

요 약

MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)는 전기적인 구성요소와 기계적인 구성요소를 작게 조합하여 구성된 소자나 시스템을 말한다. RF(Radio Frequency) MEMS는 MEMS를 이용한 RF 소자나 시스템을 의미하며, 본 고에서는 RF 소자에 대하여 논의하고자 한다. MEMS는 RF 소자의 성능, 기능, 집적화 등을 높여 주고, 크기, 가격, 부피, 전력 소모 등을 낮추어 주므로 소자 개발에 대한 연구는 매우 다양하지만, 본 고에서는 움직이는 소자 중에서 가장 많이 연구되고 있는 mechanical RF switch에 대하여 중점적으로 다루고자 한다. 이에 대한 연구 동향, 특성, 응용 분야 등을 살펴보고, 상품으로서의 가치를 인정 받기 위하여 고려해야 할 점들을 논의하겠다.

I. 서 론

무선 이동통신 서비스가 시작되고 소비자가 이를 이용하면서 그 편리함과 유용함을 인식함에 따라 이를 이용하는 소비자가 늘어나고 시장의 크기도 급격히 증가하게 되었다. 시장이 확대됨에 따라 시장에 진입하여 사업을 하고자 하는 업체가 늘어나면서 경쟁이 치열해지고 있으며, 무선 통신으로 서비스할 수 있는 부분이 늘어남에 따라 소비자의 서비스 요구도 복잡적이고 다양화 되고 있다. 처음에는 소비자가 음성통신 서비스 만으로 만족하였지만, 현재는 음성, video, image, multimedia와 data의 서

비스까지 요구하고 있다. 소비자의 요구를 얼마나 만족시켜 주느냐 하는 것이 사업의 성패를 결정함에 따라, 이동통신 단말기^{[1]-[5]}에서 처리해야 하는 서비스 양이 급격히 늘어나고 있다. 이에 따라 무선 통신 단말기에서 사용하는 RF 부품의 수가 늘어나게 되는데, 소비자는 소형의 단말기를 요구함에 따라 RF 시스템에서 작고, 가볍고, 성능이 우수하며 집적화된 부품이 필요하게 되었다. 그래서 많은 사람들이 이를 실현할 수 있는 기술을 MEMS 기술로 보고 이에 대한 연구를 활발히 수행하고 있으나, 아직 RF 시스템에서 채용하여 사용하고 있는 RF 부품이나 기술이 미흡한 실정이다. RF MEMS가 상품으로서 성공하기 위해서는 설계, 공정, 측정 등의 연구 분야와 시장 및 환경 분석, 응용 분야, 수익성 등의 사업성 평가 분야가 고려되어야 하는데, 이 중에서 연구동향과 응용 분야에 대하여 중점적으로 다루고자 한다.

II 장에서는 MEMS에서 연구되고 있는 RF 소자의 분야에 대하여 소개하고, III 장에서는 MEMS RF switch의 특성을 소개하겠다. IV 장에서는 MEMS RF switch의 종류 및 각각의 특성을 살펴보고, V 장에서는 RF switch의 응용분야에 대한 소개를 한 후에 마지막으로 상품화 하는데 있어서의 문제점을 논의하고 결론을 내릴 것이다.

II. RF MEMS

RF MEMS는 MEMS 기술을 이용하여 RF 부품이나 시스템에 사용할 수 있는 기술이나 제품, 모듈

의 통합적인 의미라고 할 수 있다. RF MEMS가 추구하는 궁극적인 목표는 RF 시스템을 하나의 chip 안에 구성하는 system on a chip의 개념이나 RF 시스템을 하나의 package 안에 구성하는 monolithic packaged RF system인데, 현 시점에서 가장 많이 연구되고 있는 것은 MEMS 기술을 이용한 RF 소자 개발이다. 이에 대한 분류는 시각에 따라 다르게 분류를 할 수 있으나, 본 고에서는 RF MEMS 소자를 움직이거나 air gap이 있는 소자(movable 소자)와 그렇지 않은 소자(non-movable 소자)로 구분하고자 한다. RF 소자 측면에서 보면 movable 소자의 대표적인 것은 mechanical RF switch^{[6], [9]}이며 air gap inductor, tunable capacitor^{[10], [13]}, mechanical membrane resonator^{[14], [15]}, mechanical filter^[16] 등이 있으며, non-movable 소자는 inductor^{[17], [19]}, cavity resonator^[20], bulk acoustic wave resonator^{[21], [22]}, transmission line^[23] 등이 있다. 또 transmission line 과 MEMS switch를 이용한 phase shifter^[24], variable capacitor와 transmission을 이용한 phase shifter^[25],

variable capacitor를 이용한 tunable VCO^[26] 등이 있다. 본 고에서는 mobile device 분야에서 가장 많이 연구되고 있는 MEMS RF switch에 대해서 중점적으로 고찰해 보겠다.

