

조셉슨 효과와 그 실용화

역/대한전기기사협회

서 언

조셉슨 효과는 근년에 와서 많이 각광을 받게 된 일렉트로닉스 선단기술의 한가지이다. 이 효과는 절대영도 가까이의 극저온에 있어서 표시하는 대단히 흥미깊은 현상으로서, 실리콘이나 다른 반도체 등의 기존 재료에서는 얻을 수 없는 많은 우수한 기능을 만들어 낼 수가 있다. 특히 차세대 초고성능 계산 기용 소자로서 기대되며, 또한 극미소 자계에 대응하는 특성은 여러가지 계측 응용에 실용화되고 있다.

여기서는 조셉슨 효과와 그 현상을 해설하고 그 응용의 구체적 예를 소개하기로 한다.

1. 조셉슨 효과의 원리와 특성

조셉슨 효과란 1962년 조셉슨(B.D. Josephson)에 의해 이론적으로 발견된 다음과 같은 현상이다.

두 초전도체간에 얇은 절연체를 끼운 구조의 접합에 있어서는 초전도 전자(쿠퍼대라고 한다)가 터널 효과로 절연층을 빠져서 흐른다. 이 효과를 조셉슨 효과라고 하며, 다음에 이 접합에 전위차가 생기면 접합에는 교류가 흐르는 것을 표시하였다. 현재는 이 두 효과를 합해서 조셉슨 효과라고 하며, 다음과 같이 부르고 그것을 표시하는 관계식이 있다.

(i) 직류 조셉슨 효과: 조셉슨 접합을 흐르는 터널 전류밀도 I 는 초전도체의 파동함수 위상차를 θ 라고

하고 다음 식으로 표시한다.

$$I = I_0 \sin \theta \dots\dots\dots(1)$$

(ii) 교류 조셉슨 효과: 조셉슨 접합단자간에 전위차 V 가 생기면 소자에는 (2)식과 같은 관계가 성립하고 (3)식의 주파수를 갖는 교류전류가 흐른다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2e}{\hbar} V = \frac{2\pi}{\phi_0} V \dots\dots\dots(2)$$

여기서 e 는 전자의 전하, \hbar 는 플랑크의 정수/ 2π , ϕ_0 는 자속양자, V 는 접합간에 걸리는 전압이다.

$$2\pi f = \frac{2e}{\hbar} V \dots\dots\dots(3)$$

f 는 발진주파수

이상과 같은 현상을 좀 더 상세히 설명한다.

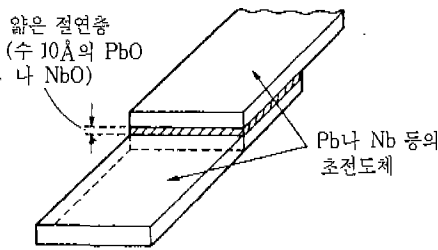
초전도체란 어떠한 도체인가? 이 도체는 특수한 도체로서 절대영도에 가까운 온도로 이 도체를 냉각 각시키면

- ① 전기저항이 0이 된다. 따라서 초전도선으로 링을 만들면 그 안을 흐르는 전류는 전원이 없어도 영구히 계속 흐른다.
- ② 마이스 효과가 있다. 초전도체 내부에는 외부로부터 자계가 침입할 수가 없다.
- ③ 자계의 작용이 있다. 어떤 조건하에 있어서 외부로부터 자계를 가하면 초전도상태가 상실되어 전압상태로 이행한다(임계전류값은 자계에 의해 변화한다).

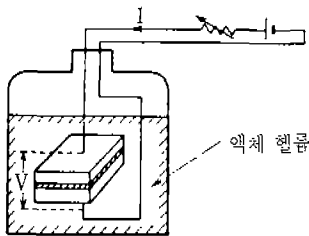
와 같은 대단히 흥미로운 성질을 제공하는 것이다.

이와 같은 초전도체는 Pb, Nb, Nb₃, Ge 등 여러 가지 재료가 있으며 Pb와 Nb는 조셉슨 소자를 제작하는 데 가장 많이 사용하고 있다.

