

RF MEMS 기술동향

광운대학교 교수 이 증 철

차 례

- I. 공진기
- II. 필터
- III. Phase Shifter
- IV. RF MEMS Switch

I. 서 론

MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술은 기계, 제어 공학 분야에서 처음 적용된 기술로써 1960년대 초반 실리콘 기판 위에 밸브, 모터, 펌프, 기어등 마이크로 단위의 기계 공구를 만드는 것으로부터 시작되었다. 1970년 대로 들어서면서 실리콘 기판을 직접 에칭하는 마이크로머신닝(Micromachining) 또는 벌크 마이크로머신닝(Bulk Micromachining)의 기술 개발로 3-D optical device, ink-jet & holography를 제작하였으며, 1980년대 후반에 들어서면서 thin-film 3-D 구조물을 만들기 위하여 희생층을 이용한 surface micromachining 기술이 소개, 이용되었다. 또한 1990년대에 들어서면서 X-ray lithography를 이용한 LIGA(X-ray lithography, Electroforming, and Molding) 기술이 개발되면서 high aspect ratio를 갖는 구조물들의 제작이 가능케 되었다. 즉 이렇게 발전을 거듭해온 MEMS 기술이 1990년대 후반 RF(Radio Frequency) 회로 분야와 기술 융합이 되면서 RF-MEMS라는 용어를

탄생시켰으며, 많은 연구자들의 관심을 끌기 시작하면서 최근 SoC(System on Chip), SoP(System on Package)의 가능성을 실현 할 수 있는 하나의 기술로 주목받고 있다.

즉, 기존의 2차원적인 구조 형태의 RF/Microwave 소자들이 지니고 있던 한계를 극복하기 위한 방법으로 이용, 가능성을 제시하면서 인덕터나 캐패시터가 가지고 있던 기존의 낮은 Q 값을 향상시키기 위하여 MEMS 기술이 응용되고 있으며 또한 전송선로의 손실을 최소화 하는 구조들이 제안, 그 가능성을 보였다. 또한 제어 회로(Control Circuit)을 설계 제작하는데 가장 중요한 소자인 PIN Diode나 TR 기반의 스위치들도 선형성이나 전력 소모량 등 월등이 좋은 MEMS 스위치로 교체되고 있으며 이 스위치들로 미국의 Rockwell사는 F-22기에 장착이 된 UHF Voltage tunable BPF 제품을 출시하여 RF-MEMS가 상용화되는 좋은 예가 되기도 하였다. 최근에 들어서는 SAW Filter를 대용할 수 있고 SoC가 가능한 FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)를 이용하여 초소형의 대역통과 여파기 제작 기술 개발에 많은 연구 인력들이 관심을 보이고

있으며 Agilent사는 2001년 시제품을 선보였다.

이렇듯 전 세계 많은 연구 인력들이 관심과 가능성을 보인 RF-MEMS 기술 또한 상용화 되려면 많은 문제점을 극복해야 한다. 예를 들어 낮은 power handing 이나 packaging, 낮은 yield, 낮은 level의 집적화, 신뢰성 등을 보이고 있으나 기존의 실리콘 CMOS, GaAs MMIC 공정 기술등과 양립할 수 있다는 가능성 때문에 많은 연구자들은 회의적인 시각과 긍정적인 시각을 동시에 보이고 있다.

따라서 본 특집호에는 RF-MEMS 기술을 이용하여 제작된 소자들에 대해 최근 몇 년간의 연구 논문을 살펴보고 연구 경향을 살펴 보는 기회를 삼고자 한다.

I. 공진기

공진기는 필터와 발진기를 구현함에 있어서 매우 중요한 요소이다. MEMS공진기로는 planar type, micromechanical type, 그리고 FBAR type 등이 있다[1].

그림1.은 Planar type중 하나인 헤어핀 공진기를 micromachining 기술을 이용하여 제작한 것이다.[2] 이러한 공진기를 멤브레인 막 위에 구현하여 발진기에 사용 된다. 하지만 멤브레인 공정이 쉽지 않다는 단점이 있다.

