

## Measurements of Correct Operation of a HTS 4-bit Shift Register Circuit

### 4-비트 고온초전도 Shift Register 회로의 동작 측정

Jong-Hyeog Park, Young-Hwan Kim, Joon-Hee Kang\*, Taek-Sang Hahn,  
Chang-Hoon Kim, Jong-Min Lee and Sang-Sam Choi

박종혁, 김영환, 강준희\*, 한택상, 김창훈, 이종민, 최상삼

P.O. Box 131, CheongRyang, Seoul, Korea 130-650, Superconductivity Research  
Laboratory, Korea Institute of Science and Technology

\*University of Incheon,

서울특별시 청량우체국 사서함 131, 한국과학기술연구원, 초전도 연구팀  
\*인천대학교

We have designed and fabricated a four-bit shift register circuit using YBCO bicrystal junctions and experimentally tested its operations by a computer-controlled digital measurement set-up. Laser ablated YBCO thin films with clean surface were used in this work. The circuit consists of the shift register and two read SQUIDs placed next to each sides of the shift register. The SQUIDs were inductively coupled to the nearby shift register stages. A probe equipped with high speed coax lines were used in this experiment. The major obstacle in testing the circuit was the interference between the read SQUIDs and we solved the problem by finding the correct operation points of the SQUIDs from the simultaneously measured modulation curves. Loaded Data("1" or "0") were successfully shifted from a stage to the next one by a controlled current pulse injected to the bias lines located between the stages and the data shifts were correctly monitored by the read SQUIDs

### 1. 서론(Introduction)

최근 수년간 초전도 단자속양자(Rapid Single Flux Quantum : RSFQ)를 이용한 디지털 소자 제작을 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. Overdamped Josephson junction을 이용한 RSFQ 회로에서 테이터는  $\Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2 \times 10^{-15}$  Wb 의 단자속 형태로 저장되고 이러한 테이터의 전파나 처리과정은  $\int v(t)dt = \Phi_0 \approx 2$  mV·ps의 관계식으로 정의되는 SFQ 펄스의 형태로 이루어진다. 이

러한 RSFQ 디지털 기술의 장점은 회로의 동작속도가 대단히 빠르고 소모전력이 작다는 점이다. 실제로 Nb/AIO<sub>x</sub>/Nb junction을 이용하여 제작되는 저온 초전도 RSFQ 디지털 소자의 경우를 살펴보면 750 GHz로 동작하는 Toggle Flip-Flop이 보고되었고[1] 비트 하나 당 전력소모가 1μW에 불과한 60 GHz Shift Register[2]와 총 전력소모가 100μW 보다 작은 12 비트 A/D converter[3]도 개발되어 거의 상용화 단계까지 도달해 있다. 고온 초전도의 경우 Josephson junction 제작과 다층박막 제작기술이 아직까지 완전히 성숙되지 않은 까닭으로 소자의 집적화는 물론 단위소자의

고속동작과 인덕턴스 조절에 필수적인 ground plane 위에서의 소자제작에 많은 어려움을 겪고 있다. 그러나 이러한 기술들이 점점 발전하고 있고 50~70 K 까지 냉각시킬 수 있는 저렴하고 소형인 cooler들이 개발되고 있어 4.2 K cryo cooler의 무게나 전력소모 때문에 저온초전도 디지털 시스템의 탑재가 어려운 군사용 위성이나 항공기에 설치할 수 있는 고온 초전도 디지털 시스템의 응용 전망은 매우 밝다고 할 수 있다. 그리고 현재 가능한 제작 기술로 고온 초전도 디지털 소자를 설계, 제작하여 고온에서의 SFQ 소자의 동작원리를 연구하고 측정기술을 축적하는 것도 대단히 중요하다. Shift register는 기능이나 개념 면에서 비교적 간단하고 단일 박막 위에 제작할 수 있도록 설계가 가능하므로 본 연구에서는 SrTiO<sub>3</sub> bicrystal 기판에 증착한 YBCO 박막을 이용하여 4-비트의 Shift Register를 제작하고 디지털 측정방법을 통하여 회로의 동작을 측정할 결과 데이터가 비트 사이에서 단계적으로 정확하게 이동함을 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 회로 제작

