

고온초전도체 전자소자 응용기술

기술해설

Applications of high Temperature Superconducting Electronic Devices

홍진표, 김종민, 지성길

(Jin-Pyo Hong, Jong-Min Kim, Sung-Gil Chee)

Key Words(중요용어) : High temperature superconducting filter(고온초전도 필터), Filter bank(필터뱅크), Phase-shifter(페이스 시프터), Antenna(안테나), Multiplexer SQUID(멀티플렉스 양자간섭장치), Sensor(센서), Three terminal device(3극간 소자).

1. 서론

액체 질소 온도이상에서 초전도성을 갖는 임계온도가 90K이상인 Y-Ba-Co-O($T_c=90K$), Bi-Sr-Ca-Cu-O의 산화물($T_c=110K$), Ti-Ba-Ca-Cu-O의 물질($T_c=125K$)의 발견은 전 세계적으로 많은 과학자들에게 영향을 미치었으며, 근래에 S.N. Putilin과 A. Schilling에 의해 임계온도가 최고 150K정도인 Hg-Ba-Ca-Cu-O 산화물초전도체 개발과 함께, 최근의 프랑스에서 임계온도가 250K 이상의 BiSrCaCuO 무한 층 화합물 박막제작 발표는 과학자들 사이에 지대한 관심과 더 높은 임계온도의 초전도체 개발에 대한 열망과 연구경쟁을 일으키어 왔다¹⁾⁵⁾. Fig. 1은 지금까지 개발된 초전도체들을 연도별 임계온도 상승곡선을 보여주고 있으며, 이러한 고온초전도체 물질의 발견은 산업 전반에 혁명을 가져올 수 있는 무한한 응용성 때문에, 학문적인 측면 뿐만 아니라, 종래의 디바이스와 개념이 다른 새로운 디바이스의 실현을 위해 electronics, communication, 반도체와 초전도 현상을 응용한 hybrid 디바이스 등 다양한 분야 소자를 개발하고자 많은 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 특히 마이크로 및 밀리미터 웨이브 주파수 영역을 사용한 위성탐제 장치의 핵심부품으로 고온초전도를 이용한 고성능의 소자들이 사용될 것으로 예측된다. 일반적으로 고온초전도체 응용연구는 크게 초전도체의 전기저항이 없다는 특성과 많은 전류 및 높은 자장의 자석을 제작하여 응용하는 bulk를 이용한 대규모 소자와 박막을 제작하여 전자공학적으로 사용하고자 하는 소규모 응용으로 구분하여 연구되어 왔으며, 조만간에 부분적인 분야에서 실용화가 예측되고 있다.

초전도체 응용에서 박막을 이용한 소규모 소자는 초전도체 박막의 low power dissipation, 저 손실, low signal distortion등의 장점을 이용한 이성

통신용 소자들 개발과 high detection sensitivity, fast switching speed, detection, high amplification의 장점을 이용한 고주파용 components(대체로 10-200GHz), 차세대 의료용으로 사용가능한 SQUID등에 연구가 중점되어 왔다. 따라서 본 고에선 현재 가장 활발히 연구되고 있는 고온초전도체 응용연구로서 주로 박막을 이용한 마이크로 및 밀리미터 전자 소자들을 분야별로 서술하고자 한다.

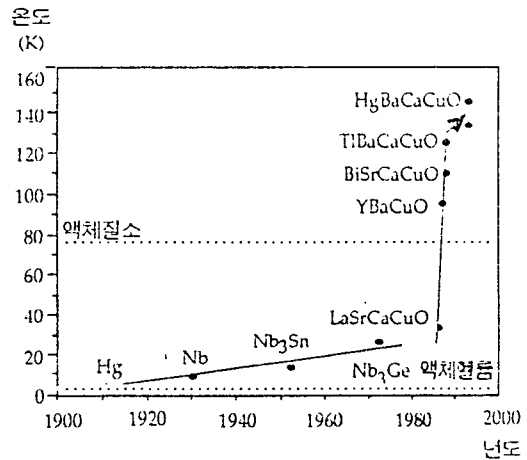


그림 1. 초전도체 임계온도 상승 곡선
Fig. 1. Curve of critical temperature.

2. 고온초전도체 수동소자

2-1. 전자소자 응용

고온초전도체를 이용한 소규모 소자는 주로 박막을 이용한 것으로서 크게 수동소자(passive device)와 능동소자(active device)로 구분하여 연구되고 있다. 박막을 이용한 전자 소자들을 개발하

기 위해서는 먼저 양질의 박막을 제작하고자 다양한 방법들이 시도 되었으며 많은 발전을 이룩하였다. 현재 가장 많이 사용하는 박막제조 방법으로는 Laser ablation, sputtering, 그리고 최근에 대면적 박막제조 방법으로서 co-evaporation 방법이 집중적으로 연구되고 있다. Table 1은 현재 고온초전도 박막제조 시 사용하는 시스템 및 특징들을 보여주고 있다.

표 1. 고온초전도 박막제조 방법과 특징
Table 1. Deposition techniques and their characteristics of high T_c superconducting thin films.

	SYSTEM	Characteristics
1	On-axis sputtering	-빠른 증착 속도 -여러 개의 target 사용 가능 -산소 분위기 및 in-situ 증착 -Resputtering effect
2	Off-axis sputtering	-Resputtering effect 없이 증착 가능 -주로 단일 target 사용 -산소 분위기 및 in-situ 증착 -slow deposition rate
3	MOCVD	-높은 면적 증착 용이 -기관 가열 용이 -대량 생산 가능 -박막 표면의 입자 생성 조절이 어려움 -precursor 물질이 알려져 있지 않음
4	Laser ablation (PLD)	-박막 조성 용이 -다층 박막 제작 용이 -증착 시간이 짧음 -대 면적이 어려움
5	Evaporation	-높은 면적 증착 용이 -여러 개의 source 사용 가능 -제조 공정 복잡 -증착 중 기관 가열 안함 -증착 후 열처리 필수

고온초전도 박막을 이용한 수동소자(passive device)는 초전도체의 적은 전력손실, 적은 표면저항, 적은 신호왜곡 등의 특성을 응용한 것으로 microwave 및 millimeter wave 영역의 고주파 소자제작에 가장 먼저 응용과 실용화될 것으로 기대되고 있다. 이 연구의 필요성은 마이크로 및 밀리미터 웨이브 영역에서 작동하는 전자소자의 수요의 증가, 소형 하에 따른 큰 에너지 손실 해결할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다. 예를 들면 현재 활발히 연구되고 있는 광섬유 network 시스템이 근본적으로 고정된 base-station이나 터미널들 간의 통신용 시스템이라면 마이크로파 시스템은 cellular 시스템과 같은 mobile 통신시스템에서 사용될 수 있는 분야이다. 그러므로 통신분야에서의 고온초전도박막의 응용은 낮은 표면저항과 자극적 insertion loss 등의 특성을 이용하여 고온초전도 공진기, 이를 이용한 oscillator, 필터 및 필터 bank, coupler, multi-plexer 및 duplexer, circulator 등을 개발하고 있으며, 궁극적으로 이러

한 소자들을 고온초전도 박막의 한 chip에 제작하고자 하는 연구가 진행될 것이다.

현재 고온초전도체를 이용한 전자소자 개발은 전 세계적으로 활발히 연구되고 있으며 그 중에서도 가장 대표적인 국가는 미국이다. 미국에서는 고온초전도 마이크로웨이브 소자들을 개별적으로 개발하여 위성통신용 소자로 이용하고자 우주에서 실험할 수 있는 HTSSE-I 과 HTSSE-II (High Temperature Superconductivity Space Experiment) 과제를 진행 중에 있다. 그러나 HTSSE-I과제는 사정상 지연되고 있으며 지금은 HTSSE-II 과제를 준비하고 있다.⁶⁻⁸⁾ Table 2는 HTSSE-I과제 관련 고온초전도 마이크로웨이브 소자 및 회사들을 보여주고 있다. 여기에서 알 수 있듯이 지금까지 고온초전도 마이크로웨이브 소자들은 공진기와 필터들이 주종을 이루고 있으며 가장 먼저 실용화가 될 것으로 예측되고 있다. 따라서 미국에서는 이 소자들을 이용하여 실용화 하고자 field 실험을 하고 있으며 예상 했던 대로 매우 우수한 특성을 보여 주고 있다. 그러므로 이 소자들은 특히 base-station설치시 기존의 소자들을 대체할 것으로 예측되고 있다. Table 3은 고온초전도 마이크로웨이브소자들을 이용한 subsystem 및 관련된 회사

표 2. HTSSE-I과제 관련 고온초전도 Microwave 소자 및 회사

Table 2. High T_c superconducting microwave devices and companies which are related to the HTSSE-I projects.

연구기관	Microwave devices
AT&T	YBCO ring resonator at 4.74GHz
DuPont	Thallium cased ring resonator at 4.9GHz
Ford Aerospace	Dielectric resonator with YBCO thin film
General Atomics	Coated cavity at 10GHz
High T_c Super	Bulk YBCO cavity at 10GHz
Honeywell	1X12 linear array YBCO IR colometer
Hughes Research Lab.	Six-pole YBCO filter at 9.6GHz
HYPPES, Inc	2phase YBCO delay line, 4GHz wide
ICI Composites	Thick film coated YBCO cavity at 5GHz
Lockeed Space and Missiles	Thallium based thermal isolator
MIT Lincoln Lab.	Six-pole 300MHz bandwidth filters at 4.7GHz
David Sarnoff Research	Four pole YBCO 50MHz 8.7 filter at 9.3GHz
TRW	YBCO end-coupled resonator at 10.4GHz
Westinghouse	Four-pole YBCO edge-coupled filter at 9.4 GHz
College of Williams	Electromagnetically coated cavity at 1.42GHz
Naval Research Lab.	Five pole edge coupled YBCO filter
Jet Propulsion Lab.	YBCO low pass filter with cut-off at 9.7 GHz
University of Wuppertal	YBCO patch antenna resonator at 5GHz
General Electronics	Coolanar YBCO resonator
Superconducting Tech. I	Thallium based ring resonator at 4.9GHz

표 3. 고온초전도 마이크로웨이브 소자들을 이용한 subsystem 및 회사

Table 3. Subsystems and companies of high T_c superconducting microwave devices

Company	Major design features	Devices
ConDev	4 channel input Multiplexer at 4GHz	Channelizers/filters
Westinghouse Science	4 channel filter at 4GHz	
Space Systems/Local	5 channel input multiplexer at 8GHz	
TRW	50GHz comm. receiver	Receivers
Lincoln Laboratory	Wideband cueing receiver > 20GHz chirp BW	
Naval Research Lab.	Hybrid 9GHz channelized receiver with 1:10 mixer	
NASA/JPL and Lewis Research Center	Low noise HTS/GaAs downconverter: 7->1GHz	
Conductus	Digital logic using Josephson junction	
Conductus	5 bit, 16MHz resolution, f _c =4GHz BW=500MHz	Digital IFM
TRW	Logic using SQUID	Digital Multiplexer
Westinghouse	40ns delay line	Delay line
University of Wuppertal & Siemens	Adaptive nulling design 4 elements f _c =5GHz	Antenna array
Naval Research Lab.	Measure space radiation effects on T _c Jc	HTS-material environmental effect monitor

표 4. 회사별로 개발중인 마이크로웨이브소자

Table 4. High T_c superconducting microwave devices at different companies.

