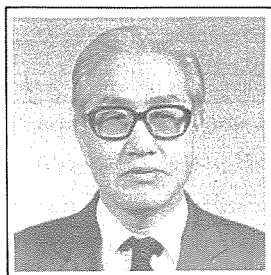


電子工學에서의 초전도응용

超전도集積回路의 注目



李 晷 漢
(서울大工大 교수·電子工学)

1987년에 접어들면서 초전도재료가 다음세대를 위한 꿈의 재료로서 급격히 부상되고 있는 것은 臨界溫度 T_c 가 지난 날보다 월등하게 높은 새로운 초전도재료가 계속적으로 개발되고 있기 때문이라 할수 있다.

이와같은 소위 고온 초전도재료의 개발이 계속된다면 머지 않아 常溫의 T_c 를 가지는 재료까지 개발되나 않을까 싶은 정도의 희망을 주고 있으며, 사실상 상온에서 초전도현상을 발견하였다는 일본학자들의 보고도 있는 것이다. 그래서 많은 신소재의 경우와 같이 특히 미·일간의 개발경쟁은 매우 심각할 정도로 전개되어 가고 있으며 앞으로 분쟁의 씨앗이 될 것인지, 협력의 원천이 될지는 예측키 어렵다.

고온 초전도 재료는 T_c 가 월등하게 높아서 그를 이용할 수 있는 분야가 크게 확대될 것이 예상되며 재래의 저온 초전도재료의 경우보다 월등하게 사용이 용이 하다. 초전도재료들은 다양한 조성으로 이루어진다는 것은 앞으로의 발전에 큰 기대를 걸수 있는 요건의 하나 이기도한 것이다.

그러나 한편으로는 현재의 고온 초전도재료의 주류를 이루고 있는 것들이 세라믹스라는 점이

그들의 응용 특히 전자분야에서의 응용에 있어서의 큰 제한조건의 하나가 되고 있는 것이다. 즉, 그의 가공성이 금속계 초전도재료나 유기물 초전도체재료(유기금속등)들 보다는 크게 뒤지고 있는 것이다. 따라서 금속계의 초전도재료가 응용면에서는 활발하게 개발되고 있으며 고온 초전도재료의 線材化기술과 導膜化기술이 적극적으로 추진되고 있는 것이다.

◇ 초전도 재료의 응용동향

Strategic Analysis사의 1986년에서 2005년까지의 초전도 시장전망에 의하면, 전 세계적으로 보아 1986년도 대비 2005년도 시장전망을 현재의 전자분야에서의 4000만달러에서 2005년에는 이의 10배가 될 것으로보고 있고 활동수준도 매우 높을 것으로 전망하고 있는 것이다. 같은 통계에 의하면 1986년 현재 計裝 및 医用분야에서의 초전도재료 시장을 가장 큰 2억달러로 보고 있으며, 그러나 2005년에는 그것을 7억 8천만 달러로 추정하고 있다.(표-1)참조. 이 분야는 전자분야와 매우 근접된 분야로서 이와같이 볼 때 전자 및 전자관련분야에서의 초전도 시장의

비중이 매우 높은 것임을 알 수 있다. 따라서 이 분야에 종사하는 사람들의 초전도 재료에 대한 관심이 클 것이라는 것이 쉽게 짐작된다.

(표-1) 초전도 시장 전망 (단위: 백만달러)

이 용 분 야	1986	2005	활동수준(전세계)
전 자	40	400	매우높음
계 장 및 의 용	200	780	높 음
항 공 및 방 위	25	350	약간높음
공 업	20	200	높 음
에 너 지 생 산	< 5	50	매우낮음
수 송	< 5	20	낮 음
계	290	1,800	

전자공업관련 부문에서 볼때 Tc 20K에서 90K에 이르는 소위 따뜻한 초전도재료는 Jc(臨界電流密度)가 큰것은 의료기기인 핵자기공명 단층촬영장치(NMR-CT) 등 강자장 응용분야와 전자빔 轉寫장치, X선 描書장치등과 같은 반도체제조장치등에의 이용이 추진되고 있으며 낮은 Jc의 것은 초전도 전자소자(大型用), SQUID(의료용)등과 같은 부문에서의 이용이 예상된다. 또 Tc가 90K에서 300K까지의 초전도재료의 경우는 전선이나 소형 전자석 같은 곳에서는 Jc가 높은 것이, 그리고 Jc가 낮은 것들은 초전도전자소자(小型用과 마이컴용)과 SQUID(일반 센서용)등에 이용될 것이 예상된다.

