

# 초전도 단자속 양자(SFQ; Single Flux Quantum) 소자 제작 및 연구 현황

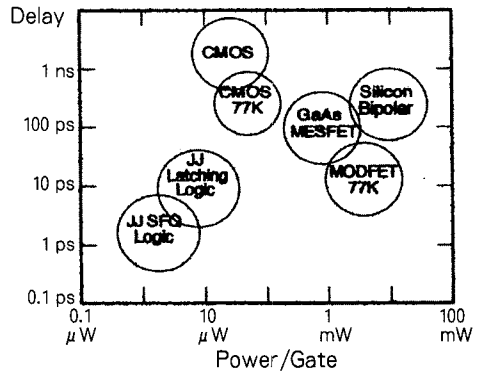
한택상

한국과학기술연구원 정보재료 소자연구센터

## I. 서론

미국에서의 정보 고속도로 건설과 같은 현대의 급속한 정보통신 기술의 발달은 초고속 전자소자의 개발 필요성을 절실히 요구하고 있다. 현재 집중적인 투자가 이루어져 온 반도체 소자의 경우 작동속도를 높이기 위해서는 나노구조를 갖는 회로의 제작이 필수적이며 이를 수행하기 위한 제작비의 급격한 증가는 해결하기 어려운 문제로 등장하고 있다. 초전도 조셉슨 소자는 초전도체만이 갖는 특이한 양자 현상을 갖고 있어 반도체로는 불가능한 빠른 전환속도를 갖는 전자 소자를 제작하는 것이 가능하여 이를 이용한 초고속 전자 소자의 개발이 선진국에서는 많이 연구되어 왔다.

초전도 조셉슨 소자를 이용한 초고속 전자소자의 개발은 현대의 정보유통의 고속화와 무선비디오 시스템 등의 개발을 촉진시켜 줄 것으로 기대된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 초전도 조셉슨 소자는 다른 반도체 소자에 비해 전환속도 면에서나 소모전력 면에서 월등히 좋은 성능을 가지고 있다. 특히 단자속 양자(SFQ; Single Flux Quantum) 소자의 경우에는 다른 조셉슨 소자에 비해서도 그 성능이 뛰어나다. SFQ 소자를 사용할 경우 최근에 개발된 고온초전도체를 사용한 전자소자의 개발이 가능하다<sup>[1]</sup>. 이들 고온 초전도체들은 임계온도가 133K에 달할 정도의 고온이므로 이들을 사용하면 액체질소 온도에서 작동하는 초고속 전자회로의 개발이 가능하다. 액체질소 온도를 얻기 위한 냉각기는 현재 군사용 및 상업용으



(그림 1) 초전도 SFQ 소자는 게이트당 단 수 마이크로 와트만의 전력을 소모시키면서도 수백 GHz로 작동하므로 미래 지구촌 통신망 등의 이용에 밝은 전망을 준다.

로 선진국에서 많이 개발되어 있으므로 이들을 사용하면 정보통신 분야의 혁신적인 발전을 이룰 것으로 기대한다. 특히 무선 화상통신, 위성과의 통신 등 일상 정보통신 분야의 발전에 기여함은 물론 첨단 레이더 장비 등에 필수적인 부품의 개발도 가능하다. 급변하는 정보화 시대에서 초고속 전자 제품의 개발은 고속 정보 통신 기술의 현대화에 반드시 필요한 과제이며 선진국에서의 상품화에 대비한 국내에서의 기술 축적이 절실히 요구된다.

## II. 국내의 연구개발 현황

초고속의 신호처리를 가능하게 하는 초고속

logic 회로를 조셉슨 소자를 이용하여 구현하려는 연구는 일찍이 1970년대의 미국 IBM과 1980년대의 일본 통상성 주관의 project를 통하여 많은 기초연구 결과들이 보고되어 있다<sup>[2]</sup>. 대부분의 초기 연구들은 Pb 화합물이 중심을 이룬 초전도 물질들의 불안정성으로 인하여 많은 문제점들을 가지고 있었다. 그러나 미국 IBM의 M. Gurvich 등에 의한 refractory 물질인 Nb을 이용한 조셉슨 접합 기술의 개발은 이 분야에 혁신적인 발전을 이루어 왔다. 이에 힘입어 초전도 집적회로의 개발이 활발하게 이루어져 왔으며, 고속 초전도 switch 및 microprocessor의 개발 등 많은 연구 결과들을 낳았다.