연구기관	공진기	필터	Delay line	Antenna	Switch/Mixer
AT&T	●				
Argonne N/L		●			
Bellcore		●			
U. Birmingham	●	●		●	
COM DEV	●				
COMSAT		●			
E. I. Du pont		●			
FLBA	●				
GECC Marconi	●				
ICI	●			●	
INTERATOM				●	
Lincoln	●	●			
Naval weapon	●	●			
Northwestern	●				
T. U. Munchen	●	●			
NRL		●			
Rutgers Unversi	●	●			
Saitama	●	●	●		●
STI	●	●			●
TRW	●				●
Westinghouse		●			
C. Williams		●		●	
U. of Wisconsin				●	

들을 보여주고 있다. 미국에서 추진중인 HTSSE과 제와는 별도로 많은 연구기관들이 고온초전도체

수동소자들 활발히 연구하고 있는데 Table 4는 회사별로 개발중인 마이크로웨이브 소자들을 보여주고 있으며, Table 5는 연도별로 예측되고 있는 초전도 시장성을 보여주고 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 차후에는 고온초전도 전자공학 산업이 전체 초전도 산업시장의 40% 이상을 차지 할 것으로 예측하고 있으므로, 본 장에서는 전자공학의 가장 기초적이면서도 현재 가장 많이 연구되고 있는 고온초전도 마이크 및 밀리미터 웨이브 소자들을 개별적으로 설명하고자 한다⁹⁻¹⁰⁾.

표 5. 예측되는 초전도 산업시장

Table 5. Commercial market of superconductors.

종 시장규모 (억 달러)	연도별				대표적상품
	현재	2000	2010	2020	
	15	80-120	600-900	1,500 - 2000	
전자공학	-	23%	32%	46%	합류단, 마이크로로피 부품 및 장치
	에너지	-	15%	16%	18%
교통	-	9%	6%	9%	자기부상열차 전자기축진선박
	의료	100%	30%	24%	11%
기타		23%	22%	16%	자석, 자기차폐
합계	100%	100%	100%	100%	

2-2 마이크로웨이브 소자에 사용하는 기판

고온초전도 박막을 이용하여 마이크로웨이브 소자 제작 시 첫 번째로 고려해야할 사항은 기판 위에 양질의 고온초전도 박막이 제작되어야 하므로 적절한 기판을 선택해야만 한다. 기판 선택 시 첫 번째 조건으로서는 1)기판의 격자상수(lattice constant)가 사용하는 고온초전도 박막의 것과 잘 일치해야 하며, 2) thermal stress나 cracking의 영향을 줄이기 위하여 박막과 기판의 열팽창 계수(thermal expansion)의 차이가 적으며, 3)고온초전도 물질들이 대부분 perovskite 구조를 가지고 있으므로 같은 구조를 가져야 한다. 또한 4) 고온초전도 박막과 화학적 기계적, 물리적으로 유사해야 하며, 5) 고온초전도 박막이 일반적으로 oxygen의 양에 의해 특성이 변화하므로 화학적으로 산소의 양이 적어지는 것에 기판이 안정해야만 한다. 마지막으로 기판의 가장 중요한 선택요소는 기판의 유전율(dielectric constant)이 작아야 하는데 이는 고온초전도 마이크로웨이브 소자에서 기판에 의한 손실이 작아야 한다는 것을 의미한다. 그러므로 이상적으로 기판의 유전율은 2-20정도가 좋으며, 현재는 위에서 언급한 조건을 유사하게 만족하는 기판으로서 특히 고온초전도 박막과 crystal구조가

비슷한 SrTiO₃을 많은 연구기관들이 사용하였다. 하지만 이 기판은 유전율이 매우 높고 ($\epsilon > 300$), 온도가 증가함에 따라 매우 큰 값으로 변화하므로 고온초전도 마이크로웨이브 소자응용에는 적절하지 않은 것으로 알려져 있다. 하지만 이 기판은 SQUID 등과 같은 DC 응용 시에는 epitaxial 박막 제작이 가능하므로 현재 많이 사용되고 있다. 현재는 다른 기판의 선택으로서 유전율이 10정도인 MgO와 25정도인 LaAlO₃ 기판이 많이 사용되고 있다.¹¹⁾ Fig. 2는 현재 많이 사용되고 있는 기판의 특성들을 보여주고 있다.

그림 2. 고온초전도 마이크로웨이브 소자 제작시 사용하는 기판들

Fig. 2. Substrates for high T_c superconducting microwave devices.

재료	구조	격자상수	굴절률(×10 ⁻⁴)	유전율
SrTiO ₃	Cubic/Perovskite	a=3.92 Å	8.6	300
LaAlO ₃	Rhombohedral/Perovskite	a=3.75 Å	10	25/15
MgO	Rock Salt	a=4.21 Å	13.8	9.9
Al ₂ O ₃	Hexagonal	a=4.75 Å		9
YSZ	Cubic/Fluorite	a=5.16 Å	10	27
LaGaO ₃	Orthogonal P	a=5.55 Å	10.6	25
Si	Cubic/Diamond	a=5.43 Å	2.6	12

2-3 고온초전도 공진기: Resonators

고온초전도체로 제작된 공진기는 마이크로웨이브 electronics에서 가장 중요하면서도 단순한 소자에 속하며 일반금속의 공진기보다 같은 주파수, 같은 작동온도에서 실험적으로는 10-100배, 이론적으로 100-1000배 정도의 큰 Q-factor을 보여주고 있다. 이는 특히 고주파 영역 (microwave range)에서 작은 크기로 큰 효율성을 가지는 고온초전도 공진기의 제작 및 응용 가능성 의미하며, 가장 먼저 위상 잡음이 매우 작은 고온초전도 발진기에 응용하고자 고온초전도 마이크로웨이브 소자들 중에서 많이 연구되어 왔다. 고온초전도 공진기를 제작하기 위해서는 먼저 트랜스미션의 구조를 결정하여야 하는데, 트랜스미션 구조에 따라 standard microstrip, inverted microstrip, coplanar line, slot line, strip line, suspended strip line 등 여러 가지가 있다. 그러나 현재는 가장 많이 연구되고 있는 구조는 Fig. 3에서 보여 주듯 시 구조가 가장 간단하고 만들기 쉬운 standard microstrip line 구조가 가장 많이 사용되고 있다. 이 구조는 사용하는 기판 사이에 conductor line 과 ground plane을 포함

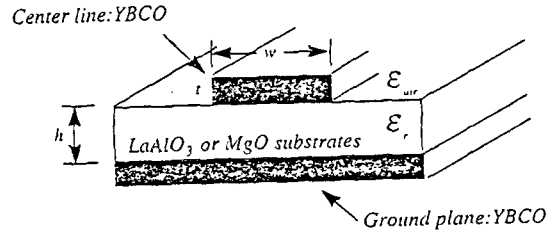
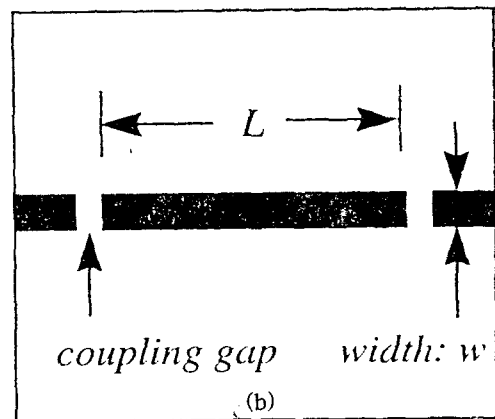
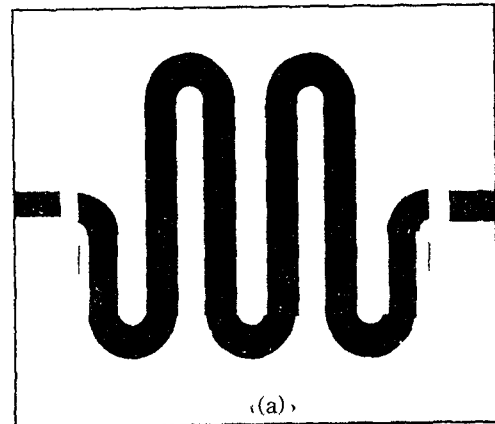


그림 3. 전형적인 마이크로스트립 라인구조
Fig. 3. Typical structure of microstrip line.

하고 있는 것으로서 line, ring, coplanar type들을 사용하여 필요로 하는 sub-system의 한 부품으로 이용하고자 한다. Fig. 4는 현재 기술원에서 연구한 microstrip line 구조를 이용한 공진기들을 보여주고 있다. 이러한 고온초전도 공진기의 제작은 소자로서 뿐만 아니라 고온 초전도체 박막 특성을 연구하는데 일반적으로 사용하는 cavity 방법으로 는 측정하기 어려운 주파수의 영역 (일반적으로 2-26GHz range)에서 고온초전도체의 에너지 갭,



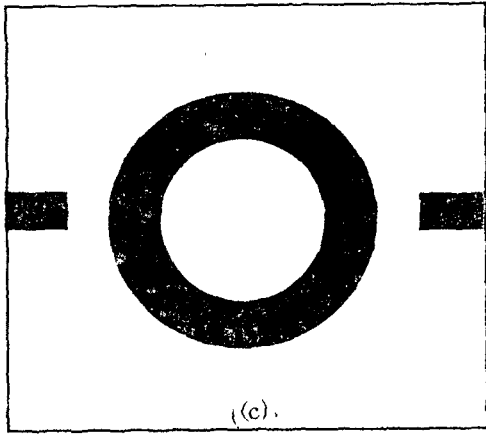


그림 4. 기술원에서 연구한 microstrip line 구조를 이용한 공진기들:

- (a) meander line, (b) line, and
- (c) ring resonators

Fig. 4. Resonators developed at SAIT by using microstrip line structures
(a) meander line, (b) line, and
(c) ring resonators

penetration depth, mean free path, 특히 마이크로 웨이브 소자 응용 시 가장 중요한 고온초전도체 박막의 표면저항 (surface resistance R_s)과 같은 물리적인 현상을 연구하는데 이용되고 있다¹²⁻¹⁷.

고온초전도 공진기는 Fig. 4에서 보여주듯이 주로 라인, meander line, 링 형태를 사용하는데, 특히 라인 공진기와 링 공진기는 공진 주파수를 결정할 시 서로 다른 electrical length를 고려해야만 한다. 즉 공진기들의 총 길이가 다음과 같은 관계식을 가지고 있다: 즉 먼저 라인 및 meander-line 공진기의 경우는 총 길이가 half-wavelength (electrical length=180)의 정수배가 되도록 다음과 같은 식을 이용하며,

$$L = n \lambda_g \frac{nc}{2f(\epsilon_{eff})}, \quad n = \text{integer} \dots$$

.링 공진기는 electrical length가 360도인 다음과 같은 식을 사용한다.

$$L = n \lambda_g \frac{nc}{f(\epsilon_{eff})}, \quad n = \text{integer} \dots$$

이 곳에서 L 은 공진기의 총 길이, n 은 정수배, f 는 공진 주파수, ϵ_{eff} 는 기판의 유전율이 주파수와 온도의 함수임으로 사용하는 주파수와 온도에서의 effective dielectric constant를 의미한다. 하지만

일반적으로 원하는 공진 주파수의 총 길이와 선폭을 결정하기 위하여 linecalc 및 여러 종류의 상업용 Cad 프로그램을 사용하고 있다. 공진기의 선폭은 기판의 두께에 따라 공진기의 임피던스와 관계 있으므로 일반적으로 측정 시스템과 임피던스 매칭이 되도록 50Ω 이 되게 하며, 공진기의 임출력단도 임피던스 매칭을 고려하여 50Ω 이 되게 한다. 하지만 때에 따라서 고효율 공진기 특성을 가지기 위하여 낮은 임피던스를 가지게 설계하고 있다. 마지막으로 공진기 설계시 중요한 요소 중의 하나인 공진기와 임출력단의 coupling gap은 일반적으로 over, optimum, under coupling이 있는데 최적의 조건을 얻기 위하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 결합적으로 결정하는데, 일반적으로 고온초전도 소자를 개발하기 위해서는 공진기 설계와 같이 산화물 초전도 박막을 기판 위에 epitaxial하게 성장시켜야 할 뿐 아니라 절연층 또는 barrier 층 위에서도 epitaxial 하게 성장시키는 다층 막 제작기술이 필요하고, 고온초전도체는 반도체 회로 설계와 근본적으로 다른 방식을 이용함으로써 설계기술의 확보가 매우 중요하다. Fig. 5는 전형적인 고온초전도 공진기를 측정하기 위하여 저온에서 열과 전기 전도율이 좋은 OFHC (Oxygen Free Highly Conductivity)재질로 만든 package를 보여주고 있다.