NMR-CT(의료용)는 1990년경부터 초전도소자, SQUID등은 1995년경부터, 선재는 2000년경부터, 또 전력 전자관련부문의 초전도이용은 2005년경부터 시장이 확장될 것이 예측된다.

◇ 초전도 전자소자의 개발

초전도재료의 전자공학에의 응용은 일찍이 저온 초전도재료인 금속초전도재료의 이용으로부터 시작되었으며 고주파 공동(Cavity)을 초전도체로 만듦으로써 공동의 표면저항을 크게 저하시킬 수 있어서 銅으로 제작할 때 보다는 현저하게 큰 Q값의 공동을 개발하기도 하였다. 이와 같은 공동을 이용한 전자, 陽子등의 초전도 선

형 가속기, 초전도 고주파 입자판별기(RF Separator)도 출현하고 있는 것이다. 이와같은 가속공동의 경우는 낮은 고주파 전력으로 연속적인 운전이 가능한 것이다. 또 이와같은 초전도 공동의 尖銳한 공진동작을 이용하면 주파수 안정도가 매우 높은 발진기도 만들 수 있다. 초전도 통신케이블도 가능 하지만 경제성과 냉동계통의 신뢰성등 때문에 실용화까지는 아직도 멀다.

초전도 전자석과 관련하여 미국에서는 초전도 재료를 이용한 전자석으로 구성된 초고전압 가속기로 양자와 양자를 각각 반대방향으로 돌려 충돌시켜 얻어지는 강력한 에너지로 일종의 현미경을 만들어서 마이크로의 세계를 관찰하고 물성을 해명하려는 계획도 진행되고 있다. 초전도 전자석과 관련하여 전자산업분야에서 가장 빠르게 실용화가 예상되는 것중의 하나는 아마도의 료용 NMR-CT장치일 것이다. NMR-CT장치에서는 스캐너의 전자석으로 강력한 자장을 인가하여 먼저 인체내의 원자들을 정열시키고 다음에 고주파 펄스를 인가하여 이들 원자를 일시적으로 교란시켜 정열상태에서 벗어나게 한다. 이때 그 원자들이 당초의 상태로 되돌아 갈때 원자들은 전자파를 발생하는데, 이것을 이용하면 신체내부의 조직의 상세한 영상을 만들 수 있다. 따라서 10배나 강력한 자석을 만들 수 있어 NMR-CT에서는 초전도 전자석이 유리하지만 이때 현재로서는 NMR-CT의 크기가 크게되는 것은 액체 헬륨 냉각제를 써야되기 때문이며 거대한 열절연장치에 대한 비용과 헬륨 냉각시스템 유지의 비용도 많이 된다. 그러나 고온 초전도재료의 이용으로 소규모 병원에도 NMR-CT의 설치 가능성이 될 것이다. Diasonics사에 의하면 액체질소를 사용하면 연간 10만달러의 비용절감이 가능할 것이라고 전망하고 있다.

반도체 제조장치에 있어서도 초전도자석의 이용으로 GaAs의 생산비를 절감할 수 있다는 것.

◇ Josephson 素子와 그 응용

초전도 전자소자의 컴퓨터에의 응용은 일찍부

터 개발의 목표이었으며 현재도 컴퓨터를 위한 초전도전자소자의 연구는 전자공학 분야에서의 초전도응용의 주된 대상으로 되어 있다. 1956년 D. A. Buck에 의하여 발표된 초전도 전산기소자 크라이 오토론은 초전도소자의 시초라고 할수 있다.

동작원리에서 볼때 이 크라이오토론을 비롯하여 크로우에(Crowe) 셀, 터널트론, 조셉슨 소자 등 많은 초전도소자가 컴퓨터를 위하여 제시되었었으며, 특히 이들중 조셉슨소자는 초고속 컴퓨터소자로서 각광을 받고 있다. 조셉슨소자를 중심으로한 초전도 集積回路는 미국의 IBM Watson 연구소를 비롯 일본등에서 활발한 개발연구가 진행되고 있다. 컴퓨터를 중심으로한 정보처리 장치의 회로소자는 논리연산소자와 기억소자로 구분할 수 있지만 이들은 쉽사리 식별할 수 있는 안정된 2개상태를 갖고 이들 상태사이에서의 轉移 즉 스위칭이 마음대로 또 쉽게 제어될수 있어야 하는데, 초전도체의 경우는 초전도상태와 정상적(전도) 상태가 이들 2개상태에 대응된다. 이와같은 2 상태간에서의 스위칭 동작을 초전도체로 구현시킨 대표적 시초의 것이 크라이오토론이다. 금속 초전도체의 붕과 권선으로 이루어진 권선형은 $100\mu s$ 정도의 낮은 동작속도를 이루는 단점이 있어 자계제어형 증폭소자인 이 권선형이 그후 개선되어 薄膜크라이오토론이 되었고 초전도체의 薄膜化기술의 싹이 트기 시작하였다.