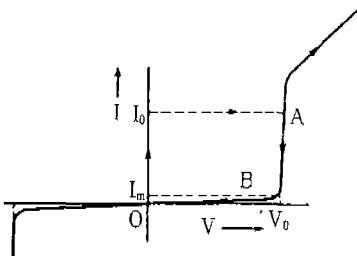
이와 같은 초전도재료를 사용해서 조셉슨 소자(조셉슨 접합이라고도 한다)를 만들려면 <그림 1>과 같이 2매의 얇은 Pb간에 수 10Å까지의 얇은 절연층을 끼운 구조로 하면 된다. 이와 같은 소자를 <그림 2>의 (a)에서 표시하는 도체 헬륨(4K의 저온)안



<그림 1>



(a) 터널형 조셉슨 소자



(b) 특성

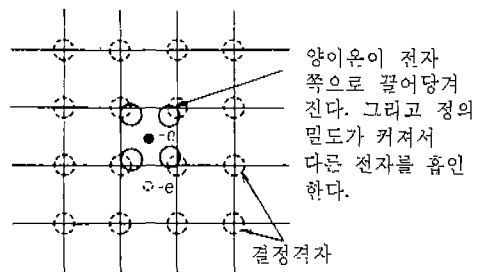
<그림 2> 조셉슨 소자의 전압-전류특성

에 넣고 외부에서 전류를 흘리면 접합을 흐르는 전류 I와 접합의 단자전압 V에는 그림 (b)와 같은 관계의 특성이 얻어진다.

즉, 외부에서 전류를 증가시켜 나가면 소자가 처음에는 초전도상태이기 때문에 접합간의 전압이 0 그대로 전류가 증가하지만 어느 전류값 I_m(임계전류라고 한다)을 초과하면 소자는 돌연 초전도상태가 파괴되어 전압상태로 스위치하여 점 A에 이동한다. 이 전압상태에서 다시 더 전류를 증가시키면 그림의 화살표를 따라 전압도 증가하고, 전류를 낮추면 화살표를 따라 단자전압도 감소하며, 그 전류가 어느 최소 전류값 I_m보다 작아지면 원래의 초전도상태에 복귀한다. 이와 같이 소자는 히스테리시스 현상 특성을 갖는다. 그리고 이 특성은 직류특성으로서 소자가 전압상태가 되면 소자는 (2)식에 따르는 대단히 빠른 주파수로 진동이 생긴다.

그러면 이와 같은 전류-전압특성을 가지는 조셉슨 소자 내부의 전자상태를 잠깐 살펴보자. 극저온에 있어서의 금속내에서 부하전하의 전자가 1개 <그림 3>과 같이 결정격자간에 놓여졌다고 하면 결정격자에 있는 양(陽)이온이 실선과 같이 전자쪽으로 당겨진다. 이것은 전자주위의 양이온 밀도가 커진 것을 표시하고 다른 1개의 전자를 끌어당기는 역할을 하여 결국은 원래부터 있던 전자에 다른 1개가 전자가 흡인된 상태가 되어 전자의 페어(대)를 만든 것이 되며, 이것을 「쿠퍼대」라고 한다.

