 반도체 제품의 기술수준에 의존하므로 현재 실용화 되어 있는 30 GHz 이하의 마이크로파 대역이다.

최근 60 GHz 대역의 실용화 연구가 활발하게 진행되어, 높은 주파수까지 사용 가능한 현실이 다가오고 있다. 그림 1에 각 주파수대역의 사용 현황과 반도체 소자 및 초전도 디바이스의 동작 범위를 제시한다.

그림 1에는 주파수에 상응한 에너지대역도 함께 나타내었다. 반도체의 에너지 갭은 0.1 eV에서 수 eV 정도로서, 이에 맞는 주파수 대역은 광 반도체 소자이며, 현재 광통신에 사용되고 있다. 초전도체의 임계온도 (Critical Temperature, Tc)가 액체질소온도 77 K를 상회하는 고온 초전도체에서는 약 30 meV 이상의 에너지갭을 나타낸다. 에너지갭에 대응한 주파수 fg를 이용하여 고온 초전도체를 미이용 주파수 영역용의 고주파 소자로 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 미이용 주파수 영역을 사용하기 위하여 해결해야 할 중요 과제로는 Heterodyne 방식의 수신기에 필요한 고성능 주파수 혼합기 (mixer), filter, 공진기 등의 개발이다. Mixer 소자는 우수한 고주파 mixing의 변환효율 $\eta$ 과 우수한 잡음 지수가 요구된다. 또한, 높은 반송 주파수 및 다 channel을 확보하기 위하여 channel의 비대역폭이 축소되므로 급속 차단특성과 저손실의 filter와 국부발진 (LO)주파수의 정밀도와 저위상 잡음화에 필요한 고 Q 공진기가 필요하다. 초전도 박막을 이용한 고주파 디바이스는 수동소자 (filter, 공진기)와 능동소자 (Josephson 소자)의 마이크로 집적회로 (MMIC)에 유용하게 활용될 수 있다. 초전도체의 고주파 표면저항 Rs는 fg 이하의 주파수영역에서 금속보다 낮으나, 77 K에서 Tc= 92 K인 고온초전도체 YBaCuO [1]의 1 THz 영역에서는 이론적 [2]으로 Rs는 10 GHz 영역에서의 Cu의 Rs와 같은 정도이다. 금속과 비교하여 Rs가 낮은 초전도 박막을 이용하게 되면 금속의 도파관 입체회로와 필적할만한 성능을 지닌 초전도 평면회로가 실현된다. 고온 초전도체의 발견 이래로 평면회로의 수동소자인 filter, 공진기 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재, 급속한 차단 특성과 저 손실 기능을 지닌 신기능 filter 시제품이 제작되고 있으며, 고 Q 공진기, 지연선, 방향성 결합기 등의 우주 실험도 계획되고 있다 [3]. 초전도박막을 이용한 초전도 능동소자의 Josephson 접합 [4]은 fg에 도달하는 주파수 신호에 대하여 고속 및 비선형으로 응답이 가능하며 양자 잡음 한계에 달하는 저잡음 성능을 보유하고 있다. 이러한 특징을 이용한 Josephson mixer는 반도체 mixer와 근본적으로 서로 다른 동작 원리를 응용하고 있으므로 반도체 mixer에서는 달성할 수 없는 성능을 실현할 수 있다. Mixing의 원리는 반도체 mixer의 경우, 전류 전압 특성이 비선형인 점을 이용하여 mixing 할 수 있으나, Josephson 접합은 전류 전압 특성이 입력 신호파 (RF)에 대하여 비선형으로 변화하는 현상을 이용하고 있는 점에 있어서 크게 다르다고 할 수 있다.

Josephson mixer는 고조파 mixing에 있어서 zero bais 동작이 가능할 정도로 우수하며, 저잡음의 특성이 얻어지므로 국부 발진파의 소비전력은 반도체 Mixer와 비교하여 크게 감소할 수 있으며 증폭작용을 할 수 없는 반도체 diode에서는 실현 불가능한 변환이득 ($\eta$ 〉 1)을 얻을 수 있다. 저온 초전도체 (Tc 〈 77 K) mixer에서는 $\eta$ 〉 1의 값이 보고되고 있다. Josephson 접합의 전류 전압 특성이론이 복잡한 비선형이므로, Mixer의 동작의 해석에는 곤란이 따르며 고온 초전도체 특유의 짧은 corherence를 응용한 입계형 Josephson 접합의 제어가 어려우므로 고온 초전도 Josephson mixer의 실용화 연구는 어려움에 직면해 있다. Josephson mixer의 동작특성을 해석하기 위해서는 Josephson 접합을 직류 Josephson 효과에 의한 전류원과 교류 Josephson 효과에 의한 전압으로 표시된 RSJ (Resistivity Shunted Junction) 등가회로모델을 이용하여 직류전원 bias, RF

