

단자속양자 회로 측정프로브의 특성 분석을 위한 시뮬레이션

Simulation for characterization of high speed probe for measurement of single flux quantum circuits

김상문*, 김영환**, 최종현***, 조운조#, 윤기현##

Sang-Mun Kim*, Young-Hwan Kim**, Jong-Hyun Choi***, Woon-Jo Cho#, and Ki Hyun Yoon##

Abstract : High speed probe for measurement of single flux quantum circuits is comprised of coaxial cables and microstrip lines in order to carry high speed signals without loss. For the impedance matching between coaxial cable and microstrip line, we have determined the dimension of the microstrip line with 50Ω impedance by simulation and then have investigated the effect of line width and cross-sectional shape of signal line, dielectric material, thickness of soldering lead at the coaxial-to-microstrip transition point, and the angle between dielectric material and end part of the signal line on the characteristics of signal transmission of the microstrip line. From the simulation, we have found that these all parameters had influenced on the characteristic of signal transmission of the microstrip line and should be reflected in fabricating high speed probe. We have also determined the dimension of coplanar waveguide to fabricate testing sample for performance test of high speed probe.

Key Words : single flux quantum circuit, high speed probe, microstrip line, coplanar waveguide

1. 서 론

초전도 단자속양자 소자는 소모전력이 적고 작동속도가 매우 빠르다는 장점을 지니고 있어 현재 많은 연구가 국내외에서 이루어지고 있다[1,2]. 단자속양자 소자의 작동 속도는 수십에서 수백 GHz에 달하기 때문에 이의 동작을 측정하기 위해서는 특수하게 제작된 프로브가 사용된다. 일반적으로 초고주파수의 신호는 도체의 표면으로 전송되려는 skin effect 및 방사하려는 경향으로 인하여 구리선과 같은 일반적인 매체로는 전송할 수가 없다. 따라서 고주파에서 많이 사용되고 있는 semi-rigid coaxial cable, microstrip line 등을 사용하여야만 초고속 신호를 손실 없이 전송할 수가

있다. 따라서 단자속양자 소자의 작동을 측정하기 위한 프로브는 semi-rigid coaxial cable 및 microstrip line 등을 사용하여 제작된다. 그림 1에 semi-rigid coaxial cable과 microstrip line으로 구성된 프로브 및 microstrip line의 개략적인 그림을 나타내었다. Microstrip line은 시편을 장착하기 위한 부분에 일부 존재한다. Microstrip line은 접지면과 신호선 사이에 유전체가 존재하는 구조를 가지며 신호선의 선폭, 유전체의 두께 및 유전 상수 등이 microstrip line의 특성에 영향을 주는 중요한 변수들이다. 프로브에 있는 microstrip line의 신호선은 시편 전극 패드와의 접촉을 확실히 하여 이 부분에서의 손실을 최소화하기 위해 끝부분이 약간 들려져 있는 형태로 되어 있다.

고주파에서 임피던스는 신호 부하에 아주 중요한 역할을 한다. 그러한 임피던스가 semi-rigid coaxial cable과 microstrip line의 연결단에서 맞지 않는다면 신호의 반사가 일어날 것이다. Semi-rigid coaxial cable의 경우 특성 임피던스가 50Ω 인 것을 주로 많이 사용한다. 따라서 임피던스 매칭을 위해 microstrip line도 임피던스가 50Ω 이 되도록 설계되어야 한다. 물론 단자속양자 소자의 임피던스도 50Ω 이 되도록 설계된다. Microstrip line의 경우 임피던스가 앞에서 서술한 여러 가지 변수들에 의해 영향을 받기 때문에 이것을 사용하고자 할 경우 원하는 임피던스 값을 가질 수 있도록 그것의 변수들이 결정되어야 한다. 이러한 변수들을 결정하기 위해서 시뮬레이션이 수행된다. 초고주파의 설계 및 해석에 있어서 실험을 통한 방법은 시간과 비용이 많이 드는 반면 수치해석적인 방법은 어떤 형상이라도 전자기 특성을 예측할 수 있고 시간과 비용을 단축할 수 있어서 매우 효과적인 방법이라 볼 수 있다.[3,4]

본 연구에서는 3차원 전자기파의 해석 및 시뮬레이

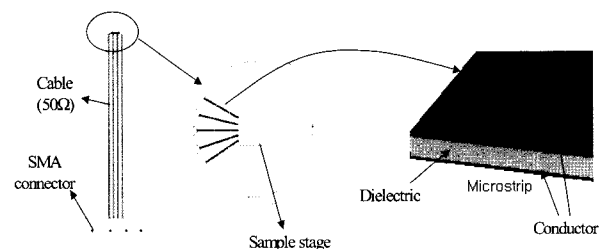


그림 1. Probe 및 microstrip line의 개략도.