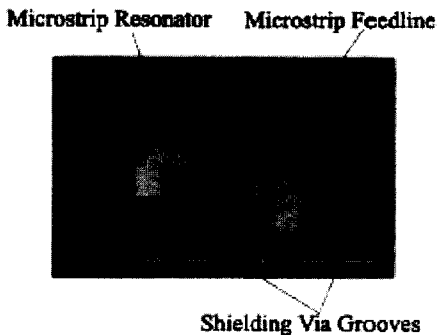


그림 1. 26.5GHz microstrip 공진기

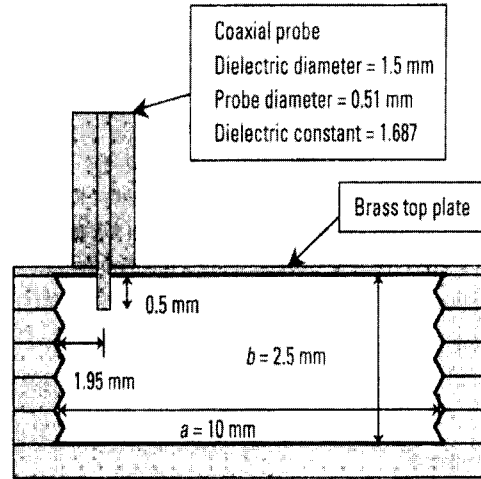


그림 2. Bulk micromachined 실리콘 캐비티

Micromechanical type으로는 cavity, clamped-clamped, 그리고 free-free beam 공진기 등이 있다. 그림 2는 Bulk micromachining 을 이용한 cavity의 사진이다. 이 cavity 공진기의 unloaded Q값은 506이고 크기는 $16 \times 32 \times 0.465$ mm 이다.[1] 다음으로는 clamped-clamped 공진기는 cantilever beam 양쪽에 anchor가 있고, 그 빔 아래 electrode 가있어 빔과 electrode 사이에 캐패시턴스가 존재하게 된다. 이 때 바이어스가 가해지면 cantilever 빔이 아래로 내려가게 되고, 빔과 electrode 사이의 캐패시턴스 값은 증가하게 된다. 이렇게 변화되는 캐패시턴스의 값에 따라 공진 주파수가 변하는 특성을 갖는다. 그림 3은 clamped-clamped 공진기의 사진과 측정 결과이다[3].

그림 4에 나와있는 free-free beam 공진기는 4개의 anchor로 beam을 공중에서 지탱하는 구조를 갖기 때문에, clamped-clamped 공진기에 비해 stiffness 가 작고 Q 값도 상대적으로 크다[3].

clamped-clamped 공진기나 free-free beam 공진기의 공진 주파수는 수십 MHz로 낮기 때문에 최근에는 Q값도 우수하고 보다 높은 주파수 대역 (0.5~6GHz)에서 사용이 가능한 FBAR에 관한 관

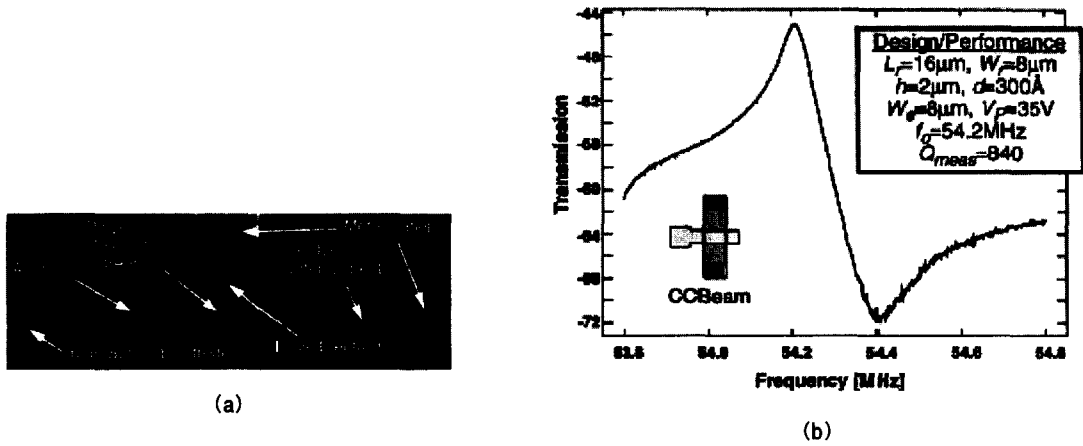


그림 3. (a) Clamped-clamped beam resonator의 SAM 사진 (b) 측정결과

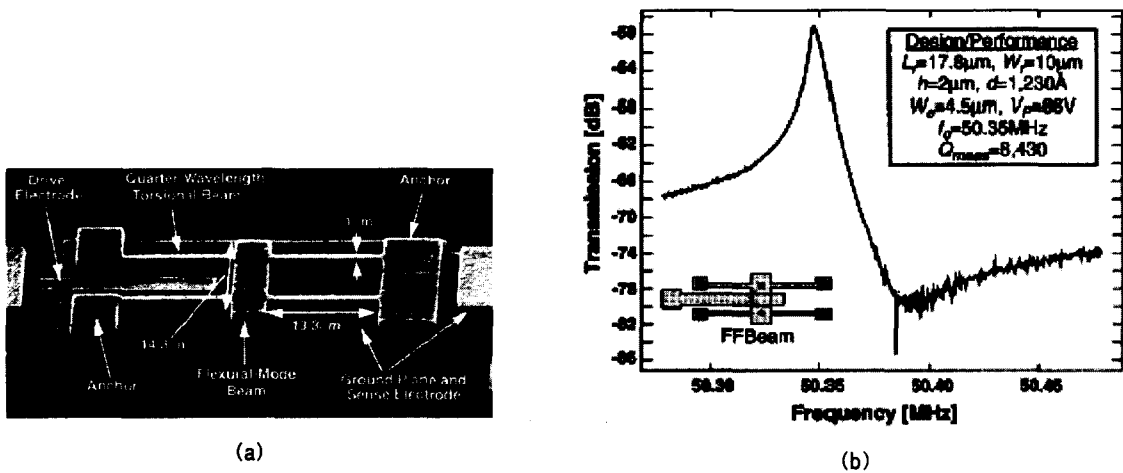


그림 4. (a) freefree beam 공진기의 SAM 사진 (b) 측정결과

심이 높아지고 있다. Krishnaswamy는 멤브레인 위에 이를 구현함으로써 1.5GHz~7.5GHz 대역에서 1000이상의 Q 값을 갖는 공진기를 설계하였다.[4] 그림 5(a)는 멤브레인 위에 구현된 FBAR 공진기의 모습이다[1].