표 1. 대표적인 산화물 고온 초전도체의 입계형 Josephson 접합.

| 종류 / 항목 | | 경사형 단일접합 | | 단차형 접합 | | Bicrystal형 접합 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 접합 모식도 | |  | |  | |  | |
| 입계 모식도 | 상면도 |  | |  | |  | |
| | 단면도 |  | |  | |  | |
| 접합 수 | | 1 | ◎ | 2 or 복수 | × | 1 | ◎ |
| 재현성 | | 안정 | ◎ | 안정 | ○ | 기판재생후 안정 | ○ |
| 제작 | | 드라이에칭 | ◎ | 반응성에칭 | △ | 기판전 열처리 | × |
| 기판 가격 | | 저가 | ○ | 고가 | △ | 고가 | × |
| 형성 위치 | | 임의 | ◎ | 임의 | ◎ | 제한 | × |
| 유전율 (기판) | | Low (MgO) | ◎ | High ($SrTiO_3$) | × | High ($SrTiO_3$) | × |
| 단차 각도 | | 10도 이상 | ◎ | 70도 이상 | × | | |

전류원 및 LO 전류원으로 구동된 회로의 비선형 미분 방정식을 구하여야한다. Mixer 동작의 해석으로는 Josephson 접합의 소 신호 동작의 해석에 의하여 연구되었다. 결과물로서 규격화된 주파수 Ω RF≪1이 되는 조건에서 mixing을 하면 mixer의 변환효율이 향상되는 점을 알 수 있다. 이러한 신호 동작 해석에는 Josephson 접합에 의한 mixing 현상을 발생하는 점이 중요하다. 중간 주파수 (IF) 출력 신호의 발생과 관련 있는 메커니즘, Josephson mixer의 임피던스 성분 및 잡음 지수 등이 해명되어 있지 않은 관계로 회로 설계이론이 확립되어 있지 않다. 따라서 Josephson mixer의 실용화를 위해서는 접합의 대 신호 동작 (LO 전류원과 RF 전류원에 의한 구성)의 해석이 필수적이다. 한편 산화물 초전도체에서는 입계형 Josephson 접합의 연구가 주류를 이루고 있으나, 소자 응용을 염두에 둔 기판의 유전율 및 MMIC 화를 위한 회로설계 등을 위한 연구가 충분히 수행될 필요성이 있다. 따라서 소자 응용이 가능한 안정된 특성의 접합 제조기술 또한 시급히 해결하여야 할 과제로 인식되고 있다. 표 1에는 산화물 초전도체의 대표적인 Josephson 접합과 특징 및 mixer 소자로서의 적합성 등을 정리한다.

산화물 초전도체의 발견이래로 Bridge형, Epitaxial형 Edge형, Focus Ion Beam (FIB)형 등 많은 종류의 입계형 접합이 제안되어 왔으나, 제어의 곤란함과 낮은 재현성 등의 문제점을 표출하였다.

바이크리스탈형 접합은 동종의 기판을 서

로 다른 결정 방위를 갖도록 하여, 초전도 박막을 성장시키며, 기판의 경계 부분에 박막 내부로부터 경사를 가진 입계를 발생시켜. Josephson 접합을 제작한다. 따라서 기판 제작에 큰 어려움이 따르므로 가공이 끝난 기판을 구입할 필요가 있다. 재현성을 향상시키기 위하여도 기판의 전 처리 공정이 필요하다. 결정구조가 명확하므로 물리적 해석에도 흥미로운 접합이라고 할 수 있다. 접합을 자유롭게 제작할 수 없는 관계로 회로 설계의 효율이 저하되며 기판으로는 고유전율의 $SrTiO_3$를 사용하기 때문에 MMIC 제작이 어려운 문제점이 있다. 이에 반하여 단차형 접합은 기판의 표면에 etching을 하여 단차를 형성하여 가며 초전도 박막을 성장시킨다. 기판으로는 YBCO와 격자정합이 우수하며 저 유전율의 $LaAlO_3$기판을 사용하며 접합은 단차 상하에 2개가 제작된다. 이 접합은 단차부의 경사 각도에 따라 접합의 수가 변화한다. 70° 이상의 급경사 단차를 제작할 경우에 한하여 2개의 접합이 제작되며 45° 이하의 경사에는 접합을 얻을 수 없다. 45°에서 70° 부근에서는 단차부의 불규칙한 위치에서 복수의 접합이 제작된다. 임이의 위치에서 접합을 형성할 수 있으며 좋은 재현성과 기판이 바이크리스탈형과 비교하여 쉽게 제작할 수 있는 점에서 공업적 응용에 적합하다고 할 수 있다. MMIC의 관점에서 살펴보면, 접합이 2개 제작되는 점과 막질의 열화가 의심되는 70° 이상의 급경사의 단차가 필요한 점 등의 단점도 있다. 따라서 Josephson mixer의 실용화를 위해서는 MMIC화에 적합한 저 유전율의 MgO 기판을 이용하여 Josephson mixer 기능 향상에 유용한 단일구조, 위상차 및 전압관계를 정현파로 표시되는 이상적인 Josephson 접합의 제작 방법과 구조 해석이 시급하다고 할 수 있다.

