

미세 간극 수직 콦을 이용한 저 전압 고 격리도 단결정 RF MEMS 스위치

문성수*, 김현철**, 전국진***
서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부

Low-voltage high-isolation RF MEMS switch based on a single crystalline silicon structure with fine gap vertical comb

Sungsoo Moon*, Hyeon Cheol Kim**, Kukjin Chun***
School of Electrical Engineering and Computer Science
Seoul National University

E-mail : *lunar@mintlab.snu.ac.kr, **hckim@mintlab.snu.ac.kr, ***kchun@mintlab.snu.ac.kr

Abstract

Low voltage actuation and high isolation characteristics are key features to be solved in electrostatic RF switch design. Since these parameters in the conventional parallel plate MEMS switch design are in trade-off relation, both requirements cannot be met simultaneously. In vertical comb design, however, the actuation voltage is independent to the vertical separation distance between the contact electrodes. Then, we can design the large separation distance between contact electrodes to get high isolation. We have designed an RF MEMS switch which has -40dB isolation at 5 GHz and 6 V operation voltages. The characteristics of the fabricated switch are being evaluate.

I. 서론

RF 무선 통신 시스템에서 낮은 삽입 손실과 높은 격리도 특성을 갖는 MEMS 스위치에 대한 요구는 날로 높아지고 있다[1,2]. 현재 많은 그룹에서 연구하고 있으며, 여러 가지 형태의 스위치가 발표되고 있다. 이러한 스위치를 구동 방향 면에서 보면 크게 수직 구동과 수평 구동의 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 일반적으로 수직 구동의 경우에는 구동 전압을 낮추기 위해서 접촉면의 간극을 가깝게 배치하여 격리도(isolation) 특성이 낮아지는 반면, 수평 구동의 경우에는 구동부의 면적이

커져 소형화가 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서 소형화 및 저 전압 구동, 고 격리도의 특성을 만족시키기 위해서는 새로운 형태의 스위치가 필요하다. 본 논문에서 연구한 수직 콦을 이용한 스위치의 경우에는 수직 구동을 유지하면서 구동 전압이 수직 콦의 콦 사이 간격에 의하여 결정되므로, 접촉 부위의 간격을 높여 높은 격리도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 기존의 평판형 MEMS 스위치와는 달리 구동 전압과 격리도 특성이 서로 무관한 수직 콦 구조 스위치에 대해서 제안 하였으며, 저 전압을 획득하기 위한 미세 간극 공정 방법에 대해서 연구하였다.

II. 설계

그림 1 에서는 기존 평판형 스위치와 제안한 수직 콦 스위치의 단면 구조를 간략하게 나타내었다. 평판형 구조에서는 구동을 위한 전극과 RF 신호의 온-오프(on-off)를 결정하는 접촉 부위가 동일 평면상에 존재한다. 구동 전압은 접촉 부위 간격의 제곱에 반비례하므로 낮은 전압을 획득하기 위하여 구동 전극 사이 간격을 최소로 해야 한다. 반면에 수직 콦을 이용할 경우 구동 전압은 콦 사이의 간격에 의하여 결정되므로, 접촉 부위 간격과 무관함을 알 수 있다. 그러나, 일반적으로

로 수직 콦을 이용한 MEMS 구조물은 콦 사이 간격이 2 μm 이상이므로 수십에서 수백 볼트의 구동 전압을 갖는 것이 일반적이다. 따라서, 콦 사이의 간격을 최소화 할 수 있는 기술이 확보된다면 저 전압 특성과 동시에 높은 격리도 특성을 얻을 수 있는 것이다.

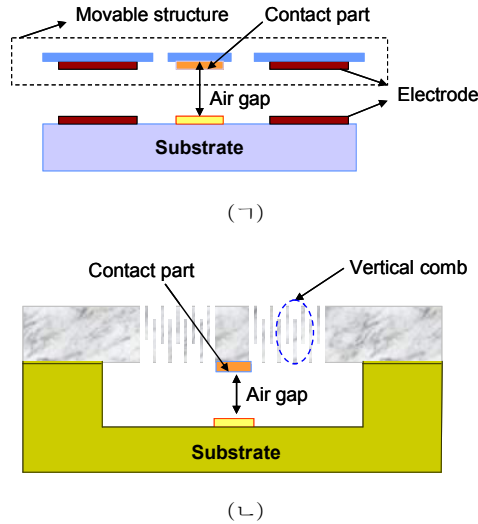


그림 1. (a)평판형 MEMS 스위치 단면도
(b) 제안한 수직 콦 구조 MEMS 스위치 단면도

그림 2에서는 제안한 수직 콦 스위치의 단면 개략도를 보여주고 있다. 유리 기판 위에 RF 신호 라인을 형성하고 구조물을 실리콘 기판을 이용하여 형성한 후 양극 접합 분당 기술(anodic bonding)로 접합 시키는 형태이다. 또한, 구조물의 실리콘과 상층 유리 기판을 분당하여 웨이퍼 레벨 패키징(wafer level packaging)을 구현하며 하층 유리 기판에 비아(via)를 형성하여 칩 마운팅(mounting)을 할 수 있는 구조이다. 패키지와 비아 연결 부분은 본 논문에서는 구현하지 않았다.