III. MEMS RF switch의 특성

현재 일반적으로 사용하는 PIN diode나 FET switch는 bandwidth, isolation, insertion loss, power consumption, 선형성 등에서 많은 단점을 가지고 있으나, MEMS switch는 <표 1>에서 보는 바와 같이 매우 넓은 대역 폭에서 우수한 특성을 가지고 있다. 특히 우수한 특성은 활용 가능한 주파수 대역이 매우 넓고 isolation 특성이 매우 크며 insertion loss, 전력 손실, inter-modulation 등이 매우 작다는 것이다.

MEMS에서 움직이는 소자의 대표적인 mechanical RF switch는 그 특성이 현재 dual-band 단말기에 사용되고 있는 frequency separator^[27]에 비하여 많은 장점을 가지고 있고 응용 분야도 다양하기 때

<표 1> RF switch 비교

	RF MEMS	PIN	FET
Actuation voltage (Volt)	8 ~ 30	3 ~ 5	3 ~ 5
Current (mA)	0	3 ~ 20	0
Power consumption (mW)	0.05 ~ 0.1	20 ~ 200	0.05 ~ 0.2
Switching time (μ s)	1 ~ 30	0.01 ~ 0.1	0.01 ~ 0.1
Cup (series, fF)	1 ~ 6	20 ~ 50	30 ~ 60
Ron (Ohmic contact, Ω)	1 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 6
Cup (C-coupling, fF)	20 ~ 50	-	-
Ron (C-coupling, Ω)	0.05 ~ 0.25	-	-
Ccut-off (GHz)	20000 ~ 80000	1 ~ 4	0.3 ~ 0.5
Isolation @ 1 ~ 4 GHz	High	High	Medium
Isolation @ 30 ~ 40 GHz	High	Medium	Low
Isolation @ 70 ~ 100 GHz	High	Medium	-
Insertion loss (dB)	0.05 ~ 0.3	0.4 ~ 1.2	0.4 ~ 1.6
Power capability (W)	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 10	0.1 ~ 3.0
Intermodulation (dBm)	66 ~ 80	27 ~ 45	27 ~ 45

문에 <표 2>에서 보는 바와 같이 세계적으로 많은 연구소나 학교에서 연구가 진행되고 있을 뿐만 아니라 국가적인 차원^[28]의 지원도 이루어지고 있다. MEMS switch는 기존의 소자에 비하여 손실과 크기가 작을 뿐 아니라 주파수 대역의 선택 특성이 기존 소자에 비하여 매우 우수하다. 이러한 특성은 응용 분야를 다룰 장에서 소개하겠지만, multi-function 소자와 차세대 multi-band/multi-mode 통신 시스템을 구현 할 수 있게 해준다. 이와 같이 RF MEMS는 미래 지향적인 특성이 강하므로 RF engineer뿐만 아니라 시스템 engineer, 공정 engineer 등 다양한 분야에서 많은 관심을 갖고 있다.

이동통신 단말기에 사용하기 위하여 MEMS RF switch가 갖추어야 할 사양(표 3)은, RF 측면에서 볼 경우 switch가 ON 상태에서 RF 신호를 손실이 적게 전달하는 특성(insertion losses)과 OFF 상태에서 RF

신호를 전달하지 않는 특성(isolation)을 들 수 있다. MEMS switch에서 RF 신호를 전달하는 방식은 크게 2 가지가 연구되고 있다. 하나는 RF 신호를 접촉 저항을 통하여 전달하는 Ohmic contact⁷ 방식이며 다른 하나는 capacitor로 RF 신호를 전달하는 capacitive coupling^{[54]-[56]} 방식이다. 각각의 방식은 그 활용에 따라 장단점을 가지고 있다. Ohmic contact 방식은 주로 낮은 주파수 대역에서 사용하고 capacitive coupling 방식은 비교적 높은 주파수 대역에서 연구되고 있다.

Switch 측면에서 보면, ON 상태와 OFF 상태를 반복적으로 변환하는 특성(life cycles)과 빠르게 변환하는 특성(switching time)을 들 수 있다. MEMS에서 구현하고자 하는 mechanical switch의 switching speed는 물질과 switch 구조에 의하여 결정되며 전자의 움직임에 이용한 반도체 소자에 비하여

