

High-speed Performance of Single Flux Quantum Circuits Test Probe

Sang-Mun Kim^{a,c}, Jong-Hyun Choi^{a,d}, Young-Hwan Kim^{*,a}, Joonhee Kang^b, Ki Huyn Yoon^c and In-Hoon Choi^d

^a Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

^b University of Incheon, Incheon, Korea

^c Yonsei University, Seoul, Korea

^d Korea University, Seoul, Korea

Received 17 August 2002

단자속 양자 회로 측정용 고속 프로브의 성능 시험

김상문^{a,c}, 최종현^{a,d}, 김영환^{*,a}, 강준희^b, 윤기현^c, 최인훈^d

Abstract

High-speed probe made to test single flux quantum(SFQ) circuits was comprised of semi-rigid coaxial cables and microstrip lines. The impedance was set at 50 Ω to carry high-speed signals without much loss. To do performance test of high-speed probe, we have attempted to fabricate a test chip which has a coplanar waveguide(CPW) structure. Electromagnetic simulation was done to optimize the dimension of CPW so that the CPW structure has an impedance of 50 Ω, matching in impedance with the probe. We also used the simulation to investigate the effect of the width of signal line and the gap between signal line and ground plane to the characteristics of CPW structure. We fabricated the CPW structure with a gold film deposited on Si wafer whose resistivity was above 1.5x10⁴ Ω·cm. The magnitudes of S₂₁ of CPW at 6 GHz in simulations and in the actual measurements done with a network analyzer were: -0.1 dB and -0.33 dB (type A), -0.2 dB and -0.48 dB (type B), respectively. Using the test chip, we have successfully tested the performance of high-speed probe made for SFQ circuits. The probe showed the good performance over the bandwidth of 10 GHz.

Keywords : single flux quantum circuit, high-speed probe, coplanar waveguide

1. 서론

매우 빠른 스위칭 속도를 가진 초전도 단자속 양자 회로의 작동을 측정하기 위해서는 일반적인 구리선을 사용하여 제작된 측정프로브

를 사용할 수가 없다. 그 이유는 신호의 속도가 빨라질수록 신호는 도체 표면으로 흐르고, 방사하려는 경향이 있기 때문이다. 초고속 신호를 손실 없이 전송하기 위해서는 고주파 회로에 많이 사용되는 coaxial cable, microstrip line, coplanar waveguide(CPW) 등을 사용하여야 한다. 따라서 초전도 단자속 양자 회로의 작동을 측정하기 위한 측정프로브는 semi-rigid coaxial

*Corresponding author. Fax : +82 2 958 5692

e-mail : youngkim@kist.re.kr

cable과 microstrip line 등을 사용하여 제작된다.

고주파 회로에서 임피던스 매칭은 신호 전송에 많은 영향을 준다. 각 회로 구성 요소들의 임피던스가 서로 다를 경우 신호 반사에 의한 손실이 발생한다. 그러므로 신호 손실을 최소화하기 위해서는 각 회로 구성 요소들의 임피던스를 서로 매칭시켜야 한다. 따라서 semi-rigid coaxial cable 및 microstrip line으로 구성된 측정프로브의 경우에도 임피던스 매칭이 필요하며, 임피던스가 50 Ω으로 매칭되어 있다. 또한 단자속 양자 회로도 입출력 회로의 경우 임피던스가 50 Ω이 되도록 설계된다.



본 연구에서는 단자속 양자 회로의 작동을 측정하기 위한, semi-rigid coaxial cable과 microstrip line으로 구성된 고속 측정프로브의 신호 전송 특성을 분석하여 프로브가 단자속 양자 회로의 고속 작동을 측정하기에 적합하게 제작되었는지를 알아 보고자 하였다. 프로브의 특성을 분석하기 위해서 시험 시편을 제작하였다. 시험 시편은 고주파가 될수록 전송 특성이 좋고[1], 비교적 간단하게 제작할 수 있는 CPW 형태로 결정하고 Ansoft사의 High-Frequency Structure Simulator(HFSS)를 사용한 전자기 시뮬레이션을 통해 임피던스가 50 Ω이 되는 구조를 설계하였다. 또한, 실제 제작할 때 발생할 수 있는 구조적 편차에 대하여도 시뮬레이션하여 제작 마진을 구하였다. 제작된 시편의 특성을 Network Analyzer로 측정한 후 프로브에 장착하여 Network Analyzer 및 Time Domain Reflectometer를 사용하여 프로브의 특성을 분석하였다.

