고온초전도 박막을 이용한 전자소자 개발 현황

박용기
한국표준과학연구원
양자연구부장

1. 서 론

미국에서 발행되는 초전도관련 소식지인 *Superconductor Week*의 최근호에는[1] 미국의 STI (Superconductor Technologies, Inc.)가 이동 통신 사업자로부터 고온초전도 마이크로파 필터 시스템 16 세트를 주문 받았다는 뉴스가 머리 기사로 실려있다. 이는 고온초전도 전자소자가 실용화의 단계에 접어들어 가고 있음을 알리는 신호라 할 수 있을 것이다.

1987년 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO)의 발견으로 본격적으로 시작된 고온초전도체에 대한 연구는 단순한 학문적인 호기심의 단계를 지나 다양하고 무한한 응용 가능성을 실현하기 위하여 꾸준히 기술 개발을 이룩하여 왔다. 기존의 전자소자에 비하여 보다 고성능과 고효율의 초전도 전자소자 개발을 위하여 새로운 초전도 물질의 합성, 박막제작기술 개발, 소자제작 기술 개발 및 소자 응용기술 개발이 이루어져왔으며 이제 일부 분야에서는 실용화의 단계까지 도달하고 있다. 그러나 아직도 많은 분야에서는 해결해야할 문제점이 있으며 이를 해결하려는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

본 논문에서는 고온초전도 박막을 응용하여 제작이 가능한 주요 전자소자 및 응용기술 개발의 국내외 현황에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 초전도 전자소자

초전도 박막을 이용한 전자소자는 그림 1과 같이 크게 조셉슨 접합을 이용하는 기술과 초전도체의 낮은 표면 저항특성을 이용하는 고주파응용기술로 나눌 수 있다. 이 중 고온초전도 박막을 이용하여 가장 활발히 개발되고 있는 분야는 무선 통신용 마이크로파 필터와 SQUID를 이용한 심자도 계측기술 및 비파괴 평가 기술이다. 이와 함께 디지털 소자 개발을 위한 연구가 비교적 활발히 진행중이며 자기공명 감지코일 등이 개발되었다.

1) 고온초전도 SQUID 응용기술

초고감도 자기장 센서인 초전도양자간섭장치(SQUID, Superconducting Quantum Interference Device)는 인간이 제작할 수 있는 자기센서 중 감도가 가장 높은 센서로, 초전도체만이 지니는 특수한 성질을 이용하여 제작할 수 있다. SQUID는 지구자기장(약 50 μT)의 100억분의 1 정도인 수 fT정도까지의 초미세한 자기장 측정이 가능하다.

SQUID는 저주파의 자기신호 측정에 대단히 유용하여 기존의 센서로는 측정이 불가능한 저주파 극미세 자기신호의 검출이 가능하며 이를 이용한 많은 응용분야가 제안되어왔다. 현재 세계적으로 가장 활발하게 연구개발되고 있는 대상분야는 생체자기 계측기술과 재료의 비파괴평가 기술이다.

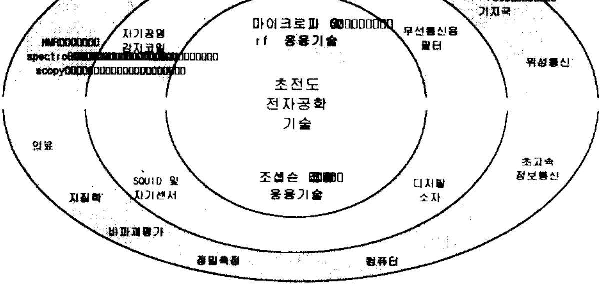


그림 1. 초전도박막 전자소자 응용 기술의 분류

SQUID를 이용하면 심장이나 뇌에서 발생하는 자기장을 측정할 수 있으며 이를 통하여 심장 및 뇌 질환의 진단이 가능할 뿐만 아니라 뇌의 기능연구도 가능하다. 현재까지 개발된 고온초전도 SQUID의 감도는 아직 뇌자도 측정에는 부족하지만 심장에서 발생하는 자기 신호인 심자도의 측정은 가능한 수준이기 때문에 고온초전도 SQUID를 이용한 심자도(Magnetocardiogram, MCG) 측정장치의 개발 연구가 가장 활발히 진행되는 연구 분야이다.