초전도체에서의 전류의 흐름은 이 쿠퍼대의 흐름

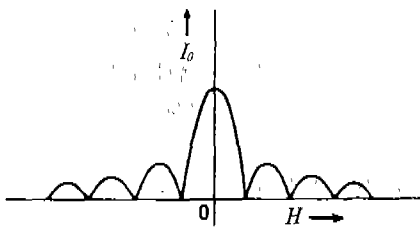


<그림 3> 쿠퍼대가 만들어지는 설명

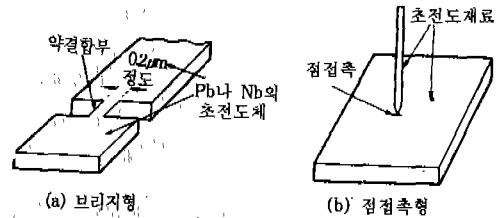
이 된다. 이 쿠퍼대는 터널효과에 의해 두 초전도체 사이에 있는 절연층을 접합의 전압이 0이더라도 뚫고 나가 흐르기 때문에 그 동작속도가 대단히 빠르다. 또한 이 쿠퍼대를 파괴하여 1개씩의 전자로 하기 위해서는 외부로부터 에너지가 필요하며, 이 최소 에너지가 초전도 에너지 갭에 상당하는 에너지이다 (<그림 2>에서 V_g 에 상당한다). Pb계 재료에서는 이것이 2.5[mV]이다. 이 에너지에 의해 1개씩 분리된 전자는 「준입자」라고 하며 이것이 기인하는 전류를 준입자전류라고 하고 있다.

준입자전류는 <그림 2>의 특성상으로는 ABO를 따라 흐르는 전류이다. 이 준입자전류도 절연층을 터널하여 흐른다(또한 상온에 있어서 도체내를 흐르는 전류와 준입자전류는 성질이 상이하기 때문에 준입자전류라고 한다). B.D.Josephson이 이론적으로 설명한 것은 「쿠퍼대의 전자가 얇은 절연층을 자유롭게 터널 효과에 의해 뚫고 흐르는」 이 현상을 지칭하고 있다. 초전도체내에 흐르는 전류는 전부 쿠퍼대의 전자만이 아니고 준입자전류도 함께 흐르게 된다.

조셉슨 소자의 전류-전압특성은 쿠퍼대 전자에 입각해서 <그림 2>의 (b)와 같은 특성이 되지만 임계전류값 I_c 는 외부자계의 영향을 강하게 받아 <그림 4>와 같은 변화를 한다. 이 자계에 의해 I_c 가 변화하는 성질은 논리 회로나 메모리 회로 그리고 또 미약한 자계의 계측 회로를 만드는 데 응용되고 있다.



<그림 4> 외부자계에 대한 I_c 의 의존성



<그림 5> 조셉슨 효과를 나타내는 소자구조

조셉슨 효과소자는 <그림 1>과 같은 샌드위치구조 외에 브리지형 조셉슨 소자<그림 5 (a)>나 점접촉형 조셉슨 소자<그림 5 (b)>가 있다. 브리지형 소자는 두 초전도체를 대단히 약하게 결부하므로 0.2 μ m정도의 가는 브리지를 단 구조이다.

점접촉형 소자는 하나의 초전도 재료에 대단히 가는 또 하나의 초전도재료의 침을 세워서 접촉시킨 구조이다. 어느 소자나 <그림 2>의 (b)와 유사한 전류-전압특성을 나타내며 초전도상태와 전압상태의 두 가지 상태가 관측된다.

2. 조셉슨 효과의 응용

조셉슨 효과의 응용은 상당히 우수한 많은 분야가 있다. 무릇 조셉슨 효과를 표시하는 조셉슨 소자의 기본적인 기능은 다른 소자로는 달성할 수 없는 다음과 같은 우수한 기능을 갖고 있다.

- (i) 초고속 스위칭(10ps/게이트 이하의 속도로 동작한다)
- (ii) 극저 소비전력(0.1 μ W/게이트 이하의 소비전력으로 동작한다)
- (iii) 극미약계의 응답(미약자계 센서기능)
- (iv) 표준전압 발생(일정한 에너지 갭 전압의 발생을 표준전압으로 채용)
- (v) 저잡음의 전자파 응답(서브밀리파 검출)
- (vi) 400[MHz] 이상의 초고조파 발생

이상과 같은 기능이 여러가지 일렉트로닉스 기술에 응용되는데, 이것을 크게 나누면 디지털 기술과 아날로그 기술이며, <표 1>과 같이 분류된다.