II. 시험 시편 제작 및 특성 분석

2-1. Coplanar waveguide의 시뮬레이션

측정 프로브의 신호 전달 특성을 분석하기 위하여 초고주파수 신호를 손실 없이 전달할 수 있는, 임피던스가 50 Ω인 CPW 형태의 시편을 제작하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. CPW를 설계하기 위한 변수에는 중심 전송선의 폭(W), 중심 전송선과 접지면 사이의 간격(G), 유전체의 두께(h), 전극의 두께(t) 등이 있다. 이와 같은 설계 인자들은 상호 복합적인

Table 1. Simulated dimension of coplanar waveguide whose impedance is about 50 Ω in the bandwidth of 2-8 GHz.

	Type A	Type B
Shape		
Width (W) (μm)	190	200/60
Gap (G) (μm)	90	100/30
Height (h) (mm)	1	0.5
Thickness (t) (μm)	3	3
유전체 재료	Silicon	
전송선 및 접지면 재료	Au	

작용으로 소자의 전기적 특성에 영향을 미친다 [2]. 이와 같은 변수와 초전도 단자속 양자 회로 칩의 크기 (5 mm x 5 mm), 전극 패드 크기 등을 고려하여 시뮬레이션을 수행한 결과 50 Ω 임피던스를 가지는 두 가지 형태의 CPW의 크기를 결정할 수 있었다. 표 1에 결정된 두 가지 형태의 CPW의 크기 및 형태를 나타내었다.

표 1에 나타낸 바와 같이 A형은 전극 패드의 폭과 유사한 선폭을 가진 전송선을 가진 형태이고 B형은 전극 패드와 폭이 좁은 전송선이 결합된 형태이다. A형의 경우 유전체로 사용한 실리콘의 두께가 1 mm인데 그 이유는 CPW 계산식을 사용하기 위해서는 중심 전송선의 폭(W)과 전송선과 접지면 사이 간격(G)에 관계된 유전체의 두께(h)가 $2 \times (W + 2G)$ 이상 되어야 하기 때문이다. 그러나 두께가 1 mm인 실리콘 기판은 일반적으로 사용되는 것이 아니기 때문에 상용화 되어 있는 두께가 0.5 mm인 실리콘 기판을 사용하기 위해서는 전송선의 선폭을 줄여야 한다. 그러나 선폭이 전극 패드의 폭보다 작을 경우 프로브에 있는 핀(pin)과의 접촉에 문제가 발생할 수 있으므로 전극 패드와 결합한 B형과 같은 형태로 설계하였다.

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (1)$$

전송선 및 접지면의 두께는 식 1과 같이 정의되는 skin depth(δ_s)를 고려하여 3 μm로 정하였

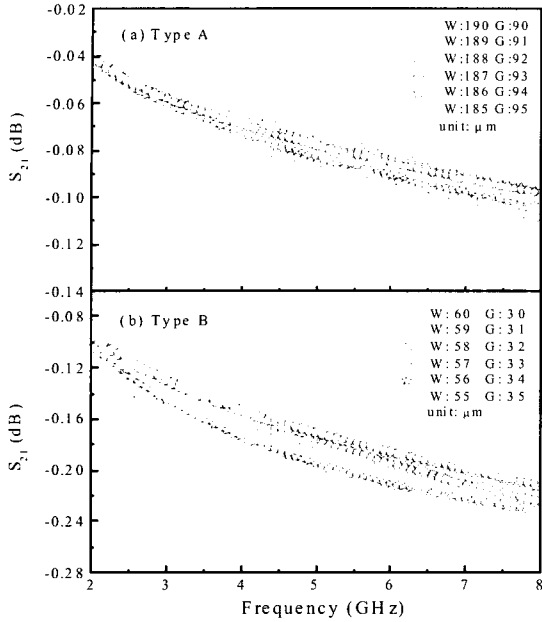


Fig. 1. Dependence of S_{21} values of coplanar waveguides on line width of signal line and gap between signal line and ground plane.

다. 식 1에서 α 는 감쇠 상수를 나타내며 ω 는 각주파수, μ 는 투자율, σ 는 도전율을 나타낸다. 주파수가 1 GHz일 때 금의 skin depth는 약 2.5 μm 이다.

