

論文

직접접촉식 RF MEMS 스위치에서의 미소용접 현상 억제

이태원*, 김성준*, 박상현*, 이호영**, 김용협**

Suppression of Microwelding on RF MEMS Direct Contact Switches

Tae-Won Lee*, Seong-Jun Kim*, Sang-Hyun Park*, Ho-Young Lee** and Yong-Hyup Kim**

ABSTRACT

In this paper, a new method for suppressing microwelding on the RF MEMS (Radio Frequency Microelectromechanical System) direct contact switches is introduced. Two kinds of refractory metals, tungsten and molybdenum were coated onto the contact point of the switches and the effect of the coating was examined. The changes in insertion loss and isolation at the switch were measured by using network analyzer and power loss was evaluated by power measurement. The results revealed that while tungsten and molybdenum showed higher contact resistance than gold in low input power range, they enhanced the power handling capability and reliability of the switches in high input power region.

초 록

본 연구에서는 고 전력의 RF 신호용 직접 접촉식 스위치에서 문제가 되고 있는 접촉부 위에서의 미소용접에 의한 점착 현상을 감소시키기 위해, 고 용접 금속인 텅스텐(W)과 몰리브덴(Mo)을 스위치 접촉 부위에 코팅하여 스위치의 성능을 분석하였다. 스위치의 삽입손실과 신호격리도, 전력 손실 등의 변화를 네트워크 분석기, 전력 측정기 등을 통하여 측정하였다. 측정결과로부터 RF 신호 전송에 있어서 낮은 입력 전력에서는 고용접 금속인 금(Au)보다 접촉저항이 더 크지만 입력 전력이 커지면 비교적 낮은 비저항의 고용접 금속을 사용하는 것이 고전력 전송 및 수명 연장에 있어서 유리함을 밝혀냈다.

Key Words : MEMS(미소전기기계시스템), RF Switch(초고주파 스위치), Direct Contact (직접접촉), Microwelding(미소용접), Reliability(신뢰성)

1. 서 론

MEMS 기술로 RF 스위치를 제작하면 기존의 반도체 RF 스위치에 비해 낮은 삽입 손실과 소비 전력, 높은 초고주파 특성과 신호 격리도를 갖게 되며, 이러한 장점을 바탕으로 RF MEMS 스위치는 송/수신 신호 전환기, 임피던스 정합

회로, smart antenna, 밀리미터파 대역의 tuning element 등으로 다양하게 사용될 수 있어 연구 개발이 폭 넓게 이루어지고 있는 상황이다[1,2].

RF MEMS 스위치는 기계적 구동을 위한 구동부와 신호를 전달하는 접촉부로 구성된다. 스위치의 RF 신호전달 특성은 접촉부의 재료에 큰 영향을 받고 접촉 재료에서의 국부적인 열 발생으로 접촉 재료가 용융하여 점착되는 미소용접(microwelding)현상은 스위치의 수명을 제한하기도 한다. 스위치의 점착을 억제하기 위해 접촉시 입력 전압의 파형을 미세하게 제어하는 방법 [3], 추가적인 구동부 설계를 통해 스위치의 복원

† 2004년 7월 22일 접수 ~ 2005년 2월 21일 심사완료

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

연락처자, E-mail : yongkim@snu.ac.kr

서울시 관악구 신림동 56-1번지

력을 높이는 연구가 진행된 바 있다[4].

본 연구에서는 텅스텐(W) 및 몰리브덴(Mo) 등 고융점의 금속을 직접 접촉식(Direct Contact type) RF MEMS 스위치의 접촉 재료로 사용함으로써 접촉현상을 억제하고자 하였고, 일반적인 금(Au) 접촉 재료 스위치와 구동 및 RF 신호 전달 특성을 비교하였다. 또한 세 가지 접촉 재료의 전력전송 용량 비교와 함께 전력전송 손실을 측정함으로써 스위치의 수명 연장 가능성을 검증하였다.

II. 본 론

2.1 접촉재료의 선정

RF MEMS 스위치에 사용될 접촉재료가 구비해야 할 조건은 아래와 같다[5].