특히 산화물로 이루어진 고온 초전도체의 발견은 초전도 집적회로를 보다 실질적으로 응용할 수 있는 가능성을 열어 놓았다. 종래의 초전도 전자소자들을 작동시키기 위해 필요했던 헬륨 냉각기 대신 보다 손쉬운 냉각기의 사용이 가능해 졌기 때문이다. 고온 초전도체를 이용한 전자회로의 제작은 조셉슨 소자가 그 기본을 이루는데 현재까지 개발된 기술로는 non-hysteretic 성질을 갖는 조셉슨 소자의 제작만이 가능하다.

SFQ 회로는 고온 초전도체의 발견 이후 많은 연구자들이 관심을 보이고 있는 logic 회로로서 종래의 초전도 logic 회로보다 빠르며 non-hysteretic 성질을 갖는 조셉슨 소자만으로도 제작이 가능하다. 이 logic 회로는 미국의 과학자들에 의하여 그 기본적인 개념이 제안되어 실험적인 검증이 이루어졌으며, 1975년 모스크바 대학의 Likharev 교수 그룹에 의해 실제 집적회로에 적용될 수 있도록 개발된 것으로서<sup>[3]</sup> 이를 이용할 경우 종전에 문제가 된 'punch through 효과'가 극복될 뿐 아니라 현재까지 연구된 고온 초전도체 조셉슨 소자의 이용이 가능하게 된다.

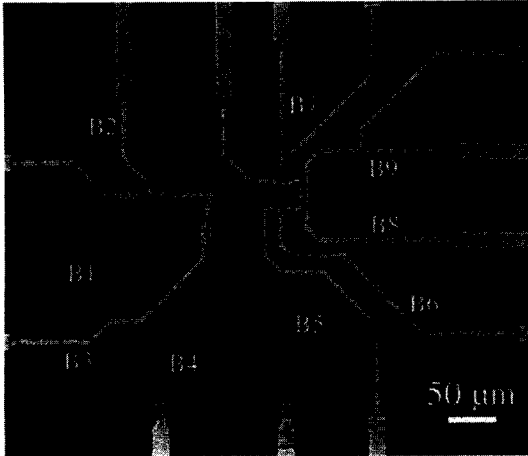
SFQ logic 회로의 경우 logic "1" 인 상태는 단자속 양자( $\Phi_0 = 2mV \cdot psec$ )에 의해 정의되며 스스로 "0" 상태로 reset 되므로 외부에서 A.C.신호로 reset 하여 줄 필요가 없다. 따라서 오로지 D.C.전류에 의한 bias 만을 걸어주면 되므로 회로의 작동이 훨씬 수월하고 속도도 수 백 GHz 까지 낼 수

있게 된다. 이 logic 회로는 뉴욕 스토니브룩 대학의 Likharev 교수 그룹에 의해 제작된 T flip-flop의 경우 그 작동이 500GHz 에서까지 가능한 것이 실험적으로 증명되었으며 이를 이용한 analog-digital 전환 회로는 1 micro-volt 의 세밀한 정밀도를 가질 수 있다는 것이 잘 알려져 있다.

SFQ logic을 사용한 전자 회로의 개발은 최근들어 상당히 활발하게 이루어지고 있으며 대표적인 예로는 미국 뉴욕주립 대학의 computer 부품 전자 회로의 개발과 미국 노드롭 그루만사의 통신회로 부품의 개발을 들 수 있다. Computer부품 전자 회로 개발의 경우 대부분의 논리 회로가 구성 제안 되었으며 실험적인 검증 단계에 있다. 정보 system 부품 DSP 전자 회로 개발의 대표적인 예로는 조셉슨 시그마-델타 analog-digital 전환 회로가 있으며 이의 modulator의 올바른 작동은 이미 실험적으로 검증된 바 있다. 이 조셉슨 시그마-델타 analog-digital 전환 회로가 완성될 경우 진정한 의미의 무선 비디오의 실현이 가능할 수 있다.