미국에서는 SQUID 센서의 감도를 높이기 위한 연구가 우선적으로 이루고 있으며 일본 및 유럽에서는 시험적인 다채널 심자도 측정장치를 개발하고 활용하기 위한 연구에 보다 많은 노력을 기울이고 있다. 일본의 스미토모전기에서는 16 채널의 고온초전도 SQUID 심자도 측정장치에 이어 32 채널 심자도 측정장치를 제작하였으며 네델란드의 Twente대학에서 7채널 장치를 그 밖에 독일의 KFA 연구소, PTB 등에서 단일 채널 장치를 이용한 심자도 측정기술 개발연구가 수행되고 있다.

우리나라의 경우 한국표준과학연구원에서 7채널 장치를 개발하여 심자도 계측에 성공하였으며 현재 16채널 장치를 개발하고 있다. 또한 LG종합기술원에서도 심자도 측정장치 개발과 비차폐환경에서의 측정기술 개발연구를 하고 있다. 그림 2는 한국표준과학연구원에 설치되어있는 자기차폐실내에서 고온초전도 SQUID를 이용한 심자도 측정장치로 심자도를 측정하는 모습이며 그림 3은 실시간으로 측정된 심자도 신호이다.

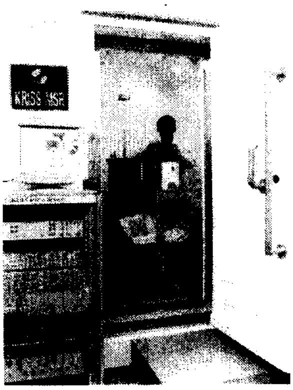


그림 2. 고온초전도 SQUID를 이용한 심자도 측정장치

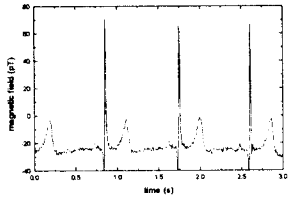


그림 3. 고온초전도 SQUID로 측정한 실시간 심자도 신호

그림 4는 정상인과 부정맥(arrhythmia) 환자의 심자도 파형을 비교한 것이다. 부정맥환자의 경우 QRS complex가 심하게 갈라지는 현상 (fragmentation)이 일어나고 있는데 갈라짐이 많이 일어날수록 심장 쇼크사의 확율이 높다고 밝혀져 있다[2].

심자도 중에서 태아의 심자도도 최근 중요한 진단방법으로 인식되고 있는데 전기적측정에 비해 많은 장점을 가진다. 즉, 태아의 심전도 신호는 모체의 심전도신호가 큰 잡음으로 작용하고 임신 후반에 태아 주변의 절연층으로 인해 태아심전도가 전혀 측정되지 않는 문제가 있으나 태아심자도는 모체의 영향을 적게 받을 뿐만 아니라 항상 측정이 가능하다[3].

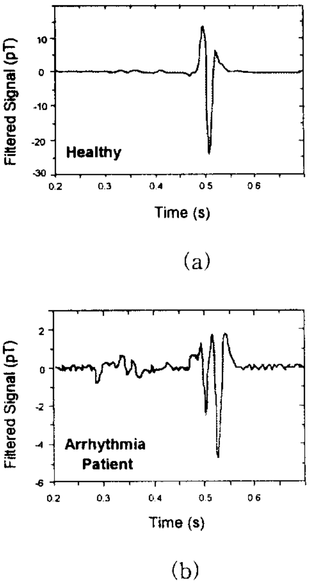


그림 4. 정상적인 사람의 심자도(a)와 부정맥 환자의 심자도 파형(b)

미국의 초전도 전자공학 기술의 전문가인 John Rowell은 2006년에는 미국의 5,500여개의 병원에서 128채널 고온초전도 SQUID 심자도 측정장치가 부정맥 진단을 위해 사용될 것이며, 500,000 명의 의사들이 현재 사용하고 있는 심전도 측정 장치 대신 7채널 규모의 간편한 심자도 측정장치를 사용하게 될 것이라고 예상하고 있다[4].