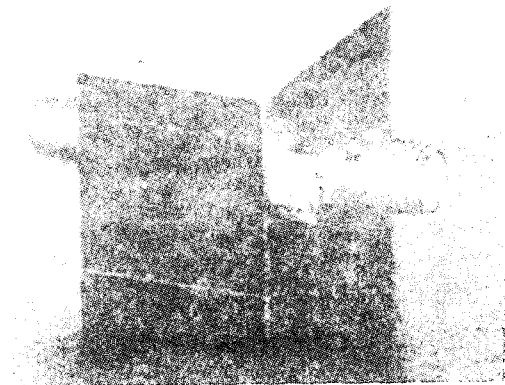


그림 5. 전형적인 고온초전도 공진기 package
Fig. 5. Typical package of high T_c superconducting resonators.

고온초전도 공진기를 패터닝하기 위해서는 고온초전도 박막을 에칭 할 때 일반적으로 많이 사용되는 습식 설루션을 이용한 standard photolithography 방법을 사용하였는데 본 고에서 서술

한 공진기는 Fig. 6 에서 보여주고 있는 방법을 사용하였다. 먼저 1)1350J Photoresist를 이용하여 고온초전도 박막에 30초 동안 스핀 코팅한다. 2)설계된 크롬 마스크와 aligner를 이용하여 스핀 코팅된 박막에 exposure한다. 3)AZ-400 developer를 이용하여 박막을 developing 한다. 4)초전도 박막 etching solution인 H3PO4를 이용하여 에칭한다. 5)불필요한 photoresistor를 아세톤을 사용하여 제거한다. 이와 같은 방법을 이용하여 공진기의 센터 라인을 만든 후 자체 제작된 테스트 fixture에서 공진기의 특성을 평가한다. 또한 공진기의 ground plane은 테스트 fixture와의 접촉을 좋게 하기 위하여 기판의 반대편과 측면에 5000Å정도의 두께로 금을 증착한다.

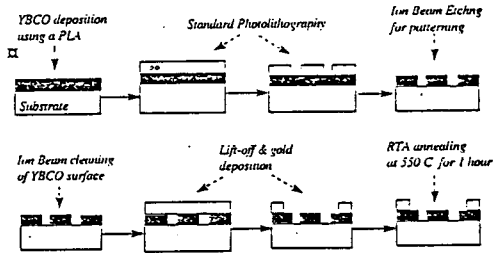


그림 6. 전형적인 고온초전도 박막 patterning process.

Fig. 6. Typical patterning process of high T_c superconducting thin films.

Fig. 7은 500um 두께의 LaAlO₃ 기판 위에 증착된 YBCO 박막으로 이용하여 공진 주파수가 450MHz인 meander 라인 형태공진기의 전형적인 실험 데이터를 보여주고 있다. 고온초전도 공진기 측정은 일반적으로 외부의 영향을 줄이기 위해 8510 network analyzer를 상온에서 calibration한 후 사용하는데 Fig. 7은 온도 20K와 주파수 450 MHz에서의 전형적인 fundamental 모드의 트랜스미션 데이터를 보여주고 있다. 위에서 언급한 대로 공진기를 이용하여 고온초전도체의 물리적 현상 즉 표면저항 (R_s) 을 계산하기 위해서 일반적으로 reflection data 와 트랜스미션 데이터의 두 가지 방법이 사용되고 있는데 이 곳에서는 계산하기 쉬우며, 많이 사용되는 트랜스미션 데이터 방법을 서술하고자 한다. 먼저 공진 주파수의 3dB 밑에서 loaded Q-factor(Q_L)와 공진 점에서의 삽입손실 (insertion loss= IL)을 측정한 후 다음과 같은 식으로 공진기의 unloaded Q-factor(Q_U)를 계산하며

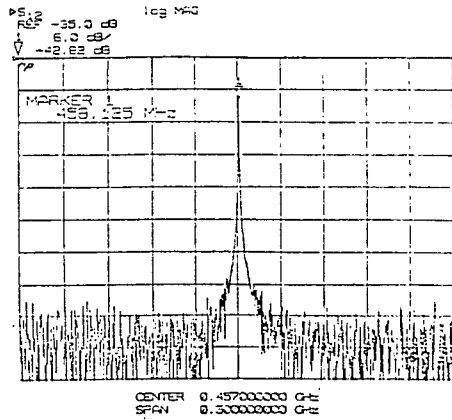


그림 7. 전형적인 공진기의 transmission data.
Fig. 7. Typical transmission data of resonator.

$$Q_U = \frac{Q_L}{1 - S_{21}}, \quad S_{21} = 10^{IL/20}$$

일반적으로 마이크로스트립 라인형태의 공진기는 unloaded Q-factor와 total attenuation coefficient (α_T)가 다음과 같이 관계 있으며,

$$Q_U = \frac{8.686 \pi L}{\lambda_g \alpha T}$$

여기서 αT 는 총 attenuation 손실, L은 링 공진기의 총 길이, 그리고 λ_g 는 guide wave length나타낸다. 위의 식으로부터 계산된 총 손실 (α_T)는 일반적으로 다음과 같은 4가지 요소들을 구성되어 있다고 고려할 수 있다. 즉.

$$\alpha_T = \alpha_c + \alpha_d + \alpha_r + \alpha_s$$

여기서 각각의 부분은 마이크로스트립 구조에서 가질 수 있는 모든 손실을 고려한 것으로서 α_c 는 conductor 손실, α_d 는 기판손실, α_r 는 방사손실, α_s 은 surface 손실을 의미한다. 하지만 저주파 용 공진기에서 방사손실과 surface 손실은 공진기가 closed 루프형태를 형성하고 있고, 사용하는 주파수의 영역이 작기 때문에 무시할 수 있다. 그러므로 전체적인 손실 중에서 conductor 손실과 기판의 tangent loss에 의한 유전체 손실만을 고려할 수 있다. 기판의 손실은 기판의 geometry와 dissipation 전력에 의해서 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\alpha_d = 23.7 \frac{\epsilon_r (\epsilon_{eff} - 1) \tan \delta}{\epsilon_{eff} (\epsilon_r - 1) \lambda_g}$$

따라서 총 손실에 대한 conductor 손실을 계산할 수 있다. conductor 손실을 계산한 후에는 다음과 Pucel¹¹⁾의 관계식에 의하여 고온초전도 표면저항을 구하는 데¹⁸⁻¹⁹⁾,

$$4\pi^2 Z_0 \alpha_c = R_s A (2B + C) Q_U \lambda_g$$

$$W = W + \frac{1}{\pi} (I_n (2h/t) + 1)$$

$$A = 1 - \frac{W^2}{16h^2}$$

$$B = \frac{1}{h} (1 - \frac{t}{\pi W})$$

$$C = \frac{2}{W} (1 + \frac{1}{\pi} \ln (\frac{2h}{t}))$$

이 곳에서 Z_0 은 마이크로스트립 라인의 특성 임피던스, t 는 초전도 박막의 두께, h 는 기판의 두께, Q_U 는 공진기의 unloaded factor, λ_g 는 guide wavelength이다. 위의 식을 이용하여 그림 7의 공진기의 표면저항을 계산하면 온도 20K, 주파수 450MHz에서 8000정도 였다. 이 값은 같은 기판 위에 제작된 금으로 제작된 공진기의 Q-factor ($Q_L=200$)보다 18배 정도 우수함을 보여주며, 고온초전도체의 표면저항은 약 0.5mΩ 정도가 된다. 현재 고온초전도 공진기 연구는 대체로 주파수 별로 고온초전도 박막의 표면저항을 측정하는 것과 개발한 공진기를 이용한 발전기연구가 많이 진행되고 있으며, Fig. 8은 다른 연구기관에서 연구중인 dual-mode 형태의 공진기를 보여주고 있다.

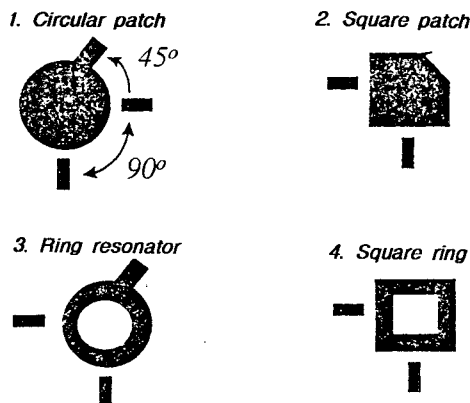


그림 8. dual mode 형태의 고온초전도 공진기
Fig. 8. Dual mode type resonators fabricated by high T_c superconducting thin films

2-4 고온초전도 여파기:Filters

현재 전 세계적으로 가장 활발히 연구되고 있는 연구분야는 고온초전도체의 필터 연구인데 이는 고온초전도 필터가 현재 사용되고 있는 위성통신에서 고 효율의 channel수를 크게 증가시킬 수 있으며, 주파수의 영역 면에서 고주파 영역인 terahertz의 범위까지 가능할 것으로 예측되고 있기 때문이다. 일반적으로 대 영역 통신 시스템 등에서 여파기를 사용할 때는 전 대역을 한번에 사용하지 않고 협 대역에서 필요로 하는 신호들만 선택하고 다른 주파수 영역의 신호들을 조절 가능한 필터 बैं크를 형성하여 사용한다. 그러나 현재 위성통신 등에서 사용하고 있는 cavity-type 필터들은 규모가 매우 크며, 삽입손실이 매우 크기 때문에 정확하고 명확한 신호의 전달에 문제가 크므로 차세대 통신용 필터 및 필터 बैं크 등은 초전도체로 제작하는 것이 매우 유리하다. 또한 고온초전도 필터를 개발하면 현재 이용되고 있는 위성통신 시스템 증량의 70%정도를 줄일 수 있을 것으로 예측되고 있다. 따라서 본 장에서는 통신 시스템의 base-station용으로서 PCS (Personal Communication Services)를 목표로 연구중인 고온초전도 마이크로파 소자중의 하나인 고온초전도 필터에 대해서 서술하고자 한다.²⁰⁻²⁴⁾

일반적으로 필터의 종류는 구조적인 관점에서 passive와 active 필터로 구별되며, passive 필터에는 lumped and distributed 필터로 구별된다. 주파수 관점에서 필터는 저주파 영역에서만 신호를 통과시키고 나머지는 금지시키는 low-pass 필터, 이와 반대되는 high-pass 필터, 일정한 주파수 영역만 신호를 통과시키는 band-pass 필터, 이와 반대되는 band-rejection 필터 등이 있다. 이 중에서 현재 고온초전도체로 많이 연구되고 있는 필터는 low-pass, band-pass 필터가 있으며, 특히 band-pass 필터는 고 효율의 협대역 필터로서 사용가능함으로 대부분의 고온초전도 필터연구는 이 분야에 집중되고 있다. 고온초전도 필터 개발은 여러 종류의 형태가 있지만 가장 많이 연구되고 있는 것은 사용된 주파수의 $\lambda/4$ 정도의 길이와 50Ω 임피던스의 특성을 갖고 있는 공진기가 평행으로 구성된 parallel-coupled 필터이다. Fig. 9는 기술원에서 연구한 전형적인 고온초전도 parallel-coupled 필터의 단면을 보여주고 있다. 이를 기초로 하여 제작한 3-pole 필터는 Fig. 10에서 보여주고 있으며 실험 data는 Fig. 11에서 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 고온초전도 박막으로 제작한 필터의 삽입손실은 매우 작으며 또한 같은 구조의

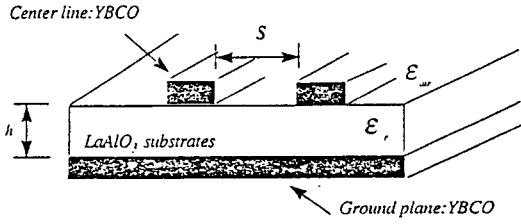


그림 9. 전형적인 고온초전도 parallel-coupled 필터의 단면

Fig. 9. Typical crosssection view of high T_c superconducting parallel-coupled filters.