Fig. 1. Schematic diagrams of high speed probe and microstrip line.

이 가능한 Ansoft사의 High-Frequency Structure Simulator(HFSS)를 사용하여 microstrip line에 대해 여러 가지 조건들을 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였

* 비 회 원 : 연세대 대학원 세라믹공학과 석사과정

** 정 회 원 : 한국과학기술연구원 선임연구원

*** 비 회 원 : 고려대 대학원 재료공학과 석사과정

비 회 원 : 한국과학기술연구원 선임연구원

비 회 원 : 연세대 세라믹공학과 교수

원고접수 : 2002년 11월 02일

심사완료 : 2002년 11월 22일

다. 이 결과들은 단자속양자 소자 측정시 발생할 수 있는 문제점 해결에 도움을 주고 프로브를 제작 또는 개선할 경우 기본 자료로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 프로브의 신호 전달 특성을 분석하기 위한 coplanar waveguide 구조의 시험용 시편을 제작하기 위해 시뮬레이션을 수행하여 임피던스가 약 50Ω이 되는 coplanar waveguide의 크기를 결정하였다.

2. 본 론

2.1. Microstrip line 시뮬레이션

Microstrip line의 임피던스 및 신호전달특성(S_{21}) 값은 신호선의 선폭(이하 '선폭'으로 줄임)에 따라 그 값이 변하게 된다. 프로브를 제작 또는 개선할 경우 시뮬레이션 결과에 의해 결정된 선폭을 가진 microstrip line을 제작하게 되는데 그 폭이 시뮬레이션 결과와 정확히 일치되게 제작하는 것은 매우 어려운 일이라 생각된다. 따라서 선폭의 영향에 대해 시뮬레이션 하여 선폭의 제작 마진을 구해보고자 하였으며 그림 2에 그 결과를 나타내었다. 이때 유전체로는 유전상수가 2.8인 teflon-based를 사용하였고 두께는 $127\mu\text{m}$ (5 mil)로 하였다. Microstrip line의 길이는 12.7mm (500 mil)이며 접지면 및 신호선으로 금을 사용하였으며 그 두께는 $35.56\mu\text{m}$ (1.4 mil)로 하였다.(이하 언급이 없으면 microstrip line은 위와 같은 크기와 재료로 구성됨). 선폭의 변화 범위는 $248.92\mu\text{m}$ (9.8 mil)에서 $266.7\mu\text{m}$ (10.5 mil)이다. 이러한 구조 및 재질에 대하여 주파수를 1~10 GHz까지 변화시키면서 임피던스 및 신호전달 특성(S_{21})을 살펴보았다.

이 범위 내에서 임피던스 값은 약 49~52Ω 사이에 있음을 확인하였고 신호전달특성(S_{21})은 크게 변하지 않음을 확인하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 microstrip line 자체의 신호전달특성은 임피던스 값

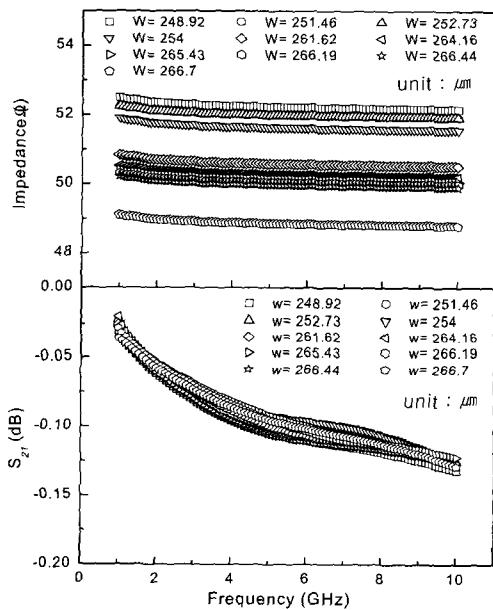


그림 2. 신호선의 선폭 변화에 따른 임피던스 및 신호 전달 특성 (유전체: teflon-based)
Fig. 2. Dependence of impedance and S_{21} of the microstrip line on line width of signal line (dielectric material: teflon-based)

