

1. 서론

RF MEMS (Radio-frequency Micro Electro Mechanical Systems) 기술은 다양한 마이크로머시닝 (Micromachining) 제작 공정을 이용하여 인덕터, 가변 커패시터, 신호 전송선, RF 스위치, 주파수 가변 필터, 위상 천이기, 안테나 등을 고정밀 초소형 구조물 형태로 구현함으로써 소자의 소형화, 경량화, 고집적화 및 저 전력화가 가능하며, 고주파 특성 및 선형성을 크게 증대시켜 기존 RF 시스템을 구성하는 전기적인 RF 부품들을 효율적으로 대체할 수 있는 강력한 대안으로 여겨지고 있다. 이 중 RF 시스템에서 신호의 흐름을 제어해주는 역할을 담당하는 핵심 부품인 RF 스위치를 MEMS 기술로 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근 이동통신 분야의 급속한 발전과 더불어 여러 가지의 통신방식을 하나의 단말기에서 해결할 수 있는 다중 모드/밴드 시스템에 대한 수요자의 관심이 증대됨에 따라 다중 입력과 다중 출력을 하나의 소자에 포함시켜 서로 다른 여러 가지 종류의 RF 신호를 제어할 수 있는 Multi-port 스위치에 대한 연구가 하나의 큰 연구 흐름을 형성하고 있는 상황이다. 본고에서는 RF MEMS 스위치 기술의 간략한 소개와 함께 이를 확장한 Multi-port RF MEMS 스위치와 응용에 대한 최근 연구 동향 및 사례를 소개하고자 한다.

2. RF MEMS 스위치 기술 및 연구 동향

최근 무선통신 기술의 눈부신 발전은 제 3세대 통신형태인 IMT 2000 시대를 거쳐 현재 제 4세대 무선 광대역 시스템 시대를 열고 있다. 이러한 시대적 흐름에 편승하여 다양한 관련 부품을 하나의 기기에 탑재한 고성능 다기능의 이동통신 단말기에 필요성이 점차 증대되고 있다. 또한 탑재 부품 수의 증가에 따른 단말기 크기의 대형화를 완화하기 위해 여러 칩을 하나로 묶는 모듈화 및 능/수동 부품의 소형화에 대한 연구가 계속적으로 진행되고 있다. 이러한 RF 시스템에서 RF 스위치는 신호의 전송 및 차단을 제어하는 소자로 RF 시스템의 전체적인 성능을 결정하는 핵심 부품으로서의 역할을 담당하고 있으며, 현재까지는 반도체 기반의 FET나 P-I-N 다이오드가 가장 활발히 사용되고 있다. 이들은 저주파 대역에서의 우수한 RF 특성, 저전압 구동 특성 및 높은 신뢰성을 기반으로 많은 기술이 집적되어 있다. 하지만 주파수 사용 대역이 높아지고 또한 MIMO (Multi Input Multi Output) 구성에 대한 필요성이 증대되면서 손실, 선형성 면에서 한계를 드러내고 있는 실정이며, 또한 회로의 복잡성과 높은 소모 전력을 피할 수 없는 문제점이 대두됨에 따라 이들을 대체할 수 있는 대안이 필요로 되어왔다. 따라서 최근 RF MEMS 스위치 기술의 발전은 이러한 기존의 반도체

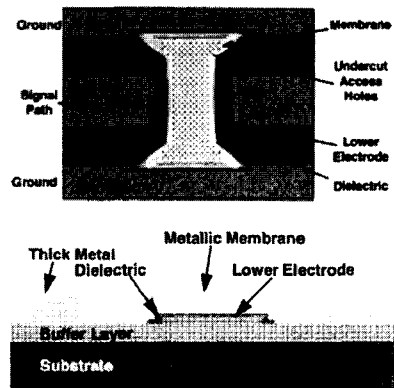
기반 전기적인 스위치를 효율적으로 대체할 수 있는 유일한 해결책으로 여겨지고 있으며, 이러한 필요성에 기인하여 기업이나 연구소 및 학교 등에서 다양한 방식의 MEMS 스위치를 개발하고 있다. 새로운 개념을 근간으로 등장했던 RF MEMS 스위치는 현재 MEMS 제작 기술의 큰 발전과 더불어 기존의 개념 중심에서 벗어나 실제 시스템에 응용하기 위한 노력이 경주되고 있다. MEMS 스위치는 현재 상당한 기술 수준에 도달해 있으며, 현재 그 응용 범위를 점차 넓혀가고 있는 추세이다.