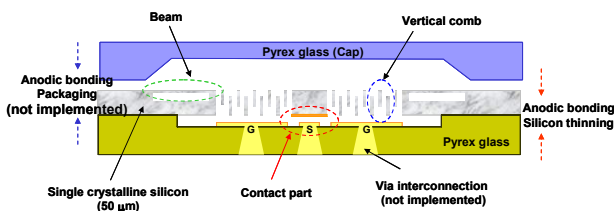


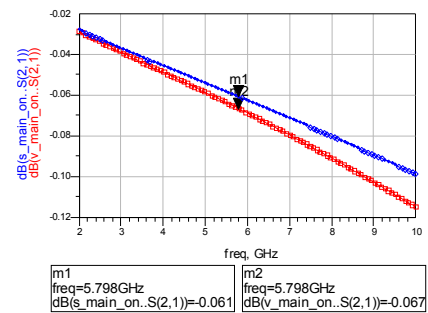
그림 2. 제안한 수직 콦 구조 MEMS 스위치 개념도

본 논문에서는 기계적 특성이 우수하고 잔여 스트레스(residual stress)가 거의 없는 단결정 실리콘을 구조물로 사용 하였다[3,4]. 이는 다음 장에서 언급 할 미세 간극 형성을 Bosch 공정을 이용하여 구현하는 한

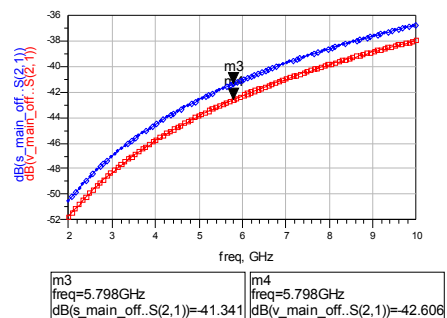
편 폴리실리콘이나 기타 금속 박막에서 발생하는 스트레스 현상을 최소화 하기 위함이다.

제안한 스위치는 정전력 구동을 이용한 금속 접촉식 구조이며, 전압이 가해지면 수직 콦에 의하여 실리콘 구조물이 유리 기판 위에 형성되어 있는 RF 신호 라인에 접촉하여 신호가 흐르게 되는 형태이다. 단결정 실리콘 구조물의 두께는 50 μm 이며, 이 때 10V 이내의 구동 전압을 획득하기 위해서는 콦 사이 간격이 1 μm 이내로 유지 되어야 한다. 이를 위한 미세 간극 형성 및 수직 콦 형성 기법에 대해서는 다음 장에서 기술하였다.

본 논문에서는 수직 콦을 이용한 두 가지 형태의 스위치를 한 웨이퍼에서 동일한 공정으로 동시에 제작 하였다. 좌우 대칭형 스위치(type 1)와 시소(see-saw) 타입 스위치(type2)의 두 가지 이며, 각 모델에 대해서는 표 1에 정리하였다. 좌우 대칭형 스위치는 전압이 인가되었을 때 모든 콦이 동일하게 아래 방향으로 움직이는 반면, 시소 타입의 경우에는 비틀림(torsion) 축을 중심으로 접촉 부위는 아래로, 반대쪽은 위로 움직이도록 설계하였다.



(a)



(b)

그림 3. HFSS 시뮬레이션 결과
(a)삽입 손실 특성 (b)격리도 특성

그림 3에서 HFSS 시뮬레이션 결과에 의한 삽입

손실(insertion loss)은 접촉 저항이 포함 되지 않은 값이며, 포함할 경우 5 GHz 에서 0.15 dB 정도의 특성을 보였다. 또한, 격리도는 접촉 부위 사이의 간격을 5 μ m로 설계 하였을 때 40 dB 이상의 결과를 보였다.

