

超電導
時代를
연다

조셉슨 素子 및 應用

Josepsok's Element and
its Application...

朴 鍾 喆

韓國標準研究所 量子物理研究室長

1. 序 論

최근 액체질소를 냉각제로 사용할 수 있는 高溫 超電導체가 발견됨에 따라 초전도체의 소규모 응용의 대표적인 경우인 조셉슨 素子の 개발이 새로운 관심의 대상이 되고 있다.

1962년 캠브리지 대학의 대학원학생이던 조셉슨에 의해서 예견된 조셉슨 효과는 곧 실험으로 확인되었으며 그 후 조셉슨효과를 실현할 수 있는 조셉슨 소자를 개발하여 이용하려는 노력이 계속되어 왔다. 조셉슨 소자를 이용하면 매우 빠른 속도로 스위칭(Switching)이 가능하며 초전도체로 되어 있으므로 전력소비가 적은 장점이 있어서 다음 세대의 초대형 고속 컴퓨터에는 필수적으로 사용될 것으로 기대되고 있다.

이 논문에서는 조셉슨 소자를 이루는 조셉슨 접합의 원리를 설명하고 대표적인 응용 예를 알아보기로 한다.

2. 조셉슨 접합

조셉슨 접합은 두개의 초전도체를 絶緣体로 연결해 놓은 간단한 구조를 갖고 있는데, 조셉슨 접합을 설명하기 위해서는 먼저 초전도체에 대한 간단한 설명이 필요하다. 超電導(Superconductivity)라는 것은 11視的인 양자現象으로 물질내에 존재하는 傳導電子(혹은 홀)가 매우 정돈된 상태하에 있어서 이들 전자의 운동을 기술하는 波動函數의 位相이 멀리까지 영향을 미칠 수 있으며, 이때 전기저항이 없어지는 현상이 나타난다. 만일 두개의 초전도체를 약하게 연결해 놓으면 한 초전도체의 파동함수의 위상은 이 약하게 연결된 부분을 통하여 계속되지는 못하지만 다른 초전도체의 위상에 영향을 줄 수 있으며 이 약하게 연결된 부분을 조셉슨 접합(Josephson Junction)이라고 부른다.

조셉슨 접합을 통하여는 전압을 걸어주지

않아도 전류가 흐를 수 있으며 이 전류를 超電流이라고 한다. 초전류의 양은 두 초전도체의 파동함수의 위상차 ϕ 에 따라 (1)식과 같이 나타낼 수 있다. 즉

$$I_s = I_c \sin \phi \quad (1)$$

이며 여기서 I_c 는 초전류의 전류, 혹은 臨界超電流(Critical Supercurrent)라고 하며 접합의 구조에 의해 성해지는 값이다. 접합의 양단에 전압 V 를 걸어주면 위상차와 전압간에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

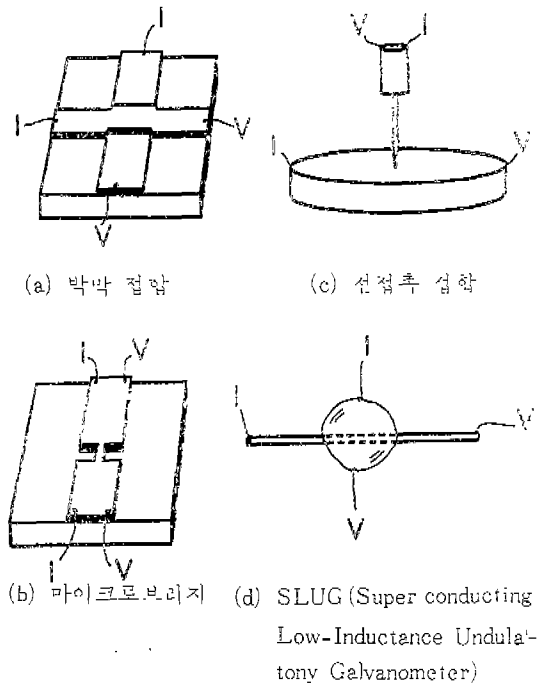
$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2eV}{h} \quad (2)$$

여기서 e 는 전자의 電荷, h 는 플랑크의 상수 h 를 2π 로 나눈 물리의 기본 상수이다. (1), (2)식이 바로 조셉슨에 의해서 양자역학적으로 유도된 관계식이며 조셉슨 방정식이라고 부르는데 이 두식에서 조셉슨 접합의 여러가지 특성을 구할 수 있다.