II. 필터

가장 일반적인 MEMS BPF의 형태는 다음 그림 6과 같이 공진기를 직렬로 연결하여 만든 것이다[5].

이전의 tunable 필터는 인가되는 바이어스에 따라 변하는 커플링 빔을 이용하여 빔과 electrode 사이의 캐패시턴스 값을 variable 하게 함으로서 tunable 한 형태의 공진기를 만들었다[5]. 그림7은 커플링 빔과 그 등가 회로를 나타내었다. 이후에는 커플링 되는 양을 보다 늘리기 위해 electro flatting 기법을 사용하여 메탈위에 또 다른 메탈을 증착시킨 LIGA 구조를 만듦으로써 커플링 되는 면적을 넓게 하는 방법 또한 사용 되었다[6]. 그림 8은 LIGA 필터의 사진과 측정 결과이다.

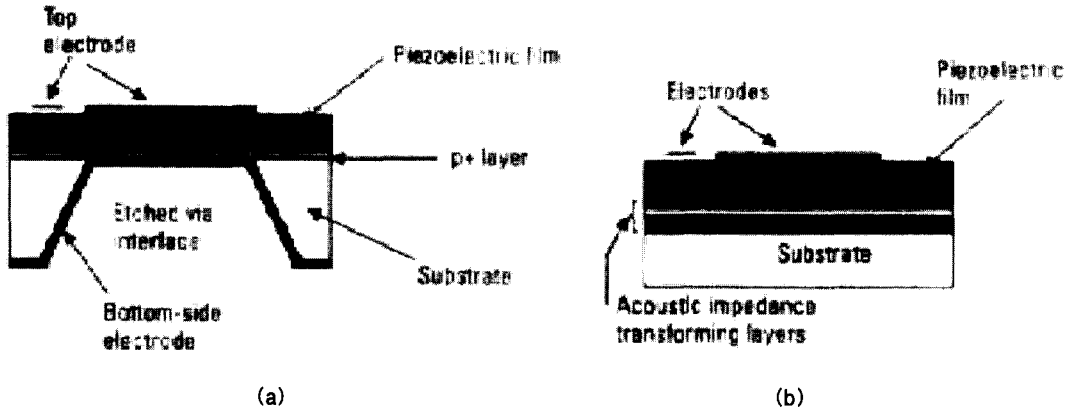


그림 5. FBAR 공진기 (a) 멤브레인 구조 (b) solidly mounted 구조

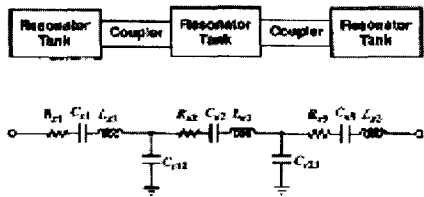


그림 6. 일반적인 BPF의 형태

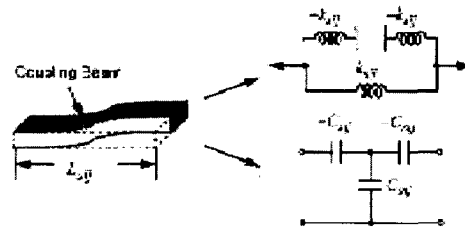


그림 7. 커플링 빔과 그 등가 회로

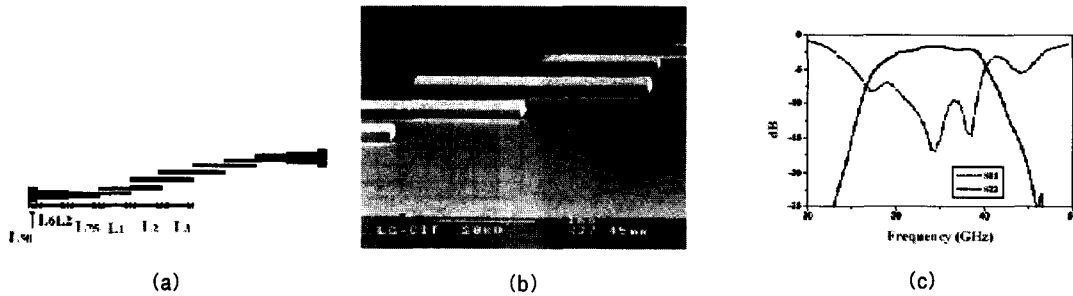


그림 8. (a) LIGA구조를 사용한 BPF의 구조 (b) SAM 사진 (c) LIGA 필터의 측정 결과

다음은 위의 필터에서 발생하는 손실문제를 개선하기 위해 멤브레인 막위에 회로를 구현 하였다(7). 멤브레인 구조란 얇은 멤브레인 막위에 회로를 구현하는 것으로서 진행파가 손실이 적은 공기중을 지나는 것과 같은 효과를 얻게 되므로 손실을 최소화 할 수 있다.

