

자동 Error counter를 이용한 RSFQ switch 소자의 Bit Error Rate 측정

Bit Error Rate measurement of an RSFQ switch by using an automatic error counter

김세훈*, 김진영**, 백승현*, 정구락***, 한택상#, 강준희##

Sehoon Kim*, Jinyoung Kim**, Seung Hun Baek*, Ku-Rak Jung***, Taek Sang Hahn#, Joonhee Kang##

Abstract The problem of fluctuation-induced digital errors in a rapid single flux quantum (RSFQ) circuit has been very important issue. So in this experiment, we calculated error rate of RSFQ switch in superconductivity ALU. The RSFQ switch should have a very low error rate in the optimal bias. We prepared two circuits placed in parallel. One was a 10 Josephson transmission lines (JTLs) connected in series, and the other was the same circuit but with an RSFQ switch placed in the middle of the 10 JTLs. We used a splitter to feed the same input signal to the both circuits. The outputs of the two circuits were compared with an RSFQ XOR to measure the error rate of the RSFQ switch. By using a computerized bit error rate test setup, we measured the bit error rate of 2.18×10^{-12} when the bias to the RSFQ switch was 0.398mA that was quite off from the optimum bias of 0.6mA.

Key Words: BER, ALU, XOR, single flux quantum, superconductor, Nb.

1. 서 론

초전도 디지털 소자를 만들면서 디지털 소자의 작동 속도는 현재의 반도체 디지털 소자에 비해서 적은 소비전력을 가지고 100배 이상 빨라지게 되었다[1,2]. 동작속도가 빨라짐에 따라 데이터의 처리용량도 많아졌고, 이에 연산과정 중에 생기는 에러가 문제로 나타나게 되었다. 그래서 이번 연구에서는 초전도 ALU에 사용하는 RSFQ (Rapid single flux quantum) switch의 Error Rate를 계산하여 제작되고 있는 소자의 동작 신뢰성을 알 수 있었다[3]. 본 연구에서 사용된 회로는 JTL(Josepson transmission line) 10개[6]과 RSFQ switch 하나로 이루어진 데이터 라인 2개를 평행하게 만들고 끝단에 RSFQ XOR[4-6]소자를 연결하여 error 발생 시 신호가 발생하도록 설계하였으며 제작하였고 측정하였다. 측정에 쓰인 칩은 한국광기술원의 10-layer standard Nb/SiO₂/Nb공정으로 제작되었다.

* 학생회원 : 인천대 대학원 물리학과 석사과정
 ** 학생회원 : 인천대 대학원 물리학과 박사과정
 *** 정 회 원 : 한국광기술원 연구원
 # 정 회 원 : 한국광기술원 기술개발부장
 ## 정 회 원 : 인천대 물리학과 교수

원고접수 : 2005년 02월 22일

심사완료 : 2005년 03월 10일

칩 설계에서는 외부의 디지털 신호를 단자속 양자(SFQ; Single Flux Quantum) 펄스로 바꿔주기 위한 DC/SFQ와 RSFQ XOR에서 발생한 신호를 측정하기 위해서 RS flip-flop 과 단자속 양자 펄스를 DC Voltage로 변환해 주는 SFQ/DC[5]를 XOR 소자의 출력단에 연결하였다. 설계 툴은 CAD프로그램인 XICTM[8]과 시뮬레이션 툴인 WRspiceTM[9] 그리고 인덕턴스 추출 프로그램인 Lmeter를 사용하였다. 측정은 파형발생기를 이용하여 신호를 입력하였으며, 오실로스코프를 사용하여 출력신호를 관측하였다. 측정할 때 칩은 High speed Cyroprobe에 연결되었으며 액체 헬륨온도(4.2 K)에서 측정하였다.