3. Multi-port RF MEMS 스위치의 연구 동향 및 사례

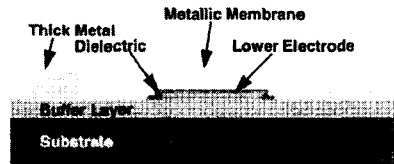
Multi-port RF 스위치는 여러 가지의 서로 다른 주파수 밴드를 동시에 처리할 수 있는 단말기에서 핵심 부품으로 현재까지는 주로 여러 개의 단위 전기적 스위칭 소자의 조합에 의해서 구현되어왔다. 이를 MEMS 기술을 이용한 스위칭 소자로 대체할 경우 앞서 언급한 바와 같이 많은 이점을 얻을 수 있다. 먼저 초소형 구조물을 구현할 수 있는 MEMS 기술을 이용하여 스위치를 제작할 경우 소자의 크기를 혁신적으로 줄일 수 있으며 또한 고주파 영역에서의 RF 특성을 향상시킬 수 있는 가능성이 있다. 또한 여러 출력단을 제어하기 위해서 사용되는 스위치가 증가되면서 필연적으로 발생하게 되는 전력 소모 문제와 선형성 저하 문제를 동시에 해결할 수 있으므로 RF 시스템의 성능을 크게 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 축적된 RF MEMS 스위치 기술을 기반으로 SP2T에서부터 SP9T까지 다양한 개념의 Multi-port RF MEMS 스위치들이 보고되고 있으며, 현재는 신뢰성을 증대시키기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 현재 보고된 몇 가지 Multi-port 스위치 소자를 소개하고자 한다.

3.1 정전 용량형 스위치를 이용한 SP2T MEMS 스위치

그림 1은 Raytheon Systems Corporation에서 개발한 정전 용량형 스위치를 이용한 SP2T MEMS 스



(a)



(b)

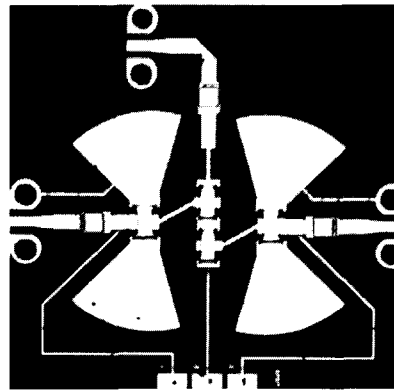


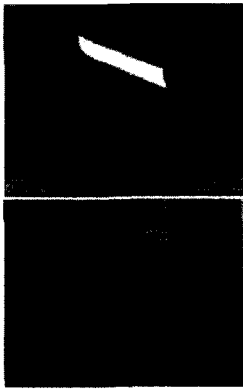
그림 1. 정전 용량형 스위치 기반 SP2T MEMS 스위치. (a) SP2T 스위치, (b) SP2T 스위치.

위치이다 [1]. 직렬 및 병렬 구성의 정전 용량형 스위치를 네 개 사용하여 신호의 흐름을 제어하도록 구성하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 두 개의 직렬 스위치가 인가된 신호의 전달 방향을 결정하게 되며, 두 개의 병렬 스위치는 각각 신호가 흐르지 않는 패스에서 동작하여 고주파에서 신호 분리도 특성을 향상시킴으로써 광대역 동작이 가능하도록 하였다. 제안된 SP2T 스위치를 구성하는 네 개의 단위 스위치는 Raytheon社의 MEMS 스위치 기술로 제작되었으며 0.5 μm 이하 두께의 알루미늄 박막을 이용하였고 구동 전압은 30 V였다. 7~25 GHz의 주파수 영역에서 삽입 손실 (Insertion Loss)은 1 dB 이하로 낮은