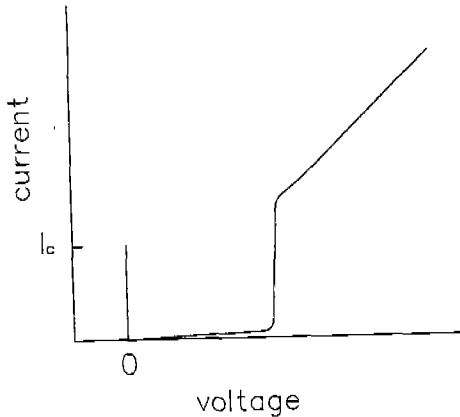
조셉슨 접합에서 일어나는 모든 전자기적 현상은 직류효과(dc effect)와 교류효과(ac effect)로 분류되는데 위상차를 포함한 변수가 시간의 함수이면 ac효과이고 아니면 dc효과이다. ac효과중 가장 중요한 것은 (2)식에서 알 수 있는 바와 같이 접합양단에 직류전압을 걸어주면 조셉슨 振動이 일어나며 초전류는 전압에 비례하는 진동수로 진동한다. 이때 비례상수는 $1\mu V$ 의 전압에 대해 $483.6MHz$ 이다. 한편 접합에 마이크로파를 照射하면 접합에 걸어진 전압 때문에 생기는 자체 진동과 조사된 전자파의 주파수가 調和(Harmonic)를 이룰 때 안정된 전류가 접합을 통해서 흐르고 定電流이 나타난다. 이와같이 조셉슨접합은 직류를 교류로, 교류를 직류로 바꿀 수 있는 특성을 갖고 있으므로 마이크로파의 혼성(Mixing), 조화파 발생기(Harmonic Generator), 발진자(Oscillator) 등으로 사용할 수 있다.

여기서 한가지 유의할 점은 조셉슨 효과를 나타내기 위해서는 초전도체 박막(Tain Film)과 절연체 박막으로 되어 있는 박막접합이 반드시 필요한 것이 아니며 두개의 초전도체가 약하게 연결된 형태(Weak Link)만 이루어진 된다는 사실이다. 가장 이상적인 조셉슨 집합은 초전도체를 약 10\AA 의 眞空中으로 분리시켜 놓은 면적 $1mm^2$ 정도의 구조를 갖고 있는 것이다. 실제적으로는 유리나 사파이어 판위에 수 μm 정도의 초전도체 박막을 입힌 후에 표면을 산화시켜 수 nm(nanometer) 두께의 절연체를 만들고 그 위에 다시 초전도체를 입히는 薄膜접합과 폭이 수 μm 정도의 마이크로 브리지(Micro bridge), 점접촉(Point Contact)접합 등이 사용되고 있다. 그림 1에 여러가지 형태의 조셉슨 접합이 나와 있다.

가장 흔히 사용되는 형태인 박막접합은 안정된 특성을 갖고 있어서, 신뢰성이 요구되는 검류



〈그림 1〉 여러가지 종류의 조셉슨 접합



〈그림 2〉 박막형 조셉슨 접합의 전류-전압 특성

(전압이 0일때 전류 I_c 가 흐를 수 있다.)

터 소자에 사용되고 있으며 점접촉 집합은 사용 중에도 접합의 간격을 조절할 수 있는 장점이 있으므로 초전도 양자간섭장치(SQUID)와 같은 측정기기로 많이 이용되고 있다.