- ① 높은 전기전도도 (주울열 발생을 억제)
- ② 높은 열전도도 (발생된 주울열을 잘 방출)
- ③ 낮은 반응성 (산화막, 황화막 및 다른 화합물의 형성 억제)
- ④ 아크방전으로 인한 손상 억제 (바람직하지 않은 방향으로 전기적 연결을 형성하거나 또는 단락시킴)
- ⑤ 높은 용점 (arc erosion, metal transfer, welding or sticking 억제)
- ⑥ 낮은 증기압 (erosion, metal transfer 억제)
- ⑦ 높은 hardness (good wear resistance)
- ⑧ 낮은 계조단가

위와 같은 이상적인 조건을 모두 만족시키는 재료를 찾기는 어려우므로 경제성과 여러 가지 공정 변수(스퍼터링 특성 등) 및 위에서 언급한 여러 가지 조건을 고려하여 상대적으로 우수한 코팅재료가 선택되어야 한다. 여러 가지 후보 금속 중 용점과 비저항을 고려하여 텅스텐(W)과 몰리브덴(Mo)을 코팅재료로 선택하였다. 그 이유는 텅스텐은 비저항이 약간 크기는 하지만 용점이 높다는 장점이 있고, 몰리브덴은 텅스텐에 비하여 용점은 낮기는 하지만 가격이 싸고 비저항이 낮다는 장점이 있기 때문이다. Table 1은 일반적으로 RF MEMS 스위치에 주로 쓰이는 금(Au)와 함께 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo)에 대한 물성치 비교이다[5].

제안된 금속들은 전기적인 저항이 금(Au)에 비해 약 2배 정도 높지만, 접촉 면에서의 발열양상은 재료 자체의 비저항 뿐만 아니라, 박막의 Roughness, Hardness 및 박막 형성 조건 등 여러가지 인자의 영향에 따라 결정되므로, 미소 용

Table 1. Au, W, Mo의 물성치 비교

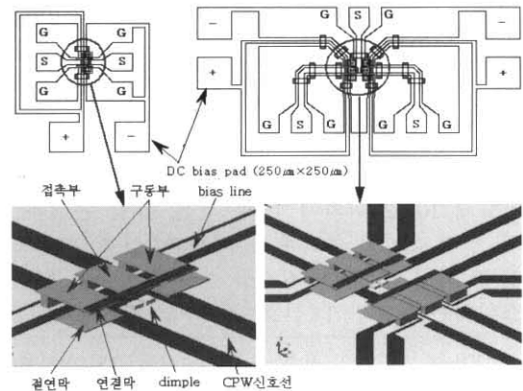
| | Au | W | Mo |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|
| Melting Point (°C) | 1063 | 3387 | 2610 |
| Density (g/cm ³) | 19.3 | 19.3 | 10.22 |
| Specific Heat (cal/g) | 0.0312 | 0.032 | 0.062 |
| Electrical Resistivity (uΩ-cm) | 2.44 | 5.6 | 5.17 |
| Knoop Hardness (Kg/mm ²) | 350 | 485 | 275 |

접 현상의 차이를 확인하기 위해서는 직접적인 실험을 통한 검증이 필요하다.

2.2 RF MEMS 스위치의 구조 설계

본 연구에서 제안된 스위치는 CPW(Coplanar Waveguide) 형태의 직접 접촉식 스위치이다. 스위치는 입력과 출력을 하나씩 갖는 SPST(single-pole single-throw) 형태의 스위치와 하나의 RF 입력에 대해 두 방향으로 출력을 조절할 수 있는 SPDT(single-pole double-throw) 형태의 스위치를 각각 제작하였다.