<표 2> MEMS RF switch 연구 그룹

연구소	Lab.	학 교
Raytheon (Texas Instruments) ²⁹⁾	Lincoln Labs ³⁰⁾	University of Michigan ³¹⁾
Raytheon (HRL) ³²⁾	Sarnoff Labs ³³⁾	University of Illinois, Urbana ³⁴⁾
Rockwell Science Center ³⁵⁾	Sandia Labs ³⁶⁾	University of California, Berkeley ³⁷⁾
Northrup Grumman		university of California, LA ³⁸⁾
Motorola ³⁹⁾		Northeastern University
Ericsson microwave systems ⁴⁰⁾		TTU ⁴¹⁾
Analog Devices ⁴²⁾		Cornell university ⁴³⁾
Standard MEMS		KAIST ⁴⁴⁾
Dow-Key Microwave ⁴⁵⁾		서울대학교 ⁴⁵⁾
MEMScAP, France ⁴⁷⁾		
CRONOS ⁴⁸⁾		
COVENTOR ⁴⁹⁾		
NEC, Japan ⁵⁰⁾		
Sony, Japan		
IME, Singapore ⁵¹⁾		
Samsung ⁵²⁾		
LG ⁵³⁾		

〈표 3〉 일반적으로 Dual band CDMA 단말기에서 요구하는 MEMS RF switch 특성

Items	특성
Circuit	SPDT
Insertion losses	< 0.2 dB
Isolation	> 40 dB
Reflection	> 20 dB
Switching time	< m-sec
Life cycles	> 2 M
Power capability	> 2 Watts
IP3	> 60 dBm
Hermetic sealing	10^{-6} cc/sec @ He

느리다. 비교적 mass와 spring constant가 작은 membrane switch의 경우 8 microseconds 까지 보고 되고 있으며, cantilever switch의 경우 20 microseconds까지 보고 되고 있다. Switch ON/OFF 방식에는 신호를 연결하고 끊어 주는 방식(serial switch)과 신호의 흐름을 막아 주고 터 주고 하는 방식(shunt switch)이 있다.

무선 통신의 경우 RF 신호가 어느 정도의 힘을 가지고 단말기와 증계기 또는 기지국을 연결해 주어야 하며, 이를 RF 소자가 처리할 수 있어야 한다. 이러한 경우 큰 RF 신호를 처리할 수 있는 특성(power capability)이 필요하다. MEMS RF switch의 power 특성은 크게 RF power가 가해진 상태에서 switching 할 경우 처리할 수 있는 크기, switch ON 상태에서 RF power가 흐를 수 있는 크기, switch OFF 상태에서 power가 가해져도 self-actuation 하지 않고 견딜 수 있는 크기와 switch ON 상태에서 장시간 power를 견딜 수 있는 능력 등 4가지로 구분하여 생각할 수 있다. 또한 power capacity와 더불어 필요한 것이 input power 대비 output power의 비가 일정한 선형성(linearity) 특성을 들 수 있다.

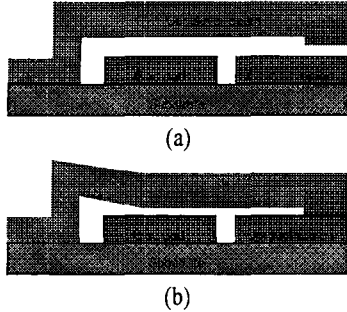
RF MEMS에서 연구하고 있는 것은 movable mechanical switch이므로 구동에 대한 항목이 추가

된다. 구동 방식에서는 전기력을 이용한 구동(electrostatic actuation)과 자기력을 이용한 구동(magneto-static actuation), 열에 의한 구동(thermal actuation)을 들 수 있다. 여기에서 electro-magnetic actuation 방식은 전류를 공급하여 electric or magnetic field를 발생시키고 이를 이용하여 actuation 시키는 방식이며, thermal actuation 방식^{[57],[58]}은 전류를 저항체에 공급하여 열에 의한 물질의 팽창이나 수축을 이용하여 actuation 시키는 방식이다. 무선 통신 단말기의 경우, 전력 공급원이 유한하므로 전력 소모의 특성이 단말기 전체의 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 전력 측면에서 RF MEMS switch에서 사용하는 구동 방식은 magneto-static actuation 방식과 thermal actuation 방식보다 electro-static actuation 방식을 선호하고 있다. 현재 단말기에 상용되고 있는 battery는 3.2 volt이며, 시스템에서 또 다른 승압기(DC to DC converter)를 사용하기를 꺼려 하기 때문에 구동전압(actuation voltage)이 3.0 volt 이하인 switch를 요구하고 있다.

MEMS RF switch에서는 반도체에서 제작하고 있는 FET switch나 세라믹을 이용한 frequency separator에서 보다 packaging^{[59],[60]}이 어려운 문제가 되고 있다. MEMS switch는 actuation에 의하여 신호를 끊고 연결하고 하기 때문에 actuation 부분이 주위 환경에 영향을 받는다. 특히 습도 등에 의해서는 치명적인 특성 변화가 일어나므로 hermetic sealing packaging이 꼭 필요하다.

