
저전압 고주파 MEMS 스위치

서용교, 최영식*

Low Actuation Voltage RF MEMS Switch

삼성종합기술원

*부경대학교 전자컴퓨터정보통신 공학부

요 약

Capacitive-coupled 구조의 RF MEMS 스위치를 설계하여 제작하였으며, 특성을 측정하였다. 낮은 구동 전압은 membrane과 신호선 사이의 간격을 작게 만들어 구현하였다. 제작된 스위치의 구동 전압은 최저 11V이며, 2GHz에서 측정된 고주파 특성은 삽입 손실이 0.2dB이고 절연 특성은 40dB이다.

Abstract

A capacitive-coupled configuration MEMS switch is designed and fabricated, and its characteristics are measured. Low actuation voltage has been achieved by means of small distance between signal line and membrane. Minimum actuation voltage is about 11V. Isolation is around 40dB and insertion loss is about 0.2dB at 2GHz .

1. 서 론

이동 무선 전화기는 음성통신에서 동화상전송이 필요해지면서 3세대, 4세대로 진화해갈 것이다. 따라서 사용주파수도 높은 주파수대로 점점 이동할 것으로 예상된다. 주파수가 높아지면 스위치의 삽입손실과 절연 특성이 통화 품질에 절대적인 영향을 미치게 된다. 소형화와 더불어 삽입손실과 절연특성을 개선하기 위해서 반도체 공정으로 만들어진 MEMS 스위치가 현재의 전기적인 스위치를 대체하여야 한다. 그러나 이러한 MEMS 스위치는 높은 구동 전압이 필요하여 무선전화기의 낮은 동작 전압을 맞추기가 어려웠다(표 1). 반도체 소자인 MOSFET과 p-i-n 다이오드로 만들어진 스위치는 현재 널리 사용되고 있으나 높은 삽입손실과 낮은 선형성 문제를 안고 있다(표 1).

최근에는 낮은 삽입손실, 높은 절연 특성과 선형성을 가진 고주파 MEMS 스위치가 주목을 받

고 있다. 반도체 소자 스위치가 가지고 있는 문제점을 해결할 수 있는 MEMS 스위치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[8].

이 논문에서 우리는 낮은 삽입손실, 높은 절연 특성, 선형성과 함께 낮은 구동 전압을 가지는 capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치를 반도체 공정을 이용해 설계하였다. 이 논문은 낮은 구동 전압을 얻기 위한 방법과, 동작 원리, 구조, 제작방법, 측정 결과와 고찰로 구성되어 있다.

표 1. 고주파 스위치의 특성 비교

Table. 1 Characteristics of each MEMS switch

	p-i-n	MOSFET	MEMS
삽입손실(dB)	0.4 - 1.2	0.4-1.6	0.05-0.3
절연특성(dB)	중간	나쁨	좋음
구동전압(V)	3 - 5	3 - 5	30 - 80
전력소모(mW)	20 - 200	0.05 - 0.2	0.05- 0.1

II. 낮은 구동 전압 제작 조건

대부분의 MEMS 스위치는 정전기 구동 방식으로 동작하기 때문에 높은 구동 전압을 보이고 있다. 현재까지 구현된 MEMS 스위치의 구동전압은 대부분 20V 이상이다. 이러한 높은 구동 전압은 소형 이동 시스템에서의 사용과 반도체 공정에서 하나의 칩으로 구현되는 추세에 걸림돌이 되고 있다. 낮은 구동 전압을 가지는 스위치를 제작하고자 하는 시도는 여러 가지 문제점으로 인하여 구동전압이 설계치 보다 항상 높아지는 문제점으로 인하여 성공하지 못하였다.