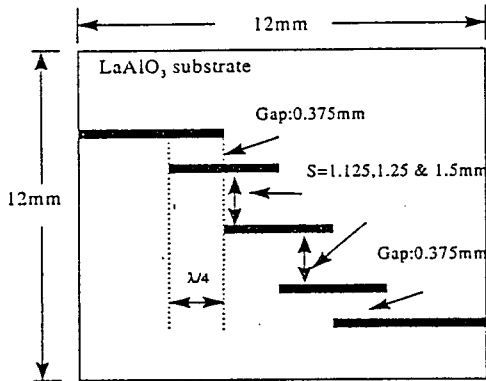


그림 10. 전형적인 고온초전도 3-pole parallel-coupled 필터

Fig. 10. Typical high T_c superconducting 3-pole parallel-coupled filter.

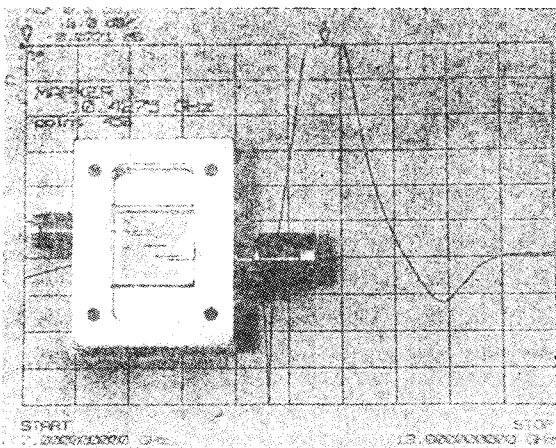


그림 11. 고온초전도 3-pole parallel-coupled 필터 실험 data

Fig. 11. Experimental data of high T_c superconducting 3-pole parallel-coupled filter.

일반 금속보다도 skirt특성이 매우 뛰어난을 알 수 있다. 고온초전도 필터분야는 여러 가지 구조들이 많이 연구되고 있으며 현재는 필터들의 high power capability를 검사 및 실질적으로 외부에서 filed test를 하고 있다. 예로 미국의 conductus사와 STI회사는 고출력의 890MHz 급과 2-3GHz급의 필터 및 필터-bank를 개발하여 저온시스템과 함께 실험중에 있으며, 또한 미국의 Ameritech 통신회사에서는 고온초전도 필터를 4곳의 지상국에 설치하기로 결정하였다. Fig. 12는 캐나다 ISTC(Industry Science and Technology Canada)에서 개발한 Chebyshev와 quasi-elliptic 기능을 가지고 있는 dual mode 형태의 필터를 보여주고 있으며 Fig. 13은 미국의 STI(Superconducting Technology, Inc)에서 개발한 광학적으로 조절이 가능한 prototype의 band-rejection 필터를 보여준다. Fig. 14는 미국의 Westing house에서 개발한 4-channel 필터 뱅크를 보여주며 이러한 필터 bank들은 최근에 multiplexer나 duplexer에 많이 응용연구되고 있다.²⁵⁻²⁶⁾

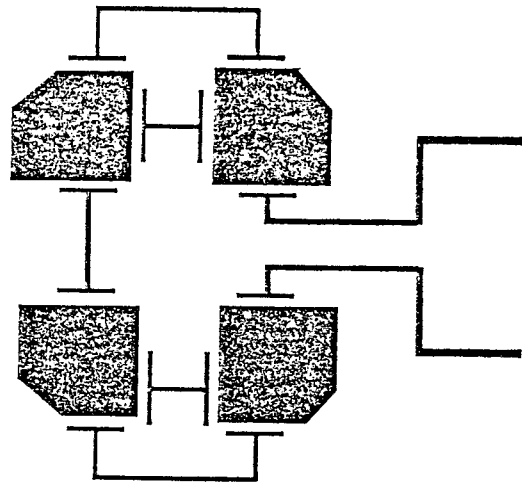


그림 12. dual mode 형태의 필터

Fig. 12. Dual mode type filters.



그림 13. STI(Super conducting Technology, Inc.) 의한 band-rejection 필터

Fig. 13. Band-rejection filters developed at STI(Superconducting Technology Inc.)

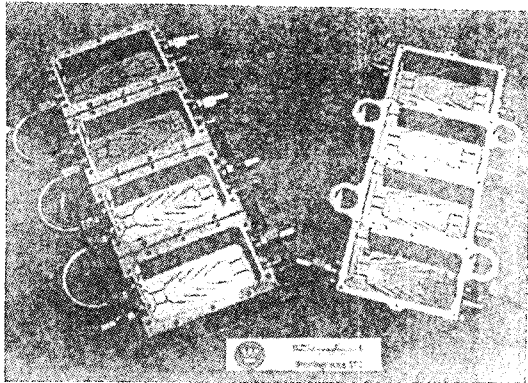


그림 14. Westinghouse에 의한 4-channel 필터뱅크

Fig. 14. 4-channel filter bank developed at Westinghouse.

2-5 고온초전도 delay-line

전자소자가 고밀도 함에 따라 각 부품들은 작아지는 반면 interconnection의 특성들은 저하되는데, 예를 들면 소자의 크기가 작아짐에 따라 커패시턴스는 같은 양만큼 작아지고, 따라서 소자의 응답속도가 같은 양만큼 늦어진다. 또한 interconnection line의 저항이 늘어남에 따라 라인들의 손실이 매우 커지는 결과가 초래한다. 따라서 이러한 문제점들을 차세대에 극복하고자 고온초전도체를 이용한 트랜스미션 라인 연구가 진행되고 있다²⁷⁻²⁹⁾. 고온초전도 라인들은 소자들을 고밀도 시 라인들 사이의 cross-talk을 줄일 수 있으며, 주파수 영역은 고주파 영역인 terahertz 범위까지 명확하고 정확한 신호들의 전달이 가능할 것으로 예측하고 있다. 또한 이 연구의 한 방편으로서 신호들을 원하는 시간만큼 지연시켜주는 delay 라인들을 미국의 고온초전도 전문회사의 하나인 STI회사에서 20ns 및 100ns 개발하여 안테나와 함께 서브시스템을 제작하여 미국 국방성에 납품하고 있다. 제작한 delay 라인들을 bank식으로 연결하여 delay 시간을 더욱 늘리는 연구가 진행되고 있으며, Fig. 15는 LaAlO₃ 기판 위에 strip 라인형태로 제작한 delay 라인을 보여주고 있다.

2-6 고온초전도 Phase shifter

Phase array antenna 시스템 등에서 필수적인 phase shifter는 크게 아날로그와 디지털 형태로 구분될 수 있는데 본 장에서는 고온초전도 박막을 이용한 디지털형태, 특히 delay 라인을 이용한 phase shifter에 관하여 서술하였다. 이 소자의 작

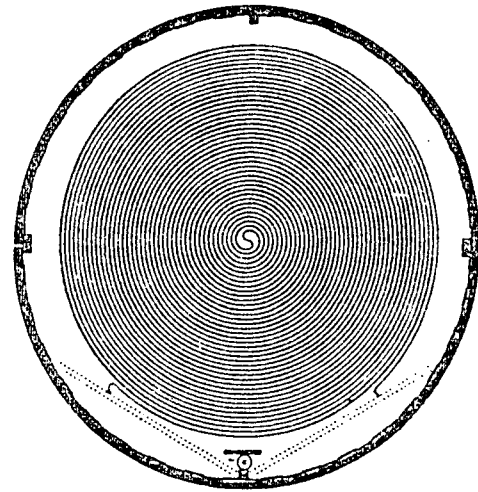


그림 15. Strip-line 형태의 지연선 그림
Fig. 15. Layout of strip line delay line

동원리는 전자기의 위상을 속도, path length, reactance중 한가지를 변형 시 switching 요소와 함께 신호들을 처리하는 것이다³⁰⁻³²⁾. 보통 delay 라인의 위상 shifter에서는 pin-diode, MESFET, MISFET등의 반도체 switching 소자들이 이용되

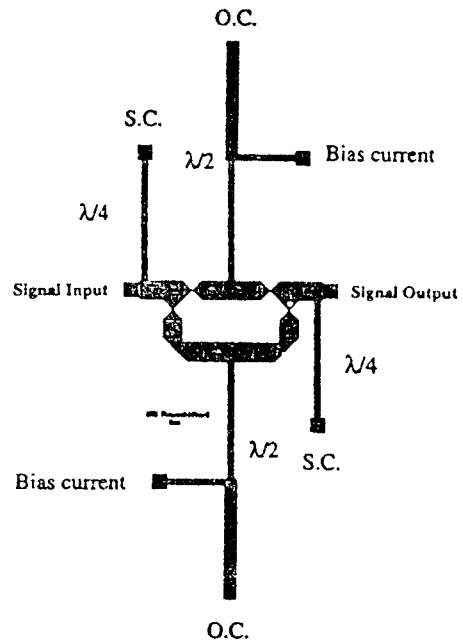


그림 16. 고온초전도체를 이용한 복합페이스 시프터
Fig. 16. Hybrid digital phase shifter using high T_c superconductors

고 있으며, 고온초전도체를 위상shifter에 응용 시에는 일반 금속과 반도체 pin-diode switch를 사용시 발생하는 큰 삽입손실을 줄일 수 있을 것으로 예측되고 있다. Fig. 16은 고온초전도체를 사용하여 새로운 형태 복합 디지털 위상 shifter를 보여주고 있다.

2-7 고온초전도 안테나(Antenna)

일반적으로 고온초전도체를 안테나 시스템에 응용하면 고 방사효율을 갖는 작은 규모의 안테나 제작이 가능할 것으로 예측되고 있다. 현재 일반 금속으로 제작된 안테나들은 손실저항이 안테나의 방사저항보다 크기 때문에 비 효과적인 결합이 되며 특히 고주파에서 conduction 손실에 기인한 손실저항이 매우 크므로 고주파용 안테나의 제작이 용이치 않은 것으로 알려져 있다. 현재 연구되고 있는 대표적인 안테나 구조는 patch안테나의 일종으로서 slot-loaded patch 및 slot-fed patch antenna가 연구되고 있다. 일반적으로 안테나를 디자인 시 가장 중요한 요소는 안테나 방사효율이 최고 값에 이르게 하는 것인데 이 식은 다음과 같다:

$$n = \frac{R_r}{R_r + R_l + R_m}$$

여기서 R_r 은 안테나의 방사 저항이고 R_l 은 안테나의 conduction 손실, R_m 은 매칭 circuit나 feedline의 저항이다. 고온초전도체는 공진기 실험에서 알 수 있듯이 표면저항이 매우 작기 때문에 안테나의 특성인 pattern이나 방향성에 영향없이 안테나 시스템에 적용하면 높은 방사효율을 기대할 수 있다¹⁴⁻¹⁵⁾. 현재 미국의 Hansen에서는 고온초전도체를 안테나시스템 개발시 사용하고자 하고 있으며, 독일의 Chaloupka사, 미국의 Dinger사 등은 새로운 개념의 고온초전도 안테나를 연구하고 있다. 하지만 고온초전도체로 안테나를 제작시 신호를 받는 receiver에는 매우 큰 장점이 있지만 신호를 보내는 transmitting 안테나로서는 고온초전도 재질 자체의 표면저항이 작으므로 효율적이지 못할 것으로 예상하고 있다. 고온초전도를 이용한 안테나는 통신, radar 시스템 등 많은 범위에서 일반 금속으로 제작된 것보다 크기의 소형화, 고성능화, 특히 고주파영역에서 장점이 있다. 현재 초전도를 이용한 안테나의 제작은 선진국에서 활발히 연구하고 있으며, 그 예로 미국의 STI 회사에서는 고온초전도 박막인 TI을 기초로 하여 성능이 구리로 제작

한 것보다 10배 이상($n_{super}=50\%$, $n_{cu}=5\%$ at 500MHz) 우수한 안테나 시스템을 제작하여 판매하고 있으며 또한 신호들의 형상을 위한 안테나를 array로 제작하고자 많은 연구를 집중하고 있다. Fig. 17은 고온초전도 센서 개발시 안테나로 사용한 frequency-independent 안테나의 하나인 spiral 안테나를 보여주고 있으며,³³⁻³⁴⁾ Fig. 17(b)는 안테나 array를 보여주고 있다.