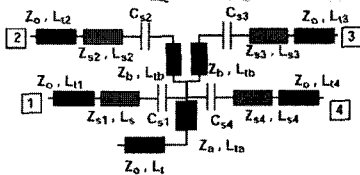
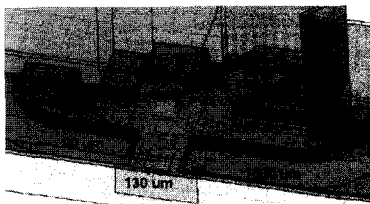
손실 특성을 보였으며, 21 GHz까지 20 dB 이상의 높은 입력 대 출력 신호 분리도 특성을 보고하였다.

3.2 웨이퍼 단위로 실장된 SP4T MEMS 스위치

그림 2는 MIT 대학 Lincoln 연구실에서 개발한 SP4T MEMS 스위치이다 [2]. Lincoln 연구실에서 개발된 정전 용량형 접촉 스위치 네 개를 개별 구동 시킴으로서 하나의 입력단에 대해서 네 개의 서로 다른 출력단을 선택할 수 있도록 하였다. 적용된 각 단위 스위치는 표면 마이크로머시닝 기술을 이용하여 외팔보 형태로 구성되었으며, 특히 실리콘 산화



(a)



(b)

그림 2. 정전 용량형 접촉 스위치 기반 SP4T MEMS 스위치 (a) SPST 스위치, (b) 실장된 SP4T 스위치의 모식도 및 등가회로.

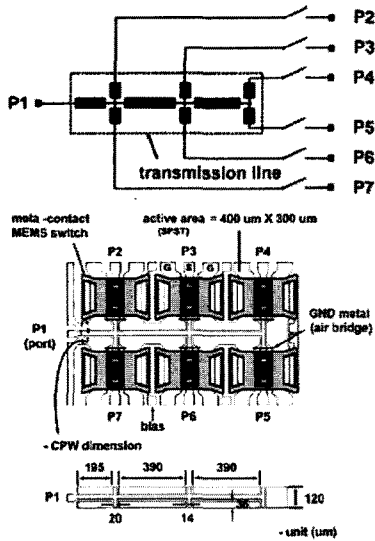
막의 고유 응력을 이용하여 초기 상태에서 구조물이 위로 휘어지게 함으로서 스위치 ON/OFF 상태에서 정전 용량 변화 비율을 크게 증대시켰다. 이와 더불어 스위치 구조물 아래 부분의 신호 전송선을 면 저항이 큰 금속으로 형성하여 동시에 하부 전극으로 이용함으로써 초소형의 스위치를 구현한 특징을 가지고 있다. 이를 확장하여 초소형의 SP4T 스위치를 제작하고 웨이퍼 단위로 실장함으로써 신뢰성을 또한 크게 증대시켰다. 제작된 스위치는 네 개의 각 RF 패스에 대해 20 GHz 대역에서 0.21~0.26 dB의 삽입 손실 및 24~27 dB의 신호 분리도 분포를 보였다.

3.3 SP6T RF MEMS 스위치

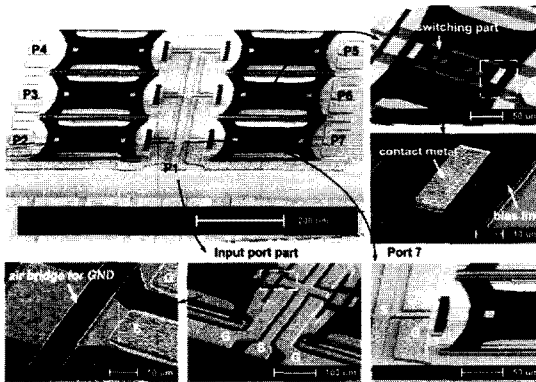
그림 3은 한국 전자통신 연구원에서 개발한 SP6T 스위치이다 [3]. 1.3 mm × 0.8 mm의 영역에 직접 접촉식 스위치를 여섯 개 배열함으로써 여섯 개의 개별 RF 패스를 갖는 초소형의 Multi-port 스위치를 구현하였다. 제안된 스위치는 역시 표면 마이크로머시닝 기술로 제작되었으며 실리콘 질화막을 이용하여 스위치 중앙에 형성된 0.2 μm 두께의 딥플 (Dimple) 형태 접촉부와 구동부를 분리할 수 있는 쉐기 (Wedge) 구조를 삽입한 특징을 보이고 있다. 그림 3(b)에 표기된 바와 같이 입력단 P1과 출력단 P2, 3, 4에 대해서 RF 특성을 측정하였으며, 6 GHz의 주파수 대역에서 측정된 신호 분리도는 각각 40, 39.1 그리고 39.2 dB였고, 삽입 손실은 각각 0.7, 0.53 그리고 0.43 dB로 낮은 손실 특성을 보였다.