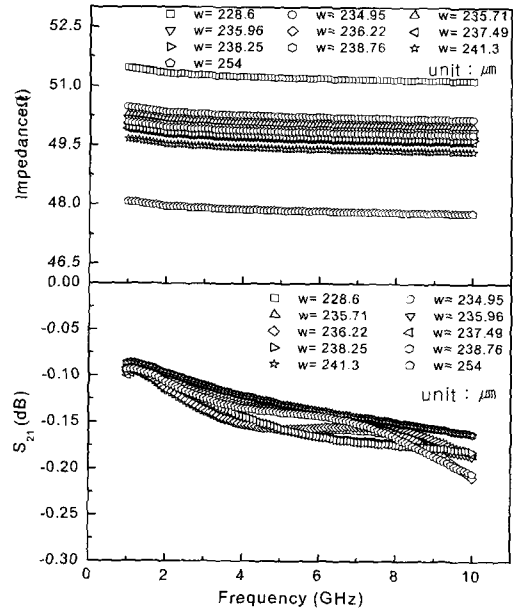


그림 3. 신호선의 선폭 변화에 따른 임피던스 및 신호 전달 특성 (유전체: plexiglass)
Fig. 3. Dependence of impedance and S_{21} of the microstrip line on line width of signal line (dielectric material: plexiglass)

에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났으나 임피던스 값이 50Ω인 semi-rigid coaxial cable과의 임피던스 매칭을 고려하면 microstrip line 자체의 신호전달특성 보다는 임피던스 값이 더 중요할 것으로 생각된다. 즉, microstrip line 자체의 신호전달특성은 임피던스 값에 크게 영향을 받지 않으나 프로브에서는 semi-rigid coaxial cable과 결합되어 사용되기 때문에 임피던스 매칭을 위해서 microstrip line의 임피던스가 매우 중요할 것으로 생각된다. Microstrip line의 임피던스는 선폭이 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 선폭이 $266.44\mu\text{m}$ (10.49 mil)일 경우 1~10GHz 주파수 범위에서 50Ω에 가장 근접한 49.9~50.2Ω의 임피던스 값을 가졌으며 $264.16\mu\text{m}$ (10.4 mil)인 경우는 50.2~50.5Ω으로 나타났다. 임피던스 매칭의 관점에서 보면 microstrip line의 선폭 마진은 약 $3\mu\text{m}$ 정도로 매우 작은 것으로 여겨진다.

그림 3은 유전체로서 유전 상수가 teflon-based($\epsilon_r=2.8$)보다 좀 더 큰 plexiglass($\epsilon_r=3.4$)를 사용하여 선폭 변화의 영향을 시뮬레이션한 결과이다. 선폭에 따른 임피던스 변화는 그림 2의 경우와 유사한 것으로 나타났으며 단지 1~10GHz 주파수 범위에서 50Ω에 가장 근접한 값을 가지는 선폭이 $238.76\mu\text{m}$ (9.4 mil)로서 teflon-based를 유전체로 사용한 경우보다 작은 것으로 나타났다. 유전체 종류에 따라 50Ω 매칭을 위한 선폭이 변화하므로 프로브의 크기 및 사용할 microstrip line 갯수를 고려한 유전체의 선택이 필요할 것으로 생각된다.

앞의 두 결과는 microstrip line만 존재할 경우 microstrip line의 신호전달특성은 임피던스에 크게 영향을 받지 않음을 나타내준다. 그러나 실제 프로브에서는 임피던스가 50Ω인 semi-rigid coaxial cable과 같이 연결하여 사용하므로, 앞에서 언급한바와 같이 임피던스 매칭이 중요할 것으로 생각된다. 이것을