표 1. 좌우 대칭형 스위치와 시소 타입 스위치의 설계

	Contact gap (μ m)	Comb gap (μ m)	Torque (nN-m)	Force (μ N)	Pull-in voltage (V)	Size (mm*mm)
Type 1	5	0.8	-	13	6	1.6*1.6
Type 2	5	0.8	1.3	-	6	1.1*1.5

HFSS simulation (at 5 GHz)	Insertion loss (dB)		Isolation (dB)	
	Target	Result	Target	Result
Type 1	< 0.3	< 0.15	> 30	44
Type 2	< 0.3	< 0.15	> 30	42

III. 제작

높은 종횡비를 갖는 미세 간극 수직 콦을 형성하기 위해서는 고 종횡비로 실리콘을 건식 식각하는 기술과, 콦을 형성하기 위한 정렬 오차(alignment error)를 줄이는 기술이 필요하다. 전자는 이미 앞서 전술한 바와 같이 저 전압 구동을 획득하기 위해서이며, 후자는 일반적으로 수직 콦 형성에서 사용하는 후면 정렬(backside align)로는 미세한 콦 사이 간격을 형성 할 수 없기 때문이다. 정렬 여유(alignment margin)를 최대로 확보하기 위한 새로운 콦 구현 방식이 필요한 것이다.

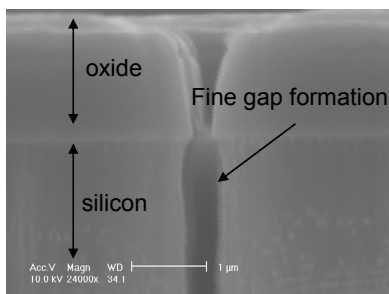
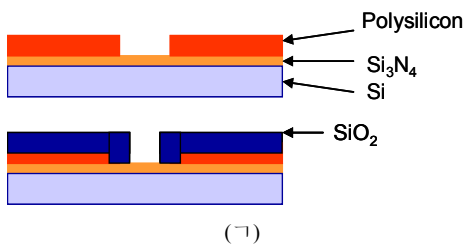


그림 4. 실리콘 고 종횡비 식각 기술
 (ㄱ) Abdolvand` s Reduced gap Si 공정
 (ㄴ) 미세 간극 형성 SEM 사진

본 논문의 설계에서는 종횡비 50:1 이상과 콦 사이 간격 0.8 μ m 를 획득하기 위하여 Abdolvand 가 발표한 reduced Si gap[5] 기술을 응용하였다. 그림 4 에서와 같이 폴리실리콘을 이용하여 패터닝 한 후 실리콘을 습식 산화시켜서 식각 마스크의 오프닝(opening)을 줄이는 방법이다. 이와 함께 Bosch 공정의 가스(gas), 압력, 전압, 유량 등을 조절하여 높은 종횡비의 실리콘 건식 식각 기술을 획득 할 수 있었다.

그림 5 는 전체 공정 흐름도를 나타내고 있으며, 세부 공정 별로 설명하면 다음과 같다. 먼저 Pyrex 7740 유리 기판에 습식 식각을 통하여 접촉 부위 간격을 형성 한 후 금 도금 (Au electroplating) 공정을 통하여 신호 라인을 형성한다. (111) 결정 방향을 갖는 단결정 실리콘 기판에 앞서 설명한 고 종횡비 식각 기술을 적용하여 콦 패턴을 형성 한다. 이후 사진 공정을 가능하게 하기 위하여 실리콘을 습식 산화한다. 이 방법은 본 논문에서 새로 개발한 것으로 실리콘과 유리 기판의 본딩과 CMP 공정 후, 후면 정렬 방식이 아닌 정면 정렬(top side align)을 가능하게 한다. 이를 통하여 낮은 정렬 오차를 얻을 수 있으므로 수직 콦을 성공적으로 구현 할 수 있게 된다. 그림 5. (d)에서는 접촉을 위한 금 박막을 스퍼터링(sputtering) 공정을 통하여 형성 한 후 구조물의 이동 변위를 획득하기 위해서 콦을 부분적으로 10 μ m 건식 식각 한다. 그림 5. (f)에서 구조물의 스프링은 실리콘의 습식 식각을 통하여 4 μ m 두께로 형성하며, 이 후 릴리즈(release) 공정을 통하여 구조물을 형성한다.