3.4 회전형 SP8T MEMS 스위치

그림 4는 영국 Imperial College London에서 발표된 회전형 SP8T 스위치이다 [4]. 이들은 하나의 회전형 구동기와 각 RF 패스에 대해 상호 독립적인 하부 전극을 형성하여 외부에서 인가되는 전압에 따라 총 여덟 개의 RF 패스를 개별적으로 제어할 수 있도록 하였다. 이는 인가된 전압에 따라서 구동기가 기울어져 접촉부와 신호선이 전기적으로 연결되도록 함으로써 입력단에서 인가된 RF 신호가 바닥 신호선으로부터 베어링 (Bearing), 차축 (Axle) 및 회전 구동기를 차례대로 지나 출력단으로 전송되는 방식으로 구동된다. 제작된 스위치의 출력단 RF1, 4, 5, 8에



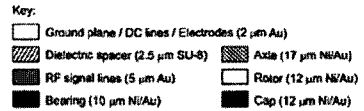
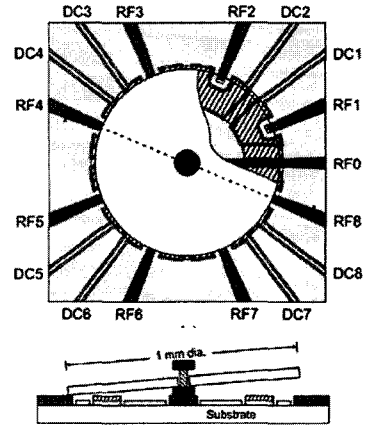
(a)



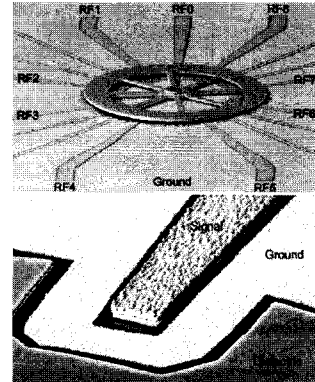
(b)

그림 3. 직접 접촉식 스위치를 이용한 SP6T MEMS 스위치 (a) 제안된 스위치의 개념도 및 모식도, (b) 제작 결과.

대해 측정된 삽입 손실은 2 GHz에서 0.6 dB, 20 GHz에서 4 dB였으며, 구동기가 다른 방향 (RF1-2, 2-3, 5-6, 6-7, 7-8, 8-1)으로 구동할 때 입력단 RF0과 출력단 RF4 사이의 신호 분리도 특성은 모든 경우에 대해서 20 GHz까지 31 dB 이상으로 우수한 신호 분리도 특성을 보였다.