이러한 높은 구동 전압을 내리기 위해서는 다음의 여러 가지 조건이 필요하게 된다. 첫째, 움직이는 구조물과 신호선 사이의 간격을 작게 하여야 한다. 그러나 이것은 공정상의 조그마한 변화에도 off-capacitance가 증가되어 절연특성을 나쁘게 하는 문제를 안고 있다. 그러므로 움직이는 구조물과 신호선 사이의 간격을 설계 값에 일치하게 제작할 수 있는 공정 기술이 필요하다. 구동 전압은 간격에 상당히 민감하기 때문에 간격이 설계대로 제작되지 않는 경우 구동 전압은 예상 치에서 벗어나게 된다. 구조물을 띄우는 공정 후 구조물 내에 존재하는 응력에 의하여 구조물은 변형하게 되며 그로 인해 간격에 변화가 생기는 것이다. 그러므로 이러한 변형을 막기 위해서는 구조물 적층 시 생기는 응력을 조절할 수 있는 공정능력이 필요하다. 둘째, 움직이는 구조물과 신호선은 전극에 가해진 전압에 의하여 접촉하게 되는데, 이때 접촉 저항은 접촉력과 상관관계를 가지게 된다. 그러므로 가해진 전압으로 구동이 되더라도 원하는 접촉저항을 얻지 못할 경우 원하는 고주파 특성을 얻지 못할 수 있다. 그러므로 낮은 저항 값을 가지는 금속재료의 사용과 넓은 접촉면을 가지도록 설계되어야 한다. 셋째, 점착과 관련된 높은 구동 전압이다. 스위치의 구동 전압을 높게 설계하는 이유는 저전압 구동과 점착방지 방안이 서로 모순되기 때문이다. 스위치가 구동되어 변형하게 되면 스위치는 다시 원래의 위치로 되돌아가려는 복원력이 생기게 된다. 이때 가했던 전압을 제거하면 스위치는 복원력에 의해 제자리로 되돌아가

는데 만일 이때의 복원력이 금속간 접촉에서 생긴 점착력보다 작으면 스위치는 점착되어 사용이 불가능하게 된다. 그러므로 강성이 큰 스위치를 만들어야 점착이 방지되나 강성이 큰 물질을 변형하기 위해서는 구동전압이 높아지게 된다. 이러한 모순된 결과를 해결하기 위해서는 강성이 큰 물질로 움직이는 구조물을 만들어야 하고 점착력이 낮은 접촉 물질을 선택하여야 한다. 그러나 일반적으로 점착력이 낮은 금속은 전기전도성이 나빠며 이로 인해 삽입 손실이 커지는 단점이 있었다. 그러므로 저전압 구동이 가능하도록 점착력이 작으면서 전기전도성이 좋은 물질을 사용하여야 한다.

이 논문에서 사용된 물질은 앞의 조건을 충족시킬 수 있도록 높은 강성을 가지는 Au로 움직이는 부분을 만들었으며 전극의 접촉부분은 고주파 영역에서 높은 유전율을 가지는 CaTiO₃로 만들어 점착력을 작게 하였다. 또한 CaTiO₃에 의해 낮은 구동전압에서 많은 전하가 유기된 capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치가 가능하게 되었다.

III. Capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치

Capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치는 높은 절연특성과 선형성, 낮은 삽입 손실을 가진 스위치를 가능하게 한다. 또한 membrane의 응력을 조절하는 공정과 두 전극 사이의 고 유전율 물질인 CaTiO₃의 선택은 낮은 구동 전압을 가지도록 한다. 그리고 이 구조는 'on' 상태와 'off' 상태 모두 진동 또는 물리적인 충격과 같은 환경 조건에 아주 강한 특성을 지니고 있다.

그림 1은 capacitive-coupled MEMS 스위치 동작을 보여주고 있다. 그림 1(a)는 아래전극(Bottom Electrode)과 membrane(Up Electrode)이 분리되어진 'off' 상태이다. Membrane이 정전기 힘에 의해 밑으로 당겨져 아래전극과 접촉되면 다른 부분의 membrane이 신호선과 접촉되어 신호가 전달된다(그림 1(b)). 이것을 'on' 상태라 한다. 두 전극 사이에는 고 유전율 물질인 CaTiO₃를 사용하였다. 이것은 두 전극의 점착을 막아주

어 낮은 구동 전압을 얻을 수 있도록 도와준다. 두 전극은 유전체에 의해 가로막혀 있으므로 스위치는 capacitive shunt 스위치의 형태를 취하게 되어 고주파성분은 손실 없이 통과하지만 직류성분은 막아주어 불필요한 손실을 줄인다. 또한 구동전극에 사용된 유전체에서는 금속에서 가해진 전하가 유전체에 축적 됨으로 해서 더욱 많은 전하를 지니게된다. 이러한 전하는 정전력을 더욱 증가 시켜서 낮은 전압에서도 충분한 구동력을 갖게 한다.