비행기나 건물과 같은 구조물 등의 안전성을 진단하기 위해서는 여러 종류의 비파괴검사 기술이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 비행기 날개의 리베트 연결부 등 여러 겹으로 되어있는 구조의 내부 층에서의 균열 등은 기존의 방법으로는 검사하기가 어렵다. 기존의 유도코일을 센서로 사용하는 와전류 탐상(eddy current test) 방법으로는 표면으로부터 10 mm 이하의 알루미늄에 생긴 결함을 검출하기가 어려운데, 이는 깊은 결함 탐상을 위해 낮은 주파수로 와전류를 유도

시키면 검출코일의 감도가 떨어지며 높은 주파수를 사용할 경우 표면효과(skin effect)로 인해 깊은 곳에 위치한 결함 검출이 불가능하기 때문이다. SQUID를 사용할 경우 낮은 주파수에서도 뛰어난 감도를 지니고 있어 여러 층으로 된 구조물의 깊은 결함도 탐상이 가능하다. 저온초전도 SQUID를 이용한 SQUID 와전류 탐상 기술로 이러한 비파괴 검사의 가능성은 이미 입증되어 있었지만 실용화하는데 어려움이 있었으며, 고온초전도 SQUID의 개발로 실용화가 가능해 지고 있다. 액체질소 온도에서 사용이 가능한 고온초전도 SQUID는 기존의 저온초전도 SQUID에 비해 냉각이 획기적으로 간편해지게 되어 장치의 제작 및 운영비용이 절감되며, 취급과 유지가 간편해질 뿐만 아니라 운반도 간편해지게되어 휴대용 비파괴 평가 장치 등의 출현이 가능하게 되었다[5].

비파괴평가 분야에서는 이외에 여러 형태의 SQUID 현미경 기술 개발이 활발하다. Scanning probe microscope (SPM)는 수평 분해능이 10 nm, 그리고 수직분해능이 10 nm이하이기 때문에 nanoscale의 미세구조의 물리적 특성조사와 미세구조의 제작 등 응용성이 많다. SSM의 성공적인 제작 및 작동은 비자성체 도체내의 자성체 불순물 검출에 이용할 수 있을 것이며 미세자기장 분포조사를 통한 vortex dynamics 연구와 미세 소자의 작동특성(전류분포특성) 및 세포단위의 생명체 연구 등 응용분야가 광범위 할 것이다[6-9].

국내에서도 SQUID 현미경에 대한 연구가 시작되어 진행되고 있는데 최근 서울대학교에서는 시편과 SQUID 센서를 모두 77 K로 냉각시켜 작동되는 수평 분해능 약 40 μm의 scanning SQUID microscope(SSM)을 제작하여 초전도박막 고리 등의 형태를 그려내는데 성공하였으며 분해능 향상과 상온 시편 측정기술 개발을 위한 연구가 진행중이다.

SQUID는 이외에도 지하자원 탐사, 지진 및 화산 예측, 잠수함 탐지, 지하 및 해저에 매설된 환경 오염물질이나 폭발물 탐사 등에 폭 넓게 사용될 수 있어 기술적 가치와 파급효과가 지대할 것으로 판단된다[10].

2) 고온초전도 마이크로파 필터

초전도체는 금속 도체에 비해 대단히 낮은 표면저항을 지니고 있다. YBCO 박막의 경우 액체 질소 온도(77 K)에서 10 GHz의 고주파에 대한 표면저항의 크기가 약 100 μΩ 수준으로 같은 조건에서 구리가 지닌 표면저항의 약 1/100 정도로 작다.

그러므로 이러한 특성을 지닌 고온초전도체를 이용하면 기존의 마이크로파 소자에 비해 월등히 우수한 특성을 지닌 소자의 개발이 가능하다. 이러한 가능성 때문에 고온초전도체의 발견 초기부터 이를 이용한 마이크로파 및 밀리미터파 소자에 대한 연구가 활발히 진행되었으며 현재 이동통신용 기지국에 사용이 가능한 필터는 거의 실용화 단계에 와 있다고 할 수 있다[11].

현재 개발되고 있는 YBCO 박막형 필터의 경우 작은 입력 손실, 균일한 통과대역 특성, 좁은 skirt로 인한 높은 out-of-band rejection ratio를 지니고 있어 기존의 필터에 비해 성능의 우수성은 인정이 되고 있으나 냉각을 시켜야하기 때문에 실용화하는데 어려움으로 작용하고 있다.