전체적인 개념도와 치수를 Fig. 1과 Table 2에 나타내었다. 스위치는 전송선과 접지선 각각에 위치하는 세 개의 외팔보와 절연막 연결부를 조합하여 설계하였는데, 전송선과 직접 금속 연결을 하는 접촉부와 정전력으로 구동되는 구동부, 그리고 구동부와 접촉부를 전기적으로는 분리시키면서 기계적으로 연결해주는 절연막 연결부의 세 부분으로 구성되어 있다. 세 개의 외팔보들은 폭과 길이가 같으며, 가운데 외팔보가 접촉부이



(a) SPST

(b) SPDT

Fig. 1. MEMS 스위치의 개념도

Table 2. MEMS 스위치의 상세 치수

| | |
|------------|--|
| CPW 전송선 | 폭: 40 μm , 간격: 24 μm |
| 회생층 | 높이: 1.6 μm , AZ1512감광제 |
| 외팔보 구조물 | 폭: 40 μm , 길이: 60 μm 외팔보 사이의 간격: 18 μm 구동부 면적: 40 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ |
| 딴플(Dimple) | 크기: 10 $\mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 높이: 0.3 μm |
| 연결막 | 폭: 9 μm , 길이: 150 μm |

고, 접촉부를 중심으로 양쪽에 있는 두개의 외팔보가 구동부이다. 구동부는 두 개의 전극에 전위차를 주었을 때 발생하는 정전력으로 구동되는데, 구동 시 직접접촉으로 인한 단락을 방지하기 위해 바닥전극에는 실리콘질화막을 이용하여 절연막을 형성해 주었다. 절연막연결부는 실리콘질화막을 사용하였고, 외팔보 끝부분에 최소한의 폭으로 형성하여 잔류응력에 의해 구조물이 변형되는 것을 최소화하였다. 또한 전송선의 접촉 부분에는 dimple을 만들어 접촉이 용이하게 이루어지도록 하였다. Dimple의 크기는 8 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 이고, 접촉부마다 2개씩 형성해 주었다.

2.3 스위치의 신호전달 시뮬레이션

본 연구의 스위치는 CPW 형태로 설계되었다. CPW는 접지선이 신호선과 동일한 평면상에서 신호선의 양쪽에 위치하므로 via가 필요 없고, 에칭에 의한 제작이 쉬운 반면, 마이크로스트립(microstrip) 선로에 비해 회로설계와 구현이 다소 복잡하다는 단점이 있다. 그러나 무엇보다도 via hole이 불필요하므로, 이방성 습식식각 등의 방법을 통한 웨이퍼 몸체가공이 필요치 않아 공정이 간단해지고, 신호선과 접지선이 한 면에 존재하기 때문에 field가 수직으로 걸려 microstrip 선로와는 달리 완전한 TEM (Transverse Electro-Magnetic) mode를 구현할 수 있어서 주파수가 높아질수록 전송특성이 좋아지게 된다는 장점이 있다. 외팔보 구조물과 신호선의 폭은 40 μm , 신호선과 접지선의 간격은 24 μm 로 설계하여 40GHz 대역에서 50 Ω 으로 매칭된 CPW 전송선을 구성하였다. 설계된 스위치의 신호전송특성을 검증하기 위해 Ansoft사의 HFSS v7.0을 이용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 2는 스위치의 ON상태에서 전기장(Electric Field)이 신호선을 따라 분포하는 것을 보여주고 OFF상태에서 전기장 분포가 단절된 것을 보여준다. Fig. 3은 이에 따른 삽입

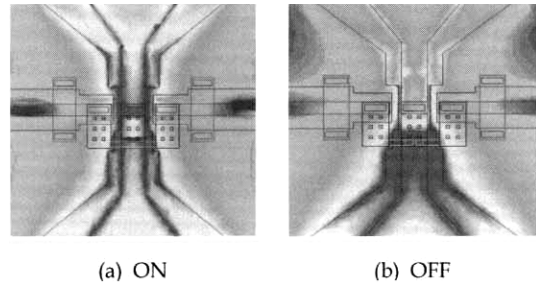


Fig. 2. 스위치 ON/OFF에 따른 E-Field 분포

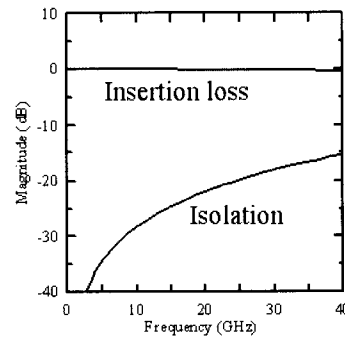


Fig. 3. 신호전달 시뮬레이션 결과

손실과 신호 격리도의 시뮬레이션 결과이다.