Off-capacitance(Coff)의 값이 절연특성을 결정한다. 커패시턴스의 크기는 두 도전체 사이의

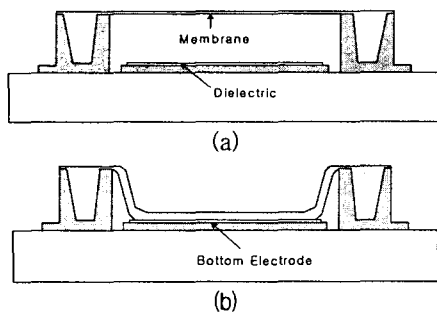


그림 1. Capacitive-coupled 구조의 동작원리 (a) 'off' 상태 (b) 'on' 상태

Fig. 1 Operation of capacitive-coupled structure (a) 'off' (b) 'on'

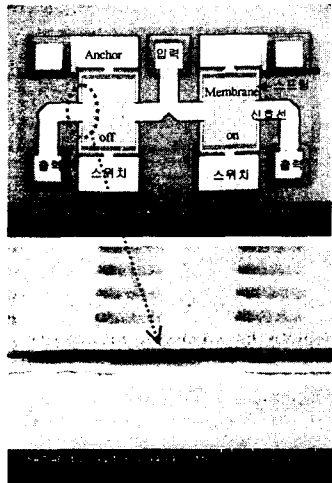


그림 2. 제작된 MEMS 스위치와 'off' 상태 일 때의 간격

Fig. 2 Distance of MEMS switch When it is 'off' state

길이에 반비례하므로 절연특성은 membrane과 신호선 사이의 길이가 커짐에 따라 좋아진다. Capacitive-coupled 구조는 membrane과 신호선이 연결이 되지 않은 상태, 즉 'off' 상태에서의 신호선과 membrane의 간격이 작은 것이 유리하다. 그러나 짧은 간격은 Coff 값을 증가시켜 절연 특성을 나쁘게 하므로 적절한 값의 간격을 가지도록 하여야 한다.

IV. 제작 순서

그림2에서 보여진 MEMS 스위치는 고저항 실리콘을 기판으로 하여 만들어진 SPDT(Single Pole Double Throw)형 스위치이다. Silicon을 기판으로 하여 표면 micromachine 공정에 의해서 만들어졌다. 도금된 Au는 낮은 shear 계수, 높은 전도성과 내부식성을 가진 주요한 부품이다. 가동 전극은 Ti, Au를 차례로 증착하여 만든다. Au는 실리콘 위에 증착이 쉽지 않으므로 증착이 쉬운 Ti를 먼저 증착 한다음 Au를 증착한다.

그림3은 제조공정을 보인다. 먼저 Silicon 기판은 RF blocking을 위해 PECVD에 의해 SiNx막을 증착한다(a). Contact layer를 형성하기 위하여 Ti 층위에 Au를 증착하여 신호선과 아래전극을 구성한다. 신호선의 경우 기판위에 형성되어지므로 두께가 얇아지면 손실이 많이 생길 수가 있다. 본 실험에서는 예비실험을 통해 확인한 결과 폭 100 μ m에서 두께4 μ m의 경우 손실이 0.025dB을 보였고 두께가 더 작아지면 손실은 기하급수적으로 증가하였다. 두께가 더 두꺼워 지더라도 손실은 거의 변화가 없었으므로 이를 설계에 반영하여 제작하였다. DC전류를 차단하기 위한 절연막은 0.3 M 농도의 CaTiO₃ 코팅용 졸로 형성하였다. PVDF 필터로 여과한 후 Photoresist(PR) spinner를 이용하여 2800 rpm 에서 30 초간 회전시켜 증착 하였다. 8번 반복 증착하여 0.3 μ m의 두께를 얻었다 (b). 희생층으로 사용되는 PR은 3회 반복적으로 도포 되었다(c). PR은 다음공정을 견딜 수 있도록 140. C에서 어닐링 된다. Cantilever 구조인 contact 전극과 상단 전극을 위하여 Au/Ti가 증

착 되었다(d). 되도록 동일 평면에 구성하여 진동과 물리적인 충격의 영향을 줄였다. 전극은 비교적 넓은 면적이므로 희생층을 쉽게 제거하기 위해 구멍을 많이 형성하였다. 희생층은 마지막으로 O₂ 건식 에칭에 의해서 제거된다(e). PR은 다른 물질에 비해 높은 에칭성이 있어 희생층의 재료로 선정되었다. 전압이 가해지지 않는 상황에서는 membrane은 신호선에서 2 μ m 떨어져 있다.

