

고온 초전도체에 관한 현황과 전망

홍진표·박찬훈·문창욱·송이현·이은홍·이조원

삼성종합기술원 신소재연구실(고온초전도팀)

1. 서 론

1986년 La-Ba-Cu-O 산화물로부터 30K 정도의 고온 초전도체가 발견된 후 1987년에는 액체질소 온도 이상에서 초전도성을 갖는 Y-Ba-Cu-O($T_c=90K$)가 발견되었고, 그 후 Bi-Sr-Ca-Cu-O의 산화물($T_c=110K$)이 일본에서, Ti-Ba-Ca-Cu-O의 물질($T_c=125K$)이 미국에서 발견되었다. 더욱이 구리산화물이 아닌 Ba-K-Bi-O계 초전도체($T_c=25K$) 물질과 함께 최근에는 C_{60} 에 K, Rb 등의 물질을 도핑한 고온 초전도체($T_c=42K$)가 발견되었다. 이러한 고온 초전도체들의 발견은 산업 전반에 혁명을 가져올 수 있는 무한한 응용성 때문에, 학문적인 측면 뿐만 아니라 종래의 소자와 개념이 다른 새로운 소자의 실현을 위해 Electronics, Computer technology, Power transmission, Energy storage 및 반도체와 초전도 현상을 응용한 Hybrid 소자 등 다양한 분야에서의 연구가 전세계적으로 진행되고 있다. 따라서 이 논문에서는 현재 선진 여러 연구기관, 대학, 기업

체 등에서 연구 개발중인 초전도 소자들을 분야별로 간략하게 소개하고자 한다.

초전도체 응용은 크게 박막을 이용한 소규모 소자와 Bulk를 이용한 대규모 소자로 구분할 수 있다. 박막을 응용한 초전도 소자는 Low power dissipation, Detection sensitivity, Fast switching speed, Low signal distortion 등 여러 가지 점에서 반도체 소자보다 장점이 있다. 디지털 소자로서 초전도 Circuit은 트랜지스터(Transistor)를 사용한 반도체 디지털 소자와는 근본적으로 다른 Josephson 접합의 On/Off switching에 의해 Digital levels("0 or 1")이 결정되며 이러한 특성을 응용한 초전도 Transistor의 개발에 역점을 두고 있다. 초전도의 아날로그 소자(Analog device)로서는 Detection, Amplification, Signal processing의 고주파용 부품들(대체로 10~200GHz), SQUID, Infrared detectors 등의 소자 연구에 중점을 두고 있으며, 또한 박막의 응용으로서 Interconnection, Signal transmission line 등과 같은 Microwave passive 소자들에 대한 연

구가 활발히 진행되고 있다.

2. 초전도 응용

2.1 박막 응용

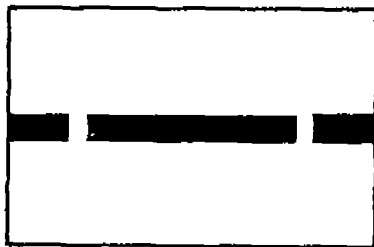
초전도 박막을 이용한 Circuit은 일반적으로 크게 수동소자(Passive device)와 능동소자(Active device)로 구분하여 생각할 수 있다. 초전도 박막을 이용한 수동소자는 초전도체의 Low loss, Low distortion의 특성을 응용하는 것으로 저온 초전도체보다 고온 초전도체는 대역역 주파수와 고주파에서 사용할 수 있는 장점이 있다. 현재는 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며

고온 초전도 응용분야 중에서 가장 먼저 실용화 될 것으로 기대된다.

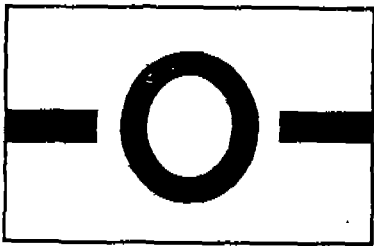
2.1.1 수동소자(Passive Device)

(1) 공진기(Resonators)

공진기는 Microwave electronics에서 단순하지만 가장 중요한 소자중의 하나로서 이것은 Filter network, Frequency discriminator, Wavemeter, Super-stable oscillator 등 여러 분야에 이용될 수 있다. 공진기는 Microstripe-line을 이용한 것으로 Line, Ring, Coplanar type들이 있으며 각각의 단점과 장점을 응용하여 필요로 하는 Sub-system의 한 부품으로 이용한다 (1-4)