SFQ 회로를 고온 초전도체를 사용하여 제작하고자 하는 노력이 최근 미국, 일본, 유럽 등지에서 활발하게 진행되고 있다. 미국의 경우 주로 switching network과 signal processing 분야에 집중적인 연구가 진행되고 있으며 일본의 경우 ISTE에서 고온초전도 박막을 이용한 개발분야로서 SFQ 회로의 개발을 중점 분야로 선정하여 연구에 주력하고 있다. 현재 단자속 양자의 가장 기본적인 소자라 할 수 있는 flip-flop, shift register cell 등이 개발되어 있다. 그림 2는 미국 노드롭사에서 제작된 1bit analog-digital converter의 전자현미경 사진을 보여주고 있다. 이 회로는 처음으로 고온 초전도체의 다중박막을 사용하여 제작된 회로라는 점에서 매우 중요한 업적으로 간주되고 있다. 회로의 설계상 비록 저 주파수에서만 작동을 관측하였으나 정확한 analog-digital converter의 작동 결과는 이 회로가 설계된 바와 같은 기능을 갖고 있으며 고주파에서도 잘 작동될 수 있음을 나타내 준다.

최근들어 국내에서도 이 분야에 대한 관심이 증



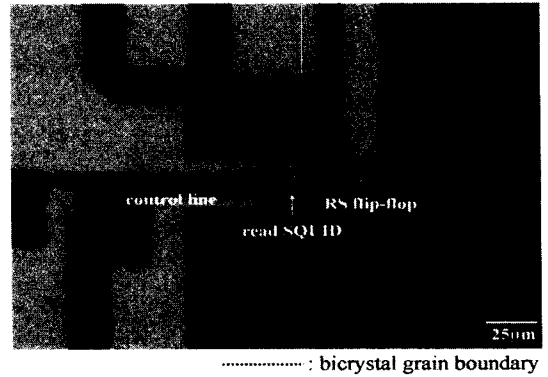
〈그림 2〉 1bit analog-digital converter의 현미경 사진으로써 미국 노드롭 그루만사에 의해 개발되었다. 이 회로는 처음으로 고온 초전도체의 다층박막을 사용하여 제작된 회로라는 점에서 매우 중요한 의미를 지니고 있다.

가하고 있으며 이에 관련한 연구논문의 발표도 나오기 시작하였다. 비록 10년간의 국책과제로 고온 초전도 연구가 이루어지긴 하였으나 그 규모가 워낙 작아 선진국에서 이론 것과 같은 고난도의 조셉슨 접합 제작 기술을 얻기에는 역부족이었다. 따라서 현재의 국내 연구 수준에 맞는 간단한 구조의 조셉슨 접합을 사용한 SFQ 회로에 대한 연구가 국내에서 이루어지고 있으며 SFQ 회로의 설계 등의 기초 기술 분야는 선진국을 따라갈 수 있는 기초적 여건을 갖추고 있다.

SFQ 회로에 관한 연구는 국내의 경우 매우 최근에 시작되었으나 연구의 여건은 비교적 잘 갖추어진 편에 속한다. 한국과학기술연구원과 인천대학교를 비롯하여 전자통신연구원, 삼성종합기술원 등 여러 연구 기관들에 의해 최근 연구가 진행되고 있으며 기술적인 면에서도 비교적 기초적인 여건이 잘 갖추어져 있다고 할 수 있다. 단자속 양자 회로 설계의 경우 설계 software가 국내 연구기관에 설치되어 있으며 단자속 양자회로 제작을 위한 설비들도 지난 10년간의 고온 초전도체 국책과제의 산물로 잘 갖추어져 있는 편이다.