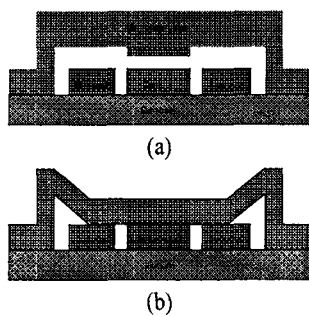
IV. MEMS RF Switch의 종류

본 장에서는 가장 많이 연구되어 온 2종류의 서로 다른 MEMS RF switch의 parallel plate 구조를 고찰하고, RF 신호를 연결하고 끊어주는 2종류의 접촉 형태에 대하여 논의하고자 한다. 구조물의 형태에서는 cantilever 형태^[61]와 bridge 형태의 mem-



[그림 1] Cantilever beam switch의 단면도
(a) OFF 상태, (b) ON 상태

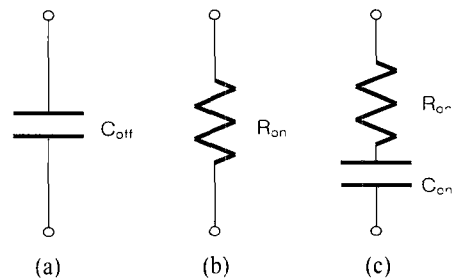
brane 구조를 갖는 형태가 주로 연구되고 있다. Cantilever beam 구조는 [그림 1]에서 볼 수 있듯이 beam의 한 끝은 기판에 고정되어 있고, 다른 한 끝은 움직일 수 있도록 공기 중에 부상되어 있는 형태이다. Cantilever beam에 전기력이 가해지지 않으면 [그림 1](a)와 같이 beam은 일정한 거리를 두고 부상되어 있을 것이며, cantilever beam과 바닥 전극 사이에 충분한 정전기력이 가해지면 [그림 1](b)와 같이 beam의 한쪽 끝이 바닥의 신호선과 붙을 것이다. 다시 전기력을 끊으면 beam은 원 위치로 돌아갈 것이다. 그림에서는 볼 수 없지만, 이러한 경우에 RF 신호선과 bias 전극 사이에 RF적으로 격리를 시켜야 하므로 RF 설계와 구조 및 공정 설계에서 이를 고려해야 한다.



[그림 2] Membrane 구조의 RF switch 단면도
(a) OFF 상태, (b) ON 상태

Membrane 구조는 [그림 2]와 같이 움직일 수 있는 얇은 beam의 양쪽 끝이 기판에 지지되어 구조에서 공기 중에 부상되어 있는 형태이다. [그림 2](a)와 같이 외부에서 아무런 힘이 가해지지 않은 초기 상태에서는 cantilever beam 구조와 같이 membrane이 기판과 일정한 거리를 두고 부상되어 있다. Membrane을 변형시킬 수 있는 이상의 전기력이 membrane과 전극 사이에 가해지면 membrane은 휘어져서 [그림 2](b)와 같이 신호 선과 붙게 된다. 다시 전기력을 끊으면 beam은 원 상태로 돌아간다. 이때에도 cantilever의 경우와 같이 RF와 DC사이를 적당히 격리시켜야 한다.

MEMS RF switch는 위에서 언급한 2가지의 종류의 구조 외에, RF 신호를 전달하는 2가지 방식이 있다. 한가지는 금속과 금속을 연결하는 Ohmic contact 방식이며, 다른 하나는 금속/유전체/금속의 형태로 연결하는 capacitive coupling 방식이 있다. OFF 상태는 2가지 방식 모두 off capacitance (C_{off})로 표현되며, C_{off} 는 접촉 전극 사이의 유전체 특성과 접촉 전극의 면적, 접촉 형태 등에 의하여 결정된다. Ohmic contact 방식의 ON 상태는 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 R_{on} 으로 표현되는 금속과 금속 사이의 접촉 저항에 의하여 coupling 손실이 결정된다. 이러한 방식의 사용 가능한 주파수 영역은 DC



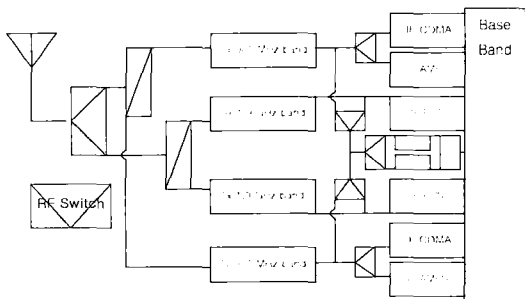
[그림 3] RF Coupling 방식의 등가 회로
(a) 두 방식의 OFF 상태, (b) Ohmic contact 방식의 ON 상태, (c) capacitively coupling 방식의 ON 상태

에서 Coff의 reactance 값에 의하여 결정되는 주파수 까지이다.

