

고온초전도 SQUID 제작 및 응용 기술

박 용 기

한국표준과학연구원 양자표준부장

1. 머리말

액체질소 온도에서 초전도성을 나타내는 Y-Ba-Cu-O 초전도체가 발견된지 10년이 되는 해이다. 그동안 세계적으로 대단히 많은 연구가 이루어져 이제 초전도기술은 단순히 가능성만을 지닌 기술이 아니라 실용화에 가까이 다가선 기술이며 21세기에 기술혁신을 주도할 중요한 핵심기술의 하나로 자리 잡고 있다. 지난 10년 동안 많은 분야에서 큰 발전이 이루어 졌지만 그 중에서도 고온초전도 박막의 제작 기술 및 이를 응용한 초전도 전자공학 소자 분야의 발전은 가장 괄목할만하다고 할 수 있다. 복잡한 조성의 산화물을 박막화하는 기술이 확립되어 고온초전도체뿐만 아니라 강유전체 및 기타의 산화물 박막제작에 크게 기여하였으며, 고온초전도 박막을 이용한 고효율 및 고감도의 마이크로 필터가 개발되어 차세대의 개인 휴대용 통신 시스템(PCS) 기지국에의 실용화를 눈 앞에 두고 있다. 또한 고온초전도 박막을 이용한 초고감도 자기장 센서인 초전도양자간섭장치(SQUID, Superconducting Quantum Interference Device)가 개발되어 그 성능이 크게 향상되었으며 이를 실용화하기 위한 기술 개발이 진행되고 있다.

이 글에서는 고온초전도 박막 응용기술 중 특히 SQUID 제작 및 응용기술의 현황과 전망을 소개하고자 한다.

2. 고온초전도 접합 및 SQUID 센서 제작 기술 현황

SQUID 시스템의 주요 구성요소는 조셉슨 접합이 연결된 SQUID 루프(loop)와 외부 자기신호를 1차적으로 감지하는 pickup 루프, 그리고 이 신호를 SQUID 루프에 전달하는 input 코일 등으로 나눌 수 있다. SQUID 센서는 좁은 의미로는 SQUID 루프를, 넓은 의

미로는 위의 3가지 요소가 결합된 형태를 의미한다. SQUID 루프에는 dc SQUID인 경우 조셉슨 접합이 2 개, rf SQUID인 경우에는 1 개가 초전도 고리중간에 연결되어 있기 때문에 조셉슨 접합제작기술이 대단히 중요하다. 이와 함께 SQUID 루프와 input 코일의 결합방식, 자력계 (magnetometer) 및 gradiometer 제작기술 또한 SQUID의 특성을 결정하는데 중요하다.

1) 고온초전도 접합 제작 기술 현황

현재 개발되고 있는 고온초전도 접합은 크게 5가지 형태로 분류할 수 있다. 즉 결정경계 접합 (grain boundary junction), 근접효과 접합 (proximity effect junction), 터널 접합 (tunnel junction), weakened 구조의 접합 (weakened structure junction) 및 나노브리지 (nanobridges) 등이다. 이 중 현재 SQUID 제작에 많이 사용되고 있는 접합은 결정경계 접합으로 자연적 혹은 인공적으로 만들어진 결정경계를 이용하고 있으며 이들은 형태에 따라 다시 자연 결정경계 접합 (natural grain boundary junction), 복결정 접합 (bicrystal junction), biepitaxial 접합, step-edge 접합 등이 있다. 이들은 biepitaxial 접합을 제외하면 모두 단일층 박막 제작공정으로 제작이 가능하다. 이들 중 SQUID 제작에 가장 많이 사용되고 있는 접합은 복결정 접합 및 stepedge 접합이다. 복결정 접합은 현재까지 $I_c R_n$ 값이 가장 크고 잡음특성도 좋으며 특히 접합제작의 재현성이 좋아 SQUID 제작에 많이 쓰이고 있는데 접합의 위치를 임의로 선정할 수 없어 집적화 및 회로응용에는 적합하지 않다는 단점을 지니고 있다. 이러한 면에서는 step-edge 접합이 대단히 유리하며 최근 step-edge 접합의 특성이 많이 개선되고 있지만 재현성에서 복결정 접합에 뒤지고 있다.