현재 고온초전도체를 이용한 SFQ 회로가 국내

에서도 제작되어 성공적으로 작동되고 있으며 이 회로의 현미경 사진을 그림 3에서 볼 수 있다. 이 회로는 국내에서 처음으로 제작된 SFQ 회로의 기초소자로서 한국과학기술연구원과 인천대학교의 공동연구에 의해 제작된 것이다. 이 회로는 문헌에 보고된 다른 선진국들에서 제작된 고온초전도체 RS flip-flop들보다 우수한 성능을 보여 주었다. 또한 이 회로를 사용하여 독창적인 방법으로 열적 요동 효과가 단자속 양자회로에 미치는 영향을 조사하여 국제학회에서도 인정받은 바 있다. 그림 4에 보여진 회로는 bi-crystal grain boundary를 이용하여 제작한 것으로써 고온초전도체로는 YBCO가 사용되었다.



〈그림 3〉 국내에서 처음으로 제작된 단자속 양자회로의 기초소자로서 한국과학기술연구원과 인천대학교의 공동연구로 개발되었다. 이 회로는 단자속 양자소자와 감지 SQUID의 두 부분으로 구성되었으며 RS Flip-Flop의 기능을 갖고 있다.

### III. SFQ 회로

#### 1. SFQ 회로의 특징

SFQ 회로와 같은 디지털 소자에 응용되는 조셉슨 접합의 일반적인 특성은 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

- ① 파(waveform) 발생기로서의 조셉슨 접합의

effective 임피던스  $R_{eff}$ 는 초전도 미세선의 저항으로 조절될 수 있다. 매우 낮은 감쇠와 분산을 가진 초전도 미세선은 혼선이 거의 없이 picosecond의 파를 전형적인 칩 크기 보다 먼 거리만큼 보낼 수 있다. 결과적으로 매우 빠른 디지털 신호를 빛의 속도와 거의 비슷한 전송속도로 보내 수 있다.

② 조셉슨 접합을 이용한 회로에서 신호 전압의 진폭은 에너지 갭( $\Delta(T)$ )에 의해 정의되는  $2\Delta(0)/e$  값을 초과하지 않으며 저온 초전도의 경우 약 3mV이다. 결과적으로 조셉슨 접합에 의해 분산되는 power( $P=V^2/R_{eff}$ )는 1mW 이하가 된다. 그러므로 VLSI 회로에서 문제가 되는 열 방출은 쉽게 해결된다. 이러한 사실은 초전도 회로 칩의 밀도 높은 패키징을 가능케 해주고 따라서 칩간의 통신에서 시간 지연을 줄일 수 있다.

③ 조셉슨 접합 고유의 스위칭 속도는 약 2-3 picosecond로서 매우 빠르다.

④ 최근 조셉슨 접합 제작 기술은 현재의 반도체 제작 기술보다 상당히 간단하며 접합 크기의 물리적인 제한( $a \approx 0.1\mu m$ ) 또한 반도체 트랜지스터의 값과 거의 유사하며 오늘날의 식각 기술로 볼 때 아무런 문제가 없다<sup>4)</sup>.

1970년대와 1980년대 초까지 진행되었던 IBM사의 조셉슨 접합을 이용한 컴퓨터를 제작하고자 하는 프로젝트는 많은 관심을 불러 일으켰으나 결국은 실패로 끝났다. 그 이유는 납 화합물과 같은 소프트 초전도체를 사용함으로써 열이력에 의해 조셉슨 접합의 절연층으로 사용된 매우 얇은(2-3 nm) 산화층이 점점 퇴화되어 결국에는 그 특성이 변화되었기 때문이다. 보다 근본적인 문제는 잘못된 논리회로의 선택이다. SIS 형태의 조셉슨 접합을 사용하였는데 이것의 가장 큰 문제는 절연층의 큰 정전용량으로 인하여 조셉슨 접합이 스위칭된 후 원래 상태로 되돌아오지 않는다는 것이다. 이런 논리회로를 래칭논리(latching logic)라 한다. 그러므로 스위칭된 조셉슨 접합을 원래 상태로 환원시키기 위해서는 외부에서 ac 신호를 따로 보내 주어야 한다. 따라서 회로의 동작속도가 외부 신호에 의하여 제한된다. 실제 래칭 논리를 사용하여 제작된 회로의 동작 속도는 2-3GHz를 넘지 못한

다.