Capacitively coupling 방식의 ON 상태는 금속/유전체/금속의 면적에 의하여 결정되는 capacitance (C_{on}) 값과 membrane과 전극에서 발생하는 Ohmic 손실 R_{on} 의 직렬 연결된 것으로 나타낸다. 이 방식의 사용 가능한 주파수 영역의 가장 낮은 값은 C_{on} 값에 의하여 결정되며, 가장 높은 값은 C_{off} 값에 의하여 결정된다. 따라서 switch를 설계할 경우, 전기력이 유전체의 breakdown voltage 이상이 되지 않게 하여야 한다. 이 외에 lateral contact 구조^{[62],[63]}도 최근에 연구되어지고 있다.

V. MEMS RF switch의 응용분야

Switch의 응용 분야를 살펴 보면, 새로운 시스템을 창출하는 부분과 기존에 사용하는 부품을 대체하는 부분으로 나눌 수 있다. 이론적으로 앞에서 논의한 switch가 상품으로서의 가치를 인정 받는다면, RF 송수신 시스템에서 신호의 경로를 자유로이 선택하여 사용할 수 있기 때문에 여러 가지 주파수 대역이나 방식을 사용할 수 있는 (multi-band/multi-mode) RF 시스템에 활용될 수 있을 것이다. [그림 4]는 현재 dual-band/tri-mode 단말기의 경우 스위치가 사용되는 형태를 보여 주는 것이다. 이와 같은 방식으로 multi-band/multi-mode 송수신 시스템을

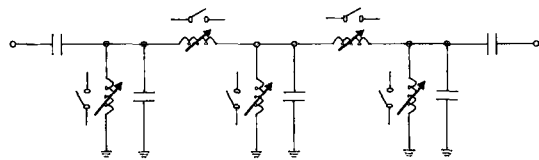


[그림 4] Dual-band/tri-mode에서의 RF switch 활용

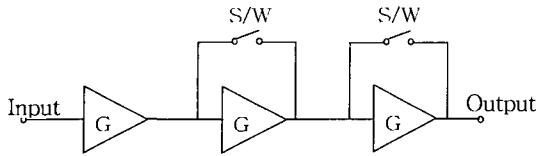
구현 할 수 있을 것으로 보인다.

[그림 4]에서 보는 바와 같이 dual-band/tri-mode 단말기에서 RF switch는 안테나에서 들어오는 신호를 2 개의 주파수 band로 선택하여 각 주파수 대역의 duplexer로 보내는 역할, 2개의 VCO (Voltage Controlled Oscillator)에서 나오는 신호를 1.9 GHz 대역과 0.9 GHz 대역으로 선택하는 역할, Rx 부분을 Rx 1.9 GHz band 부분과 Rx 900 MHz band로 구분하여 연결하는 역할, 같은 방법으로 Tx 부분에서 선택하여 연결하는 역할 등으로 사용된다. [그림 5]는 RF switch를 이용한 tunable filter의 block diagram을 보여 준다. 이 block diagram은 Inductor와 capacitor로 구성된 filter에서 서로 다른 inductance 값을 갖는 inductor를 RF switch를 이용하여 선택적으로 공진 주파수를 변화시키는 개념이다. 이러한 소자는 [그림 4]에서 볼 수 있는 바와 같이, 서로 다른 주파수 대역을 이용한 통신을 하나의 단말기를 이용하여 구현하는 시스템에서는 각각의 주파수 대역에서 대역통과 filter가 두 개 필요하다. 이들 두 개의 filter를 RF switch를 이용하여 하나의 tunable filter로 구현할 수 있음을 나타낸다. 이때 tunable capacitor를 같이 활용하면 더욱 좋은 tuning 특성을 구현할 수 있다.

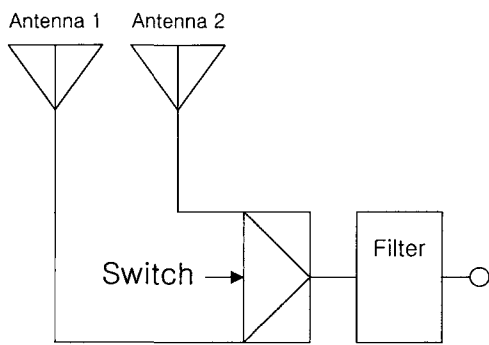
또 다른 활용 분야는 gain controllable PA(Power Amplifier)나 LNA(Low Noise Amplifier)에 활용될 수 있다. 기본적으로 단말기는 유한한 에너지원의 battery를 사용하고 있기 때문에 에너지 소모를 최소화하면서 통신이 가능한 것을 원하고 있다. 이러한



[그림 5] MEMS RF switch를 이용한 tunable filter의 block diagram



[그림 6] RF switch를 이용한 gain controllable PA 또는 LNA의 block diagram



[그림 7] Switch를 이용한 dual-band antenna의 schematic diagram

요구에 부응하기 위해서는 단말기가 기지국이나 중계기와 가까이 있을 경우와 멀리 있을 경우의 amplifier의 gain을 조절함으로써 가능하다. [그림 6]은 이러한 gain controllable PA나 LNA의 block diagram을 나타낸다. 이외에 VCO의 resonator 부분을 RF switch를 이용하여 resonance 주파수를 변화시켜 dual-band VCO를 구현하는 방법, [그림 7]과 같이 두 개의 antenna를 RF switch를 이용하여 선택할 수 있는 dual-band antenna를 구현하는 방법 등 RF switch를 응용할 수 있는 분야는 매우 다양하다.