재료 및 소자특집

초전도체와 도체 혹은 반도체가 접합을 이루게되면 근접효과를 이용하여 조셉슨 접합제작이 가능하다. 이러한 접합의 장벽(barrier)으로는 은이나 금 같은 귀금속(noble metal)이나 금속특성을 나타내는 에피텍셜한 박막물질이 주로 사용되고 있으며 접합전극의 표면을 처리하여 사용하기도 한다. 현재까지 개발된 근접효과 접합은 장벽이 YBCO 박막의 ab 면을 차단하도록 제작되고 있기 때문에 항상 c-축으로 성장시킨 박막을 사용하고 있다. 장벽을 귀금속이나 에피텍셜한 산화물 박막으로 사용하는 경우 2중 박막구조(SNS step-edge나 SNS birdge 등) 혹은 3중 박막구조(edge 혹은 ramp-edge 형태)가 된다.

결정계 접합, 특히 복결정 접합의 경우 여러 다른 연구자들이 발표하는 접합 특성이 작은 편차를 가지고 일치하는 반면, 페롭스카이트 구조의 산화물 박막을 장벽으로 제작되는 ramp-edge 접합의 경우 임계전류밀도나 임계전압 등이 연구자 마다 큰 편차를 나타내고 있다. 최근에는 YBCO에 Ca이나 Co를 첨가하여 장벽으로 사용하려는 연구가 진행되고 있는데 격자상수나 열팽창계수 등이 초전도 YBCO 상과 잘 일치하고 있어 접합면의 열화를 방지할 수 있다는 보고도 있다. 산화물 박막을 장벽으로 사용하는 rampedge 접합의 장점은 사용되는 장벽의 물질, 두께 등을 조절함으로써 접합의 특성을 조절할 수 있다는 것이다. 그러나 다층박막을 사용해야 하므로 공정이 조금 복잡하며 아직 모든 공정을 in-situ로 처리하기가 어려워 거둠율(yield)이 떨어지는 점 등은 개선되어야 할 문제점이다.

2) 고온초전도 SQUID 센서 제작 기술 현황

Input 코일과 SQUID 루프와의 결합 방식은 센서의 감도 및 잡음특성 등에 결정적인 영향을 미치게 된다. 다층박막구조 제작이 용이한 저온초전도 SQUID에서는 SQUID 루프와 multi-turn input 코일이 동일한 실리콘 웨이퍼상에 집적되어 제작되지만, 고온초전도 SQUID의 경우 이러한 집적화가 어려워 몇가지의 다른 결합 방식이 제안되어 연구되고 있다.

고온초전도 SQUID magnetometer 제

작을 위하여 현재까지 4 가지의 기본적인 결합 방식이 사용되고 있다. 이러한 결합 방식은 단일층 박막을 이용한 결합방식과 다층 박막을 이용한 결합 방법으로 대별할 수 있다. 감도가 높은 자력계를 만들기 위해서는 소자의 인덕턴스를 줄이면서 유효면적을 키워야 하기 때문에 어떠한 결합방식을 사용하던지 이러한 효과를 극대화하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 단일층 결합방식으로는 SQUID 루프의 면적을 크게한 large washer SQUID와 SQUID 루프의 일부를 input 코일로 사용하는 direct coupling 방식이 있다. 최근 direct coupling 방식을 이용한 SQUID 자력계에 대한 많은 연구가 이루어지고 있는데, 이는 인덕턴스가 큰 pickup 루프를 SQUID 루프와 병렬로 연결함으로써 자기장에 대한 감도를 높이는 한편, SQUID 루프에 의해서만 결정되는 유효 인덕턴스는 줄여 잡음수준을 최소화할 수 있는 장점을 지니고 있기 때문이다. 그러나 무엇보다도 자속 변환기와의 결합이 용이하고 제작이 간편한 점이 장점이다. 미국의 Conductus사는 20 x 20 mm²의 SrTiO₃ bicrystal 위에 directly coupled SQUID를 제작하여 1 Hz에서 26 fT/Hz^{1/2} 및 1 kHz에서 14 fT/Hz^{1/2}의 자기장 잡음(magnetic field noise)을 얻었다.