PLD (pulsed laser ablation) 방법으로 SrTiO<sub>3</sub> bicrystal( 접합각도 ~24° ) 위에 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 박막을 약 200 nm로 증착하였다. Gold 전극을 thermal evaporation 방법으로 증착한 다음 500 °C, 산소 분위기에서 한시간 동안 열처리한 후 optical-lithography 방법으로 PR 패턴을 형성한 후 ECR 이온빔을 이용한 건식식각법으로 박막을 패터 하였다. 그림 1은 완성된 shift register의 현미경 사진으로 회로의 구조는 Data in(I<sub>1</sub> 또는 I<sub>5</sub>) 라인에 적당한 진폭의 펄스를 가하여 최 좌측 또는 우측 비트에 "1" 또는 "0"의 데이터를 입력하고 Shift 라인(I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>과 I<sub>4</sub>)에 펄스를 가하여 마지막 비트까지 단계적으로 데이터를 이동시킨 후 마지막으로 Data out(I<sub>5</sub> 또는 I<sub>1</sub>) 라인에 펄스를 가하여 register의 바깥으로 데이터가 빠져나가도록 짜여져 있다. 이 과정에서 좌우에 위치한 read SQUID들은 데이터의 이동에 따른 자기장의 변화를 감지하는 센서의 역할을 수행하게 되며 control line은 SQUID의 V-Φ 특성곡선 상에서

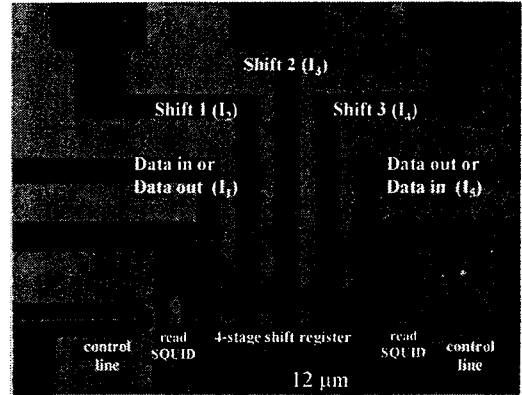


그림 1. 완성된 shift register의 현미경 사진.

전송상수  $V_{\phi} (\equiv |\partial V / \partial \Phi|)$ 가 최대가 되는 지점에 SQUID의 동작점이 위치하도록 조절하여 자기장의 변화에 가장 민감하게 반응하도록 한다. 여기서 데이터 "1"은 shift register의 비트에 단자속이 저장된 상태이고 데이터 "0"은 비트에 단자속이 존재하지 않는 상태를 나타낸다.

### 2-2. 디지털 측정 장치의 설치

단자속 양자를 이용한 디지털 소자는 가장 중요한 구성요소인 SQUID의  $\beta_L (\equiv LI_c / \Phi_0)$ 이 약 1.6의 값을 가질 때 가장 이상적으로 작동하는 것으로 알려져 있다. YBCO 박막을 이용한 소자의 경우 작동온도를 액체질소 온도(77.4 K)로 할 경우 열잡음 문제는 물론이고 kinetic 인덕턴스의 증가로 인하여  $\beta_L$ 이 1.6 보다 훨씬 커질 수 있으므로 보다 낮은 온도에서 작동시키게 되며 이런 경우 보통 cryo-cooler나 액체 헬륨을 이용하여 냉각하게 된다. 헬륨을 사용하는 경우 상용의 cryostat을 이용하면 헬륨의 전송과정에서는 물론 cryostat 내부 자체를 냉각해야 하므로 많은 손실이 발생한다. 이러한 손실을 줄이기 위하여 업체에서 배달되는 dewer에 직접 삽입하여 사용할 수 있는 측정 probe를 자체 제작하였다. 상용 cryostat의 액체헬륨 소모량은 그 규모에 따라 대략 5~15 리터/day 정도인 데에 반해 자체 제작한 probe의 경우 최대 2.5 리터/day로 훨씬 경제적이었다. 그림 2는 shift register의 동작을 디지

털 방식으로 측정하기 위한 장치의 개략도이다. Read SQUID와 control 라인들은 모두 Keithley 220/224 current source로 바이어스 하였고 shift register 라인에는 E1302A VXI mainframe에 장착된 HP E1328A D/A converter를 사용하여 펄스를 인가하였으며 Read SQUID들의 전압은 두 대의 Keithley 181 nanovoltmeter로 측정하였다. 모든 측정기기로부터의 잡음을 최소화하기 위하여 cutoff 주파수가 약 30 Hz인 low-pass filter를 자체 제작하여 부착하였다.