멤브레인 구조를 이용한 필터로는 SIR filter, end-coupled filter, 그리고 hybrid filter 등이

있고, 각각 그림9, 10, 11에 나타내었다

그림 12는 기존의 필터보다 넓은 대역폭을 갖는 ceramic resonator를 사용한 형태의 필터이다(8). ceramic resonator를 사용한 형태의 필터는 위의 edge coupled line과 비슷한 형태이나, 스트립라인을 사용하는 것이 아니라 ceramic 공진기를 사용하여 3-pole일 경우는 1GHz, 5-pole일 경우는 2GHz의 광대역을 갖는 우수한 광대역 특성을 갖는다.

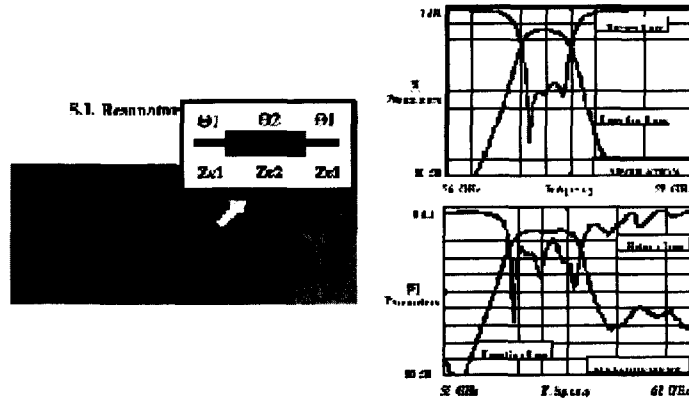


그림 9. Membrane SIR filter와 측정 결과 (위)시뮬레이션 (아래)측정결과

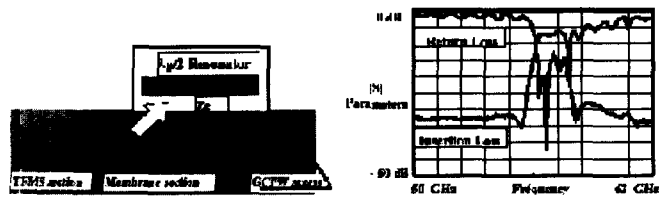


그림 10. Capacitively end-coupled filter와 측정 결과

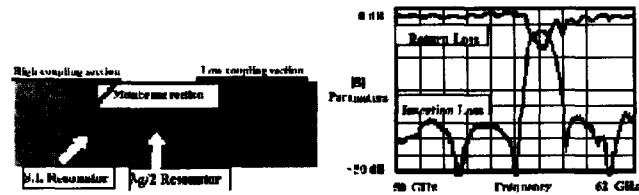


그림 11. Hybrid filter on membrane와 측정 결과

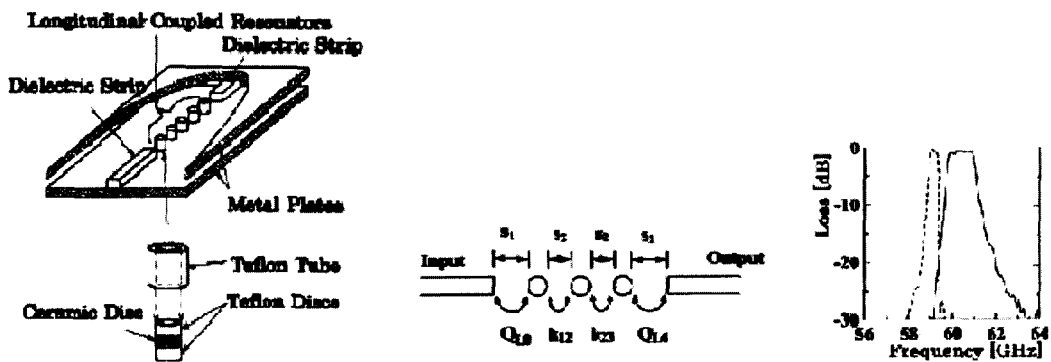
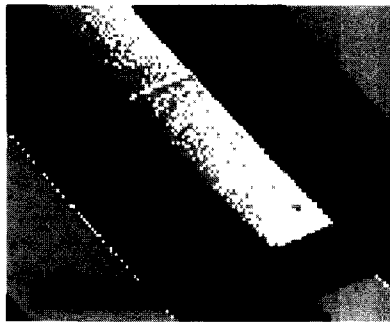


그림 12. (a)NRD guide에 연결된 3-pole 세라믹 공진기를 이용한 BPF(b)측정결과

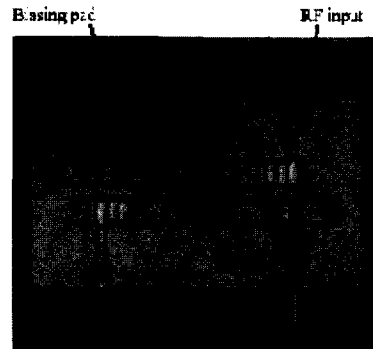
그림 13은 tunable 한 passband 대역을 구현하기 위해 cantilever 스위치를 사용한 필터이다 [9]. 스위치가 동작함에 따라 passband 대역을 조절할 수 있도록 설계 되었다.

사용되고 있다.