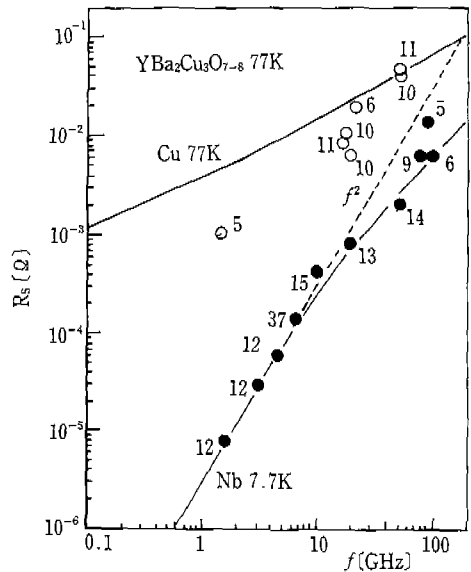
(a) Line Resonator



(b) Ring Resonator



(c) Coplanar Waveguide



15	Conductus/TIP	12	Lincoln Labs
10	GEC/ICI	37	Siemens
9	U Houston	16	UCLA
13	KFA Julich	5.6	U. Wuppelal
11.14	NTT		

(d) Surface Resistance Vs Frequency of High Tc Thin Superconducting Film

<그림 1> Superconducting Resonators

고온 초전도로 제작된 공진기는 일반금속의 공진기보다 같은 주파수, 같은 작동온도에서 10배(실험적으로)에서 100배(이론적으로) 정도의 큰 Q-factor를 보여주고 있다. 이는 고주파 영역(Microwave range)에서 작은 Size로 큰 효율성을 가지는 고온 초전도 공진기의 제작 가능성을 의미한다. 또한 공진기의 제작은 소자로서 뿐만 아니라 고온 초전도체 박막특성을 연구하는데 일반적으로 사용하는 Cavity 방법으로는 측정하기 어려운 주파수의 영역(일반적으로는 2~26GHz range)에서 박막의 표면저항(R_s)을 구하는데 이용되고 있다. 그림 1은 현재 고온 초전도체 박막으로 연구중인 여러 종류의 공진기와 공진기의 Q-factor 값으로부터 계산된 박막의 표면저항값들을 주파수 범위에 따라 보여주는 것이다.

(2) 여파기 (Filters)

현재 TV, 레이더, 통신 등에서 사용되는 여파기는 전자기 스펙트럼에서 볼 때 그 범위가 제한되어 있다. 그러나 고온 초전도체는 Q-factor가 크고 매우 작은 Insertion loss의 특성을 가지므로 이러한 특성을 응용한 여파기를 위성통신에 응용시 Channel 수를 크게 증가시키는 것이 가능하며, 주파수의 영역을 Terahertz의 범위까지 가능하게 한다. 일반적으로 대역역 레이더 통신 시스템 등에서 여파기를 사용할 때는 전 Bandwidth를 한번에 사용하지 않고 Narrow Bandwidth에서 필요로 하는 신호들만 선택하고 다른 주파수 영역의 신호들은 Filter bank를 형성하여 사용한다. 현재 일반 금속으로 제작된 Filter bank들은 Size가 매우 크며, Insertion loss가 크기 때문에 정확한 신호의 전달에 문제가 크다. 하지만 초전도로 여파기를 제작하면 위에서 언급한 문제점들을 해결할 수 있다.

<표 1> Superconducting Microwave Passive Devices

연구 기관	Superconducting Passive Device
AT & T Bell Laboratories	YBCO ring resonator at 4.74GHz
DuPont	Thallium based ring resonator at 4.9GHz
Ford Aerospace	Dielectric resonator with YBCO thin film at 10GHz
General Atomics	Coated YBCO cavity at 10GHz
General Electric	Coplanar YBCO resonator at 4.8GHz
High Tc Supercon	Bulk YBCO cavity at 10GHz Microwave power limiter
Honeywell	1×12 linear array YBCO transition edge IR Bolometers
Huges Research Laboratory	Six pole YBCO filter at 9.6GHz
HYPRES, Inc	2 nanosec. YBCO delay line, 4GHz wide
ICI Composites	Thick film coated YBCO cavity at 5GHz
Locked Space and Missiles	Thallium based thermal isolator
MIT Lincoln Laboratories	Six pole, 300MHz bandwidth filter at 4.7GHz
David Sarnoff Research	Four pole YBCO 50MHz B.W. filter at 9.3GHz
Superconducting Technology	Thallium based ring resonator at 4.9GHz
TRW	YBCO end-coupled resonator at 10.4GHz
Westinghouse R & D Center	Four-pole YBCO edge-coupled filter at 9.4GHz
College of William and Mary	Electrochemically coated cavity at 1.42GHz
Naval Research Laboratory	Five-pole edge coupled YBCO filter at 9.1GHz
Jet Propulsion Laboratory	YBCO low-pass filter with cut-off at 9.7GHz
University of Wuppertal	YBCO patch antenna resonator at 5GHz

여파기에는 Lowpass, Bandpass, Bandstop, Highpass 등 네 가지의 종류가 있으며, 이상적인 여파기는 Zero insertion loss를 가져야 하는데 이런 것은 초전도로 제작해야만 가능하다⁽⁶⁻⁸⁾. 현재 초전도를 이용한 여파기는 Narrow bandpass 여파기가 주종을 이루고 있으며, 이들 초전도 여파기는 같은 온도, 같은 주파수 영역에서 일반 금속보다 10배 정도 작은 Insetion loss를 보여주고 있다. 현재 미국에서 계획중인 HTSSE-1(High Temperature Superconductivity Space Experiment)에 참여한 연구기관들과 각각의 기관에서 연구한 고온 초전도 Micorwave passive 소자들(주로 공진기와 여파기)의 종류를 표 1에 나타냈다.