이와는 달리 독일의 Forschungszentrum Jülich 그룹에서는 rf SQUID의 주파수를 microwave 영역으로(보통 150 MHz) 올린 microwave SQUID를 개발하고 SQUID 센서와 microwave 안테나를 일체로 제작하여 자기장 분해능을 높이는 방식을 채택하고 있다. 최근에는 넓은 면적의 washer(8 mm)를 가진 SQUID를 단일층의 YBCO 자속변환기와 flip-chip 방식으로 결합시켜 잡음을 측정하였는데, 40 x 40 mm²의 pick-up loop를 사용하여 0.5 Hz까지도 자기장 잡음이 24 fT/Hz^{1/2}인 SQUID 자력계를 개발하였다.

다층박막 제작 기술이 개발되면서 다층박막 구조의 pickup 루프와 input 코일의 제작이 시도되고 있는데 이들은 SQUID와 동일한 기판 위에 일체형으로 집적시키거나 flux transformer를 별도의 기판에 제작한 후 SQUID washer와 겹쳐서 사용하는 flip-chip 방식이 있다.

Flip-chip 결합방식은 자속변환기와 SQUID 센서를 서로 다른 기판에 제작한 다음 서로

포개어 유도결합 (inductively couple) 시키는 방식이다. 간단한 방법으로는 넓은 면적의 초전도박막으로 된 자속 집속기 (flux focuser)를 사용하는 방법이 있고 각각 1 회선 pickup 코일과 input 코일로 된 단일층 초전도박막 자속변환기를 사용하는 방법이 있다. 보다 진보된 형태로는 다층박막으로 제작된 다중 회선 (multi-turn) input 코일을 포함한 자속변환기를 사용하는 방법이 있는데 20 회선 input 코일과의 결합까지 시도되었다. Berkeley 대학의 John Clark 그룹에서는 폭이 1-3 μ m 인 bicrystal 접합을 사용하여 washer 크기가 500 μ m x 500 μ m인 SQUID를 제작하고 별도의 기판에 제작된 16 회선의 input coil을 가진 flux transformer를 flip-chip 형태로 결합시킨 SQUID magnetometer를 제작하였는데, 자기장 잡음이 1 Hz에서 27 fT/Hz^{1/2}, 1 kHz에서 8.5 fT/Hz^{1/2} 수준이다.

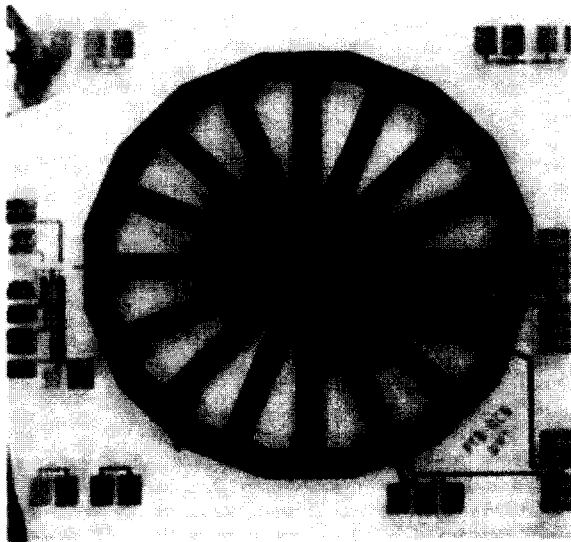


그림 1. Berkley 대와 독일의 PTB 그리고 영국의 Birmingham 대학에서 공동으로 제작한 fractional turn magnetometer