(a)

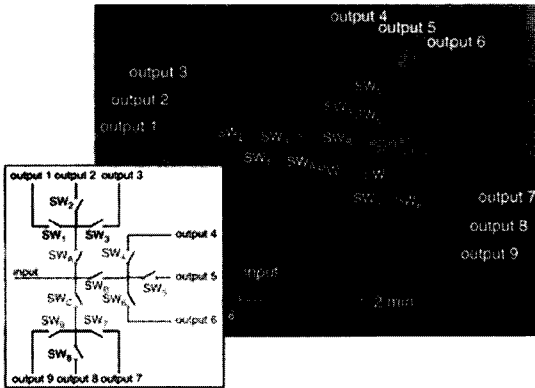


(b)

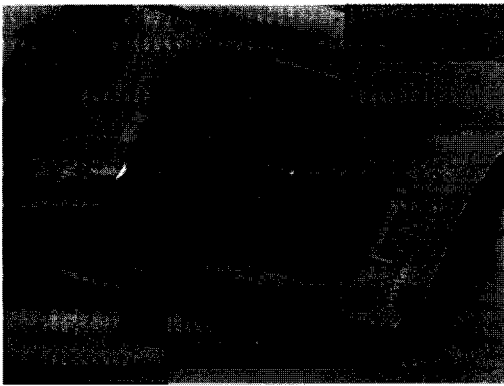
그림 4. 하나의 회전 구동기를 이용한 SP8T MEMS 스위치 (a) 스위치의 모식도, (b) 제작 결과.

3.5 포트 간 균일한 특성을 갖는 단결정 실리콘 SP9T RF MEMS 스위치

그림 5는 서울대에서 개발한 단결정 실리콘 SP9T 스위치를 보여준다 [5]. 동일한 구조를 갖는 네 개의 SP3T 스위치를 연결하여 총 아홉 개의 서로 다른 패스를 갖는 SP9T 스위치를 구성하였으며, SP3T 스위치는 각각 세 개의 단결정 실리콘 SP2T 스위치로 이



(a)



(b)

그림 5. 단결정 실리콘 SP9T RF MEMS 스위치 (a) 제작 결과, (b) 실장된 SP9T MEMS 스위치.

루어져 있다. 가운데 위치한 하나의 SP3T 스위치를 중심으로 하여 방사형으로 세 개의 SP3T 스위치들이 배치되었으며, 총 세 개 SP3T 스위치의 출력단 아홉 개는 각각 SP9T 스위치의 출력단으로 연결된다. 이처럼 단결정 실리콘 기반 SP3T 스위치를 하나의 입력단에 대해서 방사형으로 배치하여 Multi-port 스위치를 구현함으로써 각 출력단에 대해 균일한 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 제작된 SP9T 스위치에 대해 BCB를 이용하여 수평방식으로 웨이퍼 단위로 실장함으로써 스위치의 신뢰성을 증대시켰다. 실장된 SP9T 스위치의 각 RF 패스에 대해서 측정된 삽입 손실은 2 GHz 주파수 대역에서 평균

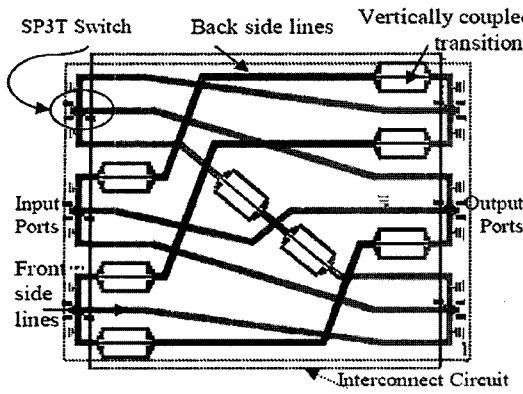
0.6 dB 이하였으며, 표준 편차는 0.04 dB로 포트 간에 우수하면서도 균일한 삽입 손실 특성을 보였다.