이 박막형에는 차폐박막형, In-line 박막형 등의 변형이 있다. 초전도체로 구성된 D자형 環路속을 흐르는 永久電流를 이용한 기억(회로)소자의 대표적인 것은 크로우에 셀이다. 이것을 매트릭스로 만들기 어려운 점을 해결코자 연속 박막 기억소자가 개발되었는데, 이것에는 구멍이 없는 하장의 기억박막이 쓰인다.

1960년 Giaever에 의하여 터널트론이라는 負性抵抗特性을 나타내는 초전도 터널 소자가 발표되었다. 이것은 얇은 절연층을 사이에 두고 초전도상태에 있는 양쪽 금속체간에다 전압을 가해주면 이 절연층을 통하여 전류가 흐르며 그

의 전류-전압 특성은 터널 다이오드와 유사한 부성저항을 나타낸다. 이때 한쪽 금속체만을 초전도상태로 하면 非直線의 전류-전압 특성이 생긴다(이 소자의 常溫에서의 전류-전압특성은 直線的임). 초전도 2극 터널소자의 전류-전압특성은 磁場을 가해주면 변화되는 고로 이 터널소자는 磁場을 한 입력으로 삼으면 3단자 증폭소자로서 작동시킬 수도 있는 것이다.

또 초전도상태의 물체에 전자파를 쏘여주면 전류-전압 특성이 크게 변한다. 이와같은 현상을 이용한 마이크로 波의 검출기가 Burnstein(1961년), Dayem(1962년)등에 의하여 제안되고 있다.

이러한 배경속에서 1962년 조셉슨효과이론이 나왔고 그에 근거한 조셉슨소자가 현재의 실리콘소자를 대치하는 차세대의 고속 저소비전력의 컴퓨터를 구성할 전자소자로서 부상되고 있는 것이다.

조셉슨 효과는 저온 초전도체에 대한 소위 BCS이론에서부터 이론적으로 예상된 것이다. 이 이론에 의하면 초전도의 본질은 그 물질의 전자-격자(lattice)의 상호작용에 기인 하는 다수의 電子雙(Cooper Pair) 집단의 量子力學的인 거동에 있으며 온도가 상승하면 이들 쌍은 일반적인 전기전도현상에서의 電導電子와 유사한 성질의 準粒子(Quasi-Particle)로 된다는 것이다. 즉 초전도 상태에서는 모든 전자쌍을 전자로 간주할 수 있다. 조셉슨 효과는 2개의 초전도체를 수 $nm(1nm=10^{-6}mm)$ 정도의 사이를 두고 접근시킬때 이들이 서로 접촉하지 않더라도 전자쌍의 터널전류가 흐른다는 것이다.

이와 같은 접합(특히 초전도체사이에 절연층을 두었을 때)을 조셉슨 接合이라 한다. 또 이때 접합사이에는 전압이 나타나지 않는다. 전압 없이 흐르는 전류에는 상한값이 있으며 그 값은 자장에 의하여 변화되며 또 이 상한치 이상으로 전류가 흐르면 접합사이에 전압이 발생되고 발생전압에 비례한 주파수의 고주파전류가 생긴다.

이상과 같은 조셉슨효과가 발생토록된 구조의 초전도소자가 조셉슨소자이며 수 nm 의 절연막

을 초전도체 사이에서 끼운 구조의 것등이 있다.

조셉슨소자는 전압을 발생치 않은 상태와 전압을 발생한 상태를 각각 한 안정된 상태에 대응시킬때 논리연산소자 및 기억회로소자로서 정보처리 장치나 컴퓨터에 이용할 수 있다.