다층박막을 이용한 집적방식은 다중회선의 input 코일과 SQUID 센서를 단일 기판상에 제작하는데, 제작이 까다롭지만 동일한 면적에서는 높은 감도를 기대할 수 있기 때문에 많은 연구를 하고 있다. 그러나 이러한 다층구조의 자력계에서는 1 kHz 이하의 주파수 영역에서 저주파 1/f 잡음이 상당히 큰 것으로 보고되고 있어 저주파에서의 응용에는 적합하지 않다는 보고도 있다. 이러한

집적형 SQUID의 제작은 몇몇 그룹에서 수행하였으나 재현성이 낮은 편이며 지금까지 보고된 단일 기판 집적형 SQUID 중 감도가 가장 좋은 것은 1 Hz에서 40 fT/Hz^{1/2} 정도이다.

또 다른 형태의 다층 집적형 SQUID로는 'fractional turn magnetometer' (때로는 'multiloop magnetometer' 혹은 'Drung type magnetometer'라 부름)가 있다. 이 SQUID는 독일 PTB의 Drung이 Nb 초전도 박막으로 제작하여 다채널 생체자기계측에 사용한 형태의 SQUID로 여러개의 (일반적으로 8 개 혹은 16개) SQUID 루프를 병렬로 연결하여 유효면적은 동일하게 유지시키면서 총인덕턴스를 줄이는 방식이다. Berkley 대와 독일의 PTB 그리고 영국의 Birmingham 대학에서는 공동으로 직경이 7 mm인 16 회선 다층박막형 고온초전도 SQUID 자력계를 YBCO/SrTiO₃/YBCO의 삼층구조로 제작하였는데 bias reversal 방식으로 측정된 자기장 잡음은 77 K, 1 Hz에서 37 fT/Hz^{1/2} 이며 1 kHz에서는 18 fT/Hz^{1/2} 이다.

SQUID를 이용한 미세신호 측정시 많은 경우 1 Hz 정도의 낮은 주파수 영역에서 낮은 잡음특성이 요구된다. 이를 위해서는 1/f 잡음 수준을 낮추어야 하는데 이를 위한 꾸준한 연구가 이루어 지고 있어 77 K, 1 Hz에서의 자기장 잡음이 1987년에 비해 현재는 약 1000 분의 1 수준까지 향상되었다. 표 1에는 여러형태로 제작된 SQUID의 감도를 비교하였다.

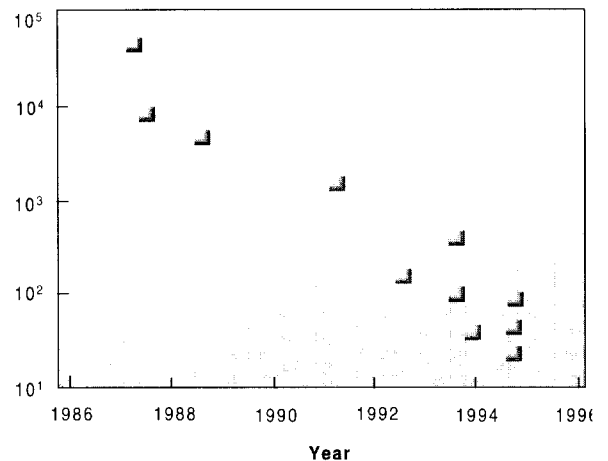


그림 2. 고온초전도 SQUID의 77 K, 1Hz에서의 자기장 잡음의 향상 추이

재료 및 소자특집

표 1. 여러 형태의 SQUID magnetometer의 크기와 감도 비교

(F.Ludwig, Proc. of 5th Intern. Superconductivite Electronics Conference(ISEC'95), September 18-21, 1995, Nagoya, Japan)

SQUID 자력계 형태	pickup loop 크기 (mm)	자기장감도(1 Hz) $S_B^{1/2}$ (fTHz ^{-1/2})	자기장감도(1 kHz) $S_B^{1/2}$ (fTHz ^{-1/2})	참고문헌
▪ directly coupled	9	93	93	2
▪ directly coupled	9.3	65	40	3
▪ directly coupled	19	26	14	4
▪ directly coupled + flux transformer	45	39	31	5
▪ large rf washer	8	170	170	6
▪ rf washer + flux transformer	40	24	24	7
▪ multiloop	7.2	37	18	8
▪ 다중 회선 flip-chip	10	27	8.5	9
▪ 다중 회선 집적형	7.4	40	40	10