이와 같이 시뮬레이션에 의해 결정된 크기로 CPW를 제작하게 되는데 시뮬레이션 결과와 정확히 일치하게 제작하는 것은 매우 어려운 것으로 생각된다. 따라서 전송선의 선폭(W)과 전송선과 접지면 사이 간격(G) 변화에 따른 영향을 시뮬레이션으로 알아보았다. W 및 G 의 변화폭은 각각 $-5 \mu\text{m}$ 와 $+5 \mu\text{m}$ 이다. 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 이 결과에 의하면 위 변화폭 내에서 임피던스의 변화는 $\pm 1 \Omega$ 정도로 나타났으며 신호 전송 특성을 나타내는 S_{21} 값은 거의 변화가 없음을 알 수 있었다. 이 결과로부터 CPW를 제작할 때 어느 정도 제작 마진이 존재함을 알 수 있었고, 위 변화폭은 제작 마진에 속하는 값으로 생각되며 현재의 기술 수준으로 볼 때 충분히 그 범위 내에 속하는 CPW를 제작할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 2. Deposition conditions of Cr and Au films

	Cr	Au
Sputtering type	RF	DC
Base pressure	8×10^{-6} Torr	8×10^{-6} Torr
Substrate temp.	Ambient temp	Ambient temp
Work pressure	5 mTorr	5 mTorr
Gas flow rate	Ar 50 sccm	Ar 50 sccm
Power(RF,DC)	200 W	433V \times 0.2A
Thickness	600 Å	3.4 μm

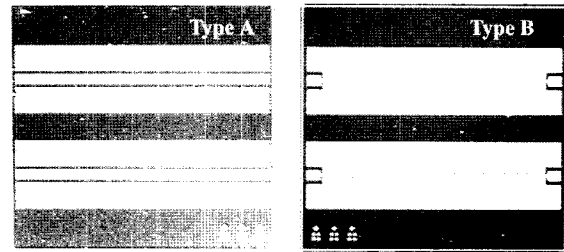


Fig. 2. Photographs of the fabricated coplanar waveguides. (magnification: $\times 7$)

2-2. Coplanar waveguide의 제작 및 특성 분석

시뮬레이션에 의해 결정된 두 가지 형태의 CPW를 제작하기 위한 mask layout을 CAD 프로그램을 사용하여 완성하였다. 단자속 양자소자의 칩 크기(5 mm x 5 mm)와 전극 패드 위치 등을 고려한 결과 한 개의 칩 내에 같은 형태의 CPW가 2개 위치하였다. CPW 제작 공정은 다음과 같다. 먼저 고저항 실리콘 기판($\rho > 15000 \Omega \cdot \text{cm}$)에 금을 증착하기 전에 금의 접착력을 향상시키기 위해 크롬(Cr) 버퍼층을 약 600 Å 정도 증착한 후 금을 증착하였다. 표 2에 크롬 및 금의 증착 방법 및 조건을 자세히 나타내었다. 금을 증착 후 일반적인 포토리소그래피법으로 PR 마스크를 제작한 후 이온빔으로 금을 건식 식각하여 CPW를 완성하였다. A형 및 B형 모두 두께가 0.5 mm인 고저항 실리콘 기판을 사용하여 제작하였다. 완성된 CPW의 사진을 그림 2에 나타내었다.

제작한 CPW의 신호 전송 특성을 30 kHz 에서 6 GHz까지 측정이 가능한 Network Analyzer (Agilent 8753ES)를 사용하여 측정하였다. Network Analyzer의 입출력 단자는 칩 형태이며

CPW의 전송선과 두 개의 접지면에 접촉된다. 그림 3에 측정 장치의 개략도를 나타내었다.

CPW의 특성을 측정하기 전에 먼저 시뮬레이션에 의해 결정된 크기로 제작된 시편의 실제 크기를 측정하였다. 그 결과 A형의 경우 중심 전송선 단면의 아래변이 $3.52 \mu\text{m}$ 증가하였고, 윗변은 $7.04 \mu\text{m}$ 감소하여 중심 전송선의 단면은 사다리꼴 형태로 나타났다. B형의 경우도

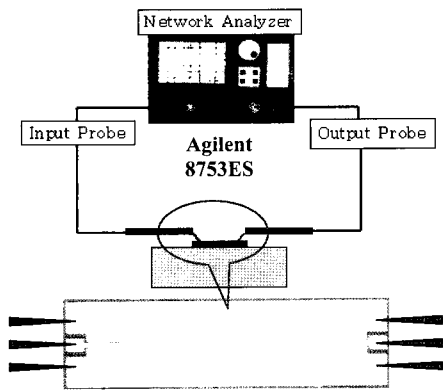


Fig. 3. Schematic diagram of measurement system for characterizing CPW.