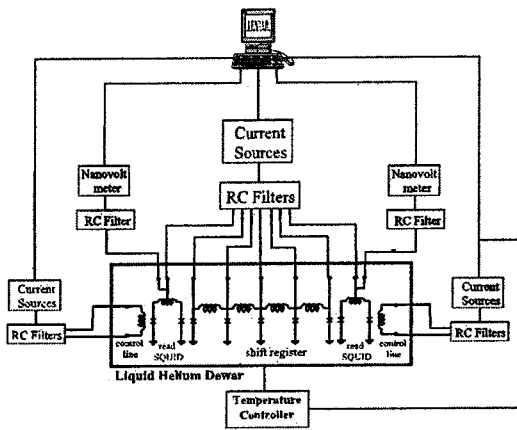


그림 2. Shift register 회로의 디지털 측정장치의 개략도.

### 3. 실험 결과 및 논의

그림 3은 70 K에서 측정한 Read SQUID들의 I-V 특성곡선으로 양쪽 모두 RSJ 모델을 따르는 Josephson junction으로 만들어진 SQUID임을 알 수 있다. 제작된 shift register의 동작을 측정하는데 어려웠던 부분은 좌우 Read SQUID 간의 간섭현상이었다. 즉 한쪽 SQUID를 독립적으로  $V_\Phi$ 가 최대가 되는 최적동작 점에 위치시킨 후에 나머지 SQUID를 최적동작 점에 위치시키면 이전 SQUID가 최적동작 점에서 벗어나는 현상으로 두 SQUID가 회로 상에서는 상당히 멀리 떨어져 있지만 반대편 SQUID의 control line으로 흐르는 전류에 의해 생성되는 자기장의 영향을 받고있음을 알 수 있다. 이러한 간섭을 보상하기 위하여

똑같은 크기의 control 전류를 동시에 흘리면서 양쪽 SQUID의  $V-\Phi$  특성 곡선을 측정하여 최적 동작 점을 정하였다. 그림 4는 이러한 방식으로 측정한  $V-\Phi$  곡선으로 왼쪽 SQUID와 control line의 mutual inductance  $m(\equiv \Phi_0 / \Delta I_{control})$ 이 약 1.7 pH로 1.4 pH인 오른쪽 SQUID와 control line 사이의 mutual inductance와 비교하여 다소 크게 측정되었다. 여기서  $\Phi_0$ 는 단자속 양자이고  $\Delta I_{control}$ 은  $V-\Phi$  곡선의 전압변조 주기를 나타낸다.

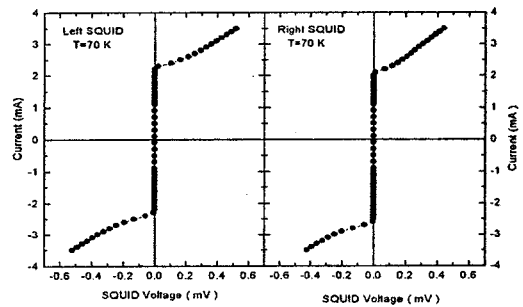


그림 3. 77 K에서 측정한 좌우 read SQUID의 I-V 특성곡선.

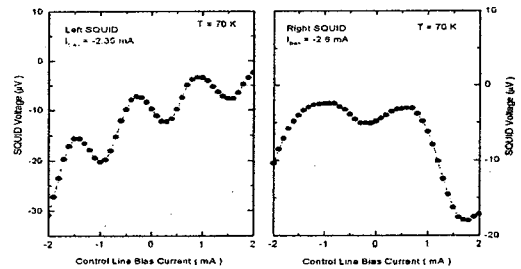


그림 4. 똑같은 크기의 control current를 흘리면서 동시에 측정한 read SQUID들의  $V-\Phi$  특성곡선.

그림 5는 모든 shift( $I_2, I_3, I_4$ ) 라인에 1 mA의 바이어스 전류를 가한 상태에서 Data-in ( $I_5$ ) 라인에 펄스를 가한 후 왼쪽 SQUID의 전압을 측정하고 Data-out( $I_1$ ) 라인에 펄스를 가한 다음 다시