그러나 일본의 여러 연구 그룹의 노력에 의하여 물질 문제는 해결되었다. 납화합물 초전도체 대신 Nb 초전도체를 사용하고 인듐 산화물 대신 알루미늄 산화물을 사용함으로써 열 이력에 의해 물질의 특성이 변화하는 문제는 완전히 해결되었고 LSI 회로의 제작이 가능케 되었다. 실제 HITACHI 사에서는 Nb 초전도체를 사용하여 4-bit microprocessor를 제작하기도 하였다. 그러나 이것은 역시 래칭 논리를 사용한 것이기 때문에 그 속도가 1GHz 정도로 초전도체를 이용한 디지털 소자로서의 장점을 가질 수가 없었다.

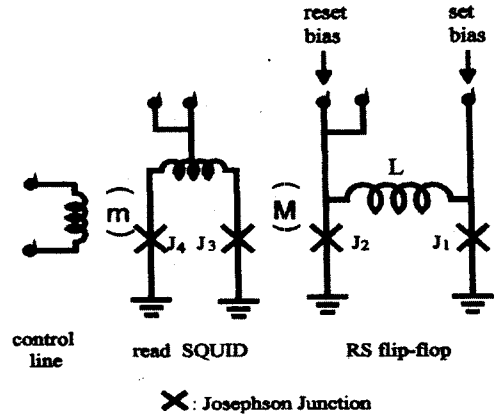
1985년 Likharev 그룹에 의해 조셉슨 접합을 사용한 새로운 논리가 제안되었다. 여기에는 두 가지 정보가 있는데 래칭 논리에서도 있는 직류 전압과 양자화된 면적을 가진 매우 짧은 전압 펄스이다. 이 전압 펄스를 SFQ 펄스라 한다. 이것은 overdamped 조셉슨 접합을 사용한 회로에서 매우 자연스럽게 발생되고 재생산이 가능하고 증폭되고 기억되며 처리될 수 있다. SFQ 펄스를 이용한 것이 바로 SFQ 논리이다. 이 논리 및  $1\mu m$  식각 기술을 사용하면 300GHz 이상의 속도를 가진 초전도 디지털 소자의 제작이 가능하다.

## 2. SFQ 회로 설계 및 제작

터널링 형태의 SIS 고온 초전도 조셉슨 접합은 현 기술 수준으로는 제작할 수 없기 때문에 모든 고온 초전도 디지털 회로는 weak link 형태의 조셉슨 접합을 사용하고 있다<sup>5)</sup>. 단자속 양자 논리 회로는 비이력적인 조셉슨 접합을 사용하고, 모든 초전도 논리 회로 중 가장 빠른 논리 회로이다. 래칭 논리(latching logic)는 영 볼트 상태("0" 상태)와 영 볼트가 아닌 상태("1" 상태)를 기본으로 하지만 단자속 논리는 단 하나의 전압 펄스를 발생시키는 것을 기본으로 한다. 이 전압 펄스는 조셉슨 접합의 임계 전류보다 큰 신호 전류를 순간적으로 접합에 흘려 줄 경우에 발생한다. 전압 펄스가 발생한 후 신호 전류는 인접한 인덕터를 통해 흐르게 된다. 이 전압 펄스는 양자화된 면적을 가지며 그 크기는 자속 양자( $\Phi_0 = 2.07mV \cdot psec$ )

한 개에 해당한다.