Fig. 3의 결과에서 40GHz 동작 대역에서도 스위치는 0dB에 가까운 삽입손실(Insertion loss)과 -15dB 이하의 신호 격리도(Isolation) 값을 보임을 알 수 있다.

2.4 RF MEMS 스위치의 제작

CPW 신호 전송선과 전원공급선, 외팔보 스위치 등의 재료로는 전도성이 우수하고 제작공정이 확립되어 있는 금(Au) 구조물을 사용하였고, 기판은 (100) 결정방향 형태의 단결정 실리콘 웨이퍼를 사용하였으며, 표면미세가공법을 이용하여 공정을 진행하였다. 그리고 미소용접 억제를 위하여 접촉부의 딴플(Dimple)은 스퍼터링된 텅스텐(W) 및 몰리브덴(Mo)을 사용한 스위치와 금(Au)을 사용한 3가지의 스위치를 제작하였다. 제작공정순서는 Fig. 4와 같다.

전체적인 구조 재료로는 금(Au)을 사용하였으며, 반도체 공정인 스퍼터링(Sputtering), 포토 리소그래피(Photolithography), 플라즈마 화학기상 증착(PECVD), 건식식각(Dry etch), 습식식각(Wet etch) 공정 등 일반적인 반도체 미세가공공정을 이용하여 제작하였다[6,7]. 그리고 습식의 구조물 부유시에 필연적으로 발생하는 점착(stiction) 문

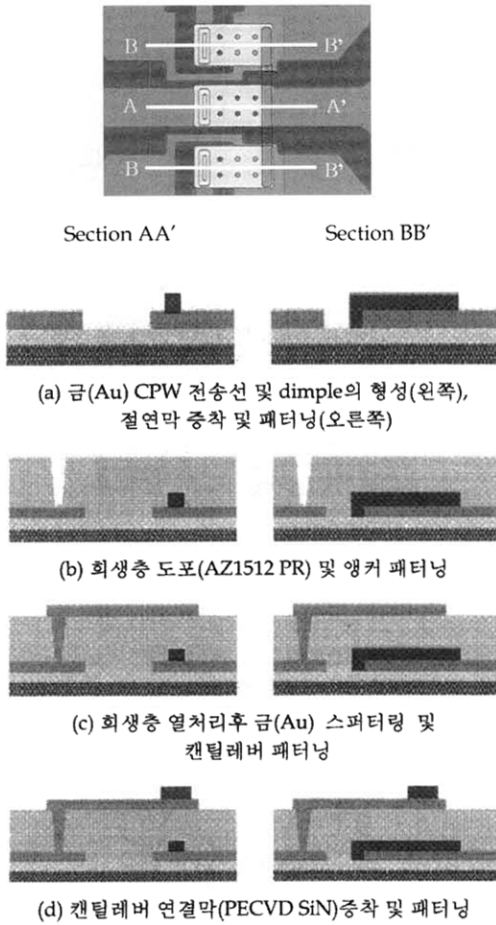


Fig. 4. MEMS 스위치 제작공정

제는 p-dichlorobenzene을 이용한 승화건조 방법으로 해결하였다. 다만 부유된 시편들의 높이가 일정하지 못하여, 구동전압이 변하고 수율이 저조한 문제점이 발견되었다. 이는 희생층에 폴리머 지지대를 미리 형성 시킨후 습식과 건식방법을 병행하여 릴리즈 시키는 방법[8], 실리콘계열의 재료로서 구조물을 만들어 변형을 최소화시키는 방법 등을 적용하면 해결 될 수 있는 문제라고 생각된다[9].