2. 본 론

2.1. 회로 디자인 및 제작

Fig. 1은 BER를 측정할 때 사용했던 회로를 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다. 회로의 제일 앞에 DC/SFQ[5]를 넣어서 외부의 신호를 회로에 입력할 수 있게 하였으며, splitter를 연결하여 BER를 측정할 RSFQ switch에 동일한 데이터가 들어갈 수 있도록 하였다. RSFQ switch는 외부에서 바이어스를 조절하여 "closed"과 "open" 가 되도록 하였다. Switch의 앞쪽과 뒤쪽에 연결되어있는 JTL의 개수도 동일하게 설계하여 두 라인간의 시간차에 의한 RSFQ XOR 출력이 발생하지 않도록 만들었다. RSFQ XOR 출력단에는 SFQ/DC를 연결하여 error 발생 시 출력 신호를 오실로스코프에서 볼 수 있도록 하였다.

RSFQ switch의BER를 측정하기 위해서는 데이터가 이동하는 라인의 error는 없어야 하며 두 라인의 switch 앞쪽과 뒤쪽의 JTL 개수를 같게 만들어서 time delay를 없게 설계했다. Switch 가 포함되어 있는 라인에 쓰인 JTL의 개수는 총 10개로 설계 제작되었다.

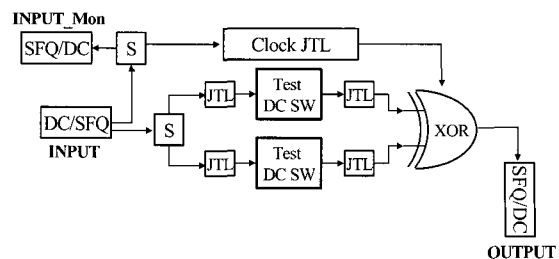


Fig. 1. Block diagram of BER(Bit error rate) measurement circuit.

Fig. 2는 측정에 사용된 회로의 layout을 보여주고 있다. Fig. 3은 Fig. 2의 C 부분의 실제 칩 사진이다. DC/SFQ 회로는 외부의 임의 파형 발생기에 연결되어 있으며, 파형 발생기에서 입력된 신호를 단자속 양자 펄스로 변환하는 기능을 하며 두 개의 출력 부분이 있어 두 개의 펄스를 발생시킨다. 이 두 펄스는 주기가 같고 서로의 주기 사이에 위치하게 된다. 아래쪽에 있는 SFQ/DC는 실제 외부에서 넣어준 신호가 회로 속에서 단자속 펄스로 잘 발생 하고 있는지 관측하기 위한 모니터링 회로이며, 오실로스코프 상에서 입력신호의 반으로 신호가 출력되는 것으로 보인다.

Fig. 4는 Fig. 2의 b부분의 실제 칩 사진이다. 두 개의 switch가 나란히 위치하고 있으며 Splitter에서 나온 동일한 데이터가 switch의 Input으로 들어간다. SW bias 부분은 임의 파형 발생기에 연결하여 switch를 "closed" 또는 "open"상태로 만들 수 있게 했다. Fig. 2 상에서 a 부분은 XOR 소자와 XOR 소자에서 출력되는 단자속 펄스를 다시 오실로스코프에서 볼 수 있도록 DC Voltage로 바꾸어 주는 SFQ/DC가 연결되어 있다. Fig. 5는 Fig. 2의 a 부분의 실제 칩 사진이다. 위쪽과 아래쪽 Input 1과 Input 2가 XOR로 입력되며 두 개의 데이터가 동일하지 않으면 Clock 신호에 의해서 XOR에서 신호가 출력 되고 SFQ/DC에 의해서 DC voltage로 바뀌어서 오실로스코프로 출력을 관측할 수 있다.

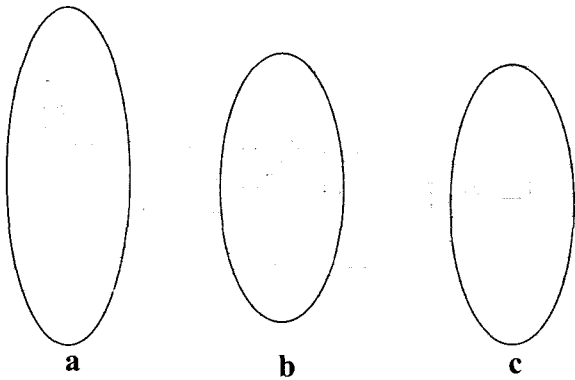


Fig. 2. Layout of the BER measurement circuit.