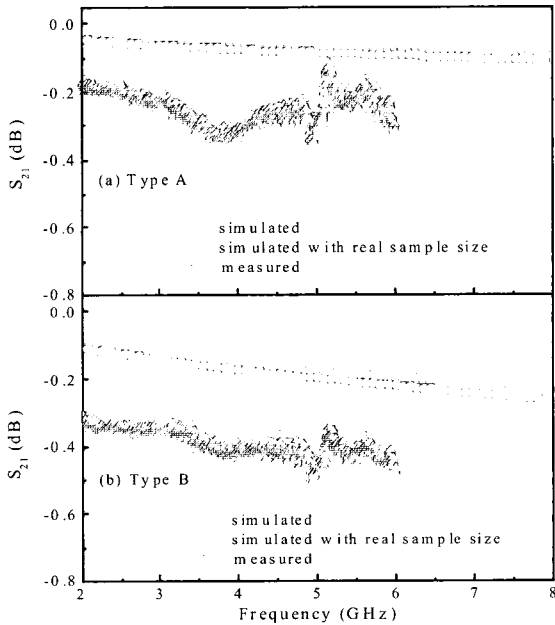


Fig. 4. Comparison between simulation and measurement results of S_{21} values: (a) type A, (b) type B

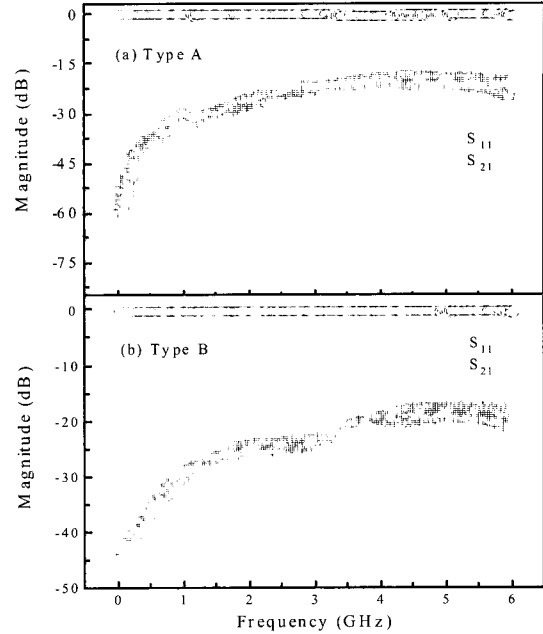


Fig. 5. Characteristics of coplanar waveguides measured by Network Analyzer with bandwidth of 30 kHz-6 GHz.

중심 전송선 단면의 아래변과 윗변이 각각 $2.76 \mu\text{m}$ 씩 증가하고 감소하여 중심 전송선의 단면은 역시 사다리꼴 형태로 나타났다. 실측한 CPW의 크기를 사용하여 다시 시뮬레이션을 수행하여, 크기를 결정하기 위해 수행했던 시뮬레이션 결과와 비교해 본 결과 그림 4에 나타낸 것과 같이 신호 전송 특성을 나타내는 S_{21} 값은 거의 변화가 없음을 알았다. 주파수 6 GHz에서 시뮬레이션 및 실측한 S_{21} 값을 비교해 보면 시뮬레이션 결과는 A형의 경우 -0.1 dB , B형은 -0.2 dB 실제 측정된 값은 A형은 -0.33 dB , B형은 -0.48 dB 로 미세한 차이를 보이고 있지만, 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치하고, 또한 그림 5에서 보는 바와 같이 신호 반사 특성을 나타내는 S_{11} 값과 비교해 보면 제작된 CPW의 신호 전달 특성이 매우 우수함을 알 수 있다. 여기서 시뮬레이션 결과와 실측된 S_{21} 값의 미세한 차이는 재료의 특성이 시뮬레이션에 사용한 것과 정확하게 일치하지 않기 때문인 것으로 생각된다. 전체적으로 볼 때 프로브의 특성을 분석하기 위해 제작한 CPW 형태의 시험용 시편은 성공적으로 제작되었음을 확인할 수 있었다.