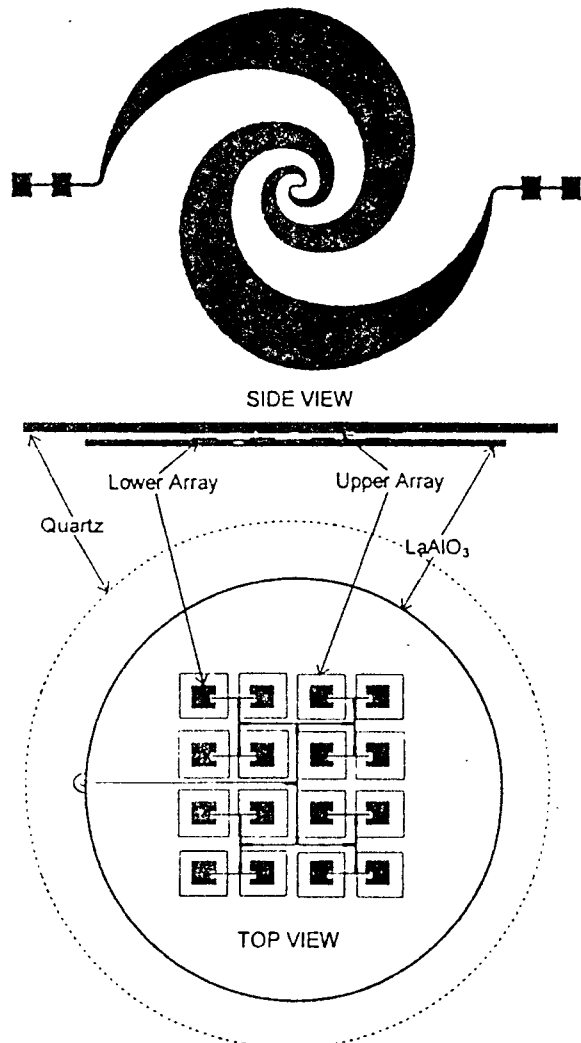


그림 17. 주파수에 무관한 spiral 형태의 안테나 및 안테나 어레이

Fig. 17. Frequency-independent spiral antenna and antenna array

2-8 고온초전도 Hybrid coupler

Duplexer 및 multiplexer 개발시 이용되는

hybrid coupler는 마이크로 스트립 형태에서 4-port 구조로 형성되어 있다. 대표적인 결합기의 하나인 3-dB/90o coupler 경우 Fig. 18에서 보여주듯이 포트사이 간격은 결합기에 사용하는 신호과장 1/4가 되게 하며, 4 포트의 소자에서 포트 2와 포트 3사이 90도의 위상차가 형성되도록 설계한다. 이 결합기의 작동원리는 간단히 설명하면 포트1에 입력된 전력 중 포트 2와 포트 3을 지나서 포트4에 도달한 전력과 포트1에서 포트 4로 가는 전력은 크기는 같고 위상차만 180도 임으로 상쇄되고 포트 4나 포트 2를 거치어서 포트 3에 도달하는 전력은 합성되도록 되어 있다. 이러한 구조의 결합기는 고온초전도 Duplexer 및 multiplexer 개발시 현재 가장 많이 사용되고 있는 구조이다.

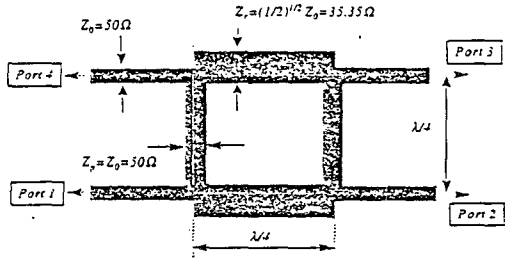


그림 18. 고온초전도 3-dB coupler
Fig. 18. High T_c superconducting 3-dB coupler.

2-9 고온 초전도체의 NMR 센서

현재 NMR system에서 센서로 사용하는 Cu된 RF-coil은 큰 표면저항 때문에 sensitivity에 제한을 가지고 있으므로 현재 고온초전도 박막으로 제작한 RF-coil을 제작함으로써 sensitivity를 증가시키고자 미국의 conductus와 STI를 중심으로 활발히 연구되고 있다. 이는 고온초전도체로 원하는 인덕턴스와 커패시턴스로 구성된 RF-coil을 제작함으로써 저 자장이나 고 자장에서 사용시 작은 크기로 제작하는 장점이 있으며, 고온초전도체 자체가 작은 표면저항을 가지고 있으므로 효율을 증가시킬 수 있다. 현재 NMR에서 사용하는 자력은 2 Tesla 정도이며, 현재 연구되고 있는 공진 주파수는 450MHz, 600MHz 및 1GHz급이다. 이 분야는 부분적으로 성공하여 Varian에 납품할 예정이며, Fig. 19는 고온초전도체로 제작한 대표적인 RF-coil을 보여주고 있다.

2-10 고온초전도 발진기:Oscillator

고온초전도체를 이용한 발진기의 개발은 위상잡

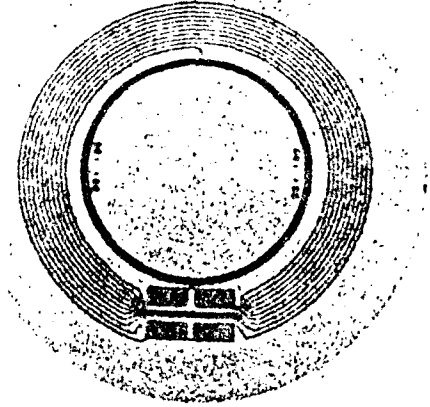


그림 19. 고온초전도로 제작한 대표적인 RF-coil
Fig. 19. Typical RF-coil of high T_c superconducting thin films.

음으로 나타나는 stability를 매우 향상시킬 수 있을 것으로 예상하고 있기 때문에 현재 여러 기관 많이 연구하고 있다. 이는 발진기 구성에 속하는 공진기를 고온초전도체 공진기로 대체함으로써 고온초전도체의 매우 작은 표면저항으로 인한 high Q-factor를 기대할 수 있고 이는 발진기에서 매우 적은 위상잡음으로 나타난다. 대표적인 발진기 구조의 하나가 Fig. 20에서 보여주고 있는데 이는 미국의 Jet Propulsion Laboratory에서 개발중인 고온초전도 공진기와 반도체 MESFET로 구성된 발진기를 보여주고 있다³⁵⁾.

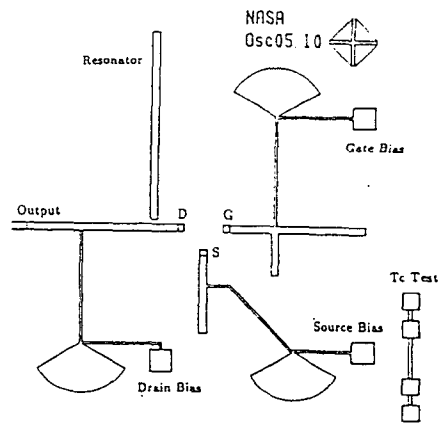


그림 20. 고온초전도 공진기와 반도체 MESFET로 구성된 oscillator
Fig. 20. Hybrid oscillator made from high T_c superconductors and MESFET

2-11 고온초전도 duplexer 및 multiplexer

현재 무선을 이용한 통신시스템들이 개발되고 발전됨에 따라 가용 주파수 대역이 높아지고 기존의 주파수를 신호왜곡 없이 많은 수의 channeling을 필요로 하고 있으며 소자의 집적화 기술은 소형화 및 경량화 등을 요구하고 있다. 이러한 필요성에 비례해서 현재 고온초전도 마이크로웨이브 서브시스템을 개발하고자 많은 연구가 진행되고 있는데 그 중에서 가장 대표적인 것이 현재 안테나를 통하여 입력된 신호들을 원하는 주파수 별로 구분하거나 결합시켜 출력시키는 duplexer 및 multiplexer가 최근에 활발히 연구되고 있다. 이 duplexer 및 multiplexer는 여러 개의 하이브리드 결합기와 원하는 channel 수만큼의 bandpass filter들로 구성되어 있으며, Fig. 21은 현재 연구중인 multiplexer로서 두개의 하이브리드 결합기와 3개의 bandpass 필터로 구성되어 있다. 이와 유사하게 Fig. 22는 현재 기술원에서 제작중인 multiplexer이다³⁶⁻⁴¹⁾.

현재는 많이 연구되고 있지 않지만 마이크로웨

이브 영역에서 가장 고가이면서 많이 요구되는 부품이 마이크로웨이브 circulator이다. 따라서 이 분야에 대한 선점연구는 차후 많은 기대효과가 있을 것으로 예상되며, Fig. 23은 미국의 Air force와 Lincoln laboratory에서 연구중인 링 형태의 circulator를 보여주고 있다⁴²⁻⁴⁴⁾.

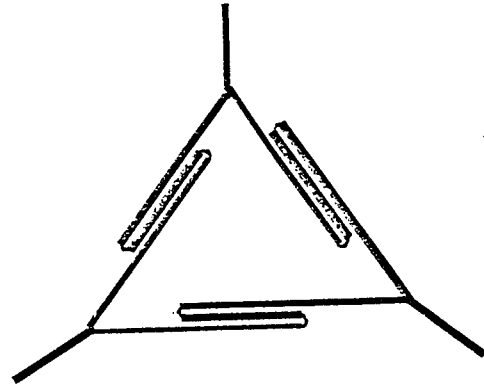


그림 23. 링형태의 서큘레이터
Fig. 23. Ring network circulator

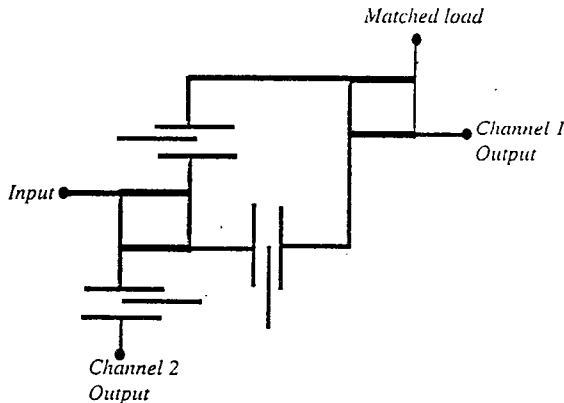


그림 21. 두개의 하이브리드 결합기와 3개의 bandpass 필터 구성된 multiplexer
Fig. 21. Multiplexer consisting of two 3-dB coupler and three bandpass filters

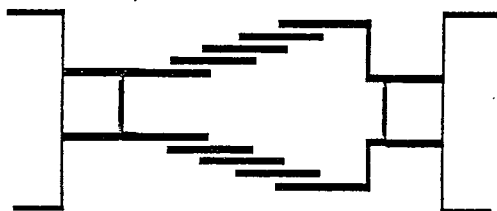


그림 22. 다른 형태의 multiplexer
Fig. 22. Other types of multiplexer.