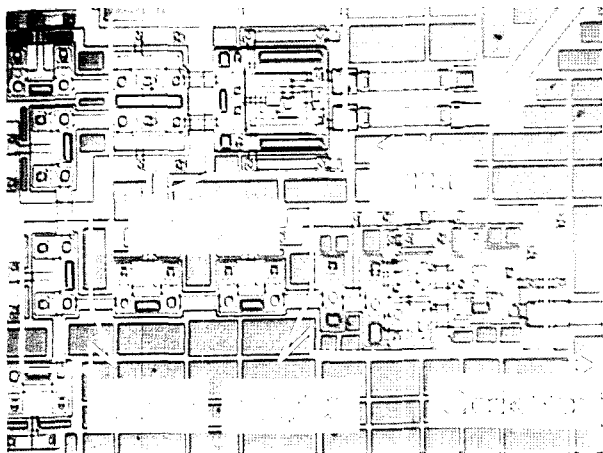


Fig. 3. Microphotograph of the DC/SFQ and SFQ/DC.

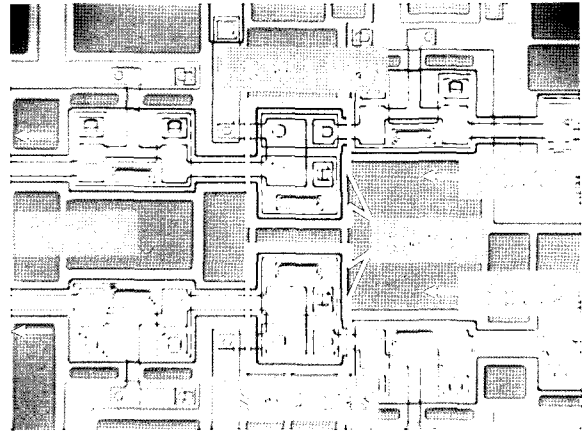


Fig. 4. Microphotograph of the RSFQ Switch.

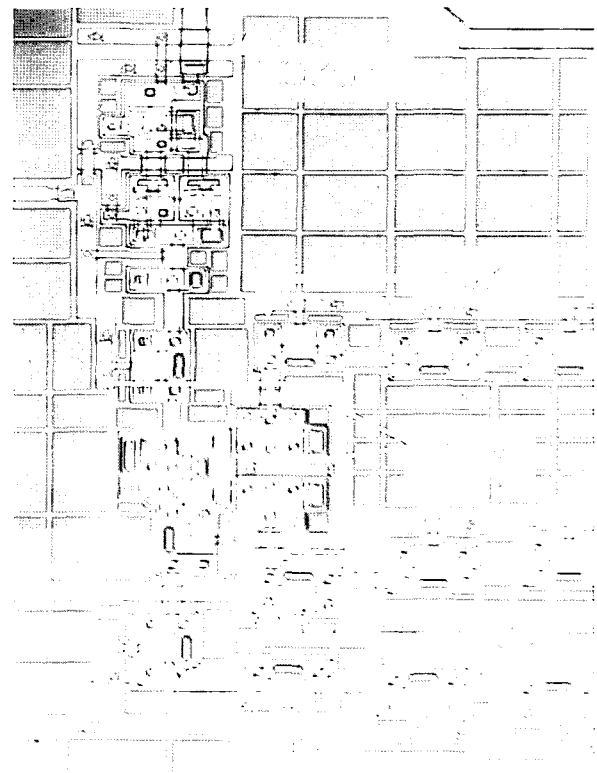


Fig. 5. Microphotograph of the RSFQ XOR.