III. 측정프로브의 특성 분석

제작된 시험용 시편을 사용하여 프로브의 특성을 Network Analyzer(NA) 및 Time Domain Reflectometer(TDR)를 사용하여 분석하였다. 그 결과를 그림 6과 7에 나타내었다. 그림 6에 보여진 바와 같이 NA를 사용하여 프로브를 분석해 본 결과 2 ~ 10 GHz 주파수 대역에서 S_{21} 값이 약 -10 ~ -15 dB로 나타났다. 그러나 NA 자

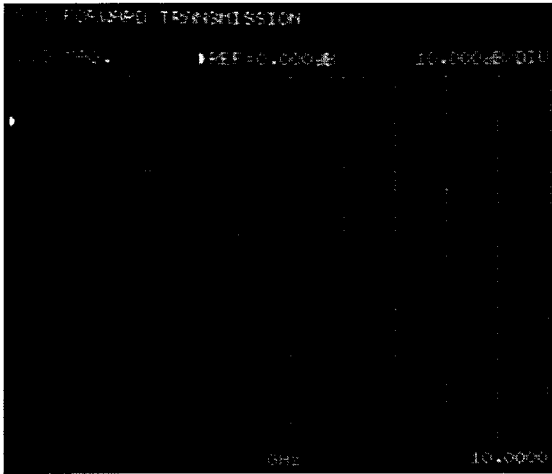


Fig. 6. Signal transmission characteristic of high-speed probe with CPW testing sample measured by Network Analyzer.

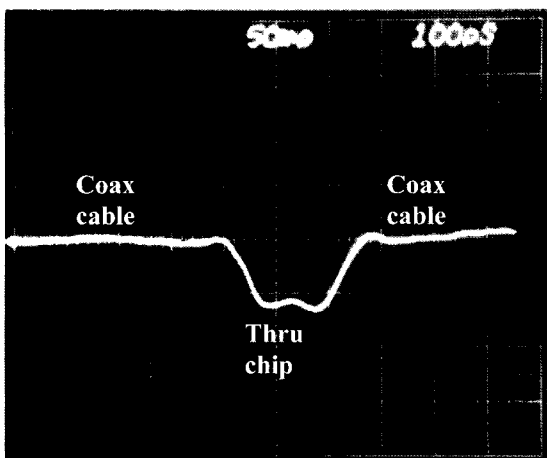


Fig. 7. TDR measurement result of high-speed probe. It shows the smooth connection through the pin contacts.

체의 loss가 약 5 dB 이상인 것으로 측정되어 실제 S_{21} 값은 -5 ~ -10 dB 정도가 됨을 알 수 있었다. 특히 5 GHz까지는 S_{21} 값이 거의 일정함을 알 수 있다. 그림 7에 보여진 TDR 측정 결과에서 알 수 있듯이 coax cable의 impedance는 50 Ω 으로 유지되나 핀 구조를 거쳐 시험용 시편을 지나는 약 200 ps의 구간 동안에는 임피던스가 약 45 Ω 인 것으로 측정되어 impedance matching이 비교적 잘 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 이 결과로부터 시편과 프로브에 있는 핀과의 접촉이 우수함을 알 수 있으며, 프로브는 비교적 잘 제작되었고 초전도 단자속 양자 회로의 작동을 측정하는데 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

초전도 단자속 양자 회로의 작동을 측정하는데 사용되는 측정프로브의 특성을 분석하였다. 이를 위해 먼저 시험 시편을 제작하였는데 시험 시편은 주파수가 높아질수록 전송 특성이 좋고 비교적 간단하게 제작할 수 있는 CPW 구조로 결정하였고, 50 Ω 임피던스를 가지는 크기를 시뮬레이션을 통해 구하였다. 고저항 실리콘 기판 위에 증착된 금 박막을 식각하여 CPW 시편을 제작하였고, 그 특성을 분석해 본 결과 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치하는 우수한 신호 전송 특성을 가짐을 확인하였다. 이 시험 시편을 사용하여 측정프로브의 특성을 분석한 결과 프로브가 초전도 단자속 양자 회로의 작동을 측정하기에 적합하게 제작되었음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원과 한국과학재단 지정 인천대학교 멀티미디어 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

[1] see www.rfdh.com

[2] Hyun Huh, Ju-Won Seo, Min-Su Kim, Jae-Kyung Pan,

“A study on deposition and characterization of low-k Parylene film”, Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, 12, 326-332 (1999).