## 참고 문헌


[1] M.K.Wu, J.R.Ashburn, C.J.Torong, P.H.Hor, R.L.Gao, Z.J.Hung, Y.Q.Qang and C.W.Chu, "Superconductivity at 93K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure", Phys.Rev.Lett., vol.58, pp.908-910, 1987.

[2] D.S.Linden, T.P.Orlandd and W.G.Lyons, "Modified two-fluid model for superconductor surface impedance calculation", IEEE Trans. Appl. Superconductivity, vol.4, pp.136-142, 1994.

[3] M.Nisenoff, J.C.Ritter, G.Prince and S.A.Wolf, "Space application of high temperature superconductivity", FED Journal, vol.3, Suppl. 1, pp.35-43, 1993.

[4] B.D.Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling", Phys. Lett., vol.1, pp.251-253, 1962.

[5] J.R.Tucker, "Quantum limited detection in tunnel junction mixers", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-15, pp.1234-1258, 1978.

[6] C.C.Grimes and S.Shapiro, "Millimeter-wave mixing with Josephson junctions", Phys.Rev., vol.169, pp.397-406, 1968.

[7] A.Yamaguchi, S.Kita and K.Fujisawa, "Noise conparision of baised and unbaised even-harmonic Josephson mixers", Electron. Lett., vol.9, pp.397-398, 1985.

[8] Y.Taur, J.H.Classen and P.L.Richards, "Josephson junction as heterodyne detecter" IEEE Trans., MTT-22, pp.1005-1009, 1974.

[9] Y.Taur, J.H.Classen and P.L.Richards, "Conversion gain in a Josephson effect mixer" Appl. Phys. Lett., vol.24, pp.101-103, 1974.

[10] S.Kita and K.Fujisawa, "Performance of Josephson junction harmonic mixers with harmonic numbers 1-8 at 70GHz", Jpn. J. Appl. Phys., vol.21, pp.497-503, 1982.

[11] S.Kita and H.Tanabe, "Millimeter wave detection by GBJJ using high Tc superconducting YBaCuO films", IEEE Trans. on Magn., MAG-25 pp.907-910, 1989

[12] D.E.M. McCcumber, "Effect of ac Impedence on dc Voltage-Current Characteristics of Superconductor Weak-Link Junction", J.Appl.Phys., vol.39, pp..3113-3118, 1968.
[13] P.Russer,"Influence of microwaves radiation on current-voltage characteristic of superconducting weak links", J.Appl.Phys., vol.43, pp..2008-2010, 1972.
[14] F.Auracher, T.Van Duzer, "Numeritical calculation of mixing with superconducting weak links", Proc.1972 Applied Superconductivity Conf.,ASC, pp.603-607, 1972.
[15] J.H.Classen, P.L.Richards, "Performance limits of a Josephson-juntion mixer", J.Appl.Phys., vol.49, pp..4117-4129, 1978.
[16] Y,Taur, "Josephson-junction mixer analysis using frequency-conversion and noise-correlation matrices", IEEE Trans., ED-27 pp.1921-1928, 1980.
[17] T.Konaka, M.Sato, H.Asano, S.Kubo, "Relative permittivity and dielectric loss tangent of substrate materials for high Tc superconducting film", Journal of Superconductivity, vol.4, pp.283-288, 1991.

## 저|자|약|력|

성 명 : 이상헌
◈ 학 력
· 1989년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학사
· 1991년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학석사
· 1994년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학박사

◈ 경 력
· 1994년 – 1997년 일본 초전도공학연구소 책임연구원
· 1994년 – 1997년 일본 東京電氣대학교 연구교수
· 1997년 – 현재 선문대학교 전자공학과 교수