4. Multi-port RF MEMS 스위치의 응용

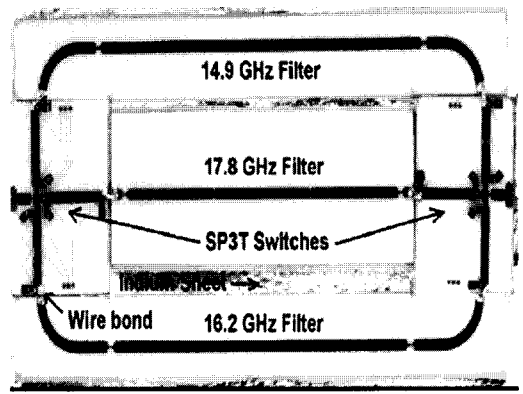
앞서 언급한 MEMS 기반 Multi-port 스위치의 장점들로 인해 현재 다양한 소자에 응용하려는 움직임이 활발해지고 있다. 현재는 MEMS Multi-port 스위치를 이용하여 위성 통신 시스템의 위상 배열 (Phased Arrays), 스위칭 매트릭스 (Switching Matrix), 주파수 가변 필터 등을 구현한 예가 보고되고 있으며, 레이더 시스템에서 위상 배열 안테나 (Phased Array Antenna)를 구성하기 위한 위상 천이기 (Phase Shifter)를 구현한 예도 보고된 바 있다. 이러한 응용 형태는 기존의 소자에 MEMS 스위칭 소자를 외부적으로 집적시키는 경우와 MEMS 스위치를 포함한 전체 응용 소자를 마이크로머시닝 기술을 이용하여 일체형으로 제작하는 경우로 나누어 볼 수 있다. 다음은 이러한 MEMS Multi-port 스위치를 응용한 예를 소개하고자 한다.

4.1 SP3T MEMS 스위치를 이용한 3×3 일체형 스위치 매트릭스

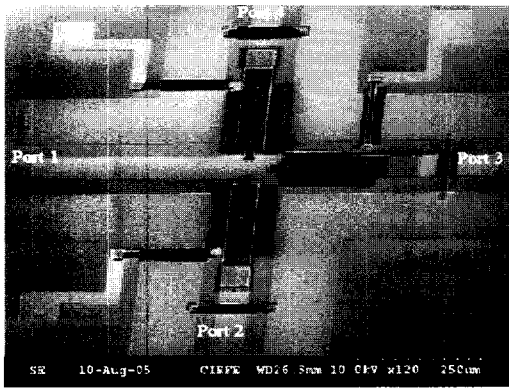
그림 6은 캐나다 Waterloo 대학에서 직접 접촉식 SP3T RF MEMS 스위치를 입력단과 출력단에 각각 세 개씩 집적하여 구현한 3×3 일체형 스위치 매트릭스이다 [6]. 앞면 및 뒷면에 형성된 신호 전송선은 수직 트랜지션을 통해 신호가 커플링되는 방식으로 연결되며, 총 여섯 개의 SP3T 스위치와 신호 전송선, 트랜지션을 모두 포함한 매트릭스의 총 크기는 2.2 cm × 1.6 cm였다. 그림 7(b)는 매트릭스 구조를 구현하기 위해 사용된 SP3T 스위치이다. 이는 스위치 구조물이 동시에 신호 전송선으로 사용되는 인라인 (In-line) 형태로 구현된 특징을 가지고 있다. 측정결과 그림에 표기된 2번과 3번 출력단에 연결된 스위치가 구동할 때의 삽입 손실은 20 GHz까지 각각 0.8과 0.5 dB 정도로 낮은 손실 특성을 보였다. 제작된 매트릭스는 세 개의 입력단과 세 개의 출력단 사이



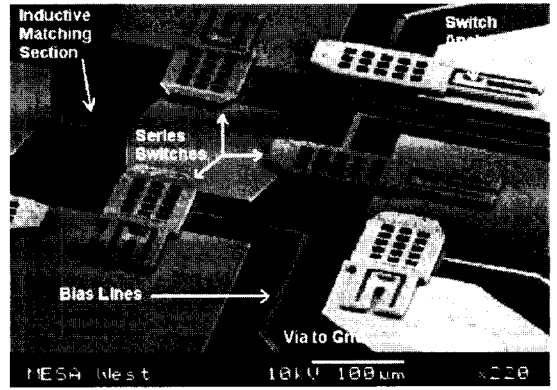
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 6. SP3T MEMS 스위치를 이용한 3×3 스위칭 매트릭스 (a) 모식도, (b) SP3T 스위치.

그림 7. SP3T MEMS 스위치를 이용한 주파수 가변 필터 (a) SP3T 스위치가 집적된 필터, (b) SP3T 스위치의 제작 결과.