이동통신 기지국용 필터시스템에서는 신호간의 간섭 배제 능력, 수신기의 감도 및 기지국 크기 등이 상호 고려대상이라 할 수 있다. 고온초전도 박막을 이용하여 제작되는 필터는 우수한 간섭 배제 능력과 초저잡음 특성 및 소형의 시스템 제작이 가능하다. 초전도체를 사용하지 않는 일반적인 필터의 경우 선택성을 높이기 위해 필터의 단계를 증가시키거나 극(pole) 수를 증가시키면 효율이 저하되게 된다. 그러나 초전도체를 사용하게 되면 여러개의 극을 사용하여 선택성이 우수하게 되어도 삽입손실율(insertion loss)이 현저히 낮기 때문에 우수한 필터 제작이 가능하다. 예를 들어 기존의 필터에서는 9극 이상의 필터제작이 어려운 반면 고온초전도체를 사용하게 되면 19극까지도 제작이 가능하게 되었다. 최근 미국 등에서 개발된 고온초전도 필터는 이상적인 "벽돌 담(brick wall)" 같은 특성의 필터에 근접하고 있다. 즉 필요한 주파수 대역의 신호는 모두 통과시키고 그 외의 모든 신호는 완전히 차단하게 된다.

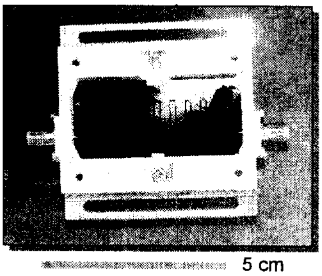
국외에서는 미국을 중심으로 800 MHz 대역의 cellular phone 및 1.8 GHz 대역의 PCS용 수신기 전단 모듈 개발이 활발히 진행되고 있다. 이 분야에 대표적인 업체로 STI, SCT, Conductus, Illinois Superconductor 등을 들 수 있다. 일본에서도 AMTEL이라는 같은 목적의 회사가 설립되어 고온초전도필터 개발에 박차를 가하고 있다.

STI(Superconductor Technologies Inc.)의 경우 이미 SuperFilter라는 상표의 cellular phone 및 PCS용 수신기 전단 모듈(Front End Subsystem)을 개발하여 Field test를 진행하고 있다. 이 수신기 전단 모듈은 고온초전도 필터 및 LNA를 Stirling type의 극저온 냉동기를 결합한 형태이다. 전단에서의 잡음 수준(Noise Figure)이 0.5 dB 이하이

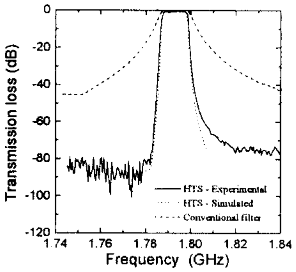
며, 미국 통신시장에 적합한 다양한 형태의 시제품을 선보이고 있다. 또한 초전도기술의 벤처기업인 Conductus도 1995년에 삽입손실 0.5 dB의 900 MHz용 19-pole 고온초전도 필터를 선보인 이래, CLEAR SITE라는 상표의 cellular phone 및 PCS용 고온 초전도 필터 및 수신기 전단 모듈을 개발하였다. 이 시스템은 고온초전도 필터 및 LNA를 Gifford-McMahon 방식의 극저온 냉동기와 결합한 형태이다. 미국 여러 통신회사와 협력하여 현장 시험을 시행 중이며, 최근에는 일본 통신회사에서도 이 회사의 제품을 도입하여 성능시험중이다. 이 회사는 수신단뿐만 아니라 송신단에도 쓰일 수 있는 high-power용 필터 개발에도 박차를 가하고 있다.

한편 일본의 경우 Japan Key Technology Center와 Denso사, Alps사가 합작 설립한 AMTEL (Advanced Mobile Telecommunication Technology)에서 필터개발 연구가 진행중이며, 마쓰시타전기, 스미토모전기 및 교세라 등이 통산성 지원하에 공동연구를 수행하고 있다.

국내에서는 고온초전도개발 국책연구사업을 통하여 마이크로파 소자의 설계 및 제작 기반 기술을 확보하였으며 이를 바탕으로 전자통신연구원, 삼성종합기술원, LG종합기술원 및 건국대학교 등에서 이에 관한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 대부분의 연구는 주로 작은 크기의 박막을 사용하여 제작이 가능한 X-band (~10 GHz)용 필터에 집중되어 왔다. 전자통신연구원에서는 중심주파수가 11 GHz인 고온초전도 멀티플렉서를 개발하였으며, 건국대 등에서는 X-band용 공진기를 이용한 오실레이터 모델 구현 및 작동기술개발 연구를 수행하고 있고, 삼성종합기술원에서



(a)



(b)

그림 5. (a) LG종합기술원에서 개발한 PCS용 11 pole hair-pin comb filter package, (b) 필터의 특성,
-band 폭: 0.55% @ 1.795 GHz,
-skirt 폭:20 dB/MHz,
-삽입손실: ~0.6 dB

는 주파수 변조가 가능한 tunable filter 개발 연구가 수행되고 있다.