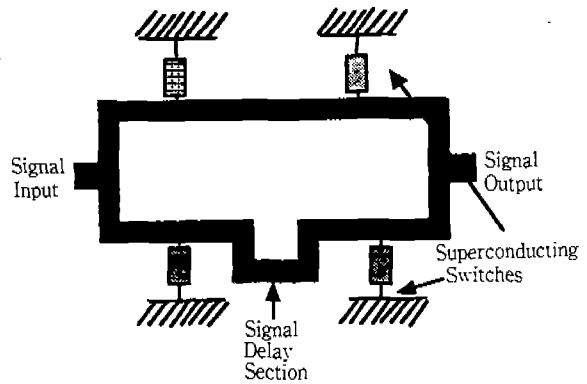
(3) Transmission Line

기술이 발전함에 따라 Electronic circuit과 System들의 고집적화가 가능하였으며, 또한 소자들의 속도가 날로 증가하고 있다. 하지만 Chip-to-chip 연결이 일반적인 금속으로 제작되었기 때문에 연결부위의 저항은 신호들을 Distortion시키고 Delay시키는 문제점을 야기했다. 즉 소자가 고집적화함에 따라 각 부품들은 작아지는 반면 Interconnection의 특성들은 저하된다. 예를 들면 소자의 크기가 작아짐에 따라 Capacitance는 같은 양만큼 작아지고, 따라서 소자 Response time이 같은 양만큼 늦어진다. 또한 Interconnection line의 저항이 증가함에 따라 Line들의 손실이 매우 커지는 결과를 가져왔다. 초전도 Transmission line을 사용하면 이러한 문제점들을 개선할 수 있으며 또한 Line들 사이의 Cross-talk를 줄일 수 있으므로 고집적도 가능하다. 특히 고온 초전도로 제작된 Transmission line들은 고주파 영역인 Terahertz 범위까지 정확한 신호들의 전달이 가능하다⁽⁹⁻¹¹⁾

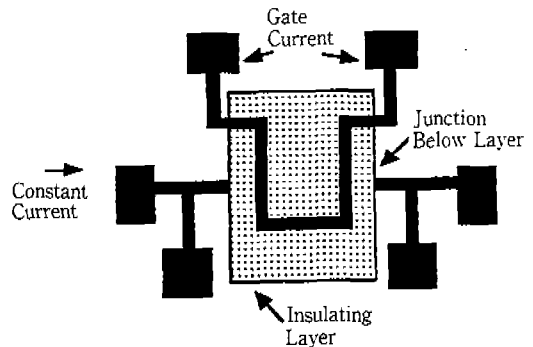
(4) Phase Shifters

Phase array antenna 시스템 등에서 필수적인

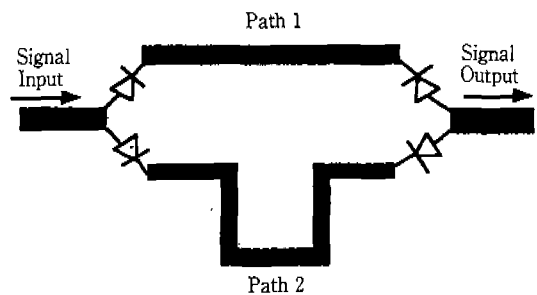
Phase shifter는 크게 나누어 Analog와 Digital type으로 구분할 수 있는데 본고에서는 고온 초전도 박막을 이용한 Digital type, 특히 Delay-line을 이용한 Phase shifter에 관하여 논하고자 한다. 이 Device의 작동원리는 Electromagnetic wave의 Phase를 Velocity, Path length,



(a) Superconducting Switching Components due to Light or Laser Components



(b) Magnetic Field Effect Device



(c) Typical Superconducting delay line

<그림 2 >

Reactance 중 한 가지를 변형시 Switching elements와 함께 신호들을 Processing하는 것이다. 보통 Delay-line phase shifter에서는 Pin-diode, MESFET, MISFET 등의 반도체 Switching 부품들을 이용하고 있다. 초전도를 Phase shifter에 응용시에는 그림 2에서 보여주는 것과 같이 Switching 소자들과 Delay-line 모두를 초전도 특성을 응용하여 사용할 수 있다. 그림 2(a)는 Light나 Laser의 Excitation에 의해 Switching 할 수 있는 Phase shifter를 나타내고, 그림 2(b)는 인덕터 Loop에 흐르는 전류로 조절하는 Magnetic field effect 소자를, 그림 2(c)는 전형적인 Superconducting delay line 을 보여준다 (12-13).

(5) 안테나(Antenna)

초전도를 안테나 시스템에 응용하면 High radiation efficiency을 갖는 작은 규모의 안테나 제작이 가능하다. 현재 금속으로 제작된 안테나는 손실(Loss) 저항이 안테나의 Radiation 저항보다 크기 때문에 비효율적인 Coupling이 되며 특히 고주파에서 Conduction loss에 기인한 Loss 저항이 매우 크므로 고주파용 안테나로서는 적절치 않다.

일반적으로 안테나를 디자인할 때 식 (1)과 같이 정의되는 안테나의 Radiation efficiency가 최고값에 이르게 한다.

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_l + R_m} \dots\dots\dots Eq (1)$$

여기서 R_r 은 안테나의 Radiation 저항이고 R_l 은 안테나의 Conduction loss, R_m 은 매칭 Circuit나 feedline의 저항이다. 초전도체는 표면 저항이 작기 때문에 안테나 시스템에 응용하면 안테나의 특성인 Pattern이나 방향성(Directivity)에 영향을 주지 않으면서 높은 Radiation efficiency를 기대할 수 있다(14-15).