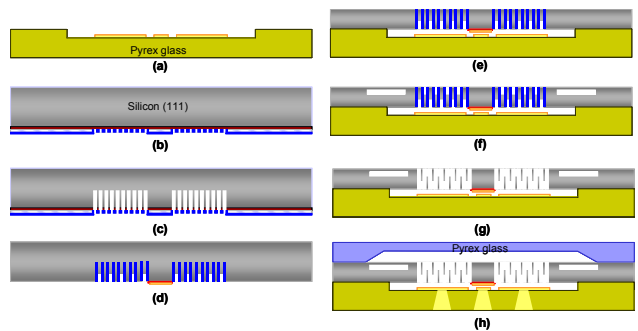


그림 5. 공정 흐름도

그림 6 은 실리콘과 유리 기판에 형성되어 있는 금 접촉 부위가 잘 정렬 되어 있는 것을 보여준다. 그림 7 은 제작된 두 가지 타입의 광학 현미경 사진을 나타내고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 기존의 평판형 스위치에서 획득하기 어려운 저 전압 고 격리도 특성을 얻기 위하여 수직 콦을 이용한 MEMS 스위치를 제안하였다. 수직 콦 구조물을 이용한 일반적인 MEMS 구조물의 구동 전압을 낮추기 위하여 직 콦의 미세 간극을 형성하고, 정렬 오차를 줄이기 위한 공정 기법을 개발 하였다. 이를 통하여 50:1 의 고 중횡비 구조물을 구현하였으며, 5GHz 에서 40 dB 이상의 격리도 특성을 얻을 수 있었다. 이 밖의 스위치 특성에 대해서는 측정 진행 중이다.

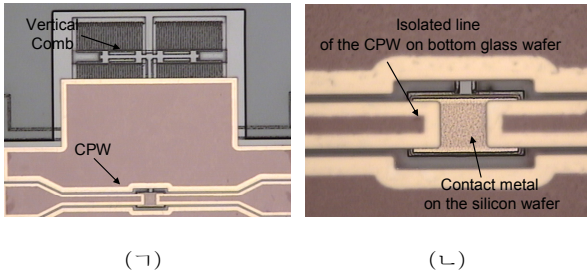


그림 6. (가) 본딩 후 유리 기판 쪽에서 본 현미경 사진
(나) 접촉 부위 확대 사진

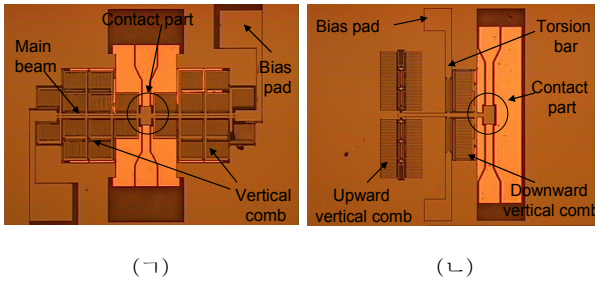


그림 7. (가) 좌우 대칭 형 수직 콦 스위치
(나) 시소 타입 수직 콦 스위치

IV. 측정

현재 본 논문에서 설계 및 제작한 스위치의 구조적 특성 및 RF 특성에 대해 신뢰성 있는 검증을 위해 측정을 진행 중에 있다. 격리도 특성은 5 GHz 에서 40 dB 이상으로 높은 값을 보이고 있으나, 구동 전압은 설계에 비하여 높은 값을 얻었다. 이는 공정 오차에 의하여 콦 사이 간격이 설계에 비하여 높아졌기 때문이다. 또한, 패키지를 구현하지 않아 미세 찌꺼기에 의하여 콦이 제대로 동작하지 않기 때문에 패키지 인터커넥션의 추가 공정을 진행하고 있다.

표 2. 제안한 스위치의 구조 및 RF 측정 값

	Design	Meas.
Control voltage (V)	6	11
Thickness of the Silicon structure (μm)	50	53
Gap between combs (μm)	0.8	1.2

At 5 GHz	Insertion loss (dB)		Isolation (dB)	
	Type	Value	Type	Value
Simulation	Type 1	0.09	Type 1	44
	Type 2	0.08	Type 2	42
Measurement	Type 1	-	Type 1	44.4
	Type 2	-	Type 2	45.0

참고문헌

- [1] Mojgan Daneshmand, Raafat R. Mansour, "Fabrication and modeling of an SP3T RF MEMS switch," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 22-27, June 2003
- [2] Gabriel M. Rebeiz, *RF MEMS theory, design, and technology*, New York: J. Wiley & Sons, 2003.
- [3] M. Sakata, Y.Komura, T.Seki, K.Kobayashi, K. Sano, S. Horiike, "Micromachined relay which utilized single crystal silicon electrostatic actuator," *12th IEEE International Conference on. (MEMS)*, pp.21-24, 1999
- [4] Jong-Man Kim, Jae-Hyoung Park, Chang-Wook Baek, Youn-Kweon Kim, "Design and fabrication of SCS(single crystalline silicon) MEMS switch using SiOG process," *17th IEEE International Conference on. (MEMS)*, pp.785-788, 2004
- [5] Reza Abdolvand, Farrokh Ayazi, "Single-mask reduced-gap capacitive micromachined devices," *18th IEEE International Conference on. (MEMS)*, pp.151-154, 2005