알아보기 위하여 50Ω 임피던스를 갖는 coaxial cable과 microstrip line을 결합하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 이 때 microstrip line의 임피던스는 앞의 경우와 비슷한 49~52Ω 정도이며 microstrip line만 존재할 경우의 신호전달특성을 그림 4에 삽입그림으로 나타내었다. 시뮬레이션 결과, coaxial cable과 결합된 경우 신호 전달특성이 전체적으로 조금 감소하는 것을 관찰하였다. 그러나 그 감소 정도는 약 1% 정도(96에서 95%로, 이 값은 최소값임.)로 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 이 결과는 프로브와 같이 비교적 간단한 시스템에서 임피던스 매칭은 신호전달특성에 크게 영향을 미치지 않음을 나타내준다. 이상의 세 결과를 종합하면 프로브를 제작할 때 microstrip line의 선풍에는 어느 정도의 제작 마진이 존재함을 알 수 있다. 가장 이상적인 것은 coaxial cable과 임피던스 매칭이 가장 잘 되는 microstrip line을 제작하여 사용하는 것이나 이것에는 상당한 어려움이 있을 것으로 생각된다. 따라서 어느 정도의 제작 마진이 정해지면 이 범위에 속하는 microstrip line은 쉽게 제작될 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서 수행한 시뮬레이션 결과 내에서 microstrip line의 제작 마진은 약 10μm 정도인 것으로 나타났고 이것은 현재의 제작 기술 수준을 볼 때 충분할 것으로 생각된다.

그림 5는 신호선의 단면(이하 '단면'으로 표기) 형태에 대한 영향을 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 시뮬레이션시 단면은 정확히 사각형 형태이나 실제 제작시 정확한 형태의 사각형을 제작하는 것은 쉽지 않을 것으로 생각된다. 이 경우 유전체로는 teflon-based를 사용하였고 선풍은 가장 좋은 특성을보인 266.44μm(10.49 mil)로 하였다. 단면 모양은 제작시 발생할 수 있는 사다리꼴 및 역사다리꼴 두 가지를 선택하였다. 사다리꼴의 윗변을 266.44μm(10.49 mil)로 고정하였고 아래변은 윗변에 비해 양쪽으로 25.4μm(1 mil)씩 증가 또는 감소시켰다. 즉, 사다리꼴의 경우는 317.24μm(12.49 mil), 역사다리꼴의 경우는 215.64μm

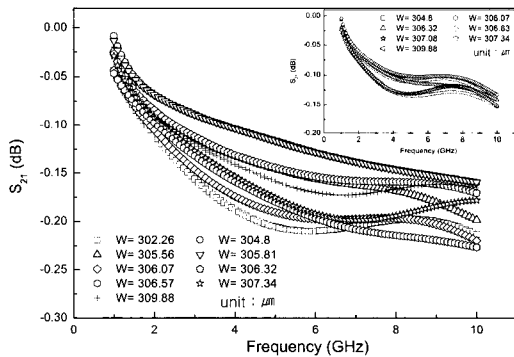


그림 4. Coaxial cable과 Microstrip line을 접합했을 경우 신호선 선풍에 따른 신호 전달 특성. 삽입 그림은 microstrip line만 존재하는 경우임.
Fig. 4. Characteristics of signal transmission depending on line width of the MSL in case that microstrip line is connected with coaxial cable of 50Ω impedance. The inset shows characteristics of microstrip line itself.

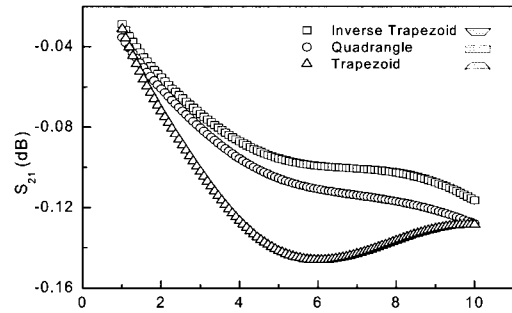


그림 5. 신호선의 단면 모양에 따른 임피던스 및 신호 전달 특성
Fig. 5. Dependence of impedance and S₂₁ of the microstrip line on cross-sectional shape of signal line

(8.49 mil)이 된다. 단면 모양에 따라 임피던스 및 신호 전달 특성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 역사다리꼴의 경우 임피던스 값은 증가했으나 신호 전달 특성은 오히려 향상되는 것으로 나타났다. 사다리꼴의 경우 임피던스 값은 감소하고 신호 전달 특성은 매우 나빠지는 것으로 나타났다. 전체적으로 사각형 형태에서 벗어남에 따라 임피던스 값 및 신호전달특성이 변화하므로 미세한 microstrip line의 경우 시뮬레이션시 신호선의 단면 모양도 고려되어야 할 것으로 생각된다.