조셉슨 접합의 특성은 구조와 제작방법에 따라 다르나 모든 종류의 집합이 공통적으로 가지고 있는 성질은 수 μA 내지는 수 mA 의 초전류를 흐르게 할 수 있다는 점이다. 그림 2에 박막 집합의 이상적인 전류-전압특성이 나와 있다.

電流의 크기가 I_c 보다 커지면 그림 2에서 보는 바와같이 전압이 나타나게 되며 전압 0인 상태와 전압이 0이 아닌 상태가 명확히 구분되므로 조셉슨 접합을 컴퓨터 소자로 사용할 수 있는 것이다.

이 밖에 조셉슨 접합은 磁場(Magnetic Field)에 대해서 매우 민감하게 반응하는데 이 특성도 조셉슨 접합의 응용에 중요한 역할을 한다.

3. 應 用

조셉슨 접합의 응용중에서 가장 잘 알려져 있는 컴퓨터 소자로의 응용과 현재 실용되고 있는 대표적인 예인 超電導 量子 干渉裝置(Superconducting Quantum Interference Device; SQUID)에 대하여 알아보기로 한다.

조셉슨 접합을 이용하면 초전도 상태와 저항이 있는 상태 사이를 빠른 속도로 스위칭할 수 있으며 이때 소모되는 전력이 아주 적다는 사실이 알려짐에 따라 이 접합을 컴퓨터 칩으로 사용하려는 시도는 조셉슨 효과가 발견된 직후인 1964년부터 IBM 연구팀에 의하여 시작되었으며 2년후에는 10^{-9} 초(ns) 이하의 빠른 속도로 작동하는 논리회로(Logic Circuit)를 제작하여 시범하는 데 성공하기에 이르렀다. 이에 따라 IBM에서는 앞으로 개발될 초고속 컴퓨터에 조셉슨 접합을 사용하기 위하여 집중적인 노력을 경주하였으며, 그 결과로 그때까지는 겨우 몇개의 조셉슨 접합을 제작할 수 있던 수준에서 조셉슨 접합의 집적회로를 제작할 수 있는 단계까지 발전시키게 되었다.

IBM 연구팀에 의해 개발된 접합은 납(Pb)에 인듐과 금을 합금한 초전도체를 사용하였는데 이 종류의 조셉슨 집합은 논리회로와 기억회로로 사용하기에 우수한 특성을 가지고 있으나 납이 연한 금속이어서 제작시에 실패율이 높고 특히 액체 헬륨 온도와 상온을 반복하게 되면 열팽창 때문에 생기는 응력의 영향으로 특성이 달라지는 단점이 있다.

IBM의 성공에 영향을 받아 '70년대 말에 와서는 일본에서도 조셉슨 접합을 사용한 컴퓨터 개발에 관심을 갖게 되었으나 1983년 IBM은 물연 조셉슨 컴퓨터계획을 중단한다는 발표를 함으로써 많은 사람들을 놀라게 하였다. IBM이 계획을 중단한 이유는 첫째, 반도체 기술이 빠

른 속도로 발전함에 따라 조셉슨 소자의 상대적 인 장점이 많이 감소되었으며, 둘째로는 조셉슨 접합을 기억저장 소자로 사용하는 데는 해결해야 할 많은 어려움이 있다는 것이 명백하여졌기 때문이다.