VI. MEMS RF switch의 성공 요인

MEMS 기술을 이용한 RF switch는 앞에서 언급한 바와 같이 그 성능 측면이나 응용 측면에서 매우 유용한 연구 개발 분야이다. 그러나 아직 상품으로

개발되어 시장에서 쓰이고 있지 않으며, 아직 몇 가지 해결해야 할 문제점이 있다. 본 고에서는 제작 측면과 신뢰성 측면, 그리고 가격 측면에서 간단히 논의해 보고자 한다. 제작 측면에서는, MEMS 공정 전반에 대한 논의는 하지 않고 switch가 상품화 되는데 있어서 중요하게 여겨지는 부분에 대하여 서술해 보는 선에서 논의하고자 한다. MEMS 공정은 기본적으로 3 차원 구조를 형성하는 것으로 박막을 쌓아 나가는 반도체 공정 보다 고려해야 할 사항이 많으며, RF switch를 제작하는데 가장 중요한 부분은 membrane 구조를 형성하는 것이다. Switch에 있어서 membrane은 그 형태나 물질의 종류에 따라 isolation, life time, switching time, actuation voltage, insertion loss 등 많은 switch 특성에 직접적인 영향을 준다. 이러한 특성이 일정한 값을 갖고, 설계와 표준화된 공정에 의한 library가 구축되었을 때 수율이 확보되고 제품으로서의 가치를 논할 수 있게 되는 것이다. Membrane 형성 과정은 크게 sacrificial layer를 만들고, 그 위에 membrane 구조를 만들고 다시 sacrificial layer를 제거하는 공정으로 진행되는데, 이때 membrane이 공정 중에서 thermal stress gradient 등에 의하여 변형이 일어날 수 있으며, membrane이 다른 물질과 표면 접촉하면서 inter-diffusion 등에 의해 물성의 분포가 달라짐에 따라 시간에 따른 변형이 일어날 수 있다. 이러한 변형이 일정하게 나타나면서 기판 전체에 똑같은 형태로 나타난다면 설계에서 보정을 할 수 있다. 현재 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 sacrificial layer의 물질을 여러 가지 금속이나 polymer, 산화물 등으로 바꾸거나 release 방법 등을 바꾸어 가면서 연구를 진행하고 있다. 결국 membrane 공정을 포함한 모든 공정에서 공정 능력과 장비를 바탕으로 재현성과 uniformity를 얻을 수 있는 표준화된 공정이 필수적이라 볼 수 있다.

상품에 있어서 신뢰성은 매우 중요하며, 그 항목

도 매우 엄격하다. 본 고에서는 온도, 환경, 충격 등에 대한 신뢰성은 고려하지 않고, 앞에서 언급한 성능에 관련된 부분만 간단히 논의하고자 한다. 앞에서 언급한 성능에서, RF switch는 여러 번 switching을 하고 난 후에 membrane의 형태가 변하여 원래의 특성과 달라지는 현상과 장시간 high power RF 신호가 흐른 후에 contact 부분의 특성이 변하여 서로 붙거나 coupling coefficient가 달라지는 현상이 일어날 수 있다. Life cycle에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 membrane 물질을 stiff한 물질을 사용하는 경우가 있는데, 이는 actuation voltage 등과 상호 연관성을 갖고 있어서 사용 용도에 따라 적절한 설계가 필요하다. 최근에 contact에 대한 신뢰성 문제도 동작 중에 일어나는 stiction 문제와 더불어 많은 연구가 진행되고 있다.

MEMS RF switch가 상품으로서 가치를 갖기 위해서는 시장에서 거래가 이루어지고, 시스템에 탑재되어 마지막 소비자가 이의 혜택을 받아야 한다. 일반적으로 성능과 신뢰성이 모두 만족하는 상태에서 가격이 문제가 되는 경우가 있다. 현재 단말기에 사용되고 있는 switch를 MEMS switch로 대체하기 위해서는 현재의 가격에서 매우 불리한 면을 갖고 있으나, 새로운 기능의 제품을 창출하는 면에서는 초기 시장에 들어갈 수 있으리라고 보는 것이 일반적인 견해이다. 그러나 궁극적으로 MEMS RF switch가 다른 경쟁 기술이나 제품을 능가하기 위해서는 현재 사용하고 있는 물질이나 공정 등의 개선이 필요하다.