왼쪽 SQUID의 전압을 측정하는 과정을 20회 반복한 결과이다. 플러스의 바이어스가 가해질 경우 shift register는 Josephson transmission line의 역할만 하게되어 가운데 두 개의 비트에는 데이터가 저장되지 못하게된다. 따라서 Data-in 펄스에 의해 맨 오른쪽 비트에 입력된 데이터 "1"은 즉시 맨 왼쪽 비트로 이동하므로 SQUID는 단자속 양자에 해당하는 전압변화를 읽고 Data-out 펄스에 의하여 데이터가 빠져나가면 원래의 상태로 되돌아간다. 그림 5(a), 5(b)에서는 이러한 동작이 20회에 걸쳐서 완벽하게 이루어짐을 볼 수 있으나 그림 5(c)의 경우 Data-in 펄스의 진폭이 작아지면서 몇 번의 에러가 발생하였다. 이러한 현상은 Data-in 펄스가 충분히 크지 못할 경우 데이터 "1" 대신 데이터 "0"이 입력되는 것으로 볼 수 있다. 이 경우에도 Data-out 펄스에 의한 SQUID의 전압변화는 관측되지 않으므로 Data-out 펄스는 이미 존재하는 데이터를 지우는 역할만 수행할 뿐 새로운 데이터의 생성은 하지 않음을 알 수 있다. 그림 5(d)에서는 Data-in 펄스의 진폭이 0.2 mA로 줄어들면 항상 "0"만 입력되어 SQUID의 전압에 변화가 없음을 보여주고 있다. 이러한 측정 결과는 shift register 내에서 데이터의 생성과 전파가 정확히 이루어지고 있음을 보여준다.

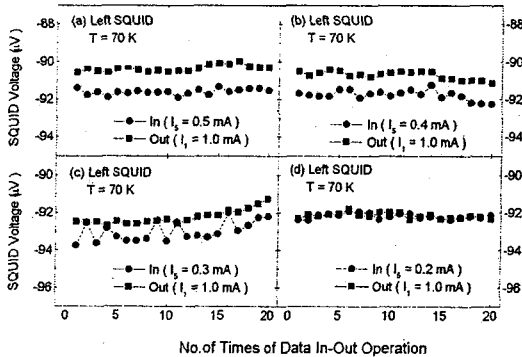


그림 5. 모든 shift( $I_2, I_3, I_4$ ) 라인에 1 mA의 바이어스를 가한 상태에서 Data-in( $I_5$ ) 라인에 펄스를 가한 후 왼쪽 SQUID의 전압을 측정하고 Data-out( $I_1$ ) 라인에 펄스를 가한 다음 다시 왼쪽 SQUID의 전압을 측정하는 과정을 20회 반복한 결과.

그림 6은 그림 5의 경우와는 달리 shift 라인들에 전류를 바이어스하지 않은 상태에서 Data-in( $I_1$ )→shift1( $I_2$ )→shift2( $I_3$ )→shift3( $I_4$ )→Data-out( $I_5$ )의 순서로 펄스를 가할 때마다 좌우 read SQUID의 전압을 동시에 측정한 결과이다. 먼저 왼쪽 SQUID의 변화를 살펴보면 Data-in 펄스에 의하여 왼쪽 첫 번째 비트에 "1"이 입력될 때 단자속 양자에 대응하는 전압상태로 간 후 shift1 펄스에 의해 두 번째 비트로 데이터가 이동하면 전압이 큰 폭으로 감소한다. 연이은 shift 펄스들에 의해 데이터가 오른쪽 비트로 순차적으로 이동함에 따라 전압이 완만히 감소하다가 Data-out 펄스로 맨 왼쪽 비트에 저장된 데이터가 빠져나가면 원래의 전압상태로 되돌아감을 볼 수 있다. 한편 오른쪽 SQUID는 첫 번째 비트에 입력된 데이터가 점차 오른쪽으로 이동함에 따라 전압이 완만히 증가하다가 shift3 펄스에 의해 맨 오른쪽 비트로 데이터가 이동할 때 전압이 급격히 증가한 후 데이터가 빠져나가면 원래의 전압 상태로 되돌아간다. 이러한 측정결과는 데이터의 이동이 shift 펄스에 의하여 한 비트씩 정확하게 이루어지고 있음을 보여준다.

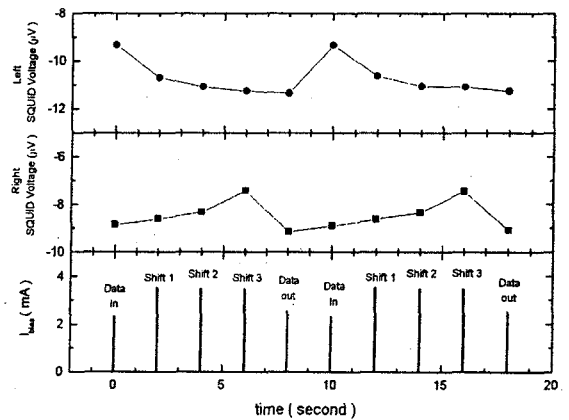


그림 6. Shift 라인에 전류를 인가하지 않은 상태에서 Data-in( $I_1$ )→shift1( $I_2$ )→shift2( $I_3$ )→shift3( $I_4$ )→Data-out( $I_5$ )의 순서로 펄스를 가할 때마다 좌우 read SQUID의 전압을 동시에 측정한 결과.