3. 고온초전도 능동소자

3-1 고온초전도 Josephson 접합

고온초전도체를 전자소자에 응용하기 위한 가장 핵심 부분중의 하나는 재현성있는 조셉슨 접합을 제작하는 것이 중요한 연구 분야였으며, 전 세계적으로 이를 위해 여러 가지 방법들이 시도 되어 왔으나 아직도 완성되지 못하였다. 이는 고온초전도체의 coherence length가 수 Å 정도로 저온초전도체의 coherence length에 비해서 매우 짧고 이 정도 두께를 갖는 균일한 층의 산화물을 성막하는 것이 기술적으로 매우 어렵기 때문이다. 또한 고온초전도체는 anisotropic 하고 물 같은 외부 조건에 매우 약한 특성을 나타낸다. 따라서 고온초전도 접합 제작시에는 저온초전도박막의 조셉슨 접합 구조(일반적으로 SIS 터널 접합)와는 다른 구조들이 지금까지 연구되어 왔는데 고온초전도 조셉슨 접합을 제작하는 방법으로는 초기에는 박막 제작시 자연적으로 형성된 grain들 사이의 weak한 연결을 이용한 microbridge 형태의 접합이 시도되었다. 그러나 이러한 접합을 소자로 사용하기에는 현실적으로 매우 어렵다. 왜냐하면 접합의 제작시 자연적으로 형성된 grain의 수를 조절하기 어려워 재현성 있는 접합을 제작할 수 없기 때문이다. 하지만 epitaxial한 고온초전도 박막의 성막이 가능함에 다

라 기판이나 buffer 층을 이용한 접합의 제작이 가능하면서 고온초전도 박막을 이용한 인위적 조셉슨 접합들이 연구되었다. 그 첫 번째는 Bi-crystal 접합으로 결정축이 다른 두개의 기판을 서로 엇갈리게 결합한 다음 그 위에 c축의 epitaxial한 박막을 성장하여 grain boundary가 형성되게 하는 것인데 일반적으로 두 기판의 misorientation angle이 클수록 임계전류가 줄어드는 것으로 알려져 있다. 또한 이 접합을 이용한 DC-SQUID의 경우 잡음 특성이 가장 좋은 것으로 알려져 있으며, 비교적 다른 구조의 접합보다 재현성 있고 양호한 특성이 나오고 있다. 하지만 이 접합은 기판 가공이 필수적이고 소자의 집적화와 대량 생산이라는 관점에서는 많은 제약이 따른다. 두 번째는 step-edge 접합으로 기판의 표면을 ion milling이나 화학물로 경사면을 만든 후 c축으로 epitaxial한 고온초전도 박막을 입히면 경사면에서 박막의 급격한 방향 변화에 의해서 grain boundary가 생기는 원리를 이용한 것이다. 이 step-edge 접합은 다른 형태의 접합들과 마찬가지로 a-b plane의 coherence length가 긴 것을 이용한다. 일반적으로 step-edge 접합은 경사면의 두 부위에서 형성되는 것으로 알려져 있는데 하나는 경사면의 concave부분이고 또 다른 부분은 convex부분이다. 현재 경사면의 각도가 대체로 45o 이상일 때 접합의 효과가 잘 나타나는 것으로 알려져 있지만 최근에는 낮은 경사면을 가지는 step-edge접합에서 조셉슨 효과를 보여주고 있다. Fig. 24는 현재 기술원에서 step-edge 접합을 ion-milling시스템이나 화학물로 제작하는 과정을 보여주고 있다. 다른 방법중의 하나는 Bi-epitaxial 접합으로 이 접합은 Bi-crystal 접합보다는 한 단계 진보된 제작방법으로 기판 위에 얇은 seed 층과 buffer 층을 성장 한후 고온초전도 박막을 성장하면 박막의 결정축이 서로 45o 정도 엇갈려 성장되는 특성을 이용한 것이다. 이 접합의 특성은 기판가공이 필요치 않는 장점이 있어, 소자의 집적화가 가능한 반면, 박막의 층수가 많아져 제작상 어려운 점이 많다. 그러나 이 접합은 다층 구조를 사용하였다는 점에서 앞으로의 기술개발에 따라 발전될 가능성이 많다고 본다¹⁸⁻²⁰⁾. 또한 현재 위에서 언급한 구조와는 다른 SNS (superconductor/normal metal/superconductor) 구조가 많이 연구되고 있는데 이 구조의 가장 근본적인 추축은 S/N interface사이에 scattering이 존재하지 않는다는 것이다. 조셉슨 접합 제작의 다른 연구 하나는 YBCO에서 표면을 chemical 에칭하면 표면이 armorphous YBCO로 변화할 것으로 예상하여

YBCO/armorphous/YBCO 접합을 제작하고자 시도되었다. 또 다른 그룹에서는 armorphous YBCO 대신에 Co-doped, Ga-doped, Al-dopep, O-deficit 등을 이용하고자 하였는데 이는 이 물질들이 RT curve에서 경사와 저항이 변화하는 것을 이용하고자 하는 것이다.

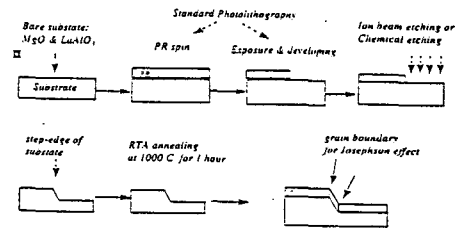


그림 24. Step 접합의 공정과정
Fig. 24. Fabrication processing for step edge junction

3-2 고온초전도 양자간섭장치 (SQUID)

고온초전도 조셉슨 접합을 응용한 소자들은 이론적으로 고 감도, 고속 응답성 등에 있어서 매우 뛰어나기 때문에 스위칭소자, 고주파검출기, SQUID등에서의 개발이 기대되고 있다. 현재 여러 응용분야 중에서 가장 많이 연구되고 있는 분야는 매우 미세자장을 측정하여 의료분야에 응용하고자 하는 DC-SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)이다. 이 DC-SQUID의 주요 구성요소는 조셉슨 접합이 연결된 SQUID 루프와 외부 자기신호를 1차적으로 감지하는 pickup coil, 그리고 이 신호를 SQUID에 전달하는 input coil로 되어 있다. Fig. 25는 현재 기술원에서 step-edge 접합을 이용하여 제작한 DC-SQUID의 보여주고 있으며, Fig. 26은 이를 접합의 특성들을 보여주고 있다. 일반적으로 SQUID에 DC 자력이 인가되면 SQUID 루프 내부에 있는 자속의 크기에 따라 SQUID 루프에는 순환 전류가 발생하고 이 전류에 의해 SQUID 루프 내부에는 자속의 quantum화가 Φ_0 (magnetic flux quantum $\Phi_0=2.06 \times 10^{-15}$ Weber or tesla-m²)의 정 수배를 유지하게 된다. 즉 외부로부터 매우 작은 자력이 SQUID에 인가되면 이 자력은 V- Φ curve의 작동점을 이동시키게 되며 따라서 SQUID에서는 전압의 변화를 감지할 수 있게 된다. 그러므로 전압이 초기의 위치로 돌아가기 위해 알고있는 형태의 코일로 전류를 보내면서 어느 정도 flux bias를 변화시키게 되며 이 전류의 값이 알고자 하는 자기장이 된다 (cf. magnetic flux quantum $\Phi_0=2.06 \times 10^{-15}$ Weber

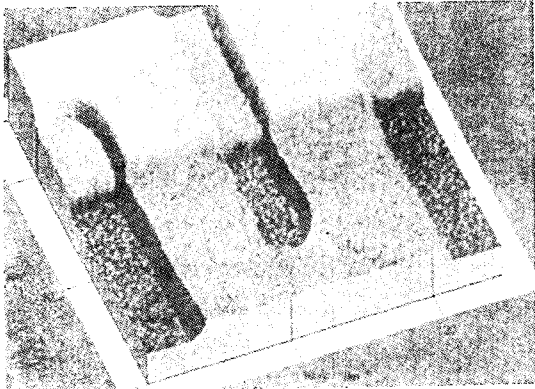


그림 25. Step-edge junction을 이용 DC-SQUID
Fig. 25. DC-SQUID using step-edge junction.

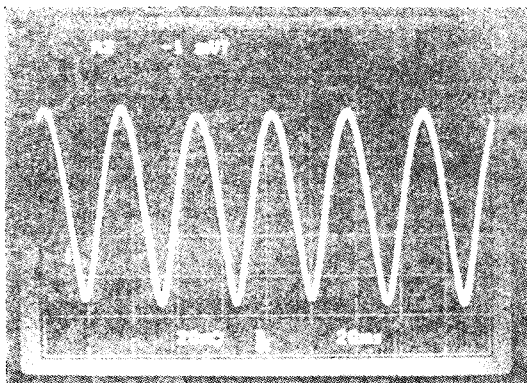
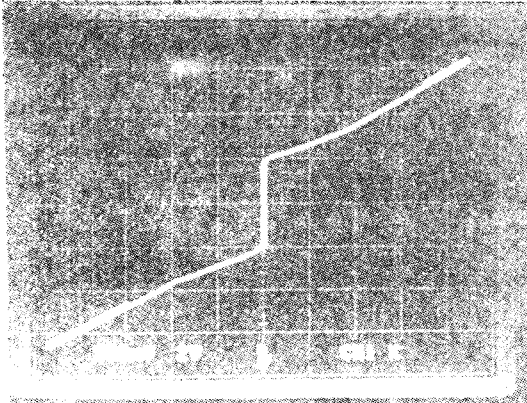


그림 26. (a) DC-SQUID의 I-V characteristics
과 (b) $V-\Phi$ 특성
Fig. 26. (a) I-V characteristics of DC-SQUID
and (b) $V-\Phi$ curve.

or tesla-m²). 대체로 SQUID의 감도는 Heisenberg의 불확정성 원리에 의해서 제약 받는 극소의

잡음 에너지를 나타내는 것으로 알려져 있으며 지금까지의 에너지 감도는 SQUID 자체의 internal 잡음만을 고려할 경우 다음과 같다. RF SQUID의 경우 $E_n < 10^{29} \text{ J/Hz}^{1/2}$ 의 값을 가지며 DC SQUID의 경우는 $E_n < 10^{31} \text{ J/Hz}^{1/2}$ 의 작은 값을 얻는 것으로 보고 되고 있다. 현재 개발한 SQUID 잡음의 근원에 대해 여러 가지 물리적인 현상들이 논의되고 있는데, 특히 1/f 잡음의 원인은 대체적으로 접합의 barrier 안에서 flux trap에 기인하는 것으로 이해되고 있으며 그것은 크게 두 가지로 분석할 수 있다. 먼저 임계 전류의 fluctuation에 의해 발생하는 1/f 잡음이다. 이것은 전자들이 접합의 barrier를 터널하는 과정에서 잠시 동안 정지하고 release 할 때 trap에 의해 barrier가 occupied되고 있으면 barrier height에서는 local change가 있을 수 있다. 따라서 임계 전류에도 local change가 발생할 수 있으며, 이것이 1/f power spectrum이라고 이해할 수 있다. 두 번째는 1/f의 잡음이 SQUID의 몸체에 trapped된 flux 라인들의 운동에 의해 생기는 것으로 생각할 수 있다.