<표 1> 조셉슨 소자의 응용분야

디지털기술	— 제5세대 슈퍼 컴퓨터용
	① 연산회로(AND, OR, NOT 각회로, 가산기)
	② 게이트 어레이
	③ 메모리회로
	④ 주변회로, 디코너, 레지스터, 멀티플렉서, 카운터
	⑤ 전원회로
⑥ 실장기술	
아날로그기술	① A/D 컨버터
	② 초고속 샘플링 회로
	③ 초고속 펄스 발생기
	④ 자기 센서 · 자화계획
	· 심자계측 (의료용 일렉트로닉스)
	· 뇌자계측
⑤ 전압표준	
⑥ 전자파검출기	

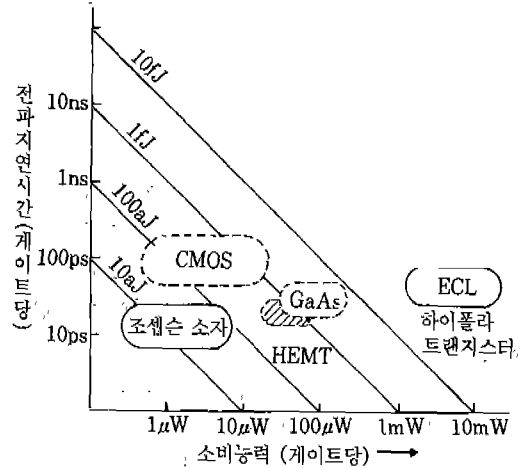
(1fJ = 1×10^{-15} J, 1aJ = 1×10^{-18} J)

(1) 디지털 기술에의 응용

현재 조셉슨 소자의 가장 기대되는 응용의 한 가지는 차세대 컴퓨터 제작이다. 조셉슨 소자를 사용함으로써 현재의 실리콘 재료에 의해 만들어지고 있는 컴퓨터의 성능을 증가하는 컴퓨터가 기대된다.

디지털 IC를 평가하는 척도로서 「전력 · 지연시간적(Power-delay Product)」이라고 하는 「성능지수(Figure of Merit)」가 있으며 <그림 6>에 조셉슨 소자, 실리콘 소자, 갈륨 · 비소(Ga As) 소자 및 HEMT 소자(High Electron Mobility Transistor, 고전자 이동도 트랜지스터)의 전력 · 지연시간 값을 표시하여 각각을 비교하고 있다. 이 표는 횡축에 게이트당의 소비전력을 잡고 종축에 게이트당의 동작 지연시간, 즉 스위칭 속도를 잡고 있다.

이 게이트당의 소비전력과 속도의 적이 성능지수이며, 에너지를 표시하는 「줄」의 단위를 갖는다. IC소



<그림 6> 여러가지 IC소자의 성능지수

자는 PJ(피코줄= 1×10^{-12} [J])의 오더이지만 조셉슨 소자는 1×10^{-17} [J]의 오더 성능이 기대된다.

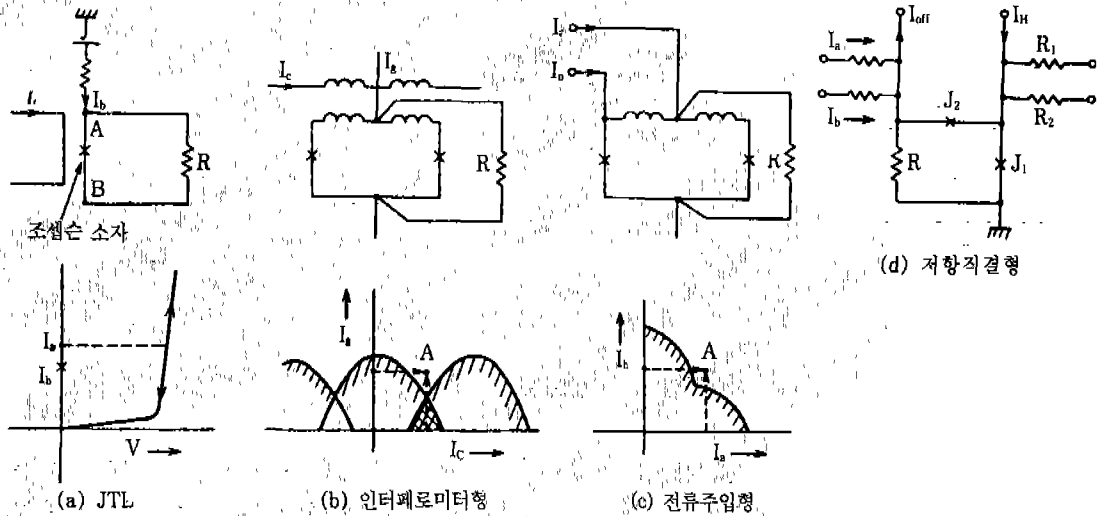
(a) 로직 회로: 로직 회로의 기본회로로 수 종의 회로가 제안되고 있다. 그 회로는