에 14 GHz까지 2.2 dB의 낮은 손실을 보였고, 모든 스위치가 OFF 상태에 있을 때 측정된 신호 분리도는 45 dB 이상으로 측정되어 응용에 대한 가능성을 보였다.

4.2 SP3T RF MEMS 스위치를 이용한 주파수 가변 필터

그림 7은 미국 Sandia National Laboratory에서 두 개의 SP3T RF MEMS 스위치를 응용하여 구현한 주파수 가변 필터를 보여준다 [7]. 제작된 주파수 가변 필터는 14.9, 16.2 그리고 17.8 GHz의 서로 다른 고정된 중심 주파수를 갖는 세 개의 필터 बैं크 (Filter

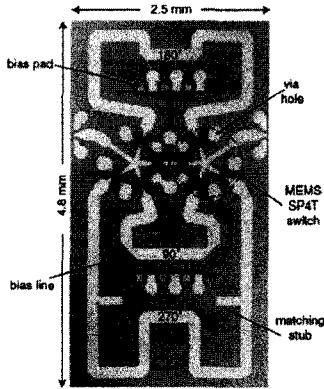
Bank)의 앞단과 뒷단에 표면 마이크로머시닝 공정을 이용해서 제작된 외팔보 형태의 SP3T 스위치를 외부적으로 집적하고, SP3T 스위치의 각 RF 패스를 개별적으로 구동시킴으로서 원하는 하나의 주파수 대역을 선택할 수 있는 방식으로 동작한다. 이러한 구조의 필터는 이미 결정된 중심 주파수를 갖는 공진기를 스위치 동작에 의해 선택해주게 되므로, 정확한 주파수 가변율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 제작된 스위치에 대해 측정된 삽입 손실은 15와 18 GHz에서 각각 0.41과 0.47 dB로 우수한 손실 특성을 나타내었다. 제작 완료된 주파수 가변 필터는 14.9에

서 17.8 GHz까지 17.7%의 주파수 가변율을 보였고, 삽입 손실은 1.7~2 dB의 낮은 범위로 측정되어 주파수 가변 필터 응용에 대한 가능성을 보였다.

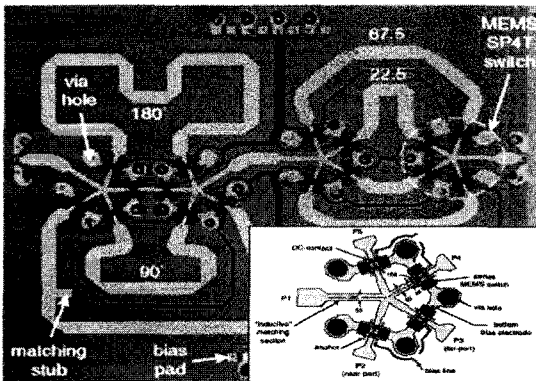
4.3 SP4T MEMS 스위치를 이용한 시지연 방식 위상 천이기

그림 8은 미국 미시간 대학에서 Rockwell Scientific의 SP4T RF MEMS 스위치를 이용하여 개발한 2-와 4-비트 시지연 방식 위상 천이기이다 [8]. 사용된 스위치는 네 개의 RF 패스에 대해서 3 GHz의 주파수 대역까지 0.1 dB의 낮은 삽입 손실과 45 dB의 높은 신호 분리도 특성을 보였다. 제작된 2-비

트 위상 천이기는 두 개의 SP4T 스위치를 입출력단에 집적하고, 각 단위 스위치 두 개가 한 쌍으로 동작하여 한 방향의 신호 전송선을 선택하도록 해주므로서 10 GHz에서 소자의 전기적인 길이가 각각 $0^\circ / 90^\circ / 180^\circ / 270^\circ$ 로 변화 가능한 방식으로 동작한다. 8~12 GHz 대역에서 삽입 손실은 0.62 ± 0.31 dB로 측정되었고, 10.25 GHz에서 $\pm 2^\circ$ 의 위상 정확도를 보였다. 4-비트 위상 천이기는 네 개의 전송선의 입출력단에 SP4T 스위치를 배열하여 $0^\circ / 90^\circ / 180^\circ / 270^\circ$ 와 $0^\circ / 22.5^\circ / 45^\circ / 67.5^\circ$ 의 위상 변조를 가능하게 한다. 이 경우 측정된 삽입 손실은 8, 10, 12 GHz에서 각각 1, 1.2 그리고 1.6 dB, 위상 정확도는 9.97 GHz에서 $+2.3^\circ, -0.9^\circ$ 였다. 소개된 위상 천이기는 SP4T 스위치를 포함한 모든 회로를 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작하였으며, SP4T 스위치의 개별 동작에 의해서 위상을 효과적으로 가변하여 스위치 응용에 대한 가능성을 보였다.