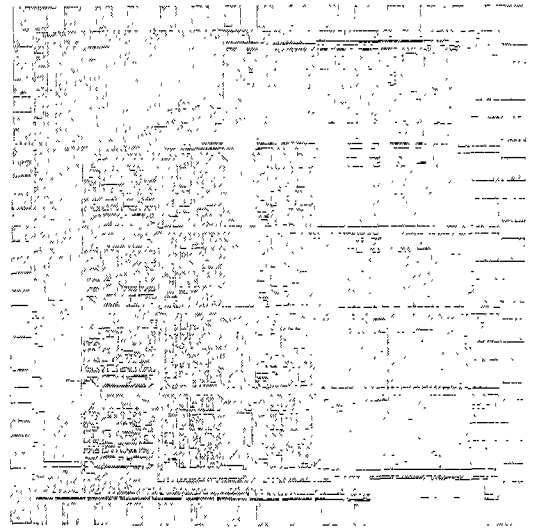
한편 일본의 조셉슨 컴퓨터 개발계획은 꾸준히 계속되어 상당한 성공을 하고 있다. 일본의 연구팀들은 IBM의 실패를 경험삼아 납대신 내화금속인 니오비움(Nb)과 Nb합금인 NbN을 사용하여 접합을 제작하는데 진념하였다.

그림 3에 일본의 電子總合研究所(ETL)에서 제작한 4×4 bit Multiplier가 나와 있다. NbN를 사용하여 제작된 이 Multiplier에는 650개의 Gate를 포함하고 있으며, 10^{-9} 초(Nanosec)에 Multiplication을 할 수 있으며 소모전력은 $210 \mu W$ 에 불과하다.

조셉슨 접합을 사용한 논리회로의 최고 속력은 $1.5 \mu m^2$ 의 Gate를 사용하여 4.2 Picosec/Gate의 빠르기를 내는데 성공한 일본 선신전화(NTT)의 경우가 기록이다. 반도체 소자를 사용하여도 1 Picosec 이하의 스위칭 시간을 갖는 것이 가능하지만 그렇기 위해서는 소자의 크기를 μm 이하로 만드는 특별한 제작기술이 개발되어야 할 것이다.

조셉슨 素子를 이용한 장치에서 소모되는 전력은 대개 수 μW 정도로 반도체 소자를 사용한 장치보다 약 1000분의 1 정도로 적으므로 같은 면적내에 더 많은 소자를 집적시키는 것이 가능하며 따라서 신호가 짧은 거리를 통하여 전해지므로 빠른 속도의 컴퓨터를 제작할 수 있게 된다.

이밖에 유리한 점으로는 超電導體를 소자와 소자간의 연결도선으로 사용할 수 있으며 이 경우 도선에서 소모되는 전력은 사실상 없는 셈이다. 또한 초전도체는 본질적으로 불순물이나 격자결함의 영향을 받지 않으므로 반도체 소자의



(그림 3) 일본의 ETL에서 개발한 초전도 칩

(4×4 bit Multiplier로 NbN를 사용하여 제작하였으며 650개의 Gate로 되어 있는데 계산속도는 1 Nanosec 이고 소모전력은 $210 \mu W$ 이다.)

경우처럼 고순도의 單結晶을 만들어야 하는 어려움이 없다. 따라서 조셉슨 접합을 사용하여 Wafer 크기의 집적회로를 만들거나 3차원 집적회로를 만드는 것도 가능할 것이다.

조셉슨 접합을 제작하는 데는 가능한 한 일계 온도 T_c 가 높은 초전도체가 유리하며 NbN의 경우 T_c 는 약 15K이다. 그리고 접합에 사용되는 절연체로는 초전도체를 산화시키는 방법보다 처음부터 절연체를 사용하는 것이 접합의 균일성을 유지하는데 유리하며 MgO나 비정질 Si이 사용되기도 한다.

조셉슨 접합을 이용한 컴퓨터 素子는 이제 실험실 규모를 떠나서 일부 실용화되는 단계에 와 있다. 금년 초 美國의 Hypress사는 Nb합금으로 제작된 조셉슨 접합 장치를 사용하여 디지털 샘플링 오실로스코프를 개발하는 데 성공하였다.

超電導時代를 연다

이 회사의 PSP-1000 Picosecond Signal Processor는 Rise time이 5 Picosec, Sensitivity는 $50\mu V$ 이며 Bandwidth가 70GHz로 현재 시판되고 있는 어떤 기기보다 최소한 5배는 나은 성능을 갖고 있다.