- (i) 조셉슨 · 터널형 회로 (JTL, Josephson Tunnel Logic)
- (ii) 양자간섭형 회로(인터페로미터 로직 회로 또는 스쿠이드(SQUID))
- (iii) 전류주입형 회로
- (iv) 저항직결형 회로

와 같은 회로이다. 여러가지 개량된 회로도 제안되고 있다.

(가) JTL: <그림 7>의 (a)는 JTL회로이다. 조셉슨 소자(이하 JJ라고 표시한다)에 미리 I_0 이하의 바리어스 전류 I_b 를 흘려준다. 외부에서 JJ의 콘트롤 선에 전류 I_c 를 흘리면 자체가 생겨 JJ의 임계전류값이 낮아지고 <그림 4 참조> I_b 보다 작아지므로 JJ는 전압상태로 스위치한다. 그 결과 소자의 단자간 AB에 전압이 생기고 부하 R에 전류가 흘러 다음 소자에 신호를 보내게 된다. 이 형의 소자는 초기의 로직 회로이다.

(나) 양자간섭형 회로: <그림 7>의 (b)에 양자간



<그림 7> 여러가지 로직 회로

섭형 회로를 든다. 이 회로는 2개의 JJ를 인덕턴스를 걸쳐 결합한 회로에 외부로부터 제어전류 I_c 를 흘려서 2개의 JJ를 전압상태로 스위치시키는 회로이다. 즉, 이와 같은 회로의 특성은 그림 (b)와 같은 특성이 있으며, 사선영역은 소자 초전도상태에 있는 영역이고 그 밖은 전압상태를 표시한다.

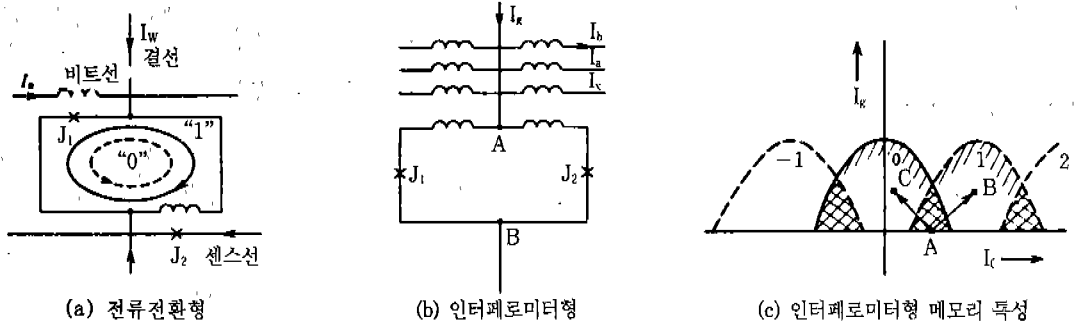
따라서 이 회로에 I_a 와 I_b 를 흘리고 특성곡선도상점 A에 동작점을 이동하면 소자는 전압상태로 스위치하여 부하 R에 전압이 생기고 전류가 흐른다. 이 회로는 AND동작과 OR동작이 가능하다. 동작속도는 20~30ps로 약간 뒤지지만 소비전력이 대단히 작다.

(가) 전류주입형 회로: <그림 7>의 (c)에 이 회로를 표시한다. 이것은 양자간섭형 회로의 제어전류 I_c 를 제거하면 직접 JJ의 단자에 전류를 가한 회로이다. 이 회로의 특성은 하단과 같이 사선부분이 초전도상태이고 그 밖이 전압상태가 되는 특성이 있다. 지금 이 회로에 I_a 와 I_b 를 가하면 동작점이 A점으로 이동하고 JJ는 전압상태로 스위치하여 부하 R에 전류를 흘리고 AND동작을 할 수가 있다. 이 회로는 동작속도가 빠른 특징이 있다.