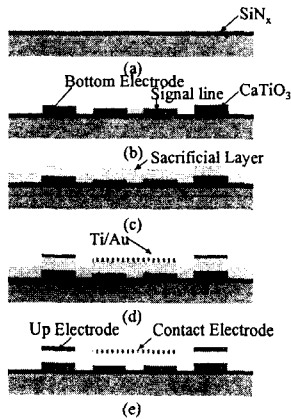


그림 3. 제작 공정 순서
Fig. 3. Process step

V. 측정 결과

제작된 스위치의 전기적 특성을 측정하였다. 구동전압, 삽입손실과 절연특성은 하나의 웨이퍼에서 여러 위치를 측정한 결과이다. 그림 5는 2GHz에서 구동전압을 측정한 결과이다. 구동전압은 최저 11V이며 평균값은 16V이다.

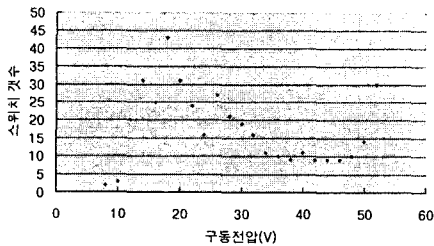


그림 5. 위치에 따른 구동전압 측정결과
Fig. 5 Measurement results at various points

그림 6은 고주파 특성인 2GHz에서의 삽입손실 측정 결과이다. 최저 값은 0.1dB이며 평균값은 0.2dB이다. 삽입 손실의 위치에 따른 측정 결과는 다른 두 가지 특성보다(구동전압 및 절연특성) 정상적인 분포를 보이고 있다.

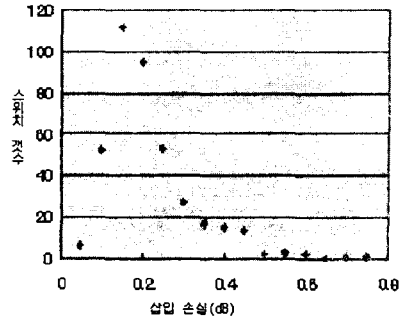


그림 6. 위치에 따른 삽입손실 측정 결과
Fig. 6. Measurement results of insertion loss at various points

그림 7은 2GHz에서 측정한 절연특성이며 평균값은 40dB이다. 40dB 이상의 특성을 가진 스위치의 숫자가 많음을 보여주고 있다.

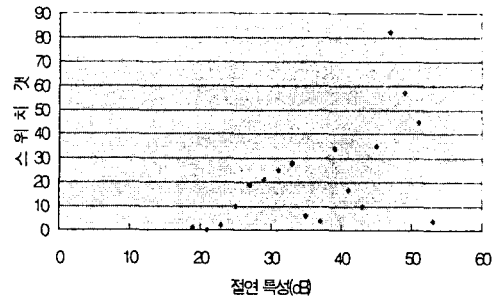


그림 7. 절연특성 측정 결과
Fig. 7 Measurement results of isolation

VI. 고찰

앞의 측정 결과를 보면 위치에 따라 구동전압, 삽입손실 과 절연특성의 값이 크게 변함을 알 수 있다. 구동 전압과 절연특성의 분포가 Gaussian 분포가 되지 않았다. 이는 아직도 membrane과 신호

선 사이의 간격과 구조물 적층 시 생기는 응력을 조절할 수 있는 공정능력이 안정되지 못함을 보여주고 있다. 건식 에칭으로 희생층으로 사용된 PR를 제거하는 공정은 250. C 이상의 열이 발생한다. 이 열에 의한 변형이 발생하여 membrane과 신호선 사이의 간격이 웨이퍼 위치에 따라 균일하지 않아 Gaussian 분포가 되지 않은 측정 결과를 얻은 것 같다. 그림 8은 응력에 의한 membrane 변형을 Abaqus를 사용하여 시뮬레이션 한 결과이며, 그림 9는 측정결과를 보인다. 그림 8과 9에 나타난 것과 같이 중앙에 심한 변형을 일으킨다. 이러한 균일하지 못한 응력은 membrane과 신호선 사이의 간격을 설계치 보다 다르게 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 높은 열을 수반하는 건식 에칭을 습식 에칭으로 바꾸고 그리고 membrane의 모양을 직사각형에서 원형으로 바꾸면 더욱 낮은 구동 전압을 얻을 수 있을 것이다. Membrane를 원형으로 바꾸고 습식 에칭 조건에서 시뮬레이션 해본 결과는 실리콘 웨이퍼에서 다른 소자와 함께 집적화 할 수 있는 3.7V의 구동 전압을 보였다. 희생층 물질을 PR에서 Al로 바꾸어 낮은 온도의 습식 에칭이 가능하다는 단위공정 실험 결과도 얻었다. MOSFET과 p-i-n 다이오드로 만든 스위치보다 뛰어난 고주파 특성은 가지고 있으나 높은 구동 전압을 보이는 capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치는 원형의 membrane 구조와 습식 에칭으로 다른 반도체 소자와 함께 하나의 칩으로 구현될 수 있을 것이다.