초전도 안테나는 Receiver로서는 매우 큰 장점이 있지만 신호를 보내는(Transmitting) 안테나

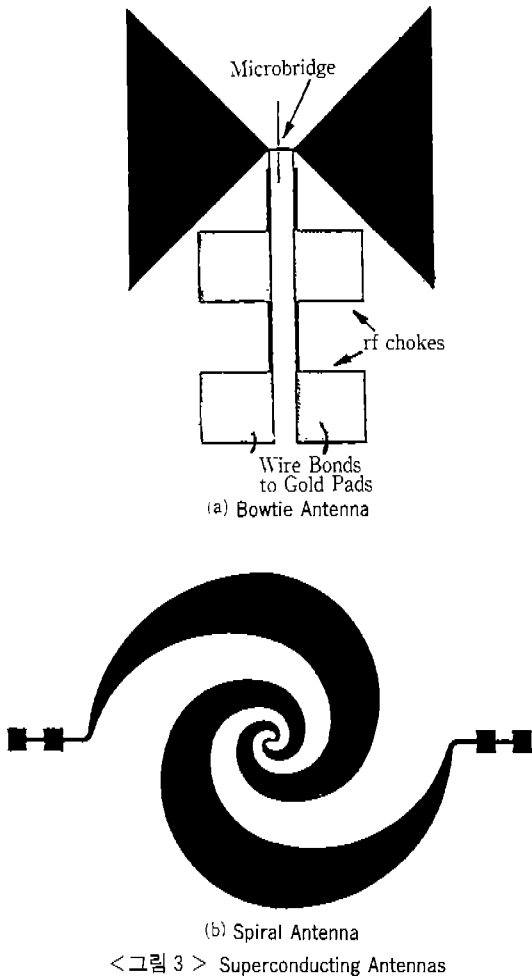
로서는 초전도 재질 자체가 표면저항이 작으므로 효율적이지 못하다. 초전도를 이용한 안테나는 통신, Radar system 등 많은 범위에서 일반 금속으로 제작된 것보다 Size의 소형화, 고성능화, 특히 고주파 영역에서 장점이 있다. 현재 초전도를 이용한 안테나의 제작은 선진국에서 활발히 연구하고 있으며 그 예로 미국의 STI에서는 고온 초전도 박막(Ti-based film)을 사용하여 성능이 구리로 제작한 것보다 10배 이상($n_{super}=50\%$, $n_{cu}=5\%$ at 500MHz) 우수한 안테나 시스템을 제작하여 판매하고 있으며 또한 신호들의 Imaging을 위해 안테나를 Array로 제작하고자 연구에 몰두하고 있다. 그림 3은 고주파에서 사용할 수 있는 고온 초전도 박막으로 제작된 안테나들을 보여주고 있다(16-17)

2.1.2 능동소자(Active Device)

(1) Josephson 접합

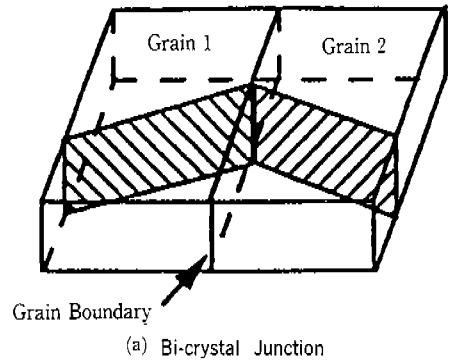
고온 초전도체의 소자 응용은 그 핵심부분이 Josephson 접합을 제작하는 것으로 생각할 수 있으며 전 세계적으로 재현성 있는 Josephson 특성을 갖는 접합을 만들기 위해 지금까지 여러 방법들이 시도되어 왔다. 일반적으로 고온 초전도 박막은 Coherence length가 수Å 정도로 저온 초전도체의 Coherence length에 비해서 매우 짧고 이 정도 두께를 갖는 균일한 층의 산화물을 성막하는 것이 기술적으로 매우 어렵다. 또한 고온 초전도체는 Anisotropic하고 환경에 특성이 쉽게 변화는 재료이다. 따라서 고온 초전도 접합 제작시에는 저온 초전도 박막의 Josephson 접합구조(일반적으로 SIS 터널 접합)와는 다른 구조들이 연구되어 왔다.

고온 초전도 Josephson 접합은 초기에는 박막 제작시 자연적으로 형성된 Grain들 사이의 Weak한 연결을 이용한 Microbridge 형태였다. 그러나 이러한 접합을 소자로 사용하기에는 현실적으로 매우 어렵다. 왜냐하면 접합의 제작시 자

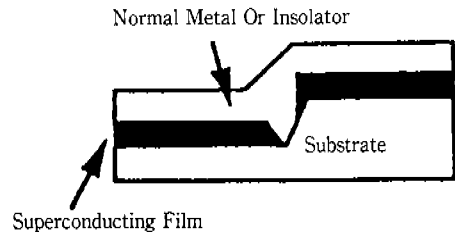


<그림 3> Superconducting Antennas

일반적으로 두 기판의 Misorientation angle이 클수록 임계전류가 줄어드는 것으로 알려져 있다. 또한 이 접합을 이용한 DS-SQUID의 경우 Noise 특성이 가장 좋은 것으로 알려져 있으며, 비교적 다른 Type의 접합보다 재현성있고 양호한 특성이 나오고 있다. 하지만 이 접합은 기판 가공이



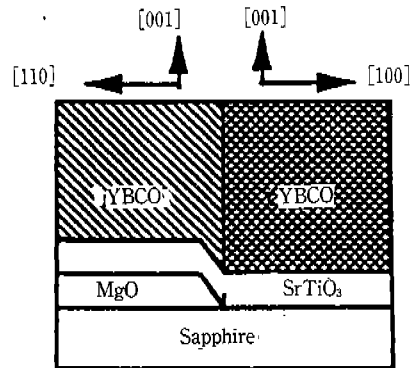
(a) Bi-crystal Junction



(b) Step-edge Junction

연적으로 형성된 Grain의 수를 Control하기 어려워 재현성있는 접합을 제작할 수 없기 때문이다. 그 후 성막기술이 눈부신 발전으로 Epitaxial한 고온 초전도 박막이 가능하였으며 따라서 기판이나 Buffer layer를 이용한 여러 종류의 Josephson 접합 제작이 가능하였다.