2.2. Oscilloscope 를 이용한 BER 회로측정

Fig. 6은 제작된 칩으로 입력 주파수가 500kHz로 측정된 화면이다. Switch1은 임의 파형 발생기에 연결하여 "closed" 과 "open" 상태를 만들어 주었고, switch2는 current bias source에 연결하여 항상 "closed"상태이다. Switch 1이 "open" 되어있고 Switch 2가 "closed"상태 일 때는 XOR 에 데이터가 하나만 입력되므로 XOR 논리 값에 따라 XOR 의 출력이 발생한다. Switch 1과 Switch 2 둘 다 "closed" 상태 일 때는 XOR 논리 값에 따라 출력이 없다. Input_Mon은 실제 입력되고 있는 SFQ펄스를 보여준다. 위상이 바뀌는 시점마다 SFQ펄스가 하나씩 있는 것이며 XOR의 출력은 에러 발생 시 위 상태에서 출력 값의 위상이 180° 반전된다. BER은 위 상태에서 출력 값이 180° 반전 되는 시점까지의 시간을 측정하여 계산 할 수 있었다.

Fig. 7은 입력 주파수가 5MHz 일 때이며 500kHz 때와 동일하게 SW1이 “closed”일 때 두 개의 스위치가 “closed”가 되므로 XOR의 출력은 없다. 입력 주파수가 5MHz일 때는 오실로스코프의 대역폭에 의해서 출력신호가 사각파(square wave)로 보이지 않고 톱니모양으로 보인다. 두 실험 다 최적 바이어스상태에서 한 것이며 이론적으로 RSFQ 회로의 최적바이어스 상태에서의 BER은 10^{-30} 정도이다[7]. 최적바이어스상태에서는 눈으로 관측이 가능할 만큼 에러의 발생이 적다. 입력 주파수를 500kHz로 해서 4시간 동안 관측했으나 error로 인한 출력 값의 180°위상 반전이 관측되지 않았으며 관측한 시간만 가지고 계산하였을 때 $BER \leq 1.38 \times 10^{-10}$ 이다. 5MHz로 해서 3시간 동안 관측했으나 출력 값의 위상 반전을 관측할 수 없었으며 관측한 시간만을 가지고 계산하였을 때 $BER \leq 1.85 \times 10^{-11}$ 이다. 입력 주파수를 높임으로써 입력 비트수를 증가시켜 실험 시간을 단축 할 수 있었다. 두 실험을 통해 최적바이어스상태에서의 BER값이 최소 10^{-11} 이하 값을 가질 것이라 예상되며 더 정확한 BER값을 도출하기 위해서는 최적바이어스상태가 아닌 에러가 더 빈번하게 발생하는 주변 바이어스상태에서의 BER 측정이 필요하며 더 정확한 에러 체크를 위해서 다음 PXI 시스템을 이용한 자동 BER 측정 장치가 필요 하였다.

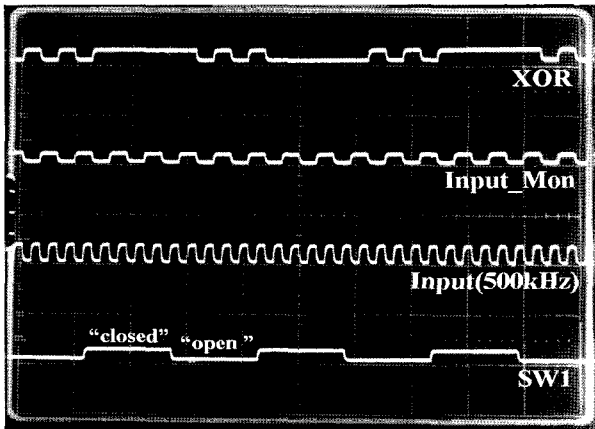


Fig. 6. Measurement of BER using oscilloscope and arbitrary waveform generator at 500kHz.