그림 7은 그림 6에서 설명한 측정과정을 20회 동안 반복한 결과로 18번은 작동이 잘 이루어졌

으나 2회는 에러가 발생하였다. 이것은 열잡음이나 그 밖의 외부의 잡음에 의하여 데이터 "1"이 입력되는 대신 "0"이 입력되어 오른쪽 SQUID는 이동되어온 "0"을 검출한 것으로 분석할 수 있다. 그림 8은 그림 7의 측정에서 다른 모든 펄스의 진폭은 같게 한 후 Data-in 펄스의 진폭만 1.4 mA로 감소시켜 "1" 대신에 "0"을 데이터로 입력한 결과이다. 예상대로 좌우 SQUID의 전압변화는 없었으나 한번의 에러가 발생하였다. 이 경우 또한 그림 7에서와 마찬가지로 잡음에 의하여 작은 Data-in 펄스에도 불구하고 "1"이 데이터로 입력되어 이동된 것으로 볼 수 있고 그림 7과 그림 8의 결과는 shift 라인 펄스에 의한 데이터의 생성은 없음을 보여주는 강력한 증거이다.

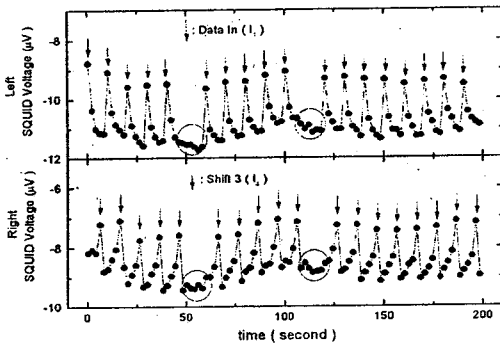


그림 7. 그림 6에서 설명한 측정과정을 연속하여 20회 동안 반복한 결과로 원으로 표시한 두 군데에서 잡음에 의하여 데이터 "1" 대신에 "0"이 입력되면 우측 SQUID에서도 "0"이 검출됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

단일 층 제작이 가능한 4-비트 shift register 회로를 SrTiO<sub>3</sub> bicrystal 기판에 증착한 YBCO 박막을 이용하여 제작하여 디지털 측정방법을 통하여 회로의 동작을 측정하였다. 정확한 동작 측정을 어렵게 하는 Read SQUID들 사이의 간섭 문제를 동시에 측정한 양쪽 SQUID의 V- $\Phi$  곡선 상에서 동작점을 결정하는 방법으로 해결하였다. 측정결과 shift register 내에서 데이터의 생성과

전파가 원활하게 이루어지고 있으며 양쪽 read SQUID의 반응으로부터 입력된 "1" 또는 "0"의 데이터가 비트 사이에서 단계적으로 정확하게 이동하고 있음을 확인하였다.

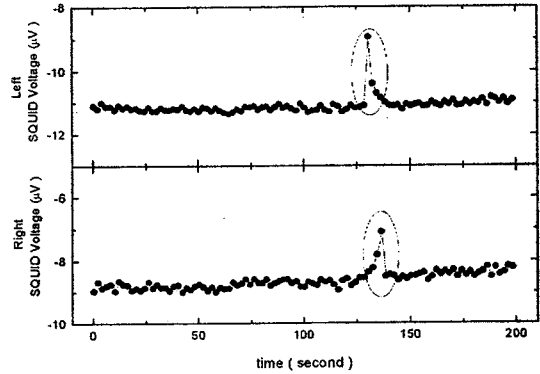


그림 8. 그림 7의 측정에서 다른 모든 펄스의 진폭은 같게 한 후 Data-in 펄스의 진폭만 1.4 mA로 감소시켜 "1" 대신에 "0"을 데이터로 입력한 결과인데 앞의 결과와 마찬가지로 원으로 표시한 부분에서 에러에 의하여 "0" 대신에 "1"이 입력되면 우측 SQUID에 "1"이 검출되는 결과를 보인다.

#### 참고문헌

- [1] R.Lochschmied, Supraleitende Schieberegister mit geringer Verlustleistung, Ph.D. Thesis, Universitat Fridericiana Karlsruhe, 1996.
- [2] O.Mukhanov, "Rapid single flux quantum (RSFQ) shift register family", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 3(1), 2578, 1993.
- [3] D.L.Miller, J.X.Przybysz, J.H.Kang, C.A. Hamilton, and D.M.Burnell, "Josephson counting analog-to-digital converter", IEEE Transaction on Magnetics, 27, 2761, 1991.