그림 4는 고온 초전도 박막을 이용하여 인위적으로 제작한 여러 종류의 Josephson 접합을 보여준다. 그림 4(a)는 Bi-crystal 접합으로 결정축이 서로 다른 두 개의 기판을 엇갈리게 결합한 다음 그 위에 c축의 초전도 박막을 성막하여 접합 사이에 Grain boundary가 형성되게 하는 것인데



(c) Bi-epitaxial Junction

<그림 4> Superconducting Josephson Junctions

필수적이고 소자의 고집적화와 대량생산이라는 관점에서는 많은 제약이 따른다. 그림 4(b)는 Step-edge 접합으로 기판의 표면을 Ion milling이나 Chemical etchant로 step을 만든 후 c축의 고온 초전도 박막을 입히면 Step에서 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 이용한 것이다. 일반적으로 Step-edge 접합은 Step의 두 부위에서 형성되는 것으로 알려져 있는데 하나는 Step의 Concave 부분이고 또 다른 부분은 Convex 부분이다. 그러나 지금까지 어느 부분이 Grain boundary 역할을 하는지는 잘 알려져 있지 않다. 다만 Step의 각도가 대체로 45° 이상일 때 접합의 효과가 나타나며 이 각도보다 작을 때는 접합이 아닌 c축의 단순한 박막이 형성되는 것으로 알려져 있다. 그림 4(c)는 Bi-epitaxial 접합으로 이 접합은 Bi-crystal 접합보다는 한 단계 진보된 제작방법이며 기판 위에 얇은 Seed layer와 Buffer layer를 성막한 후 고온 초전도 박막을 성막하면 박막의 결정축이 서로 45° 정도 엇갈려 성장되는 특성을 이용한 것이다. 이 접합의 특성은 기판 가공이 필요치 않는 장점이 있어, 소자의 고집적화가 가능한 반면, 박막의 층수가 많아져 제작상 어려운 점이 많다. 그러나 이 접합은 다층구조를 사용하였다는 점에서 앞으로의 기술개발에 따라 발전될 가능성이 많다고 본다⁽¹⁸⁻²⁰⁾.

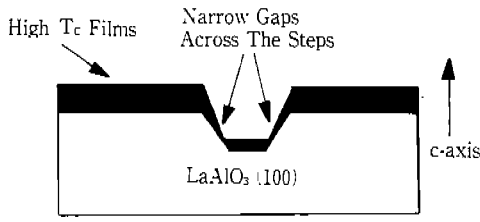
(2) SQUID

Josephson 접합을 응용한 소자들은 고감도 및 고속응답성이 매우 뛰어나기 때문에 스위칭 소자, 고주파 검출기, 자력계 등에서의 개발이 기대되고 있다. 그러므로 이 Section에서는 Josephson 접합을 응용하는 여러 가지의 소자중 현재 가장 많이 연구되고 있는 DC-SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)에 관해 서술하고자 한다.

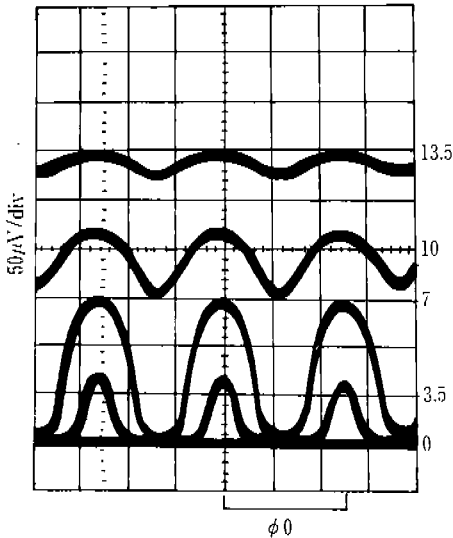
SQUID는 알고자 하는 자력을 측정하기 쉬운 전압으로 변화시키는 소자로 흔히 Magnetic flux to voltage transformer라고 불리어지고 있으며, DC SQUID는 한 개의 접합으로 이루어져 있는 RF SQUID와는 다르게 두 개의 접합과 루프(Loop)로 이루어져 있다. SQUID에 DC 자력이 인가되면 SQUID Loop 내부에 있는 자속의 크기에 따라 SQUID Loop에는 순환전류가 발생하고, 이 전류에 의해 SQUID Loop 내부에는 자속의 Quantum화가 Φ_0 (Magnetic flux quantum $\Phi_0 = 2.06 \times 10^{-15}$ Weber or tesla-m²)의 정수배를 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 알고 있는 Geometry의 코일로 전류를 보내면서 어느 정도 Flux bias를 변화시키게 되면 이 전류의 값이 알고자 하는 자기장이 된다. 대체로 SQUID의 감도는 Heisenberg의 불확정성 원리에 의해서 제약받는 극소의 잡음에너지를 나타내는 것으로 알려져 있다. 지금까지 에너지 감도는 SQUID 자체의 Internal noise만을 고려할 경우 RF SQUID는 $E_n < 10^{-29}$ J/Hz^{1/2}의 값을 가지며 DC SQUID는 $E_n < 10^{-30}$ J/Hz^{1/2}의 작은 값을 얻는 것으로 보고되고 있다. 그림 5는 고온 초전도 박막과 Step-edge 접합으로 제작된 DC-SQUID와 V- ϕ 곡선을 보여준다.