(a)



(b)

그림 8. SP4T MEMS 스위치 기반 시지연 방식 위상 천이기 (a) 2-비트 방식, (b) 4-비트 방식.

5. 결론

이상과 같이 RF 시스템의 핵심 부품인 Single / multi-port 스위칭 소자를 MEMS 기술로 구현하고자 하는 시도가 계속적으로 증가하고 있으며, 이는 무선통신 분야의 발전과 더불어 점점 중요성이 더해지고 있다. RF MEMS 스위치 기술은 현재 상당한 기술 수준에 올라와 있으며, 향후 소자의 신뢰성 향상 및 실장 과정을 통해서 상용화 시키는 노력이 경주될 것이고, 다양한 분야에 적용함으로써 그 응용 범위도 크게 넓혀갈 것으로 전망된다. 지속적인 관심과 투자는 MEMS 기술의 발전 속도를 크게 증대시킬 것이며, 이는 결국 우리의 삶에 효율성과 편리성을 함께 제공해 줄 것이라고 생각된다.

참고 문헌

- [1] A. Malczewski and B. Pillans, "Single-pole double-throw switches using capacitive MEMS switches,"

Int. J. RF and Microwave CAE, Vol. 14, pp. 383-387, 2004.

[2] J. Muldavin, C. Bozler, and C. Keast, "Wafer-scale packaged RF-MEMS switches," *IEEE Microwave Theory and Technique Simp. Digest*, pp. 267-270, 2006.

[3] J. Lee, C. H. Je, S. Kang, and C. -A. Choi, "A low-loss single-pole six-throw switch based on compact RF MEMS switches," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 53, No. 11, pp. 3335-3344, 2005.

[4] S. Pranonsatit, G. Hong, A. S. Holmes, and S. Lucyszyn, "Rotary RF MEMS switch based on the wobble motor principle," *19th Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systmes (MEMS '06)*, PP. 886-889, 2006.

[5] J. -M. Kim, S. Lee, C. -W. Baek, Y. Kwon, and Y. -K. Kim, "BCB-based wafer-level packaged single-crystal silicon multi-port RF MEMS switch," *Electronics Letters*, Vol. 44, No. 2, pp. 118-119, 2008.

[6] M. Dansshmand and R. R. Mansour, "Monolithic RF MEMS switch matrix integration," *IEEE Microwave Theory and Technique Simp. Digest*, pp. 140-143, 2006.

[7] I. C. Reinse, C. L. Goldsmith, C. D. Nordquist, C. W. Dyck, G. M. Kraus, T. A. Plut, P. S. Finnegan, F. Austin IV, and C. T. Sullivan, "A low loss RF MEMS Ku-band integrated switched filter bank," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 15, No. 2, pp. 74-76, 2005.

[8] G.-L. Tan, R. E. Mihailovich, J. B. Hacker, J. F. DeNatale, and G. M. Rebeiz, "Low-loss 2- and 4-bit TTD MEMS phase shifters based on SP4T switches," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 51, No. 1, pp. 297-304, 2003.

저|자|약|력



성 명 : 김종만

◆ 학 력

- 2002년 중앙대 전자전기공학부 공학사
- 2004년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 공학석사
- 2007년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 공학박사

◆ 경 력

- 2007년
- 현재

서울대 화학생명공학부 Post-doctoral Fellow
 부산대 나노과학기술대학 나노시스템공정공학과 교수