조셉슨효과를 이용한 소자는 작은 자장으로 큰 전류변화를 얻을 수 있어 크라이오트론과 비슷한 자체제어형 소자 또는 고감도, 즉응성 磁束센서로 이용할 수 있고 자체측정등에 쓸수 있다. SQUID(超電導 量子干涉素子)는 이에 속하는 것으로 RF형과 DC형이 있다. 조셉슨소자에서는 초전도 전극간의 직류전압과 발생하는 교류주파수와와의 관계가 재료나 구조에는 무관한 고로 물리량($2e/h$)의 정밀측정에 이용할 수 있고 전압표준용으로도 이용할 수 있다. 기타 전자파에 대한 센서로서 그리고 고주파, 원적외선의 발전기, 검파기, 믹서 등으로서의 조셉슨소자의 이용이 개발중에 있다.

전압표준으로 쓸 경우는 조셉슨 접합에 마이크로파를 조사하였을때 발생하는 電壓스텝이 마이크로파의 주파수에 비례하는 것을 이용하는 방식이며 이미 실용화 되고 있다.

조셉슨소자는 터널접합 이외에도 점 접촉형, 가느다란 초전도체로 2 개의 초전도체를 연결한 형식으로 된것등 여러가지 형태의 것이 제안되고 있다.

근래 3 단자형 초전도소자 즉, 트랜지스터가 개발되고 있어 종래의 2 단자형 즉 다이오드형 소자만으로는 회로설계에 제한을 주게 되므로 이것이 초전도회로 실용화에 기여할 것이 기대되며 또 이 소자에는 고온 세라믹스 초전도재료도 적용이 가능하다고 한다, 또 일본의日立제작소는 세라믹스 고온 초전도재료를 박막화하여 光스위칭소자를 개발하는데 성공하였다고 하며 그의 정보전달속도는 실리콘을 쓴 광 스위칭소자보다 비약적으로 빨랐다고 한다.

◇ 초전도집적회로

조셉슨 접합은 여러가지 형태의 것이 있지만

터널 障壁형의 것이 소자의 재현성이 가장 좋으며 寫眞蝕蝕기법으로 단일 칩위에 대규모집적회로(LSI)를 구성하기가 용이하다. 컴퓨터에의 응용을 목적으로할 경우 조셉슨접합의 고속 스위칭특성을 살리기 위해 여러 회로를 단일 칩위에 다 LSI化하는 것이 꼭 필요한데, 이때는 앞서의 이유 및 기타의 이유등으로 이 터널형의 조셉슨 접합이 현재로서는 가장 유망하다.

지난 봄 외신에 의하면 미국의 Tiny Hypres사는 IBM이 그간 우여곡절 끝에 실패한 조셉슨접합기술을 완성하여 조셉슨접합 집적회로 개발생산에 성공하였다고 한다. 엄청나게 빠른 측정용 위크스테인션의 핵심부품으로 개발된 칩으로 동작은 신뢰성있게 동작하는 회로를 구성하였고, 또 소자의 냉각문제도 해결하고 있다.

이 위크스테인션은 $ps(=10^{-12}s)$ 의 고속 신호 처리기이며 디지털 샘플링 오실로스코프로 쓰이는 이 처리기는 다른 동계열의 것들에 비해 훨씬 뛰어난 5ps의 상승시간, $50\mu V$ 의 감도, 70GHz의 대역을 가지고 있다고 한다. 이와같은 성능은 유사한 다른 기종에 비해 5 배정도 우수한 성능인 것이다.

금속계의 저온 초전도체의 박막을 이용한 이 조셉슨소자의 직접회로는 비록 소규모의 것이지만 초전도 전자기술을 한 시스템구성에 적용하는데 성공하였다는 점에서 상당한 의의가 있다. 즉, 이것은 조셉슨소자를 소형이면서도 강력한 슈퍼컴퓨터를 만드는데 이용하는 첫걸음이 될수도 있기 때문이다. 이것은 밀리미터 波의 통신, ns($1ns=10^{-9}s$)이하의 디지털 신호처리, 애널로그 신호처리, 고 정밀도의 애널로그/디지털 변환등 중요한 전자기술 분야에 조셉슨소자를 활용할 수 있음을 예고하는 것이라 할 수 있다.

따라서 세계적으로 이와같은 조셉슨소자 특허 그의 직접회로개발의 열기가 솟고 있는 것이라 하겠다. 특히 고온 초전도체를 이용한 이와같은 소자 및 직접회로의 개발연구는 많은 주목을 끌고 있는 것이다.

— 오는손님 반가웁게 —

가는손님 즐거웁게