Ⅶ. 맺음말

결론적으로 MEMS RF switch는 성능이나 기능면에서 차세대 이동통신에서 사용할 수 있는 복합적인 통신 시스템을 구현할 수 있는 해결책을 줄 수 있을 것으로 보고 있다. 그러나 시장에서 상품으로

인정 받고 성공하기 위해서는 신뢰성이나 가격을 고려한 보다 완성도 높은 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] <http://www.sec.co.kr>
- [2] <http://www.lg.co.kr>
- [3] <http://www.nokia.com>
- [4] <http://www.motorola.com>
- [5] <http://www.analog.com/technology/RFCComms/cellularHandsets/index.html>
- [6] www.analog.com/industry/umic/relay.html
- [7] C. Bozler, R. Drangmeister, S. Duffy, M. Gouker, J. Knecht, L. Kushner, R. Parr, S. Rabe, and L. Travis, "MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components", *Microwave Symposium Digest. 2000 IEEE MTT-S International*, vol. 1, pp.153-156. 2000.
- [8] D. Hynan, A. Schmitz, B. Warneke, T. Y. Hsu, J. Lam, J. Brown, J. Schaffner, A. Walston, R. Y. Loo, G. L. Tangonan, M. Mehregany, and J. Lee, "GaAs-compatible surface-micromachined RF MEMS switches", *Electronics Letters*, 35, 3, pp. 224-226, February 4, 1999.
- [9] D. J. Young, and B. E. Boser, "A micromachined variable capacitor for Monolithic low-noise VCOs", in *Proceedings of 1996 Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, 86-89, 1996.
- [10] Z. Feng, W. Zhang, B. Su, K. F. Harsh, K. C. Gupta, V. Bright, and Y. C. Lee, "Design and modeling of RF MEMS tunable capacitors using electrothermal actuators", in *1999 IEEE MTT-S International Microwave Digest*, pp.

-
- 1507-1510, 1999.
- [11] C. L. Goldsmith, A. Malczewski, Z. J. Yao, S. Chen, J. Ehrnke, and D. H. Hinzl, "RF MEMS variable capacitors for tunable filters", *International Journal of RF & Microwave Computer-Aided Engineering*, 9, 4, pp. 362-374, 1999.
- [12] I. J. Yao, S. Park, and J. DeNatale, "High tuning-ratio MEMS-based tunable capacitors for RF communications applications", in *Proceedings of 1998 Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, pp. 124-127, 1998.
- [13] E. Hung, and S. Senturia, "Tunable capacitors with programmable capacitance-voltage characteristics", in *Proceedings of 1998 Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, pp. 292-295, 1998.
- [14] C.T.-C. Nguyen, "Frequency-selective MEMS for miniaturized communication devices", in *1998 IEEE Aerospace Conference*, 1, 44s-460, 1998.
- [15] F. D. Bannon, III, J. R. Clark, and C.T.-C. Nguyen, "High frequency microelectromechanical IF filters", in *1996 International Electron Devices Meeting*, pp. 773-776, 1996.
- [16] J. R. Clark, F. D. Bannon, III, A. C. Wong, and C. T. C. Nguyen, "Parallel-resonator HF micro-mechanical bandpass filters", in *Proceedings of 1997 International Conference on Solid-State Sensor and Actuators*, Chicago, pp. 1161-1164, 1997.
- [17] Choong-Mo Nam and Young-Se Kwon, "High-performance planar inductor on thick oxidized porous silicon (OPS) substrate", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 7, Issue 8, pp. 236-238, Aug. 1997.
- [18] J. Y. C. Chang, A. A. Abidi and M. Gaitan, "Large suspended inductors on silicon and their use in a 2-um CMOS RF amplifier", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 14 Issue 5, pp. 246-248, May 1993.
- [19] Chen-Yu Chi, "Planar microwave and millimeter-wave lumped elements and coupled line filters using micro-machining techniques", *IEEE Trans. MTT*, vol. 43, no. 4, April 1995.
- [20] P. Blondy, A. R. Brown, D. Cros, and G. M. Rebeiz, "Low-loss micromachined filters for millimeter-wave communication systems", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46, 12, pp. 2283-2288, 1998.
- [21] R. Ruby, P. Bradley, J. D. Larson III and Y. Oshmyansky, "PCS 1900 MHz duplexer using" thin film bulk acoustic resonators (FBARs)", *Electronics Letters* 13th, vol. 35, no. 10, pp. 794-795, May 1999.
- [22] S. V. Krishnaswamy, J. F. Rosenbaum, S. S. Horwitz, and R. A. Moore, "Film bulk acoustic wave resonator and filter technology", *IEEE MTT-S. Dig.*, pp. 153-155, 1992.
- [23] L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "Novel micromachined approaches to MMICs using low-parasitic, high-performance transmission media and environments", in *1996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1145-1148, 1996.
- [24] B. Pillans, S. Eshelman, A. Malczewski, J. Ehmke, and C. Goldsmith, "Ka-band RF MEMS phase shifters", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 9, 12. pp. 520-522, December 1999.