프로브에서 신호 전달을 위해 coaxial cable 및 microstrip line을 서로 연결하여 사용한다. 일반적으로 납땜을 사용하여 이들을 서로 연결하게 되는데 신호가 coaxial cable에서 microstrip line으로 전달되는 즉, coaxial-to-microstrip transition에 의해 손실되는 것을 최소화하여야 한다. 그림 4에서 보듯이 단순히 microstrip line에 coaxial cable을 연결하여 시뮬레이션 했을 경우에도 약간의 손실이 발생하는 것을 알았다. 그러나 실제에서는 납땜 등을 사용하여 서로 연결하게 되는데 이 경우 납땜의 영향이 클 것으로 생각된다. 이를 알아보기 위하여 그림 6의 삽입 그림에 나타낸 것과 같은 설계를 하여 납땜의 두께가 신호 전달에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 여기서 원이 아닌 반원 모양의 납땜 모양을 설계한 것은 coaxial cable의 core가 원 형태의 납땜 자리의 중앙에 위치한다고 가정하였기 때문이다. 시뮬레이션 결과를 보면 낮은 주파수 영역(1~5 GHz)에서는 납땜의 두께가 신호 전달에 거의 영향을 미치지 않으나 이보다 높은 주파수 영역에서는 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 전체적으로 납땜의 두께에 대한 경향성은 발견되지 않았지만 신호전달특성에 영향을 줄을 확인하였다. 따라서 프로브 제작시 정교한 납땜 기술을 사용하여 접합 부분에서의 손실을 최소화하여야 될 것으로 생각된다.

프로브에서 시편을 장착하는 부분인 microstrip line에는 스프링 개념이 사용되고 있다. 앞에서 서술한 바와 같이 신호선의 끝부분이 약간 들려져 있는 (popped-up) 형태로 되어 있다. 이것은 넓은 온도 범위에서 접촉의 신뢰성을 확보하기 위해서이다. 또한 스프링 특성에 의해 접촉 저항 및 연결 반복성이 결정되므로 신호선의 재질 선택이 매우 중요하다. 시편 장착은 신호선의 끝부분이 약간 들려져 있는 상태에서 시편을 장착한 후 일정한 힘을 가해 시편을 고정하게 된다. 이 때 들려진 상태에 있는 신호선이 퍼지게 되어

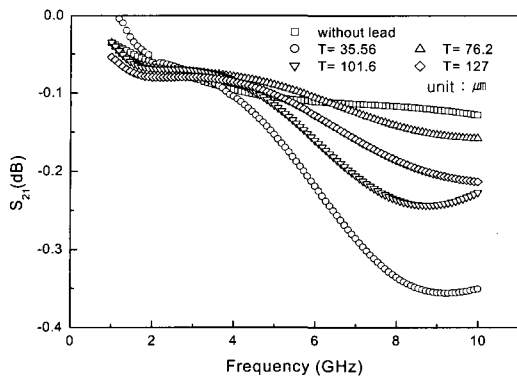


그림 6. 납땜 두께에 따른 신호전달특성
 Fig. 6. Dependence of S_{21} of the microstrip line on the thickness of soldered lead at the point of coaxial-to-microstrip transition

완전한 형태의 microstrip line이 되어 그 특성을 유지하게 될 것으로 생각된다. 그러나 신호선이 완전히 퍼지지 않을 경우 신호 전달에 영향을 줄 것으로 생각되어 여러 가지 각도 즉, 끝부분이 유전체에서 떨어진 정도에 따른 신호 전달 특성을 시뮬레이션 하였으며 그림 7에 그 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 끝부분이 떨어진 정도에 따라 신호 전달 특성이 크게 변화함을 알 수 있다. 즉, 떨어진 정도가 클수록 임피던스 값은 증가하고 신호전달 특성이 나빠짐을 알 수 있었다. 또한 임피던스 값의 증가폭이 매우 크므로 (30°인 경우 약 95Ω임.) coaxial cable과 임피던스 매칭이 되지 않아 생기는 손실도 발생할 것으로 생각된다. Microstrip line에서 신호는 위단의 신호선과 아랫단의 접지면 사이에 필드형태로 유기 되어 전달되는데, 위단의 신호선이 유전체에 완전히 접촉되어 있지 않을 경우 당연히 이 부분에서 신호 손실이 발생할 것으로 생각된다. 따라서 이 결과는 프로브에 시편을 장착할 때 매우 세밀한 주의가 필요함을 나타내준다.