MEMS Phase shifter는 위성통신에 사용되기 위한 목적으로 개발하였으며 또한 MEMS Switch 발전을 통해 더욱더 발전하게 되었다.



(a)



(b)

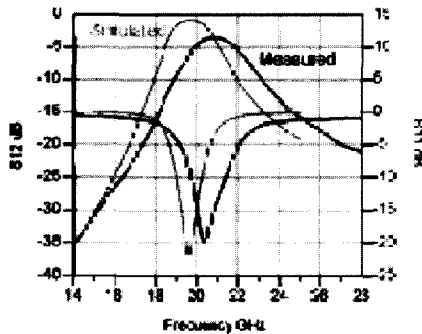
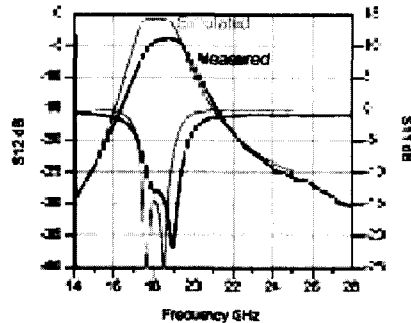


그림 13. (a) cantilever 스위치

(c) up state일 때의 측정 결과



(b) cantilever 스위치를 이용한 tunable BPF

(d) down state일 때의 측정 결과.

III. Phase Shifter

Phase shifter는 telecommunication 과 radar application 용 안테나에 중요한 Component로 사용되고 있다. 일반적으로 Phase Shifter는 페라이트를 이용한 페라이트 Phase shifter 그리고 pHEMT, MESFET, Varactor diode와 같이 반도체 소자 Phase shifter가 있으며 또한 MEMS 기술을 이용한 MEMS Phase shifter가

MEMS 기술을 이용한 MEMS Phase Shifter는 pHEMT, MEMSFET, Varactor diode를 사용한 반도체 Phase Shifter들과 달리 소형이고, 무게가 가벼우며, 가격도 싸고, 손실이 적다. 그러한 이유는 MEMS Switch가 정전기적으로 동작하므로 즉 기계적인 동작으로 하므로 시스템 레벨에서 DC 전류가 필요 없어 전력 소비를 최소한으로 할 수 있다.

또한 Isolation 특성 역시 뛰어나다.

반면 반도체 Phase shifter 는 그 동작 속도가 1us 이하 이지만 MEMS Switch 는 2 ~ 50uS 라는 긴 동작 시간이 걸리는 단점과 또한 스위치가 동작하기 위해서는 높은 DC 전압이 필요하게 되는 단점이 있다.

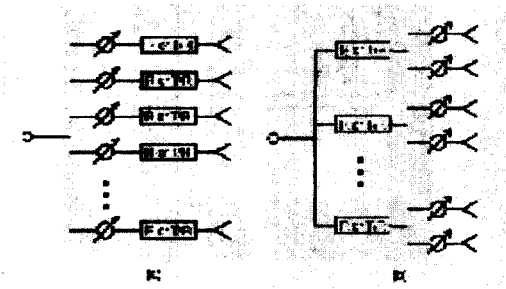


그림 14. (a) 일반적인 Phase shifter
(b) MEMS 기술을 이용한 Phase shifter [10]

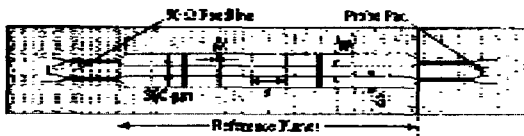


그림 15. 50(line과 테스트를 위한 Probe pad를 연결한 DMTL Layout

그림 15의 DMTL은 single analog control voltage를 center conductor에 가함으로써 Phase shifter로 동작하게 된다. Voltage를 증가 시킴에 따라 Bridge가 center conductor에 가깝게 접근함에 따라 Capacitance 의 값이 증가하게 되고 Phase velocity 값은 감소 하게 된다. [11]

이러한 Phase velocity 변화를 이용하여 true-time delay Phase shifter로 사용된다.

DMTL: Distributed MEMS transmission line

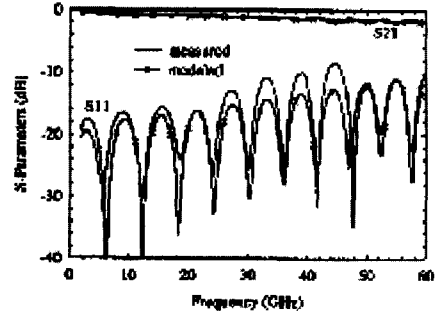


그림 16. 바이어스 13V가 공급된 폭이 100 um

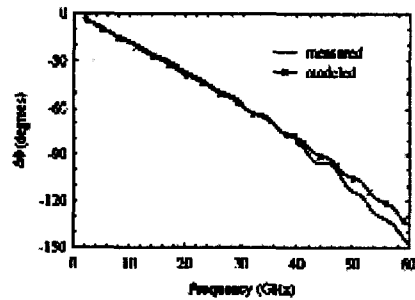


그림 17. 바이어스 13V일때 폭이 100 um 인 38개의 Bridge를 가지는 DMTL 의 측정값과 모델값 DMTL의 측정값과 모델값

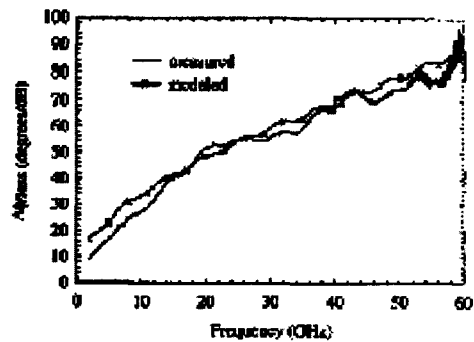


그림 18. W=100um DMTL showing 90(/dB at 60GHz or 4 dB loss for 360(Phase shifter의 단위길이 당 loss 측정치과 모델치