최근 LG종합기술원에서는 PCS용인 1.8 GHz대역의 우수한 성능을 지닌 11 극 hair-pin comb filter를 개발하였다. 그림 5는 LG종합기술원에서 개발한 필터와 필터의 특성을 보여준다.

PCS 사업자가 증가하면서 통화의 질 경쟁이 치열해지고 이를 해결하기 위해 많은 안테나 탑이 세워지고 있는데, 도시에서는 이에 필요한 설치공간 확보와 비용이 큰 문제가 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 개의 중계기를 한 중계탑에 설치하는 방안이 모색되고 있는데 이 경우 시스템의 소형화와 함께 전파의 혼선을 막기 위한 뛰어난 선택성 등을 갖춘 고온초전도 박막형 필터가 더욱 유리하게 되어 앞으로 많은 수요가 예상된다.

3) 고온초전도 디지털 소자

초전도체만이 지니는 특이한 양자현상을 이용하여 제작이 가능한 조셉슨 소자를 이용하면 반도체로는 불가능한 대단히 빠른 전환속도를 갖는 전자 소자 제작이 가능하다. 초전도 조셉슨 소자를 이용한 초고속 전자소자의 개발은 현대의 정보유통의 고속화와 무선비디오 시스템 등의 개발을 촉진시켜 줄 것으로 기대된다. 그림 6은 기존의 반도체 소자와 현재 개발중인 초전도소자의 소비전력과 지연시간을 나타내는데 그림에서 보는 바와 같이 초전도 조셉슨 소자는 다른 반도체 소자에 비해 전환속도 면에서나 소모전력 면에서 월등히 좋은 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

1980년대 초반에 수행되다 중단된 IBM의 조셉슨 컴퓨터 프로젝트나 1981년부터 1992년까지 계속된 일본 통산성 주관의 초전도 컴퓨터 프로젝트 등은 대표적인 초전도 디지털 전자소자 및 시스템의 대형 연구프로젝트이다. 이러한 소자의 작동원리는 모두 전압상태 논리 방식(voltage-state logic)을 사용하고 있는데 최근의 고온초전도 디지털 소자연구에서는 단자속양자(RSFQ, Rapid Single Flux Quantum) 논리 방식이 주류를 이루고 있다. RSFQ 방식은 1985년 Moscow State University의 Likharev교수에 의해 처음 발표되었으며[12], 점차 주목을 받기 시작하여 최근에는 세계 각국에서 이 방식의 소자 및 회로 연구가 활발하다. Likharev 교수는 현

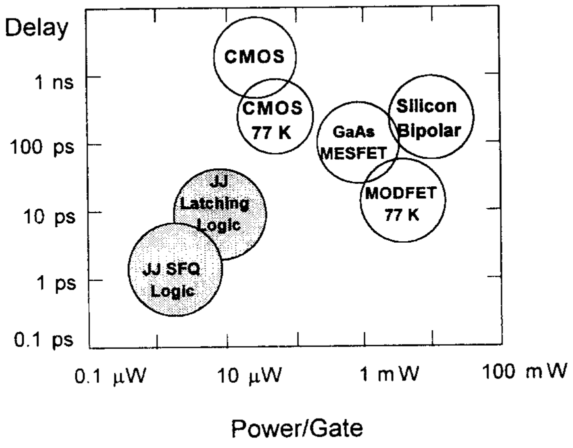


그림 6. 반도체 소자와 초전도체 소자의 성능 비교

재 미국 뉴욕주립대학으로 이주하여 연구를 계속하고 있다.