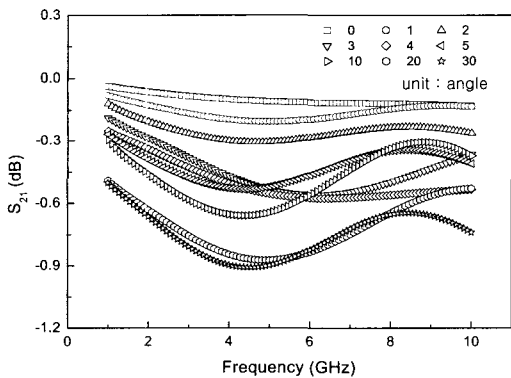


그림 7. 신호선 끝단의 떨어진 정도(a)에 따른 신호 전달 특성.
 Fig. 7. Dependence of S_{21} of microstrip line on the angle, α .

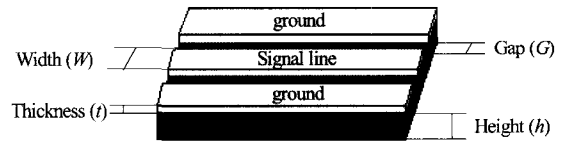


그림 8. Coplanar waveguide의 구조
 Fig. 8. Schematic diagram of coplanar waveguide

2.2. Coplanar waveguide(CPW) 시뮬레이션

측정 프로브의 신호 전달 특성을 분석하기 위하여 초고주파수 신호를 손실 없이 전달할 수 있는 임피던스가 50Ω인 coplanar waveguide 형태의 시험용 시편을 제작하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 coplanar waveguide는 신호선과 접지면 사이에 유전체가 있는 microstrip line과는 달리 신호선과 접지면이 유전체의 한 평면상에 공존하고 있는 형태를 띠고 있어 via를 구현하기가 쉽고 무엇보다도 한 면에 공존하는 신호선과 접지면 사이에 field가 걸리기 때문에 microstrip line과는 달리 완전한 TEM 모드를 구현할 수 있어서 고주파가 될수록 microstrip line보다 전송 특성이 좋고 또한 비교적 간단하게 제작할 수 있다는 장점을 지니고 있다(5).

Coplanar waveguide의 임피던스에 영향을 주는 주요 변수들은 신호선의 폭(W), 신호선과 접지면 사이의 거리(G), 유전체의 종류 및 두께(h) 등이다.

2~8 GHz의 주파수 대역에서 임피던스가 약 50Ω인 coplanar waveguide 형태의 시험용 시편을 제작하기 위해 그림 9에 나타난 것과 같이 두 가지 모양으로 설계하였으며 각각에 대해 임피던스가 약 50Ω이 되는 구조를 결정하였다. 이 때 신호선 및 접지면은 금을 사용하였고 유전체로는 실리콘 기판을 사용하였다. 그리고 금의 두께는 skin effect를 고려하여 3μm로 하였다. 그림 9에서 (a)의 경우는 실제 소자의 전극 패드 폭과 거의 유사한 폭을 가진 전송선을 채택하였고, (b)의 경우는 패드와 폭이 좁은 전송선이 결합된 형태를 채택하였다. 그림(a)의 경우 임피던스를 약 50Ω에 맞추기 위해서 두께가 1mm인 실리콘 기판을 사용하였다. 그러나 두께가 1mm인 실리콘 기판은 일반적으로 사용되는 것이 아니기 때문에 일반적으로 사용되는, 두께가 0.5mm인 실리콘 기판을 사용하기 위해서는 전송선의 선폭을 줄여야 한다. 그러나 소자의 패드 크기 및 배열이 정해져 있고 따라서, 프로브도 이에 맞게 제작되기 때문에 그림(b)와 같은 모양의 coplanar waveguide를 채택하였다. 이 경우 손실이 (a)의 경우보다 조금 큰 것으로 나타났다. 표 1에 시뮬레이션에 의해 결정된 coplanar waveguide의 치수를 나타내었다. 시뮬레이션에

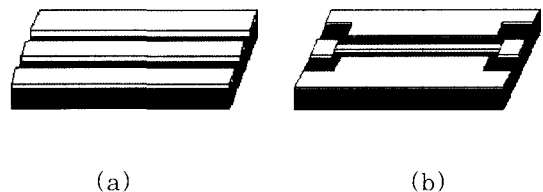


그림 9. 본 연구에서 설계한 두 가지 형태의 coplanar waveguide
 Fig. 9. Two kinds of coplanar waveguide designed in this study

표 1. 2~8 GHz 주파수대역에서 임피던스가 약 50Ω 인 coplanar waveguide의 사양.