현 단계에서는 회로 구조가 매우 간단한 단자속 양자 RS flip-flop을 설계하여 제작하는 수준이며, 단자속 양자 RS flip-flop은 단지 두 개의 조셉슨 접합을 사용하여 설계될 수 있다. RS flip-flop은 두 개의 안정된 정상상태(set and reset states)를 가지며 이들은 회로 내에 한 개의 단자속 양자의 존재 유무에 의해 구별되어진다<sup>[6,7]</sup>. 다른 말로 표현하면 회로 내에 순환하고 있는 지속 전류( $I_p \approx \Phi_0 / 2L$ )의 방향에 의해 구분된다. 일반적으로 RS flip-flop에는 잘못된 신호에 의해 회로가 동작하는 것을 방지하기 위하여 보조 접합을 가지고 있다. 이를 제작하기 위해서는 floating 조셉슨 접합을 제작할 수 있어야 한다. 이 제작기술은 최근에 개발되었기 때문에 아직 회로 제작에는 거의 응용되고 있지 않다. 이 경우 회로를 간단하게 제작할 수 있는 장점이 있으나, 외부에서 ac clock signal을 공급해 주어야 하는 단점도 있다. 그림 4에 한국과학기술연구원에서 제작한 SFQ 소자(그림 3)의 등가회로의 예를 나타내었는데<sup>[8]</sup>, 이 회로는 접합 두 개로 이루어진 RS flip-flop과 그 옆에 자기적으로 결합된, RS flip-flop의 두 상태를 구분하기 위한 read SQUID, 그리고 read SQUID 옆에는 역시 자기적으로 결합된 조절선 등으로 구성되어 있다. 이 회로의 동작을 간단히 살펴보면 다음과 같다. 접합  $J_1$ 이 이것의 임계전류보다 큰 바이어스 전류에 의해 순간적으로 전압상태로 스위칭 되면 RS flip-flop내에 단자속 양자가 갇히게 되며 이 상태는 RS flip-flop의 set 상태에 해당된다. 접합  $J_2$ 가 이것의 임계전류보다 큰 바이어스 전류에 의해 순간적으로 전압 상태로 스위칭 되면 RS flip-flop에서 단자속 양자가 빠져 나오며 이 상태는 RS flip-flop의 reset 상태에 해당된다. 이 두 상태는 옆에 자기적으로 결합된 read SQUID에 의해 구분된다. 또한 두 가지 형태의 조절선을 설계함으로써 read SQUID와 조절선 사이의 상호 인덕턴스(m)에 미치는 영향을 서로 비교할 수가 있다. 이 회로에서 각 소자들 간의 간격은 패턴 공정에서 제한된 가장 작은 줄 간격을 기준으로 하여 가장 큰 자기적 결합을 얻을 수 있도록 설계된다.



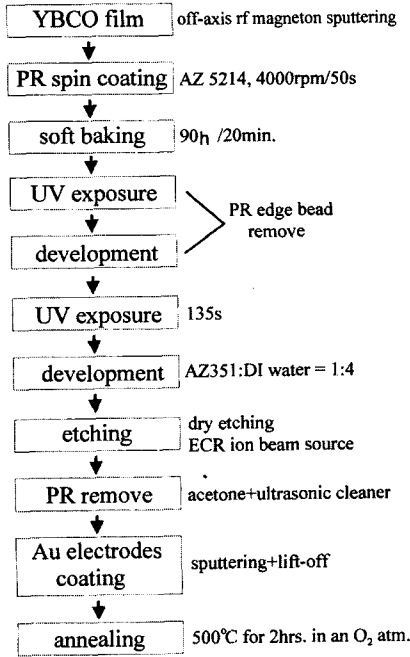
(그림 4) SFQ 소자의 등가회로. 여기에는 RS flip-flop, read SQUID, 및 control line이 포함되어 있다.

단일층 YBCO 박막으로 제작된 간단한 구조의 SFQ RS flip-flop의 경우에는 RS flip-flop과 read SQUID 및 조절선으로 구성되어진다. 조셉슨 접합은 SrTiO<sub>3</sub> 양결정(bi-crystal) 기판 위에 성장된 YBCO 박막을 사용하여 제작되고, YBCO 박막은 off-axis rf magnetron sputtering법 및 레이저 증착법 등으로 제조된다.

박막은 일반적으로 사용되는 photolithography 과정과 식각 과정을 거쳐 설계한 형태대로 패터닝한다. 그림 5에 photolithography 과정 및 조건의 일 예를 간단히 나타내었다. 박막을 패터닝 후에는 골드 전극을 스퍼터링으로 증착하고, 리프트 오프 방법을 사용하여 골드 전극을 패터닝한다. 전극을 증착하기 전에 접촉 저항을 최소화하기 위하여 이온 밀링을 사용하여 박막 표면을 처리하고, 골드 전극을 증착한 후에는 대개 500°C에서 산소 분위기로 3 시간 동안 열처리하여 식각과정에서 열화된 초전도 특성을 회복시킨다.