SQUID 잡음의 원인에 대해 여러 가지 물리적인 현상들이 논의되고 있는데, 특히 I/F 잡음은 대체적으로 접합의 Barrier 안에서 Flux trap에 기인하는 것으로 이해되고 있으며 크게 두 가지로 분석할 수 있다. 첫번째는 임계전류의 Fluctuation에 의해 발생하는 I/F 잡음이고, 두번째는 SQUID의 Body에 Traped된 Flux line들의 운동(Motion)에 의해 생기는 것으로 생각할 수 있다⁽²¹⁻²³⁾.

SQUID의 응용으로 Magnetometer, Gra



(a) Double Step-edge Junction



(b) Typical V vs ϕ Curve at different bias conditions
<그림 5>

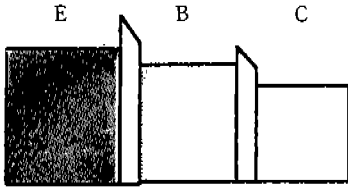
diometer, Susceptometer, Gravitational wave detector, Magnetic monopole detector, Small signal amplifier, A/D converter 등이 가능하다. SQUID를 자력계로 사용할 때에는 SQUID 자체의 잡음에너지 뿐만 아니라 이들을 구성하는 부분들과의 연결시 발생하는 잡음의 에너지를 극소화하는 것이 핵심인데, 일반적으로 평면의 박막을 이용한 Washer 형태의 DC SQUID와 Coil들을 이용하는 것이 보편화되고 있다.

(3) Three Terminal Device (Superconducting Transistors)

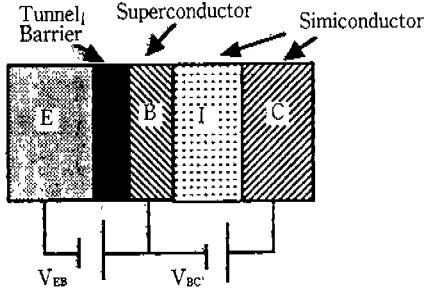
Transistor의 특성은 Current gain, Voltage

gain, Isolation, High speed, Low power 등으로 그중에서 Low power 필요성은 특히 중요하게 여겨져 왔다. 대체로 반도체 소자를 작동시키는 데는 수 Voltage 정도가 필요한데 이는 초전도를 사용할 때 필요로 하는 mV Scale에 비해 Power 손실이 큼을 의미하는 바 이를 극복하기 위하여 반도체 소자들의 Dimension을 줄였으며 저온에서 작동하고자 하였다. 그러므로 저온에서 우수한 특성을 갖고 있는 초전도를 이용한 반도체와 초전도의 Hybrid system의 개발은 초전도 소자연구의 궁극적인 목적으로 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다.

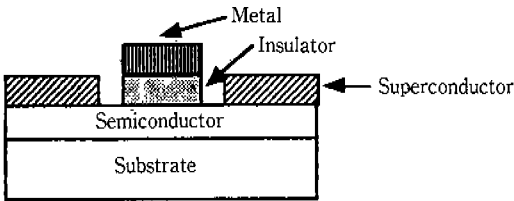
그림 6은 지금까지 시도되어 왔던 Superconducting three terminal 소자들의 예를 보여주고 있다. 그림 6(a)는 Superconducting-metal base transistor (Super-HET)이다. 반도체 Bipolar transistor의 경우 Minority carrier가 Base layer로 Diffusion 할 때의 시간에 의해 속도가 제한되기 때문에 이것을 개선하기 위해 Base layer를 줄이는 방법을 지금까지 시도해 왔다. 하지만 두께가 감소함에 따라 Base layer의 저항이 커지기 때문에, Base layer를 매우 얇은 Superconducting layer로 대체함으로써 소자의 속도와 Current gain을 예측할 수 있다. 그림 6(b)는 Superconducting-Base Semiconductor-Isolator Transistor (SUBSIT)인데 이 소자의 작동원리는 일반적인 Bipolar transistor와 같다. 즉, Emitter를 통해 Minority carrier들을 Base로 주입하고 Majority carrier들은 Collector로 보낸다는 것이다. 유일한 차이점은 SUBSIT의 경우 Base 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. 그림 6(c)는 Josephson Field Effect Transistor (JOFET)로서 이 소자의 작동원리는 일반적인 FET 소자와 같다. 즉 Gate voltage를 조절하여 Channel carrier의 Concentration을 조절하는 것



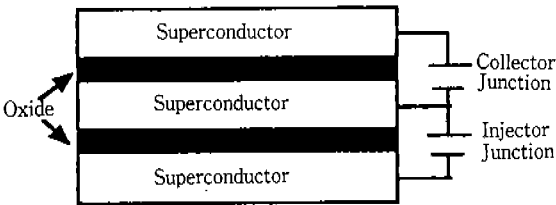
(a) Superconducting-Metal Base Transistor(Super-HET)



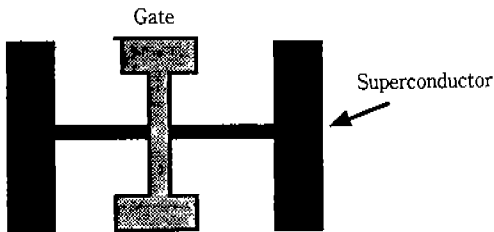
(b) Superconducting Base Semiconductor- Isolator Transistor(SUBSIT)



(c) Josephson Field Effect Transistor



(d) Superconductor-Insulator- Insulator- Superconductor- Insulator-Superconductor(SISIS) Transistor