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

	Type A	Type B
Width (W) (μm)	190	60
Gap (G) (μm)	90	30
Height (h) (mm)	1	0.5
Thickness (t) (μm)	3	3
유전체 재료	실리콘	
전송선 및 접지면 재료	금	

의해 그 크기가 결정된 두 가지 형태의 coplanar waveguide는 단자속양자 소자의 실제 크기(5x5mm)와 전극 패드 위치 등을 고려한 결과 한 개의 칩 내에 같은 형태의 coplanar line 2개가 위치하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 단자속양자 소자의 동작을 측정하는데 사용되는 프로브의 신호 전달 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 프로브에서 시편을 장착하는 부분에 존재하고 있는 미세한 microstrip line을 신호선의 선폭, 신호선의 단면 모양, 유전체 종류, coaxial-to-microstrip transition 부분에서 납땀의 두께, 신호선 끝단이 유전체에서 분리된 정도 등에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 프로브와 같은 비교적 간단한 구조에서는 임피던스 매칭이 신호 전달 특성에 크게 영향을 주지 않음을 확인하였다. 그리고 선폭이 신호 전달 특성에 미치는 영향을 시뮬레이션해 본 결과 약 10μm 정도의 제작 마진이 존재함을 알 수 있었다. 신호선 끝단이 유전체에서 분리된 정도에 대한 결과로부터 시편을 프로브에 장착할 때 매우 주의가 필요함을 알 수 있었다. 종합적으로 보면 이상의 결과들은 프로브를 제작 또는 개선할 때 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

프로브의 신호 전달 특성을 분석하기 위한 시험용 시편으로 두 가지 형태의 coplanar waveguide에 대해 시뮬레이션 하여 2~8 GHz 주파수 대역에서 약 50Ω 임피던스를 가지는 구조를 결정하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 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", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 1, No. 1, pp.3-28, 1991.
- [2] 박종혁, 정구락, 임해용, 강준희, 한택상, "DC/SFQ-JTL-SFQ/DV 회로의 시뮬레이션 및 작동", 한국초전도·저온공학회논문지, 4권 1호, pp.17-20, 2002.
- [3] 김중윤, 윤석진, 김현재, "HFSS를 이용한 고주파 유전체 디바이스 설계", 전기전자재료 11권 11호, pp. 126~129, 1998.
- [4] 박재환, "마이크로파 유전체의 전자기 시뮬레이션", 세라미스트 3권 4호, pp. 69-75, 2000
- [5] see www.rfdh.com

저 자 소 개



김상문(金商汶)
1975년 9월 21일생, 2001년 군산대 공대 재료공학과 졸업, 현재 연세대학원 세라믹공학과 석사 과정



김영환((金永桓)
1961년 11월 22일생, 1984년 서울대학교 무기재료공학과 공학사, 1986년 동 대학원 무기재료공학과 공학석사, 1997년 동 대학원 무기재료공학과 공학박사, 1988-현재 한국과학기술연구원 선임연구원



최중현(崔鍾賢)
1975년 6월 16일생, 2001년 군산대 공대 재료공학과 졸업, 현재 고려대학원 재료공학과 석사 과정



조운조(曹雲朝)
1958년 06월 10일생, 1981년 서울대학교 무기재료공학과 공학사, 1986년 동 대학원 무기재료공학과 공학석사, 1995년 동 대학원 무기재료공학과 공학박사, 1986-현재 한국과학기술연구원 선임연구원



윤기현(尹冀鉉)
1939년 5월 29일생, 1962년 연세대학교 화학과 졸업, 1968년 동 대학원 화학과 졸업(석사), 1975년 Ph.D. Univ. of Missouri-Rolla, 1978년-현재 연세대학교 세라믹공학과 교수