정교한 성능을 지니는 디지털 소자를 만들기 위해서는 대단히 많은 조셉슨 소자가 복잡한 구조로 제작 되어야하는데 아직 고온초전도박막을 이용한 조셉슨소자 제작 기술은 이러한 수준에 도달하고 있지 못하여 대부분 Nb초전도체를 이용한 연구가 진행중이며, 고온초전도체의 경우 주로 재현성이 우수한 접합 제작연구와 간단한 형태의 시험회로 등이 연구되고 있다. 뉴욕주립대학의 Likharev그룹에서는 전자빔으로 손상시킨 조셉슨 접합 15 개를 이용하여 고온초전도 RSFQ 회로를 제작한 바 있으며[13], 네델란드의 Twente 대학 등에서는 ramp 형태의 SNS 접합을 이용한 고온초전도 ADC 회로 등을 제작하였다[14]. 고온초전도체를 이용한 디지털 소자제작에 있어 가장 어려운 점은 접합의 임계전류 및 저항값의 재현성이라 할 수 있다. 현재 가장 우수한 SNS 접합의 경우 특성의 편차가 10%정도인데 이는 편차가 수% 이내인 Nb 접합에 비해 훨씬 큰 값이다.

Nb을 이용한 RSFQ 소자로는 shift register, A/D 변환기, 컴퓨터 연산에 필요한 logic gate 및 고속 통신에 필요한 스위치 및 소자 등이 있다. 현재 미국에서는 100 GHz 정도로 작동되는 shift register를 이용하여 위성통신용 모뎀을 개발하려는 연구가 진행되고 있다. 앞으로 원격진료를 위한 의료용 영상정보 교환, 미래형 대화형 TV 등을 위해서는 광섬유를 통하여 초고속으로 전달되는 방대한양의 영상정보를 적시에 적소로 전달해야하는데 이를 위해서는 초 고속의 스위치 기능이 필수적이다. 이러한 목적을 위한 초고속 스위치 등도 개발되고 있는데 미국의 컨덕터스는 10 Gbits/s로 작동되는 통신용 초전도 스위치를 개발중이다. 뉴욕주립대학에서는 20 GHz로 작동되는 A/D 변환기도 개발하고 있다.

고온초전도 디지털 소자 중 국내에서 연구 되고 있는 소자는 단자속 양자(single flux quantum, SFQ) 소자이다.

단자속 양자회로에 관한 연구는 국내의 경우 매우 최근에 시작되었다. 한국과학기술연구원과 인천대학교를 비롯하여 전자통신연구원, 삼성종합기술원 등에서 최근 연구가 진행되고 있으며 기술적인 면에서 비교적 기초적인 여건이 잘 갖추어져 있다고 할 수 있다. 단자속 양자회로 설계의 경우 설계 software가 국내 연구기관에 설치되어 있으며 단자속 양자회로 제작을 위한 설비들도 지난 10년간의 1차 국책연구사업을 통하여 잘 갖추어져 있는 편이다.

현재 다층박막 기술, 신뢰성 있는 접합제작 기술 및 논리소자의 설계 기술 등 핵심 기반 기술 개발과 RS flip-flop, shift register 등 기본 소자의 제작 기술을 확보하는 것을 목표로 연구가 수행되고 있다.

전자통신연구원에서는 주로 접합 기술 연구를 수행하고 있는데, 경사형 모서리 (ramp-edge) 조셉슨 접합의 장벽물질 (barrier materials)로 사용하기 위해 YBCO와 유사한 결정구조와 격자상수를 가지는 입방정(cubic) YBCO 박막과 Co, Ca 및 Pr 등이 도우핑된 YBCO 박막 등에 대한 연구도 수행하고 있다.

최근 한국과학기술원과 인천대는 공동으로 YBCO 고온초전도 박막을 사용하여 고온초전도 단자속 양자 소자의 기본적인 구성 요소 중의 하나인 RS flip-flop회로를 성공적으로 제작하여 60~71 K에서 동작을 확인하였다. Reset-set 동작을 100회 반복시에는 오동작율이 0%이었으며, 300회 반복시에도 오동작율이 약 1%정도로 양호하였다. 그림 7은 제작된 RS flip-flop의 현미경 사진이다.

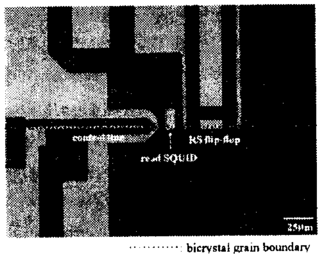


그림 7. 고온초전도 R-S flip flop 회로

이 밖에 삼성 종합기술원에서는

자체과제를 통하여 디지털 소자 응용을 위한 접합제작 기술 연구를 수행하고 있다. 7% Ga을 도핑한 YBCO를 중간층으로 사용하여 경사형 조셉슨 접합을 제작하였는데 (Fig. 3), 60 K에서 I_cR_n 값이 320 μV 이상의 우수한 junction을 재현성 있게 얻었다[4].