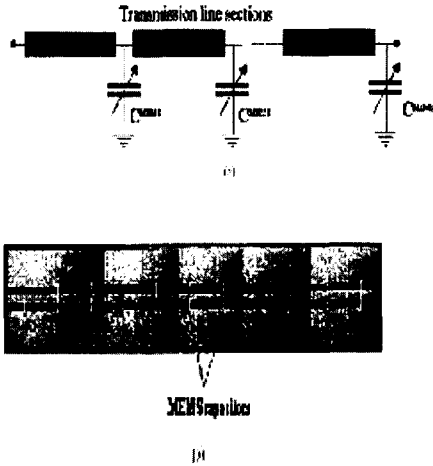


그림 19. (a) Phase shifter의 Circuit schematic
(b) 실제 Phase shifter 사진 전체 길이 8.58mm

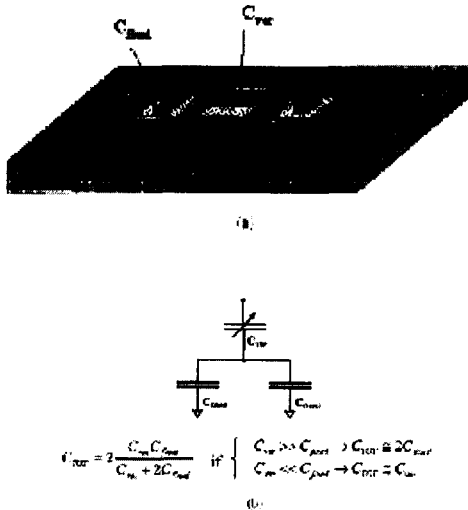


그림 20. (a) "Series" MEMS Capacitive switch 구조
(b) 동작회로

그림 19의 Phase Shifter는 MEMS Capacitance를 이용한 one-bit 저 손실 K/Ka 밴드용 위상천이기 이다. 측정 결과를 보면 25GHz에서 180(위상 천이가 되고 1.7dB 손실을 가지는 성능

을 나타내며 35GHz에서는 270(의 위상 천이와 1.69dB의 손실을 가졌다 또한 0 ~ 35GHz 밴드에서 11dB의 Return loss를 가지고 있다.[12]

그림 22에서 보는 것과 같이 이 위상천이기는 전체 길이가 8.58mm 이고 CPW 구조를 가지고 있으며 11개의 MEMS Capacitance로 이루어져있다.

DC 전압이 가해지지 않는 상태는(UP-State) Membrane이 위에 있는 상태가 되고 DC 전압이 점점 증가함에 따라 MEMS Capacitance의 Membrane이 점점 아래로 내려가져 Down-State가 된다. 따라서 Membrane 아래로 내려감에 따라 loading Capacitance 값을 증가하게 되고 이로서 C값이 변하게 된다. 이런 C 값의 변화를 이용하여 위상 천이를 일으키게 된다.

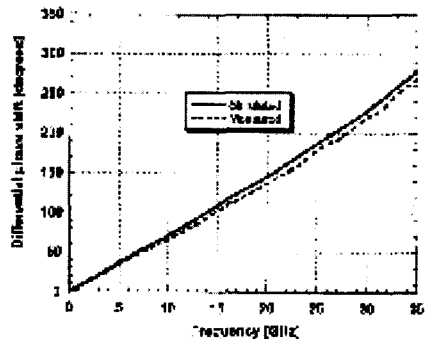
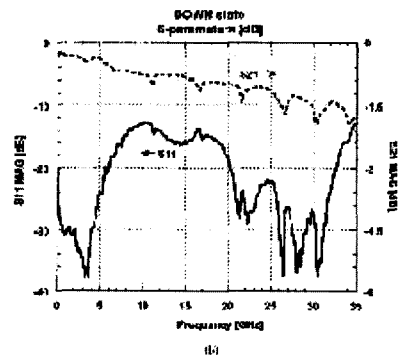


그림 21. Down state 일 때 설계치와 측정치



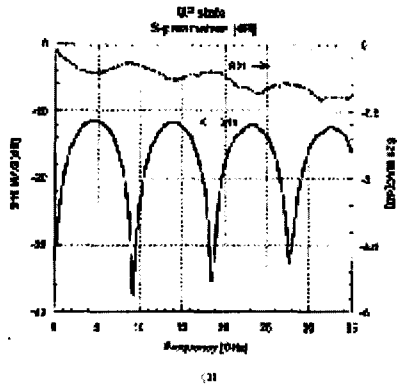


그림 22. (a) Insertion loss 와 Return loss 측정값 (UP 상태일 때)
(b) Insertion loss 와 Return loss 측정값 (Down 상태일 때)