2.5 MEMS 스위치 제작 결과

Fig. 5는 제작된 SPST 및 SPDT 스위치의 전체모습을 보여주는 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 사진이다. 스위치 각 부분의 세부치수는 외판보 구조물의 경우 길이 $60\mu\text{m}$, 폭 $40\mu\text{m}$, 연결막 구조물은 폭 $9\mu\text{m}$ 로 설계되었다.

기준에 만들어진 대표적인 스위치들의 크기가

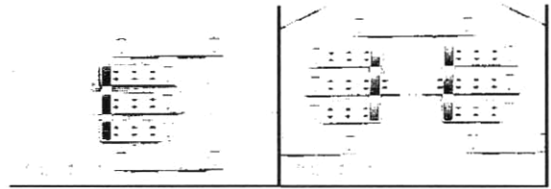


Fig. 5. 완성된 SPST 및 SPDT 스위치

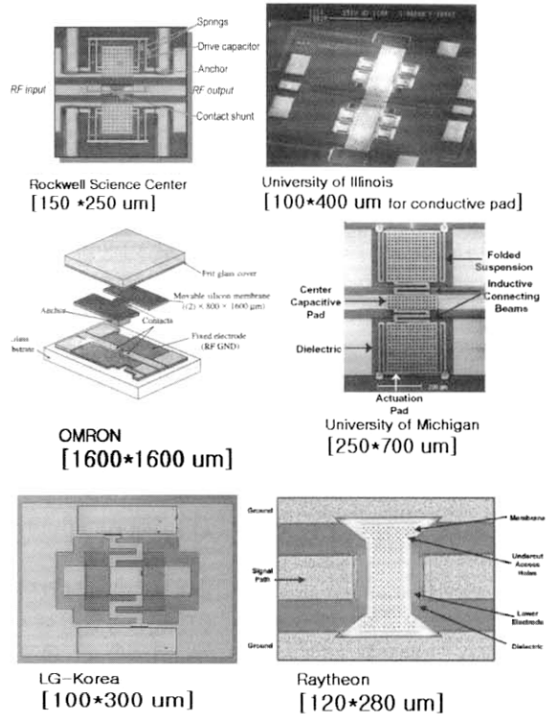


Fig. 6. MEMS 스위치들의 크기비교

Fig. 6 에 나타나있으며, 본 연구에서 제작된 SPST 스위치의 경우 $74 \times 156\mu\text{m}$ 의 크기로서 상당히 작은 크기의 MEMS 스위치임을 알 수 있다.

2.6 스위치의 특성 측정 및 분석

마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작된 스위치의 성능을 평가하는 기준은 여러 가지가 있다. 스위치의 구동 전압, 삽입 손실(insertion loss), 신호 분리도(isolation) 그리고 무선 통신 기기에 응용되기 위한 전력 전송 용량(power handling capability) 등은 스위치의 기본적인 특성으로서 스위치의 성능을 평가하는 중요한 항목들이다[8]. 따라서 본 절에서는 이러한 스위치의 특성을 측정하는 방법과 측정결과 분석을 통한 스위치의 성능 개선 요소들에 대해 기술한다.

2.6.1 구동전압의 측정

구동전압은 Probe Station 장비를 이용하여 측정하였다. Fig. 7은 본 실험에 사용한 Probe Station으로써, 광학 현미경, 카메라, Function generator, 전압증폭기로 구성되어 있다.

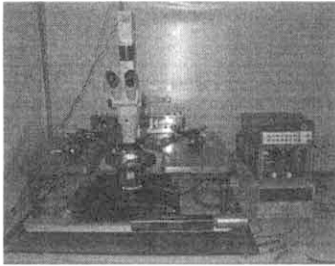


Fig. 7. Probe Station 장비

구동전압은 스위치의 인가전압을 서서히 높여 가면서 스위치가 구동하는 순간의 전압을 측정하였고, 상승문턱전압은 구동전압이 가해져 스위치가 바닥에 붙어있는 상태에서 인가전압을 서서히 줄일 때 스위치가 원래 상태로 복원되는 순간의 전압을 측정함으로써 알 수 있다. 측정된 구동전압은 초기 간격에 따라 30~60V 범위의 값을 나타내었고, 상승문턱 전압은 구동 전압에 비해 약 5V 낮은 값을 보였다.