### 3. SFQ 소자의 작동

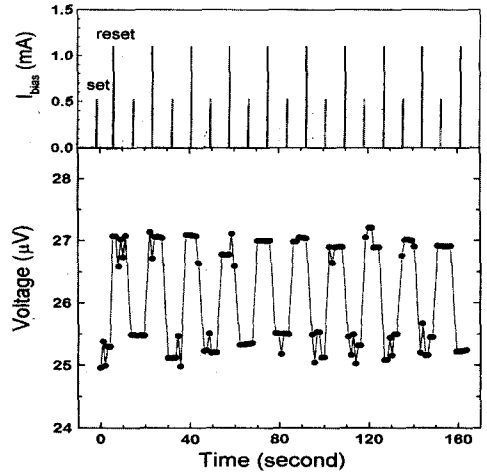
RS flip-flop의 동작을 측정하기 위해서 컴퓨터로 조절되는 전류원을 직류전류 바이어스 공급을 위하여 사용하고, read SQUID에서 생성되는 전압 변화를 측정하기 위하여 역시 컴퓨터로 조절되는 나노볼트미터를 사용한다. RS flip-flop과 자기적



〈그림 5〉 SFQ 소자 제작을 위한 photolithography 과정도로서 일반적인 반도체 제조 공정과 유사함을 보여준다.

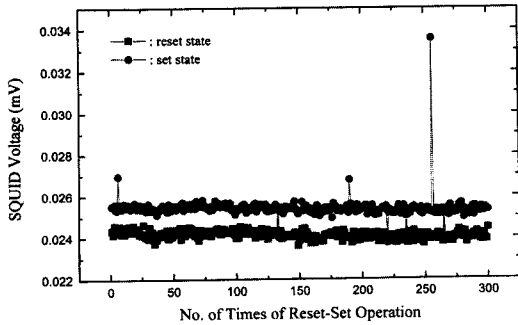
으로 결합된 read SQUID는 RS flip-flop 내에 존재하는 SFQ의 갯수에 따라 전압 변화량이 다르다. 그림 6은 66K에서 RS flip-flop의 동작을 나타낸 예이다. 이 그림에서 윗부분은 reset-set 동작을 위해 사용한 전류 펄스의 크기 및 입력 시기를 나타낸 것이다. Reset-set 동작을 위해 사용한 전류 펄스의 크기는 각각 1.1 및 0.525 mA이고 펄스의 폭은 0.5 초이다. 이 펄스 폭은 회로를 동작시킬 때 사용한 필터의 정전 용량을 고려하여 회로를 동작시킬 수 있는 가장 짧은 시간이며, 실제 회로에 주입되는 전류 펄스는 삼각과 형태를 가진다. 그림의 아래 부분은 RS flip-flop의 두 상태 즉, set과 reset 상태에 따른 read SQUID의 두 개의 양자화된 전압 상태를 보여 주고 있다. 이 두 전압 값의 차이는 RS flip-flop내에 단자속 양자 한 개가 저장되고 빠져나감에 따른 변화에 해당한다. 또한 이 그림은 회로가 66K에서 아무런 실수가 없이 10회 동안 잘 동작함을 보여주고 있다.

그림 7은 이 회로가 71K에서 300회의 reset-set 동작을 실수없이 성공적으로 수행함을 보여주

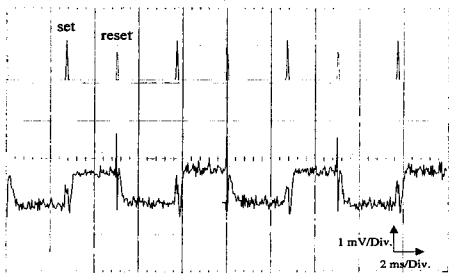


〈그림 6〉 66K에서 RS flip-flop을 작동시킨 결과로서 reset과 set 신호에 따라 10회 동안 실수 없이 잘 작동함을 알 수 있다.