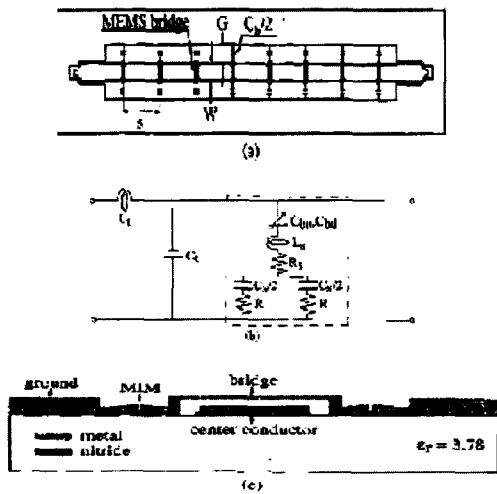


그림 23. (a) MEMS bridge 를 이용한 CPW phase shifter 와 MIM capacitors
(b) Distributed lumped 모델
(c) MEMS bridge 의 종단면

그림 23의 Wideband distributed Coplanar-Waveguide (CPW) 구조로 된 phase shifter는 X-band에서 동작하도록 설계되어 있다. 이 위상 천이기는 DMTL 구조를 기초로 설계되어 있으며 Varactor의 High capacitance 값을 이용하여 설

계되어 있다. Varactor는 MEMS bridge와 MIM Capacitor들의 직렬 결합으로 이루어져 있다.[13] Distributed Phase shifter는 Quartz substrate에 제작되어 있다. 10GHz에서 True-time delay로 동작하는 이 Phase shifter는 Reflection coefficient는 15dB보다 작은 값과 180/deg의 Insertion Loss를 가진다. 이 Phase shifter는 bias Voltage 공급해주므로 Bridge 가 down 되어 Capacitance값이 변화하게 되어 Phase shift 하게 된다.

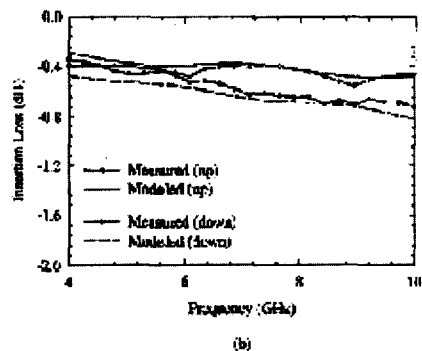
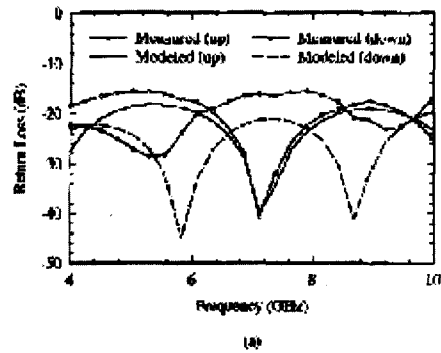


그림 24. 측정값과 Modeled 값의 (a) Return loss (b) Insertion loss

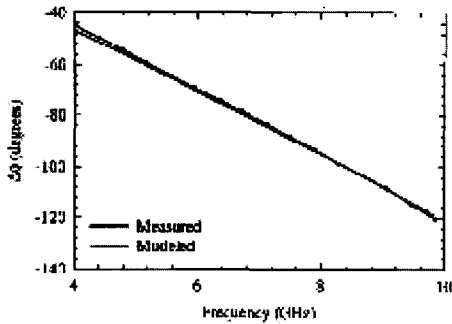


그림 25. MEMS Phase shifter 의 측정치와 모델치

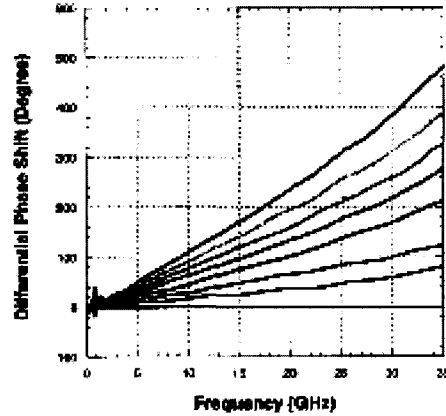


그림 27. 모든 MEMS switching 상태에서 Differential Phase shifter 측정치

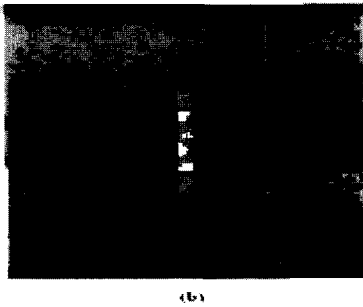


그림 26. (a) 3-bit distributed MEMS Phase shifter
(b) Close - up MEMS switch

그림 26의 3-bit K-band Phase shifter 는 MEMS Capacitive Switch를 이용하여 동작하게 된다. 측정 결과를 보면 26GHz에서 1.7dB의 Insertion loss 가 생기고 7dB 정도의 Return loss가 발생된다. [14]

3개의 One-bit Phase shifter는 각각 180, 90, 그리고 45도의 위상 변화를 가지도록 구성되어 있다. 각각의 MEMS Switch를 동작시킴으로 Phase shift를 시키게 된다.