(e) Injected controlled Link Device

<그림 6 > Superconducting Three Terminal Devices

으로 이 소자는 초전도체가 다른 재질과 접촉하고 있을 때(일반적으로 Metal이나 반도체 재질) 존재하는 Proximity effect를 이용하는 것이다. 그림 6 (d)는 Superconductor-Insulator-Superconductor-Insulator-Superconductor (SISIS)로서 이 소자의 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 전극 사이에 Quasiparticle에 의한 Current가 흐르도록 하기 위해 Energy gap보다 낮은 Bias voltage에서 작동한다. 그림 6(e)는 Injected-Controlled Links 소자로서 초전도 Electron들을 Gate라는 전극을 통해서 외부의 Quasiparticle로 조절하는 것이다. 이 소자로부터 Voltage gain을 예측할 수 있으며, 고온 초전도체가 Normal state에서 높은 저항을 가지고 있기 때문에 Device로 잠재적인 가능성을 가지고 있다.

(4) Detectors(Mixers)

Josephson 접합의 고주파에 대한 Response 특성과 고감도 특성을 이용한 초전도 Receiver는 초전도체의 소자 응용에 중요한 부분중의 하나이다. 따라서 고주파 범위에서 사용할 수 있는 저잡음 Receiver를 제작하고자 꾸준한 노력을 기울여 왔으며 특히 이러한 소자들은 넓은 Bandwidth를 가지고 있어 Radio astronomy나 궁극적으로 위성통신 시스템에 사용할 수 있다.

고주파용 Heterodyne이나 Direct receiver의 제작은 크게 두 가지 방법을 사용하고 있는데 그 하나는 Single particle 터널링 효과와 저온 초전도체를 이용하는 것이다. SIS(Superconductor-

Insulator-Superconductor) 접합의 경우 접합과 외부신호 사이의 Coupling efficiency를 증가시키기 위해 주로 고주파용 Waveguide components를 이용하였으며, Receiver 효율을 높이는데 있어서 가장 어려운 문제중의 하나인 임피던스 매칭을 높이기 위하여 Tuning components로서 Sliding backshorts와 Screw tuner를 Waveguide에 포함시켰다. 그러나 저온 초전도체를 이용한 Receiver는 액체 Helium을 필요로 하기 때문에 이 Receiver들은 매우 제한적으로 응용되어 왔다. 고온 초전도체의 발견은 Receiver의 작동온도를 액체헬륨에서 액체질소로 바꿀 수 있어 Receiver의 Noise performance가 떨어짐에도 불구하고, 고온 초전도체에서 예측되는 높은 Energy band gap과 작동온도 때문에 저온 초전도체의 Receiver보다 고주파용 Receiver의 제작 가능성을 예측할 수 있다. 그렇지만 현재 고온 초전도체의 짧은 Coherence length(대략 2~20 Å)와 Single particle tunneling 효과를 이용한 SIS 접합의 제작상의 문제 때문에 고주파용 고감도 Receiver의 출현이 지연되고 있다.

또 다른 Receiver 제작방법으로는 Quasi-optical 기술을 이용하는 것인데 이 방법으로 고주파에서의 Waveguide 단점인 짧은 작동 Bandwidth와 제작상의 어려움을 극복할 수 있다. 이 기술은 Flexible antenna와 Active detector를 이용하는 것으로 대 영역의 주파수와 Wide bandwidth를 가질 수 있는 장점이 있다.

2.2 Bulk 응용

고온 초전도체의 Bulk는 일반적으로 박막의 임계 전류밀도(Critical current density)보다 작으며 또한 임계전류는 외부의 자력에 의하여 급속히 저하된다. 그러나 Processing technology가 발전함에 따라 현재는 소규모 분야에서 초전도 Bulk의 응용이 가능하게 되었다. 초전도 Bulk의 응용은 Magnetic Resonance Image(MRI), 자기

부상열차, 초전도 추진선박, 송배전 등이 있으며 이 논문에서는 현재 가장 많이 연구되고 실현될 것으로 기대되는 분야를 간단히 서술하고자 한다.

고온초전도 Bulk 응용분야중 MRI의 시장이 가장 먼저 실현될 것으로 기대되고 있는데 초전도 MRI는 Conventional resistive magnets보다 고자력, Large volume, Uniformity, Stability 등에서 장점이 있으나 이 시스템을 실현하기 위해서는 고온 초전도체의 선재화가 선행되어야 한다. 초전도 Bulk의 다른 응용으로는 Superconducting Magnetic Energy Storage(SMES)가 있다. 이 SMES 시스템에서는 Energy가 자력의 상태로 저장되며 다른 에너지 Storage 시스템보다 에너지 Loading에 있어 짧은 시간안에 매우 좋은 Efficiency(90~93%)를 기대할 수 있다. 여기서 Response 시간이 짧은 것은 Stable한 Utility system의 제작 가능성을 의미하며 현재 다른 선진국 등에서는 대용량의 SMES 시스템보다는 산업체에서 사용 가능한 작은 용량의 시스템 개발에 주력하고 있다(<100MW-hr).

Transportation에 대한 초전도의 응용은 Maglev system, Motor, Generator 등이 있는데 대체로 자기부상열차에 대한 연구가 가장 많이 진행되고 있다. 자기 부상열차는 두 가지의 개념을 가지고 개발되고 있는데 하나는 비초전도 물질의 인력(Attractive force)을 이용하는 것으로 열차와 레일 사이의 간격이 작으므로 무거운 열차를 지탱할 수 있는 구조와 정확한 간격을 유지시킬 수 있는 Control 시스템이 필요하다. 또 다른 개념의 부상열차는 초전도 물질의 반발력(Repulsive force)을 이용하는 것으로 초고속 자기부상열차로서 가능성이 매우 크지만 현재 실현되고 있는 부상열차는 첫번째의 개념을 이용한 것이다.