그림 8. 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation result



그림 9. Interferometer 측정 결과
Fig. 9. Measurement result by Interferometer

VI.결 론

Capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치가 반도체 공정으로 제작되었으며 그 특성이 측정되었다. Capacitive-coupled 구조와 적절한 물질의 선택으로 구동 전압을 크게 개선하였다. 제작된 capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치는 MOSFET과 p-i-n 다이오드로 만들어 스위치보다 뛰어난 고주파 특성을 보여주고 있다. 구동전압이 최저 11V이어서 아직은 이동 무선전화기의 낮은 동작 전압을 맞추기가 어렵다. 그러나 membrane과 신호선 사이의 간격을 더 작게 할 수 있는, 그리고 membrane에 생기는 응력을 조절할 수 있는 공정기술을 개발하여 MEMS 스위치의 상용화를 막고있는 높은 구동 전압의 문제를 해결하여야 한다. 가까운 미래에 capacitive-coupled 구조의 MEMS 스위치가 이동 무선 전화기에 사용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] S. Pacheo, C. T. Nguyen and L. P. B. Katehi, "Micromechanical Elecstatic K-Band Switches," IEEE MTT-S Digest, pp. 1569-1572, 1998.
- [2] C. Goldsmith, Z. Yao, S. Eshelman and D. Denniston, "Performance of Low-Loss RF MEMS Capacitive Switches," IEEE Microwaves and Guided wave Letters, Vol. 8, pp. 269-271, 1998.
- [3] E. Brown, "RF-MEMS Switches for Reconfigurable Integrated Circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 46, pp. 1868-1880, 1998.
- [4] D. Hyman, A. Schmitz, B. Warneke, T. Y. Hsu, J. Lam, J. Brown, J. Schaffner, A. Walston, R. Y. Yoo, G. L. Tangonan, M. Mehregany and J. Lee, "GaAs-Compatible Surface-Micromachined RF MEMS Switches," Electron Letters, Vol. 35, pp. 224-226, 1999.
- [5] J. B. Muldavin, G. M. Rebeiz, "30GHz Tuned MEMS Switches," IEEE MTT-S Digest, pp. 1511-1514, 1999.
- [6] K. Suzuki, S. Chen, T. Marumoto, Y. Ara

- and R. Iwata, "A Micromechanical RF Microswitch Applicable to Phased-Array antennas," IEEE MTT-S Digest, pp. 1923-1926, 1999.
- [7] J. Chiao, Y. Fu, D. Choudhury and L. Lin, "MEMS Millimeterwave Components," IEEE MTT-S Digest, pp. 463-466, 1999.
- [8] V. Milanovic, M. Maharbiz, A. Singd, B. Warneke, N. Zhou, H. K. Chan and K. S. J. Pister, "Microrelays for Batch Transfer Integration in RF Systems," 2000 IEEE International Conf. on Microelectromechanical Systems, pp. 787-792, 2000.

저자 소개



최영식(Young-Shig Choi)

1982년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1986년 12월 Texas A&M Univ. 전기공학과(공학석사)

1993년 5월 아리조나 주립대 전기공학과 (공학박사)

1987년 2월 ~ 1999년 2월 현대전자 시스템 IC 연구소

1993년 3월 ~ 2003 동의대학교 전자공학과

2003년 3월 ~ 현재 부경대학교 전자공학과

서용교(Yong-Gyo Seo)

1985년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사) 1988년

3월 와세다대학교 재료공학과 (공학석사)

1993년 12월 동경대학교 (공학박사)

1988년 ~ 현재 삼성종합기술원 전문연구원