고 있다. 이 경우도 단자속 양자 한 개가 RS flip-flop내에 저장되고 빠져나감에 따른 read SQUID 전압 변화를 측정할 것이다. 이 때 사용한 reset-set을 위한 전류 펄스는 각각 0.5와 0.4 mA이다. Set 동작을 위한 전류 바이어스값이 접합의 임계 전류값보다 훨씬 클 경우 RS flip-flop 내에 두 개 또는 그 이상의 단자속 양자가 저장되었다. 이것은 RS flip-flop의 인덕턴스가 한 개의 단자속 양자만을 저장시키기에 적당한 값보다 크기 때문이다. SFQ 소자의 장점을 살려 고속에서 작동시키기 위해서는 디지털 측정 보다는 아날로그 측정이 성공적으로 이루어져야 한다. 그림 8에서 아날로그 측정 결과를 볼 수 있는데, 두 대의 펄스 발생기를 사용하여 set 신호와 reset 신호를 교대로 발생시켜 회로에 입력시켰을 때 그에 따라 “1”, “0”의 상태로 잘 작동하고 있음을 알 수 있다. 이 측정은 200Hz 정도의 저속에서 행하여졌으나 잡음 특성을 개선하여 수백 GHz 정도의 고속에서도 잘 작동할 수 있도록 연구가 이루어져야 한다.



(그림 7) 디지털 측정장치를 사용하여 RS flip-flop을 300회 연속 동작시킨 결과로서 오동작이 거의 없이 작동함을 볼 수 있다.



(그림 8) 아날로그 측정 방법으로 측정한 SFQ RS flip-flop의 작동 결과. 교대로 입력되는 set pulse와 reset pulse에 따라 실수없이 잘 작동하고 있다.

#### IV. 결 론

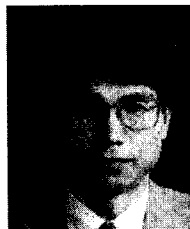
초전도체를 사용한 SFQ 디지털 전자소자는 기존의 반도체 소자보다 처리속도가 100배 이상 빠르면서도 소모 전력은 1000분의 1 수준으로 매우 적어서 차세대 전자소자로 주목을 받고 있다. 현재는 반도체 소자로서 모든 처리가 가능하고 큰 어려움을 느끼지 못하고 있으나, 앞으로 대용량의 정보처리가 요구되고 초고속 컴퓨터의 개발 등이 필요하게 될 경우 기존의 소자는 한계를 느끼게 되고 새로운 개념의 초고속 전자소자가 이 역할을 담당하리라고 전망된다. 이러한 점에서 초전도체를 사용한 전자소자는 최근에 크게 주목 받고 있

으며, 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 활발한 연구를 수행하고 있으며, 국내에서도 최근에 이 분야의 연구가 시작되어서 활발한 연구를 수행하고 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Matisoo, Appl. Phys. Lett. 9, 167 (1966).
- [2] S. Hasuo, S. Kotani, A. Inoue, and N. Fujimaki, IEEE Trans. Magn. 27, 2602 (1991).
- [3] K. K. Likharev and V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 1, 3 (1990).
- [4] T. V. Duzer and C. W. Turner, "Principles of superconductive devices and circuits", Chap. 5, Elsevier, New York, 1981.
- [5] D. Dimos, P. Chaudhari, and J. Mannhart, Phys. Rev. B41, 4038 (1990).
- [6] O. A. Mukhanov, V. K. Semenov, and K. K. Likharev, IEEE Trans. Magn., 23, 759 (1987)
- [7] Division 6, ISTECS-SRL, ISTECS Journal, 9(3), 39 (1996).
- [8] 김영환, "스퍼터링법에 의한 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 박막 제조 및 초전도 디지털 소자 응용" 박사학위 논문, 서울대학교 (1997. 8)
- [9] Y. H. Kim, J. H. Kang, J. M. Lee, T. S. Hahn, S. S. Choi and S. J. Park, Physica C, 280, 304 (1997).

#### 저 자 소 개



##### 韓 擇 相

1952년 6월 16일생, 1978년 2월 서울대학교 재료공학과(학사), 1987년 2월 서울대학교 무기재료공학과(석사), 1991년 2월 서울대학교 무기재료공학과(박사), 1978년 3월~1985년 2월 한국과학기술연구원 연구원, 1985년 3월~1993년 2월 한국과학기술연구원 선임연구원, 1993년 3월 현재 한국과학기술연구원 책임연구원, (주관심 분야: 고온초전도 전자소자)