3. 결 론

고온 초전도체의 출현은 기초적인 이론에서 응

용분야까지 산업 전반에 영향을 미치고 있으며 특히 응용분야에서는 박막을 이용한 소규모 소자와 Bulk를 이용한 대규모 응용으로 구분하여 각각의 분야에 선진국 뿐만 아니라 국내에서도 활발히 연구되어 왔다. 응용분야 중에서 가장 먼저 Space, Electronics, Communication에 관련된 소자들이 출현할 것으로 기대되며 그 다음으로는 의학분야이며, 장기적으로는 Electric power,

Transportation과 같은 대규모 부분에서 초전도의 응용이 실현될 것이다. 또한 현시점에서 고온 초전도체에 대한 이론적인 근거가 확실히 규명되어 있지 않지만 고온 초전도체의 독특한 특성과 반도체, Optoelectronic material 등, 다른 재료들과의 Hybrid 시스템의 출현 가능성이 매우 크며 새로운 개념의 소자 출현과 함께 초전도시대가 열릴 것으로 기대된다.

★ Reference

- 1) R.B. Hammond, G.V. Negrete, M.S. Schmidt, M.J. Moskowitz, M.M. Eddy, Strother, and D.L. Skoglund IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2, 867 (1990).
- 2) A.A. Valenzuela, and B. Ross. Electronics Letters, 25, 1435 (1989).
- 3) R.C. Taber, Rev. Sci. Instrum., 61, 2200 (1990).
- 4) J.C. Ritter, M.Nisenhoff, G. Price, and S.A. Wolf, IEEE Trans. Magn., 27, 2533 (1991).
- 5) D. Kalokitis, and A. Fathy, Appl. Phys. Lett., 58, 537 (1990).
- 6) S.H. Talisa., IEEE Trans. Magn., 27, 2544 (1991).
- 7) G.C. LIANG, Applied Super Conductivity Conference, Colorado Sep., 22 (1990).
- 8) W.G. Lyons., IEEE Trans. Magn., 27, 2537 (1991).
- 9) B. Honeisen and C.A. Meads, Sol. State. Elect., 15, 819, 981 (1992).
- 10) R.L. Kautz, J. Appl. Phys., 49, 308 (1978).
- 11) L.C. Bourne, R.B. Hammond, M.D. Robinson, M.M. Eddy, W.L. Olson and T.W. James, Appl. Phys. Lett., 56, 2333 (1990).
- 12) R. Stoktron and A.I. Sreenivas, "Handbook of Microwave and Optical Components," New York, 2, 230 (1990).
- 13) C.K. Jackson, and D.J. Durand, in 1991 IEEE MTT-S Microwave Synm. Dig., (1991).
- 14) L. Lewis, G. Koepf, K.B. Bhasin, and M.A. Richard, Applied Superconductivity Conference, Chicago, (1992).
- 15) G.B. Walker, J. Appl. Phys., 40, 2035 (1969).
- 16) D.P. Neikirt, D.P. Rutledge, H. Rark, and P.E. Young, Appl. Phys. Lett., 41, 329 (1982).
- 17) J.P. Hong, H.R. Fetterman, A.H. Cardona, and R.J. Forse, to be published in Appl. Phys. Lett., (1993).
- 18) J.B. Barner, C.T. Rogers, A. Inam, R. Ramesh, and S. Bersey, Appl. Phys., Lett., 59, 742 (1990).
- 19) M. Kawasaki, P. Chaudhari, T.H. Newman, and A. Gupta, Appl. Phys. Lett., 58, 2555 (1991).
- 20) K. Char, M.S. Colclough, S.M. Garrison, N. Newman, and G. Zahachuk, Appl. Phys. Lett., 59, 733 (1991).
- 21) A.H. Milklich, J.J. Kligston, F.C. Wellstood, and John Clarke, Appl. Phys. Lett., 59, 988 (1991).
- 22) R. Cantor, T. Ryhanem, D. Drung, and H. Koch IEEE Trans. Magn., 27, 2927 (1991).
- 23) M.B. Ketchen, K.G. Stawiasz, D.J. Perrson, T.A. Brunner, C.K. Hu, M.A. Jaso, M.P. Manny, A.A. Parsons, and K.J. Steins, Appl. Phys. Lett., 61, 336 (1992).
- 24) W.J. Gallagher, IEEE Trans. Magn., 21, 709 (1985).
- 25) T.D. Clark, R.J. Prance, and A.D.C. Grassie, J. Appl. Phys., 51, 2736 (1980).
- 26) M. Heibium, Sol. State Electron. 24, 343 (1989).
- 27) B.D. Hunt, and R.A. Buhrman, IEEE Trans. Magn, 19, 1155 (1985).
- 28) Y. Taur, J.H. Claassen, and P.L. Richards, Appl. Phys. Lett., 24, 101 (1974).
- 29) J.W. Archer, Proc. IEEE, 73, 193 (1977).
- 30) M.J. Wengler, D.P. Woody, R.E. Miller, and T.G. Phiillps, Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, 6, 697 (1985).
- 31) Q. Hu, C.A. Mears, and P.L. Richards, IEEE Trans. Mang., 25, 3380 (1989).
- 32) A.V. Raisanen, W.R. McGrath, P.L. Richards, and F.L. Lloyd, IEEE Trans. MTT-33, 1495 (1989).