2.6.2 신호전달 특성 측정

구동 전압 측정 실험에 이어, 실제 스위치를 구동하며 신호전달 특성을 측정하였다. Fig. 8은 RF Probe Station에서 스위치를 구동시키는 사진이다.

0~8GHz 대역으로 네트워크 어날라이저(Agilent E5071B)를 이용하여 실험을 수행하였으며, 구동 전압을 인가하여 스위치의 ON/OFF에 따라 Fig. 9의 삽입손실(Insertion loss)과 신호 격리도(Isolation) 값을 얻을 수 있었다.

삽입손실은 -0.279dB의 값으로 0dB에 가깝지만, 신호 격리도의 경우 시뮬레이션 값과는 차이를 보였다. 8GHz에서 -20dB로 측정되어, 이는 MEMS 스위치가 실제적으로 위치하게 되면서 생

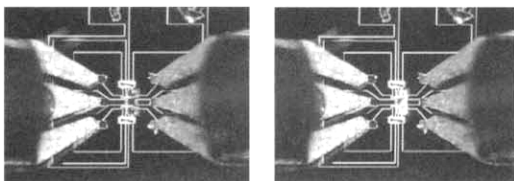


Fig. 8. 구동 사진 (왼쪽-ON, 오른쪽-OFF)

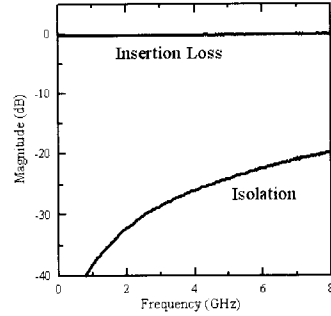


Fig. 9. 스위치 구동시의 신호 특성

긴 기생 캐패시턴스(Parasitic Capacitance)에 기인한 것으로 생각된다.

2.6.3 전력 전송 손실 측정

금(Au), 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo)의 3가지 딴플(dimple) 종류에 따른 스위치의 전력 손실을 측정하였다. 측정 장비로 E8247C Signal Generator, E4419B Power Meter를 사용하였고, 10MHz 주파수 상에서 측정 장비의 한계인 -2dBm~16dBm(0.6~40mW) 까지의 Input Power를 스위치에 인가하였다. 각 종류별로 10개씩의 스위치를 측정하여, 평균값을 취하였다. Fig. 10은 이에 대한 결과 값으로, 전체적인 경향은 Input Power가 증가할수록 Power Loss가 증가되는 것을 볼 수 있다.

초기에 텅스텐(W)과 몰리브덴(Mo) 딴플 스위치의 Power Loss값보다 금(Au) 딴플 스위치의 값이 작은 이유는, 금(Au)의 고유한 물성인 낮은 전기저항에 기인한 것이다. 그러나 10dBm 이상의 Input Power에서는, 금(Au) 딴플 스위치의 Power Loss값이 다른 종류의 스위치들에 비해 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 장비의 안전을 위해 최대 16dBm(40mW)의 값까지만 측정을 했지만, 그 이후의 변화는 금(Au) 딴플 스위