3. SQUID 응용 기술 현황

SQUID는 인간이 가지고 있는 자기장 측정 센서 중 가장 감도가 높은 센서이다. 더욱이 저주파의 자기신호 측정에 대단히 유용하여 기존의 센서로는 측정이 불가능한 극미세 자기신호의 검출이 가능하며 이를 이용한 많은 응용분야가 제안되어왔다. 고온초전도 SQUID의 개발에 따라 이를 응용하는 기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는데 이러한 기술들은 머지 않은 장래에 실용화될 것으로 보인다. 현재 주요 관심분야는 생체 자기 계측과 재료의 비파괴평가이다.

SQUID를 이용하면 심장이나 뇌에서 발생하는 자기장을 측정할 수 있으며 이를 통하여 심장 및 뇌 질환의 진단이 가능할 뿐만 아니라 뇌의 기능연구도 가능하다. 고온초전도체를 이용한 SQUID의 경우 심자도 측정에는 이미 충분한 수준의 감도를 갖추고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 일부 연구그룹에서는 뇌자도측정의 초보적인 연구결과도 보고하였다.

독일의 Forschungszentrum Jülich 그룹에서는 rf SQUID와 자속 집속기 (flux focuser)를 이용하여 150 fT/Hz^{1/2}의 자기장 분해능을 가진 2차 electronic gradiometer를 제작하고 심자도측정을 하였다. 또한 일

본의 초전도센서연구소(SSL)에서는 YBCO dc SQUID와 자속집속기를 사용한 16 채널 심자도 측정장치를 개발하여 가슴부위 12 cm²에서의 자장분포를 측정하는데 이어 32 채널 시스템도 완성하였다. 이 장치의 자기장 분해능은 200 fT/Hz^{1/2}이다. BTI사에서는 SNS 형태의 접합을 이용하고 15 회선의 input coil이 집적된 SQUID magnetometer를 제작하여 심자도 및 청각자극에 의해 유발된 뇌자도를 측정하였다. 사용된 SQUID 자력계의 감도는 10 Hz에서 280 fT/Hz^{1/2}이었다. 또한 독일의 PTB에서도 덴마크의 NKT연구소에서 제작된 집적형 SQUID 자력계를 이용하여 심자도와 전기적 자극에 의해 유발된 뇌자도 측정에 성공하였다. Additional positive feedback (APF)과 bias reversal 방식을 사용하여 측정된 자력계의 감도는 1 kHz에서 9.7 fT/Hz^{1/2} 그리고 1 Hz에서는 53 fT/Hz^{1/2}이었다. 국내에서도 한국표준과학연구원, LG종합기술원 및 삼성종합기술원에서 고온초전도 SQUID를 이용한 심자도 측정 기술에 대한 연구를 수행하고있는데 한국표준과학연구원에서는 자기차폐실을 갖추고 고온초전도 SQUID 7채널 심자도 측정장치를 개발하여 심자도측정에 성공하였으며 현재 16 채널 장치의 개발이 진행중이다.