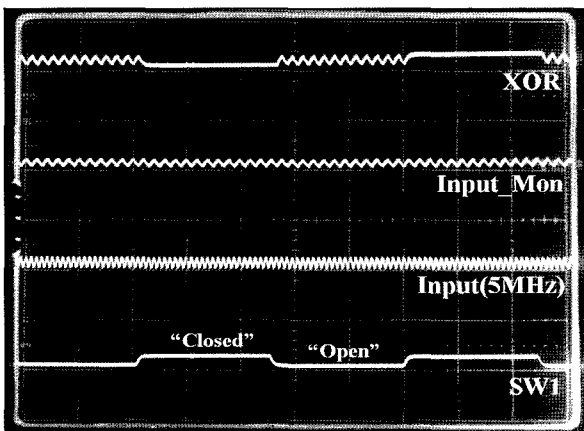


Fig. 7. Measurement of BER using oscilloscope and arbitrary waveform generator at 5MHz.

2.3. PXI 시스템을 이용한 자동 BER 측정

Fig. 8은 PXI[10]와 Labview[10] 프로그램을 이용하여 에러의 측정을 자동으로 하게 만든 프론트 패널의 모습이다. Fig. 8은 스위치를 하나만 작동시켜서 XOR의 작동상태를 확인하고는 있는 과정이다. 출력신호는 약 1mV 정도이며 3000배 증폭을 해서 측정 프로그램에서 사용한다. 처음 높은 BER에서는 입력 주파수를 1kHz로 하여 측정하였으며 PXI로 입력된 신호중 일부분을 샘플링하여 샘플링된 구간에서의 에러의 개수를 세어서 BER를 계산 하였다. BER이 높은 구간에서는 이런 일련의 샘플링을 반복해서 통계적으로 모든 구간의 에러를 세지 않아도 BER를 계산할 수 있으며 10^{-3} 까지의 BER 구간에서는 샘플링 방법으로 측정하였다. 10^{-4} 이하의 BER 구간은 1ms 시간 사이의 출력신호의 비교를 통해서 에러를 검출하였다. 낮은 BER 구간에서는 1초당 10개미만의 에러가 발생하며(더 낮은 BER 구간에서는 에러가 더 적게 발생한다.) XOR 출력신호는 TFF형 SFQ/DC에 의해서 “0” 또는 “1” 이라는 신호로 다음 에러가 발생할 때까지 멈추어있게 된다. 우리는 신호가 1ms 시간동안 값의 변화가 있는지를 실시간으로 계속 측정하여 에러의 개수를 알 수 있었으며 BER를 계산할 수 있었다. PXI를 이용한 자동 에러측정은 oscilloscope를 이용하여 에러를 관측 개수를 세는 것보다 보다 더 정확하며 통계적인 신뢰성을 가지게 하기 위해서 에러의 개수가 100개 이상일 때까지 회로를 작동시켰다. 입력주파수 1GHz 일 때 자동 측정 시스템을 이용하여 측정한 BER의 최하 값은 바이어스가 0.398mA에서 2.18×10^{-12} 이다. 이 값은 최적 바이어스 값인 0.6mA보다 적은 바이어스 값에서 측정한 것이므로 최적 바이어스 값에서는 더 적은 BER값을 예상할 수 있었다.

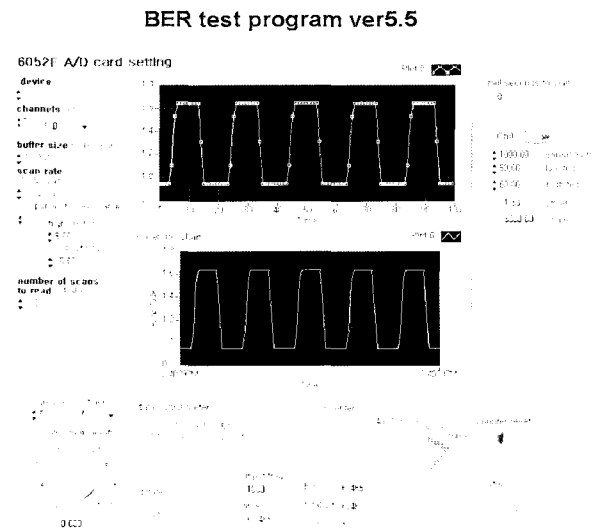


Fig. 8. Automatic BER analysis system by PXI and Labview software.