(라) 저항직결형 회로: <그림 7> (d)의 회로로서, JJ와 저항으로만 구성되어 있다. 바이어스 전류로서 I_b 가 가해지고 있다. 지금 I_a 와 I_b 의 두 입력이 인가되면 J_1 소자가 전압상태로 스위치하고, 이어서 J_2 의 소자도 스위치한다. 이 결과 신호는 부하 R_1 과 R에 전달되는데, J_2 가 전압상태에 있기 때문에 입력단 자쪽으로(역방향으로) 복귀하지 않고 신호의 방향성이 얻어진다. 동작속도가 가장 빠르고 또 소자도 작게 제작되어 고집적화를 도모할 수 있다.

(b) 메모리 회로: 메모리 회로도 여러 종류의 회로가 제안되고 있다. 모두 저소비 전력과 고속동작이 특징이다.

(가)전류전환형 메모리: <그림 8> (a)는 전류전환형 메모리라고 호칭되며, 캐시메모리(계산기의 연산처리장치와 주기억장치 간에 두고 재사용하는 기억 데이터를 이 메모리에 주어 계산기의 고속화를 도모한 것. 즉, 주메모리 보다 고속이지만 용량은 작다)에 사용된다. 원리는 JJ를 1개 포함하는 그림과 같은 루프를 구성한 회로에 비트선, 판독선 등을 설치한다. 지금 "1"를 기입하기 위해 전류 I_w 를 위로부터 아래로 흘리고 다시 번지선택을 위한 전류 I_B 를



<그림 8> 조셉슨 메모리 회로

홀리면 소자 J_1 은 초전도상태로부터 전압상태로 스위치하고 I_k 의 대부분이 루프의 우측회로를 흐른다. 이어서 I_k 와 I_b 가 없어지면 이 루프를 관통하는 자속을 유지하기 위해 루프에 우회하는 영구전류가 흘러 "1"이 기입되게 된다. 이 "1"을 판독하기 위해서는 센스선에 전류를 흘리면 "1"에 상당하는 우회하는 전류의 자계에 의해 소자 J_2 가 전압상태가 되고 출력선에 전류를 흘린다.

"0"의 기입은 전류 I_k 를 아래로부터 위로 흐름으로써 소자 J_1 을 역방향으로 스위치시켜 신호전류가 소멸한 후에도 좌회전의 영구전류를 흘려 "0"을 기억한다. 0을 판독할 때는 센스선에 전류를 흘려도 J_2 에는 역방향의 자계가 가해지므로 스위치 않고 출력이 얻어지지 않는다. 이와 같이 루프내 전류의 방향을 전환하여 메모리 동작을 하기 때문에 전류전환형 메모리라고 부르는데, 동작속도가 대단히 빠른 특징이 있다.

(나) 인터페로미터형 메모리 : <그림 8> (b)는 인터페로미터형 메모리 회로이다. 이 회로의 특성은 그림 (c)와 같이 횡축에 제어(자계용) 전류, 종축에 게이트 전류를 잡으면 이 루프 안에 축적되는 자속 양자수가 0, 1, 2...개에 대응해서 초전도 영역에 중복된 특성(허치의 영역을 갖는 특성)을 갖는 이 자속 양자수가 0과 1의 상태를 논리연산의 "0"과 "1"에 대응시켜서 메모리를 동작시킨다.

즉, 제어선에 미리 I_b 의 바이어스 전류를 흘려 동작점을 A점으로 세트해 둔다. "1"을 기입하기 위해서는 번지선택과 1의 정보신호를 회로에 가하여 동작점을 B로 가지고 가서 자속양자수를 1로 한다. 신호가 소멸하면 A점에 복귀하지만 양자수는 1 그대로 1의 기억동작을 할 수 있다. 0의 정보를 기입하려면 동일하게 해서 동작점을 C위치에 이동시키고 자속양자수를 0 상태로 한다.