SQUID를 이용한 생체자기측정기술은 비접

측 및 비파괴적이면서 인체의 기능에 대한 3차원적인 정보를 얻을 수 있다. X-ray CT나 MRI-CT 등의 진단방법은 우수한 공간분해능을 가지지만 해부학적인 정보만을 제공하며 인체내의 동적인 정보는 제공하지 못하고 있다. 전기적 측정인 심전도나 뇌파는 체내의 활동전류에 의해 인체표면에 생긴 전압을 측정하기 때문에 활동전류 및 주변에 발생하는 전기활동의 공간적인 합에 의존하는 반면 SQUID를 이용한 생체자기측정은 인체가 자기적으로 투명하기 때문에 자장 발생원으로부터 공간적으로 떨어진 위치에서 측정이 가능하고 측정결과가 주로 발생원의 전류에만 의존하기 때문에 발생원의 위치를 정확하게 추정할 수 있는 장점이 있으며 시간분해능이 우수하기 때문에 인체의 기능적인 정보를 얻는데 유용하게 사용될 수 있다. 따라서 현재 병원에서 사용하는 심전도나 뇌파보다 더 정확하게 심장이나 뇌의 상태를 진단할 수 있기 때문에 선진국에서는 보다 넓은 부위를 빠른 시간에 측정할 수 있는 다채널시스템을 개발하고 측정신호를 분석하여 임상데이터를 체계화하는 연구가 활발히 진행중이다. 미국의 경우 2006년까지 256 채널의 뇌자도 측정장치가 100여개의 병원에서 사용될 것으로 예상하고 있으며, 5000여 병원에서는 128채널 심자도 측정장치를 사용할 것으로 예상하고 있다. 또한 500,000명의 의사들이 7채널 정도의 심자도 측정장치를 현재 사용중인 심전도 대신 사용할 것으로 예상하고 있다. 그림 3은 한국표준과학연구원에 설치되어있는 자기차폐실내에서 다채널 고온초전도 SQUID 시스템을 이용하여 심자도를 측정하는 모습이다. 심자도 파형의 분석을 통하여 심장 질환의 정밀한 진단이 가능하며 심장발작에 의한 돌연사의 가능성을 미리 예측함으로써 위험을 줄일 수도 있을 것으로 기대되고 있다. 또한 태아의 심장기능 진단의 경우 SQUID를 이용한 심자도 측정이 기존의 심전도에 비해 대단히 감도가 높은 측정결과를 얻을 수 있어 앞으로 유용하게 쓰일 것으로 보인다.

비행기나 건물과 같은 구조물 등의 안전을 진단하기 위해서는 여러 종류의 비파괴 검사 기술이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 비행기 날개의 리베트 연결부 등 여러

접으로 되어있는 구조의 내부 층에서의 균열 등은 기존의 방법으로는 검사하기가 어렵다. 기존의 유도코일을 센서로 사용하는 와전류 탐상(eddy current test) 방법으로는 표면으로 부터 25 mm 이하의 알루미늄에 생긴 결함을 검출하기가 어려운데, 이는 깊



그림 3. 한국표준과학연구원에 설치되어 있는 자기차폐실내에서 다채널 고온초전도 SQUID 시스템을 이용하여 심자도를 측정하는 모습

은 결함 탐상을 위해 낮은 주파수로 와전류를 유도시키면 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 가능해지고 있다.

비파괴평가 분야에서는 이외에도 여러 형태의 SQUID 현미경 기술 개발이 활발하다. 매릴랜드 대학 부설 초전도연구센터에서

재료 및 소자특집

SQUID Scanning Probe Microscope (SSPM)를 개발하여 여러가지 모양의 초전도박막 패턴 및 미세전류가 흐르는 복잡한 도선의 궤적을 그리는데 성공하였으며 또한 Eddy Current Microscope (ECM)도 개발하였다. 또한 Neocera라는 회사에서는 주사 스쿼드 현미경 (Scanning SQUID Microscope)을 시판하고 있다.

SQUID는 이외에도 지하자원 탐사, 지진 및 화산 예측, 잠수함 탐지 및 지하에 매설된 환경 오염물질 탐사 등에 폭 넓게 사용될 수 있다. 일본에서는 최근 SQUID ELFA (Extremely Low Frequency Antenna) 시스템을 이용하여 지자기 변동 관측을 통한 지각변동 및 화산활동 등을 예측하는 장치를 개발하고 있으며 이를 상용화할 예정이다.