3. 결 론

본 연구를 통해서 XOR회로를 이용하여 BER를 측정 할 수 있는 회로를 CAD프로그램인 XicTM과 시뮬

레이션 프로그램인 WRspice™, 그리고 인덕턴스 추출 프로그램인 Lmeter를 사용하여 설계했고 제작하였으며 500kHz 와 5MHz에서 아날로그 테스트를 통하여 BER를 계산하였다. 에러 측정은 최적화된 바이어스 상태에서 하였다. 입력 주파수가 500kHz에서는 BER $\leq 1.38 \times 10^{-10}$로 계산 되었으며, 5MHz 에서는 BER $\leq 1.85 \times 10^{-11}$로 계산 되었다. PXI를 이용한 자동BER측정에서는 입력주파수 1GHz일 때 최적바이어스인 0.6mA 보다 적은 0.398mA 에서 BER 이 2.18×10^{-12} 으로 측정되었으며 최적 바이어스 값에서는 더 낮은 BER을 예상할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프린터 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원과 한국과학재단 지정 인천대학교 멀티미디어 연구센터의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] K.K Likharev and V.K. Semenov; "RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems" Appl Supercond, IEEE Trans. on Vol , 1 , Issue: 1 , March 1991 Pages:3 - 28.

[2] C.J. Fourie, W.J. Perold; "Ultra high-speed superconducting RSFQ(Rapid Single-Flux-Quantum) digital switching logic" AFRICON, 1999 IEEE, Vol: 2 ,Sept.-1 Oct. 1999 Pages:1183 - 1188.

[3] Eric J. Dean, Paul D. Dresselhaus, John X. Przybysz, Andrew H. Miklich, and A. Hodge Worsham, "Bit Error Rate Measurements for GHz Code Generator Circuit", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 9 No.2, 1999.

[4] O.A Mukhanov, S.V. Polonsky, V.K. Semenov, "New elements of the RSFQ logic family" Magnetics, IEEE Trans. on ,Vol. 27 ,Issue: 2 ,Mar 1991 Pages:2435 - 2438.

[5] V.K Kaplunenko, V.P. Koshelets, K.K Likharev, V.V. Migulin, O.A. Mukhanov, G.A. Ovsyannikov, V.K. Semenov, I.L. Serpuchenko, and A.N. Vystavkin, "Experimental Study of the RSFQ Logic Circuits," in: Extended Abstracts of ISEC'87, Tokyo, pp. 127-130, Aug 1987.

[6] Q.P. Herr, M.J. Feldman, "Error rate of RSFQ circuits: theory", IEEE Trans. Vol: 7 ,2 ,1997 Pages:2661 - 2664.

[7] T.V. Filippov, Y.A. Polyakov, V.K. Semenov, K.K. Likharev, "Signal resolution of RSFQ comparators" IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol 5 , Issue: 2 , June 1995 Pages:2240.

[8] <http://www.wrcad.com/xic.html>

[9] <http://www.wrcad.com/wrspice.html>

[10] National Instruments <http://www.ni.com/>

저 자 소 개



김세훈(金世勳)
1978년 6월 5일생, 2004년 인천대학교 자연대학 물리학과 졸업, 현재 동대학원 물리학과 석사과정.



양정국(梁正國)
1979년 10월 8일생, 2005년 인천대학교 자연대학 물리학과 졸업, 현재 동대학원 물리학과 석사과정.



백승헌(白承憲)
1978년 1월 12일생, 2004년 인천대학교 자연대학 물리학과 졸업, 현재 동대학원 물리학과 석사과정.



김진영(金鎭榮)
1975년 10월 23일생, 1998년 인천대학교 자연대학 물리학과 졸업, 2000년 동 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 현재 동대학원 물리학과 박사과정.



강준희(姜準熙)
1955년 02월 05일생, 1987년 미네소타대학 물리학 박사, 1987년 ~ 1989년 Argonne National Lab. 연구원, 1989년 ~ 1994년 Westing House 선임연구원, 1994년~현재 인천대학교 물리학과 교수.