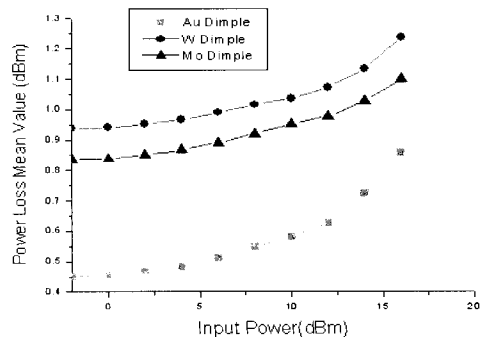


Fig. 10. 전력 전송 손실 측정 결과

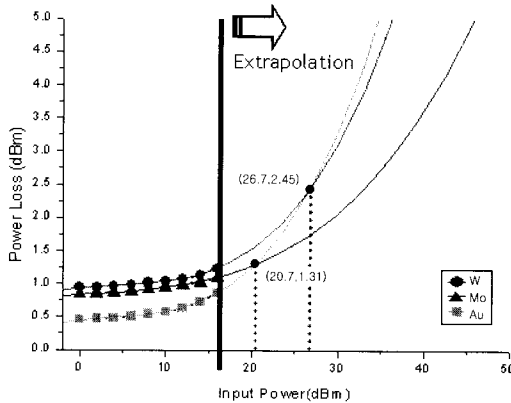


Fig. 11. Extrapolation 결과

치가 더 많은 Power Loss를 보일 것으로 예상된다.

Fig. 11은 curve fitting 작업으로 extrapolation 한 예상값이며, 텅스텐(W)의 경우 27dBm, 몰리브덴(Mo)의 경우 20dBm 정도의 값에서부터 금(Au) 덤플 스위치보다 적은 Power Loss를 보일 것으로 나타났다. 이 손실값의 대부분은 열 발생의 원인이 되며, 구동 중 미소용접 현상이 발생할 가능성이 커지게 된다. Input power가 30dBm(1W) 일 때 예상되는 power loss는 W의 경우 Au에 비해 약 3.8%, Mo의 경우 약 22.9% 줄어들게 된다. 따라서, 일정 전력 이상의 스위치 구동에 있어서는 용점이 높은 금속을 접촉 부위에 사용함으로써 허용 전력 전송 용량과 수명(Life-Time)의 증가를 기대 할 수 있다는 것을 확인하였다.

III. 결 론

본 연구에서는 DC~40GHz 대역의 동작 성능을 가지는 작은 크기의 RF MEMS 스위치를 설계하였으며, 이에 대한 다양한 측정을 수행하였다. 측정결과로 도출된 데이터로부터 고전력 스위치 동작에 있어, 비교적 낮은 비저항의 고융점 금속을 접촉 재료로 사용하는 것이 전력 전송 용량 및 수명에 있어서 유리함을 확인하였다.

이는 RF MEMS 스위치의 장점인 낮은 삽입손실과 높은 신호 격리도를 유지하면서, 기존의 PIN-diode나 FET 반도체 스위치에 비해 단점으로 꼽혔던 고전력 전송 문제도 해결할 수 있음을 보여주는 것이다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-041-D00064).

참고문헌

- 1) 박재영, "차세대 정보통신 산업에 RF MEMS 기술의 응용", 대한전기학회지, 제 51권, 5호, 2002, pp.36-43.
- 2) Vijay K. Varadan, K. J. Vinoy, K. A. Jose, "RF MEMS and Their Applications", Wiley, Chichester, 2003, Chap. 1.
- 3) Gabriel M. Rebeiz, "RF MEMS Theory, Design and Technology", Wiley Inter-Science, New Jersey, 2003, pp.192-194.
- 4) D. Peroullis, S. P. Pacheco, "Electromechanical Considerations in Developing Low-Voltage RF MEMS Switches", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, No. 1, Jan. 2003, pp.259-270.
- 5) Howard E. Boyer, Timothy L. Gall, "Metals Handbook : Desk Edition", American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1985, Part II.
- 6) Perrin Walker, William H. Tarn, "CRC Handbook of Metal Etchants", CRC Press, Boca Raton, California, 1991, Chap. 2.
- 7) Kirt R. Williams, Richard S. Muller, "Etch Rates for Micromachining Processing", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 5, No. 4, Dec. 1996, pp.256-269.
- 8) 김성준, 이태원, 박상현, 김원호, 김문일, 김용협, "RF MEMS 스위치를 이용한 초고주파용 Active-EMXT", 제 6회 한국 MEMS 학술대회, 2004.
- 9) 김종만, "SiOG 기판을 이용한 단결정 실리콘 RF MEMS 스위치의 제작 및 특성에 관한 연구", 서울대학교 석사 학위논문, 2004.
- 10) Jae-Hyoung Park, "A Study on the Characteristics of Micromachined Direct Contact Type RF Switch", Ph.D Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 2002.