SQUID의 용용으로 magnetometer, gradiometer, susceptometer, gravitational wave detector, magnetic monopole detector, small signal amplifier, A/D converter등이 가능하며, SQUID를 자력계로 사용할 때에는 SQUID 자체의 잡음에너지 뿐만 아니라 이들을 구성하는 부분들과의 연결시 발생하는 잡음의 에너지를 극소화 하는 것이 핵심인데, 일반적으로 평면의 박막을 이용한 Washer형태의 DC SQUID와 코일들을 이용하는 것이 많이 연구되고 있다. 하지만 이러한 washer 형태의 SQUID는 다층 막을 필요로 하기 때문에 최근에는 pick-up 코일이 SQUID washer에 직접 연결된 Directly coupled DC SQUID가 많이 연구되고 있다. 이 구조는 외부신호나 modulation 코일에 의한 자장에 의해 유도된 전류가 pick-up 코일을 통해서 직접 SQUID에 흐르도록 되어 있다. Fig. 27은 전형적인 Directly coupled DC SQUID를 보여주고 있다.

SQUID관련 선진연구기관의 동향으로서는 미국 conductus사가 실험 용으로 Mr. SQUID와 Dr. SQUID를 개발하여 현재까지 200대 이상의 판매실적을 가지고 있으며, 일본의 초전도센서 연구소에서는 High-T_c 16 channel SQUID와 Low-T_c 64 및 256 channel SQUID를 이용하여 임상실험 및 Multi-channel화 가능성 실증하였다. 독일의 Julich group에서는 second order electronic gradiometer 개발하여 rf-SQUID 와 Flux focusor를 이용한

150 fT/의 자기분해능을 가진 gradiometer로 심자도를 측정하는데 성공하였다. 그러나 현재 이 분야에서 극복해야 할 연구과제로서는 먼저 소자의 수율문제, Flux transformer 제작기술, Sensor package 기술, Data/Image processing을 위한 soft 기술 등이 예상되고 있다.

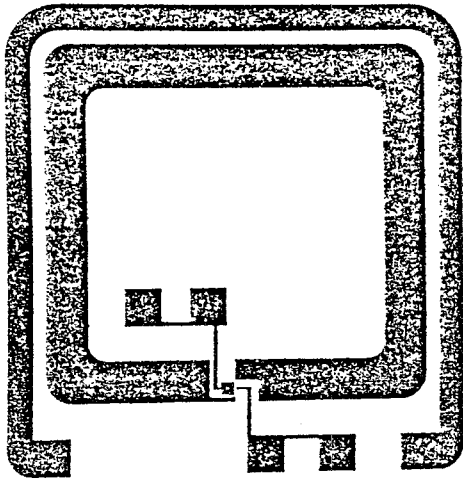


그림 27. 전형적인 Directly-coupled DC-SQUID
Fig. 27. Typical Directly-coupled DC-SQUID

3-3 초전도 Three Terminal Device: Transistors

대체로 반도체 소자를 작동시키는 데는 수 voltage 정도가 필요한데 이는 초전도를 사용할 때 필요한 mV scale에 비해 power 손실이 큰을 의미하는 바 이를 극복하기 위하여 지금까지 반도체 소자들의 dimension을 줄였으며 저온에서 작동하고자 하였다. 그러므로 저온에서 우수한 특성을 갖고 있는 고온초전도체를 이용한 반도체와 초전도의 hybrid system의 개발은 초전도 디바이스 연구의 궁극적인 목적으로 지금까지 연구가 진행되어 왔다. 이 분야는 transistor의 특성을 나타내는 Current gain, voltage gain, isolation, high speed, low power중에서 current gain과 저 전력에 장점이 있을 것으로 예상되고 있지만 초장기에 비해서 많이 진보되어 않았다. Fig. 28은 지금까지 시도되어 왔던 superconducting three terminal device들의 예를 보여주고 있는데 Fig. 28a는 Superconducting-metal base transistor(Super-HET)이다. 반도체 bipolar transistor의 경우 minority carrier가 base layer로 diffusion할 때의 시간에 의해 속도가 제한되기 때문에 이것을 개선하기 위해 base layer를 줄이는 방법을 지금까지 사용하여 왔

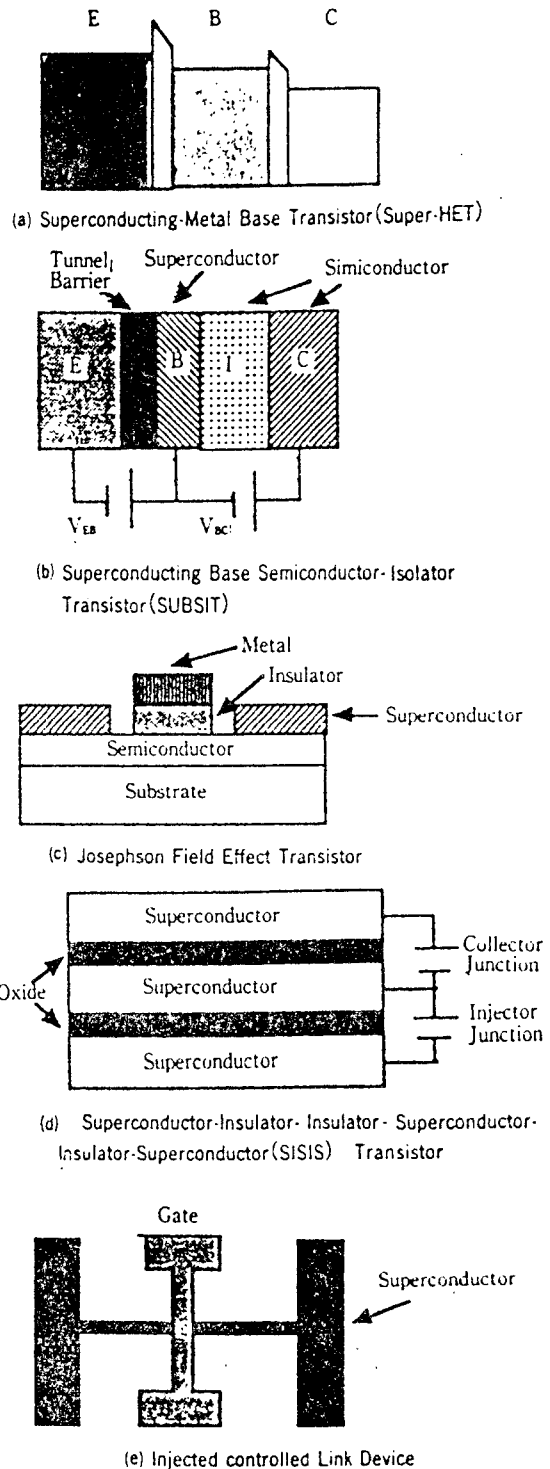


그림 28. 초전도 3극관 소자들
Fig. 28. Superconducting three terminal device

다. 하지만 두께가 감소함에 따라 base layer의 저항이 커지기 때문에, base layer를 매우 얇은 superconducting layer로 대체함으로써 소자의 속도와 current gain을 예측할 수 있다. Fig. 28b는 Superconducting-Base Semiconductor-Isolator Transistor (SUBSIT)인데 이 device의 작동 원리는 일반적인 bipolar transistor와 같다. 즉, emitter를 통해 minority carrier들은 base로 주입되고 majority carrier들은 collector로 보낸다는 것이다. 유일한 차이점은 SUBSIT의 경우 base의 majority carrier가 superconducting pair electron으로 구성되어 base의 저항이 제로가 될 것으로 예측되며, 따라서 매우 큰 current gain(>1000)과 높은 cutoff 주파수를 기대할 수 있다. Fig. 28c는 Josephson Field Effect Transistor(JOFET)로서 이 device의 작동원리는 일반적인 FET device와 같다. 즉 gate voltage를 조절하여 channel carrier의 concentration을 조절하는 것으로 이 device는 초전도체가 다른 재질과 접촉하고 있을 때 (일반적으로 metal이나 반도체 재질) 존재하는 proximity effect를 이용하는 것이다. Fig. 28d는 Superconductor-Insulator-Superconductor-Insulator-Superconductor(SISIS)로서 이 device의 collector와 output에서의 gain은 electron과 hole의 mixing과 recirculating을 이용한 non-equilibrium superconducting 효과를 응용하는 것이다. 이 device에서 injector라고 불리는 junction은 저항이 높으므로 excess quasiparticle들이 중간 막으로 이동할 수 있도록 하기 위해서는 energy bandgap보다 높은 bias voltage에서 작동한다. 한편 collector라고 불리는 junction은 전극사이에 quasiparticle에 의한 current가 흐르도록 하기 위해 energy gap보다 낮은 bias voltage에서 작동한다. Fig. 28e는 Injected-Controlled Links Device로서 초전도 electron들을 gate라는 전극을 통해서 외부의 quasiparticle로 조절하는 것이다. 이 device로부터 voltage gain을 예측할 수 있으며 고온초전도체가 normal state에서 높은 저항을 가지고 있기 때문에 device로 잠재적인 가능성을 가지고 있다.

3-4 고온초전도 Detectors(Mixers)

고온초전도체로 제작하는 detector는 고주파 영역에서 응답 속도와 고 감도의 강점을 가지고 있을 것으로 예상하고 있다. 현재 많은 선진 연구기관에서는 고주파 범위, 특히 밀리미터 및 서브 밀리미터에서 사용가능한 저 잡음 detector를 제작하고자 꾸준한 노력을 기울여 왔다. 일반적으로 고온

초전도 detector는 넓은 bandwidth를 cover할 수 있을 것으로 예상하기 때문에 radio astronomy, 궁극적으로는 차세대 통신 주파수 영역인 밀리미터에서 위성 통신 시스템등에 사용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 현재 detector를 구분하는 방법으로는 heterodyne이나 direct detection으로 크게 구분하는데 지금까지 heterodyne detection의 대표적인 것은 single particle 터널링 효과와 저온 초전도체를 이용하는 것으로서 그 특성은 이론치에 근접함을 보여주고 있다. 또한 기존의 SIS detector에서는 detector와 외부 신호사이의 결합 효율을 증가시키기 위해 주로 고주파용 waveguide components를 이용하였으며, 이는 detector 효율을 높인데 있어서 가장 어려운 문제중의 하나인 임피던스 매칭을 높이기 위하여 tuning components로서 sliding backshorts와 screw tuner를 waveguide에 포함시켰다. 고온초전도체로 제작하는 detector는 잡음성능이 떨어짐에도 불구하고, 고온초전도체에서 예측되는 높은 에너지 갭과 작동 온도 때문에 저온초전도체의 detector보다 고주파용 고온초전도체 detector의 제작가능성을 예측하고 있다. 하지만 현재 고온초전도체의 짧은 coherence length (대략 2-20Å)와 single particle tunneling 효과를 이용한 SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)접합의 제작상 기술적인 문제 때문에 고주파용 고 감도 detector의 제작 실현이 지연되고 있다. 또한 현재 고주파 영역에서 waveguide 단점인 짧은 작동 bandwidth와 제작상의 어려움을 극복하기 위해 quasi-optical coupling 기술이 연구되고 있는데 이는 flexible antenna와 active detector를 이용하는 것으로 대 영역의 주파수와 wide bandwidth를 가질 수 있는 장점이 있다.