3. 맺는말

지금까지 고온초전도 박막을 이용하는 전자소자의 응용기술 개발 현황을 살펴보았다. 1987년 이후 지난 10 여년동안 고온초전도 전자소자제작 기술은 응용의 가능성을 충분히 보여주었으며 이제는 이미 일부 분야에서 실용적인 기술개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 마이크로파 필터 등 일부 소자는 실용화의 문턱에 서 있으며 SQUID 등의 응용기술은 가능성을 충분히 보여주고 있어 다음 세대에 들어서면 실용화가 가능할 것으로 보인다. 그러나 아직도 고온초전도박막 제작 공정 및 소자의 재현성 및 안정성 향상, 신뢰성있는 소형 냉각 기술의 확보 등 해결해야 하는 문제가 아직도 남아있으며 디지털 소자 제작기술에 있어서는 이러한 문제가 해결되어야만 실용화의 가능성을 예측할 수 있을 것으로 보인다.

그러나 초전도 전자소자가 지니고 있는 여러 가지의 특성 즉 고감도, 고속, 저 전력소모 및 소형화 등은 앞으로의 전자공학기술이 추구하고 있는 방향과 일치하고 있어 새로운 전자공학의 중요한 핵심기술로 자리잡게 될 것이며 다음 세대에서는 의료, 정보통신, 환경 탐사 등의 분야에서 인류의 삶의 질 향상에 없어서는 않될 핵심기술이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Superconductor Week, Vol. 12 No. 13. July 20, (1998).
2. Y. Zhang, Y. Tavrin, H.-J. Krause, H. Bousack, A. I. Braginski, U. Kalberkamp, U. Matzander, M. Burghoff and L. Trahms, *Applied Superconductivity* **3**, 367 (1995).
3. A.P. Rijpma, Y. Seppenwoolde, H.J.M. ter Brake, M.J. Peters and H. Rogalla, presented in EUCAS'97, June 30 - July 3, 1997, the Netherlands.
4. J. M. Rowell, *Proc. of the 10th Anniverary HTS Workshop on Physics, Materials and Applications*, ed. by B. Batlogg, C.W. Chu, W.K. Chu, D.U. Gubser, and K.A. Müller, World Scientific, Singapore 1996, p. 52.
5. M.L. Lucia, R. Hohmann, H. Soltner, H.-J.Krause, W. Wolf, H. Bousack, M.I. Faley, G. Spörl, and A. Binneberg,*IEEE Trans. on Appl. Supercon.* **7**(2), 2878 (1997).
6. R.C. Black, C. Wellstood, E. Dantsker, A.H. Miklich, D.T. Nemeth, D. Koelle, F. Ludwig and J. Clarke, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 99 (1995).
7. J.R. Kirtley, M.B. Ketchen, K.G. Stawiasz, J.Z. Sun, W.J. Gallagher, S.H. Blanton and S.J. Wind, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1138 (1995).
8. Y.R. Chemla, T.S. Lee, J. Clarke, M. Adamkiewicz and B. BuchananProc. of 6th Int. Supercon. Electronics Conf., June 25-28, 1997, Berlin, Germany, p.140.
9. J.P. Wikswo, Jr., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 5(2), 74 (1995).
10. T.R. Clem, G.J. KeKelis, J.D. Lathrop, D.J. Overway, and W.M. Wynn, *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*, ed. by H. Weinstock, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996, p. 517.
11. T. Van Duzer, IEEE Trans. on Appl. Supercon. **7**, 98 (1997).
12. K. K. Likharev, O. A. Mukhanov, and V.K. Semenov, SQUID'85, Berlin, Germany: W. de Gruyter, 1985, p. 1103.
13. S. Shokor, B. Nadgorny, M. Gurvitch, V. Semenov, Yu. Polyakov, and K. Likharev, *Appl. Phys. Lett.*, **67** (6), 2869(1995).
14. R. J. Wiegerink, G .J. Gerritsma, E.M.C.M. Reuvekamp, M.A.J. Verhoeven, and H. Rogalla, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, 5, 3452(1995).

< 주진호 위원 >