4. 맺는말

고온초전도 박막을 이용한 SQUID 제작 기술은 지난 10년동안 대단히 빠르게 발전하여왔다. 고온초전도 SQUID의 감도도 이제 십자도 측정 가능한 수준에 도달하였으며 이를 바탕으로 다채널 십자도 측정 장치가 개발되어 실용화 가능성을 제시하였다. 비파괴 평가에의 응용도 많은 연구가 시작되었다. 특히 독일에서는 고온초전도 SQUID를 이용한 휴대용 비파괴검사 장치를 개발하는 등 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 아직 SQUID의 감도 향상, 안정성 및 제작의 재현성 개선, 다층박막 기술을 이용한 집적화 기술 개발, 자기잡음의 제거 기술 등 실용화를 위해서는 해결해야 할 문제점들이 많이 남아있다고 할 수 있으며 이러한 문제점의 개선 연구와 함께 새로운 SQUID 응용 분야의 개발도 이루어져야 할 과제이다. 그러나 SQUID 응용 기술은 이미 실용화의 가능성이 여러 분야에서 입증되고 있으며 21세기에는 의료, 뇌기능 연구, 환경 탐사, 구조물의 안전성 검사, 지진 예측, 자원 탐사 등의 여러 분야에서 우리의 삶의 질 향상을 위한 핵심 기술로 자리 잡을 것이 확실하다.

참고문헌

1. F.Ludwig, Proc. of 5th Intern. Supercon-

- ductivity Electronics Conference (ISEC'95), September 18-21, 1995, Nagoya, Japan
2. D.Koelle, A.H.Miklich, F.Ludwig, E.Dantsker, D.T.Nemeth, and J.Clarke, Appl. Phys. Letters 63, 2271 (1993)
 3. L.P.Lee, J.Longo, V.Vinetskiy, and R.Cantor, Appl. Phys. Letters 66, 1539 (1995).
 4. R.Cantor, L.P.Lee, M.Teepe, V.Vinetskiy, and J.Longo, IEEE Trans. Appl. Supercond. 5, 2927 (1995).
 5. D. Koelle, A.H. Miklich, E. Dantsker, F. Ludwig, D.T. Nemeth, J. Clarke, W. Ruby, and K. Char, Appl. Phys. Letters 63, 3630 (1993).
 6. Y.Zhang, M.Mück, K.Herrmann, J.Schubert, W.Zander, A.I.Braginski, and C. Heiden, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3, 2465 (1993).
 7. Y. Zhang, U. Krüger, R. Kutzner, R. Wördenweber, J. Schubert, W. Zander, M.Stupp, E.Sodtke, and A. I. Braginski, Appl. Phys. Letters 65, 3380 (1994).
 8. F.Ludwig, E.Dantsker, R.Kleiner, D.Koelle, J.Clarke, S. Knappe, D.Drung, H.Koch, N. Mcn. Alford, and T.W. Button, Appl. Phys. Letters 66, 1418 (1995).
 9. E. Dantsker, F. Ludwig, R. Kleiner, D. Koelle, J. Clarke, M. Teepe, L. P. Lee, N. McN. Alford, and T. Button, Appl. Phys. Letters 67, 725 (1995).
 10. O. Dössel, B. David, and D. Grundler, Proceedings of the HTS Workshop on Applications and New Materials, Twente, 1995.
 11. Y. Zhang, Y. Tavrín, H.-J. Krause, H.Bousack, A.I.Braginski, U.Kalberkamp, U. Matzander, M. Burghoff and L. Trahms, Applied Superconductivity 3, 367 (1995).
 12. L. Ludwig, J. Beyer, D. Drung, S. Bechstein and Th. Schung, Extended abstract, 12. ISEC97, p.4, June 1997, Berlin, Germany.
 13. Hyukchan Kwon, In-Seon Kim, Yong-Ho Lee, Jin-Mok Kim, Yong Ki Park and Jong-Chul Park, Jpn. J. Appl.

Phys. 37, 496 (1998)

14. D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker and John Clarke, Reviews of Mod. Phys. 71 (3), 631 (1999).

저자이력



박용기
1951년 5월 19일생
1975년 서울대 공과대학 재료
공학과 졸업(학사), 1977년
KAIST 재료공학과 졸업(석
사), 1985년 미국 노스웨스턴
대학원 재료공학과(공학박) 현재
표준과학연구원 양자표준부장