신호가 소멸한 후는 A점으로 복귀하지만 양자수는 0 그대로이다. 판독을 하는 경우는 재차 C점의 위치에 동작점을 옮긴다. 만일 자속양자수가 1의 상태일 때는 자속이 0으로 변화하여 회로에 전압이 유지되고 출력기호가 그림 (b)의 AB간에 얻어진다. 0의 상태일 때는 자속의 변화가 없고 출력전압이 나오지 않는다. 이와 같이 해서 메모리 기능이 달성되지만 이 메모리는 파괴 메모리이기 때문에 재기입이 필요하다. 비트당의 소비전력이 극히 작고 동작속도도 빠른 특징이 있다.

(2) 아날로그 기술에의 응용

조셉슨 소자의 아날로그 기술에의 응용은 가장 실용성이 있으며 발전이 기대되는 기술이다. 아날로그·디지털 변환 회로도 100[GHz]에 대응하는 회로가 기대되고 또한 10[ps] 이하의 분해능이 있는 샘플링 회로도 실현되고 있다. 이하, 두 세가지 응용례

를 든다.

(a) 전압표준: 조셉슨 소자가 실용화되어 가장 활약하고 있는 것이 전압표준 분야이다. 미국, 일본, 프랑스, 캐나다 등의 전압표준에 사용되고, 그 정밀도는 $10^{-8}[V]$ 오더의 것이 얻어지고 앞으로는 볼트 정도가 높은 출력전압표준과 신뢰화 연구가 진행될 것이다.

(b) 극미약 자기측정: 조셉슨 소자는 대단히 미약한 자기($10^{-19}T$)를 검지하는 능력이 있으며 다른 소자로는 도저히 달성할 수 없는 우수한 특징을 가지고 있다. 그 특성을 이용해서 심장이나 뇌, 근육에서 나오는 미약자계를 비접촉으로 조사하여 심전계를 대신하는 고성능 심자계나 뇌의 구조를 조사하는 등

많은 용도에 쓰인다. 또 지구물리의 면에서도 자기 센서로서 자원탐사를 하고 있다.

기타 전자파 검출이나 증폭발전 등 그 용도가 넓고 성과가 기대된다.

맺음말

조셉슨 효과에 대해서 또 그 원리와 특성에 대해서 설명하고 그 응용을 해설하였다. 이 소자는 다른 소자에서는 얻을 수 없는 우수한 특징을 가지고 있어 앞으로 최선단 일렉트로닉스 기술의 일익을 담당하는 소자가 될 것으로 기대되고 있다.

새질서·새생활 실천운동 지상캠페인

조금 더 일하는 사회 훨씬 윤택해지는 사회

선진경제현실을 위해서는 각 경제주체들이 뚜렷한 직업정신과 사명감을 가지고 맡은 일을 성실히 수행하는 자세 확립이 절실히 요구되고 있습니다.

이에 정부에서는 자율화, 민주화 시대에 맞추어 민간부문의 자율적인 경제행위를 유도하면서 투기와 같은 불로소득 기회를 제거하고 시장 경제의 엄정한 감시자로서의 역할을 충실히 수행하고 있으며 공직자들은 철저한 대민봉사정신과 사명감으로 맡은 일에 최선을 다하고 있습니다. 이에 발맞추어 기업은 생산적인 투자활동과 기술개발로 건전한 성장을 추구하고 기술과 생산력을 바탕으로 기업자체와 국민경제 건전한 성장을 추구하고 기술과 생산력을 바탕으로 기업자체와 국민경제 전체의 대외 경쟁력을 높이는 데 노력을 기울여야 할 것입니다. 근로자들은 투철한 근로정신과 전문가 정신을 더욱 드높여 맡은 일에 성실히 책임감을 갖고 완수해야겠습니다. 이것이 바로 노사협동정신이 바탕이 된 노사공존공영의 길인 것입니다.

최근 각계에서 불길처럼 일어나고 있는 「30분 더 일하기 운동」 「10% 소비절약 운동」에 「내가」가 「내 직장」이 먼저 참여하여 우리 모두의 삶이 윤택해 지는 사회 구현을 위해 다함께 노력합니다.