Fig. 29는 현재 외부의 신호를 측정하고자 사용하는 간단한 receiving 구조를 보여주고 있으며, Fig. 30은 고온초전도체의 bow-tie antenna와 step-edge 접합으로 구성된 detector의 한 예를 보여주고 있다. Fig. 31은 저주파 영역에서 사용하는 mixer를 보여주고 있다. 하지만 지금까지 고온초전도체로 detector를 제작하기 위해서는 특성이 우수한 접합 개발이 우선되어야 하는데 현재 저온초전도체에 비해서 크게 진보되지 못하고 있다.⁴⁵⁾

4. 결 론

고온초전도체 연구가 활발히 연구되면서 많은 발전을 보이고 있으며, 특히 고온초전도체 박막을 이용한 수동소자는 응용분야 중 가장 먼저 실용화 될 것으로 기대되고 있다. 이는 마이크로 웨이브 및 밀리미터 주파수 영역에서의 소자의 소형화에 따른 성능저하 및 새로운 소자의 출현을 요구하고 있으며, 현재 전 세계적으로 무선을 이용한 통신시스템 개발되고 발전됨에 따라 가역주파수 대역이 점차 높아가고 있기 때문에 고성능 소자의 개발은 필수적이다. 따라서 초고주파 영역에서의 무선통신 핵심 기술과 차세대 개인휴대 통신 시스템이나 위성통신 시스템에서 고온초전도체를 이용한 소형, 경량화 수동소자들이 사용될 것으로 기대되고 있다. 현재 고온초전도체 응용분야는 단기적으로는 space, electronics, communication에 관련된 소자들이 출현할 것으로 조만간 기대되며 그 다음으로는 의학, 산업, 장기적으로는 electric power, transportation과 같은 대규모 부분에서 초전도의 응용이 실현될 것이다. 현 시점에서 고온초전도체에 대한 이론적인 근거가 확실히 규명되어 있지 않지만 고온초전도체의 독특한 특성과 반도체, optoelectronic material등, 다른 재료들과의 hybrid 시스템의 출현 가능성이 매우 크며 새로운 개념의 device출현과 함께 고온초전도 시대가 열릴 것으로 기대된다. 특히 고온초전도 전자소자중 가장 먼저 마이크로웨이브 영역에서 사용가능한 고효율의 필터 및 필터 bank, multiplexer, duplexer, front-end receiver등이 현재 가장 많이 연구되고 있으며, 밀리미터 영역에서는 고온초전도 circulator, 안테나-array등이 많이 연구될 것으로 예측되고 있다. 특히 circulator는 필터와 같이 많이 사용될 고가의 부품이므로 이에 대한 연구를 시작하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

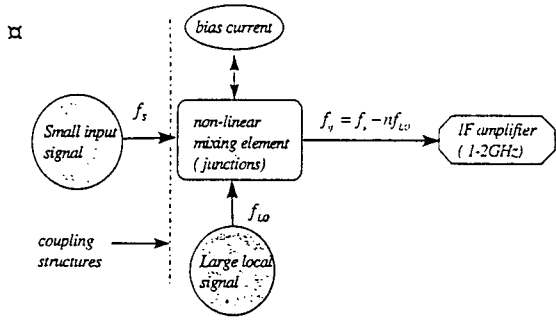


그림 29. 외부의 신호를 측정하고자 사용하는 간단한 detecting 구조
 Fig. 29. Typical detecting structure for the investigation of external source

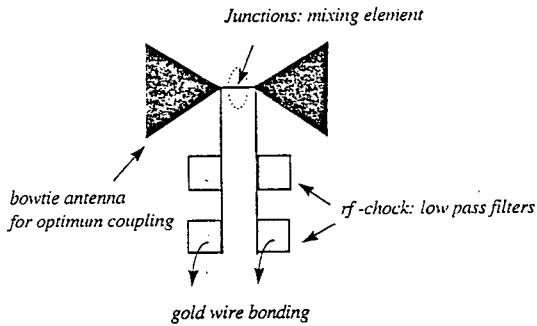


그림 30. 고온초전도 detectors
 Fig. 30. High T_c superconducting detectors.

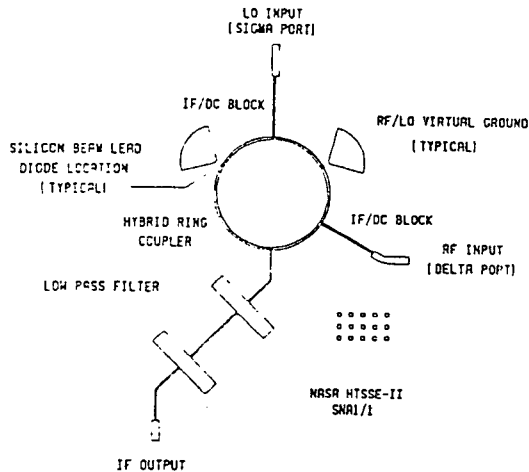


그림 31. 저주파 영역에서 사용하는 mixer
 Fig. 31. Low frequency mixer which is made from high T_c superconducting thin films.

참 고 문 헌

1. M.K. Wu, J. Ashburn, C.W. Chu, et al., Phys. Rev. Lett. 58, 908 (1987).
2. H. Maeda, Y. Tanaka, M. Futomi, and T. Asano, Jpn. J. Appl. Phys. 27, L209 (1988).
3. S.N. Putin, E.V. Antipov, O. Chmaisnen, and M. Marezio, Nature 362, 226 (1993).
4. A. Schilling, M. Kanton, J. D. Guo and H.R. Ott, Nature 363, 56 (1993).
5. C.W. Chu, L. Gao, F. Chen, Z.J. Huang, R.L.

- Meng, and Y.Y. Xue, Nature 365, 323 (1993).
6. J.C. Ritter, M. Nisenoff, G. price, and S.A. Wilf, IEEE Trans. Magn. Vol. 27, 2533 (1991)
 7. M. Nisenoff, D.U. Gubser, S.A. Wolf, J.C. Ritter, and G. Price, in Int. Superconducting Electronics Conf. Glasgow, Scotland, June (1991)
 8. M. Nisenoff, to be published in Supercond. Sci. Technol., Vol 9 (1996).
 9. High Tc Information Service, Vol.6, No. 6, June (1993)
 10. Joint Communique, 1994 International Superconductivity Industry Summit.
 11. A.Inam, M.S. Hedge, X.D. Wu, T. Venkatesan, P. England, etc, Appl. Phys. Lett., 53, 908, (1988)
 12. T.L. Hylton and M.R. Beasley, Phys. Rev. B39, 9042(1989).
 13. J.Drabeck, G. Gruner, J.J. Chang, A. Inam, X.D. Wu, L. Nazer, T. Venkatesan, D.J.Scalapino, Phys. Rev. B40, 7350(1989).
 14. L.C. Bourne, R.B. Hammond, M. Robinson, M.M. Eddy, W.L. Olson and T.W. James, Appl. Phys. Lett. 56, 2333(1990).
 15. M. Huhn, M. Klinger, A. Baranyak, and J. H. Hinken, IEEE Trans. Magn. Mag-27, 2809 (1991).
 16. C.E. Gough, S.K. Khamas, T.S.M. Maclean, M.J. Mehler, N.M. Alford and M.M. Hammer, IEEE Trans. Magn. MAG-25, 1313(1991).
 17. P. Woodall, M.J. Lancaster, T.S. M. Maclean, and C.E. Gough, IEEE Trans. Magn. MAG-27, 1264 (1991).
 18. G. C. Linag, Xiaohong Dai, D. F. Herbert, T. Van Duzer, N.Newman, and B. F. Cole, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 1, No.1, 58 (1991).
 19. R.A. Pucel, D.S. Masse and C.P. Hartwig, IEEE Trans. MTT-16, 1064 (1968).
 20. G. Matthaei, L. Young and E.M.T. Jones, Artech.
 21. Ramesh Gafg and I.J. Bahl, IEEE trans. MTT-27, July, (1979).
 22. L.C. Bourne, R.B. Hammond, M. Robinson, M.M. Eddy, W.L. Olson and T.W. James, Appl. Phys. Lett. 56, 2333(1990).
 23. G.C. Liang, D. Zhang, C.F. shih etc, IEEE MTT-S (1994).
 24. S.H. Talisa, M.A. Janocko, C. Moskowitz, J. Talvacchio, J. F.Billing etc, IEEE Trans. MTT-39Sept. (1991).
 25. A. Fathy, D. kalokitis, V. Pendrick, E. Belohoubek, A. Pique, and M. Mathur, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1277 (1993).
 26. S.H. Talisa, M.A. Janocko, D.L. Meier, C. Moskowitz, R.L. Grasssel, J. Talvacchio, P. Lepage, D.C. Buck, R.S. Nye, S.J. Pi, and C.R. Wagner, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.5, no.2, 2079 (1995).
 27. Z.Y. Shen, P.S. W. Pang, E.L. Holstein, C. Wilker, S. Dunn, D.W. Face, D.B. Laubacher, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Vol. 8, 1235 (1993).
 28. N. Fenzi, D. Aidnik, D. Skoglund, and S. Rohlfing, SPIE Proc. on High-Tc Microwave Superconduct. Applicat., Vol.2156, 143.
 29. V.M. Hietala, J.S. Martens, T.A. Plut, C.P. Tigges, T.E. Zipperian, D.S. Ginley and J.K. Truman, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol 42, no 2 972 (1994).
 30. G.K.G. Hohenwarter, J.S. Martens, J.B. Mayer, J.E. Nordman, and D.P. McGinnis, IEEE Trans. Magn., Vol 25, no 2, 1100, (1989)
 31. G. Liang, X. Dai, D.F. Hebert, T. VanDuzer, IEEE Trans. Appl. Supercond. 58 (1991)
 32. W.J. Ince and D.H. Temme, Adv. Microwave Vol. 4, 1 (1969)
 33. K.C. Gupta and A. Benalla, Norwood, MA: Artech House, 107 (1988)
 34. D.P. Meolort, D.P. Rutledge, H. Park, and P.E. Young, Appl. Phys. Lett., 41, 329 (1982)
 35. F.A. Miranda, C.M. Chorey, R.R. Romanofsky, and K.B. Bhasin, Symp. 187th Meet, Electrochemical Soc., Reno, NV, 93 (1993).
 36. J. Rhodes and R. Levy, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 211 (1979).
 37. R.J. Cameron, W.C. Tang, and C.M. Kudisia, in Proc. AIAA 14th Int. Communicat. Satellite Systems Conf., (1990)
 38. R.R. Mansour, V. Dokas, G. Thomson, W.C.

Tang, and C.M. Kudsia, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 42, 2472 (1994)

39. A. Fathy et al, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1227 (1993)

40. R.R. Mansour, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 42, 1411 (1994)

41. R.R. Mansour, F. Rammo, and V. Dokas, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1281(1993)

42. J.A. Weiss, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 13, 38 (1965)

43. J.A. Weiss and G.F. Dinne, in 1995 MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 725 (1995)

44. S.D. Ewing and J.A. Weiss, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 15, 38 (1964) J.B. Barner, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. vol 5, 2075 (1995)

45. J.B. Barner, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 5, 2075 (1995)

저자소개

홍진표



1986년 미 U.C.L.A. 물리과 학부졸업.
 1988년 미 U.C.L.A. 물리과 석사학위.
 1992년 미 U.C.L.A. 물리과 박사학위.
 1992년-1996년 삼성종합기술원 신소재 연구실 선임연구원. 1996년-현재 삼성종합기술원 표시재료 lab. FED팀 수석연구원(Projector Leader).

지성길



1986년 미 U.C.L.A. 물리과 학부졸업.
 1988년 미 U.C.L.A. 전자공학과 석사.
 1992년 미 U.C.L.A. 전자공학과 박사.
 1992년-95년 삼성종합기술원 광소자연구실 선임연구원. 1995년-현재 홍익대학교 전자공학과 조교수.

김종민



1980년 홍익대 전자공학과 졸업. 1986년 미 뉴저지 공과대학 전기공학 석사.
 1991년 미 뉴저지 공과대학 전기공학 박사. 83년-84년 금성사 OA사업부 엔지니어. 88년-92년 미 육군연구소 연구원.
 93년-94년 미 FED사 선임연구원엔지니어.
 94년-96년 삼성종합기술원 FED프로젝트 팀장(수석연구원). 96년-현재 삼성종합기술원 표시재료 lab. lab장(director).

▶ 1997년도 8월호의 기술해설 제목과 저자는 다음과 같으니 많은 참고 바랍니다. ◀

題 目	著 者 및 所 屬
압전 액튜에이터의 특성 및 기술동향	엄우식(생산기술연구원), 송준광(생산기술연구원) 이해욱[(주) 메타텍 대표]
압전 트랜스포머의 특성 및 기술동향	함중걸(생산기술연구원), 백수현(동국대학교) 김일남(대우공업전문대)