-
- [25] J. S. Harden, and G. M. Rebeiz, "One-and two-bit low-loss cascaded MEMS distributed X-band phase shifters", in *2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 161-164, 2000.
- [26] A. Dec, and K. Suyarna, "A 2.4 GHz CMOS LC VCO using micromachined variable capacitors for frequency tuning", in *1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1, pp. 78-82, 1999.
- [27] <http://www.hitachi-metals.co.jp/isc2001/mw/mw.html>
- [28] <http://www.microsystem.re.kr>
- [29] <http://www.raytheon.com>
- [30] <http://www.ll.mit.edu/>
- [31] <http://eecs.umich.edu>
- [32] <http://www.hrl.com>
- [33] <http://www.sri.com/>
- [34] <http://www.uiuc.edu>
- [35] <http://www.rockwell.com>
- [36] <http://www.sandia.gov/Main.html>
- [37] <http://www.berkeley.edu>
- [38] <http://www.ucla.com>
- [39] <http://www.motorola.com>
- [40] <http://www.ericsson.com>
- [41] <http://www.ccp.ntech.edu/mems/index.html>
- [42] <http://www.analog.com/technology/mems/index.html>
- [43] <http://www.cornell.edu/>
- [44] <http://iml.kaist.ac.kr>
- [45] <http://www.dowkey.com/>
- [46] <http://plaza.snu.ac.kr/~micro/>
- [47] <http://www.memscap.com>
- [48] <http://www.memsrus.com>
- [49] <http://www.coventor.com>
- [50] <http://www.nec.co.jp/>
- [51] <http://www.ime.org.sg>
- [52] <http://www.sait.samsung.co.kr>
- [53] <http://www.lg-elite.com>
- [54] C. Goldsmith, T. H. Lin, B. Powers, R. W. Wen, and B. Norvell, "Micromechanical membrane switches for microwave applications", in *IEEE Microwave Theory Tech. Symp.*, vol. 1, pp. 9194, May 1995.
- [55] C. Goldsmith, J. Randall, S. Eshelman, T. H. Lin, D. Denniston, S. Chen, and B. Norvell, "Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies", in *IEEE Microwave Theory Tech. Symp.*, vol. 2, pp. 1141-1144, June 1996.
- [56] L. Charles Goldsmith, Zhimin Yao, Susan Eshelman, and David Denniston, "Performance of Low-Loss RF MEMS Capacitive Switches, IEEE", *Microwave and guided wave letters*, vol. 8, no. 8, 269-271, August 1998.
- [57] Shifang Zhou, Xi-Qing Sun and W. N. Carr, "A micro variable inductor chip using MEMS relays", *Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago.*, 1997 International Conference on, vol. 2, pp. 1137-1140, 1997.
- [58] Xi-Qing Sun, K. R. Farmer, and W. N. Carr, "A bistable microrelay based on two-segment multimorph cantilever actuators", *Micro Electro Mechanical Systems, 1998. MEMS 98. Proceedings., The Eleventh Annual International Workshop*, pp.154-159, 1998.
- [59] A. C. Lmhoff, "Packaging technology for RFICs: current status and future trends", *1999 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits*

-
- (RFIC) Symposium, pp. 7-10, 1999.
- [60] Yun-Kwon Park, Heung-Woo Park, Duck-Jung Lee, Jung-Ho Park, In-Sang Song, Chung-Woo Kim; Ci-Moo Song, Yun-Hi Lee, Chul-Ju Kim, and Byeong-Kwon Ju, "A novel low-loss wafer-level packaging of the RF-MEMS devices", *Micro Electro Mechanical Systems, 2001. The Fifteenth IEEE International Conference*, pp. 681-684, 2002.
- [61] J. J. Yao and M. F. Chang, "A surface micromachined miniature switch for telecommunication applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz", in *Transducers'95*, pp. 384-387.
- [62] Ye Wang, Zhihong Li, Daniel T. McCormick and Norman C Tien, "Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications", in *Micro Electro Mechanical Systems, 2001. The Fifteenth IEEE International Conference*, pp. 645-648, 2002.
- [63] E. J. J. Kruglick, and K. S. J. Pister, "Lateral MEMS microcontact considerations", in *Micro-electromechanical Systems, Journal of*, vol. 8, Issue 3, pp. 264-271, Sep. 1999.

≡ 필자소개 ≡

송 인 상



1997년: 박사학위 취득
현재: 삼성종합기술원, MEMS Lab. 재직
RF MEMS 팀장