조셉슨 접합을 사용한 초고속 컴퓨터를 개발하기 위해서는 아직도 해결되어야만 하는 문제들이 많이 있으나 그간 상당한 진전이 있었고 더우기 최근에 발견된 고온 초전도체를 이용하여 조셉슨 접합을 제작하는 데도 성공하였으므로 이 분야의 연구에 더욱 박차가 가해질 것은 틀림없는 사실이며 조셉슨 컴퓨터가 멀지 않은 장래에 등장할 수도 있겠다.

조셉슨 접합을 응용하는 기기중에서 현재 가장 일반적으로 사용되는 것이 초전도 양자 간섭 장치(SQUID)이다. SQUID는 하나 혹은 두개의 조셉슨 접합을 초전도체로 연결하여 만든 간단한 구조를 가지는데 현재 개발되어 있는 어떤 센서 보다도 높은 감도로 磁束(Magnetic Flux)을 감지할 수 있다. SQUID는 $0.01 \text{ aWb} (= 10^{-12} \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^2)$ 의 작은 자장을 감지할 수 있으므로 적절한 회로에 연결시키면 전압, 저항, 磁化率, 變位 등의 물리량을 다른 센서를 사용해서는 상상도 못할 정도의 정밀도로 측정하는 것이 가능하다.

SQUID의 응용은 저온물리학에서는 말할 것도 없으며 地球物理學分野에서는 磁氣地質學, 岩石의 磁氣的性質연구 등에 이용되고 있으며 生醫學에서는 심장 운동계(Magneto-Cardiograph)와 뇌파(Brain Wave) 연구에 응용되고 있다. 또한 저주파 통신, rf 전력측정, 전압 및 전류비교기 등에 이용되고 이밖에 重力波 감지, 粒子物理學에서 기본 문제인 쿼크의 검출(Guark Hunting), 磁氣單極子를 찾는 데도 사용되는 등 응용 범위가 날로 넓어지고 있다.

위에 열거한 응용중에서 인체와 관련된 흥미 있는 응용인 뇌파감지에 대하여 설명하기로 하자.

인체에서 발생하는 자기적 신호는 아주 미세하여 심장에서는 약 100 피코테슬라($=10^{-10} T$)의 자장이 생성되고 뇌에서 발생하는 신호는 약 $100fT (= 10^{-13} T)$ 에 불과하다. 현재 개발되어 있는 SQUID의 감도가 이보다 훨씬 좋기는 하지만 주위에서 발생하는 자기적 소음이 훨씬 크므로 이를 제거하기 위하여 차폐실을 사용하고 자장의 기울기를 測定하는 방법으로 뇌에 전기적인 자극이나 시각 또는 청각신호를 주었을 때 나타나는 반응을 연구하고 있다.

또한 간질병환자의 뇌에서 발생하는 전기적 신호를 감지하여 방전이 일어나는 부위를 정확히 앎으로써 수술로 제거할 수도 있다. 이밖에 SQUID는 정신분열증, 파킨슨씨병, 알제이머씨병과 같은 신경계통 질환의 원인을 찾아내고 치료방법을 개발하는데도 사용된다.

SQUID를 이용한 기기는 상용화되어 있으며 앞으로 더 많은 분야에서 응용될 것임에 틀림없다.

4. 結 論

초전도체를 사용하여 제작한 조셉슨 접합은 이미 기초과학, 의학분야에서 많이 응용되고 있다. 조셉슨 접합의 응용중에서 가장 많은 관심의 대상이 되고 있는 컴퓨터素子로의 응용은 빠른스위칭 속도와 전력소모가 적은 장점이 있으나 아직 접합의 안정성, 신뢰성, 제작공정 등에서 해결되어야 할 문제가 많다. 최근 고온 초전도체에 관한 연구가 매우 활발하므로 고온초전도체를 사용하여 안정된 조셉슨 접합을 제작할 수 있다면 초고속 조셉슨컴퓨터의 실현이 의외로 빠를 수도 있을 것이다.