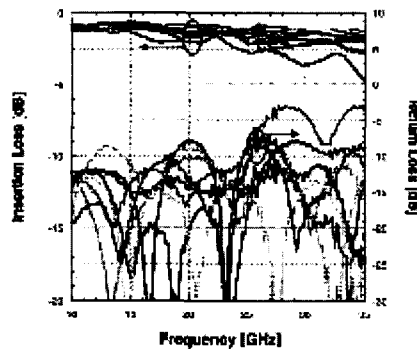


그림 28. 모든 MEMS switching 상태에서 Insertion loss 와 return loss 측정

Low loss Phase shifter는 RF MEMS series 스위치와 Single-pole four-throw (SP4T) switch를 동작을 기초로 설계 되어 있다. 이 위상 천이기는 200um 두께의 GaAs기판에 제작 되어 있다. 측정 결과를 보면 8~12 GHz에서 평균

표 1.26GHz에서 3-Bit Phase shifter data

Phase States	0.0	45.0	90.0	135.0	180.0	225.0	270.0	315.0
Measured	0.0	49.5	85.6	143.3	183.7	219.3	262.9	321.3
Phase Error	0.0	-4.5	4.4	-8.3	-3.7	5.7	7.1	-6.3

손실이 -0.55dB 이고 Reflection loss가 -17dB 이다. 2-bit Phase Shifter는 18GHz에서 평균 -0.85dB 손실이 생기며 DC~18GHz 까지 선형성을 유지하는 것을 확인 할 수 있다.

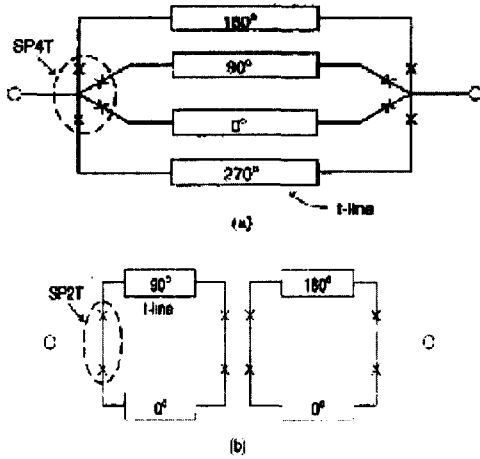


그림 29. 2-bit Phase shifter (a) SP4T, and (b) SP2T

그림 29의 Phase shifter 의 동작을 살펴 보면 그림 31과 같이 SP4T, SP2T 스위치 들이 동작을 하여 각각의 delay line을 결정하게 되고 이를 통해서 Phase Shift를 하게 된다.[15]

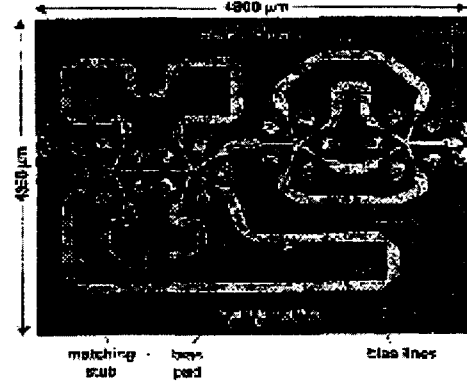


그림 31. 4-bit SP4T Phase shifter

SP4T에 의해서 8~12GHz에서 평균 -0.5에서 -0.6dB의 손실을 얻게 되고 모두 4개의 State에서 Reflection loss는 -17dB보다 크게 된다.(그림 32)

각각 0, 3.0, 49.0 그리고 72.8Ps의 Time delay를 가지게 되고 그에 따라 25GHz에서 0, 90.1, 177.8 그리고 272.0° 의 다른 Phase Shift를 가지게 된다.(그림33)

이 Phase Shifter는 18GHz까지 선형성을 유지하고 평균 -0.85dB의 손실과 -11dB보다 큰 Reflection loss를 가지고 있다.

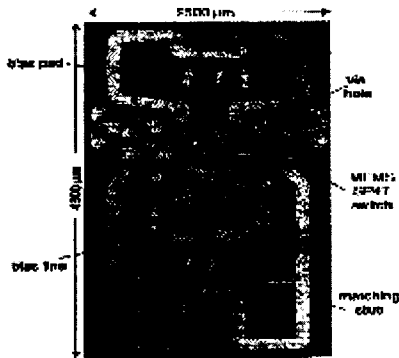
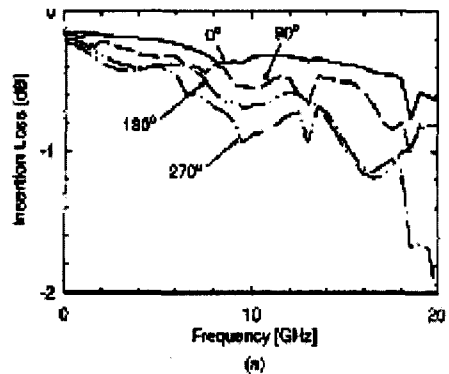


그림 30. Low-loss SP4T 2-bit Phase shifter 사진



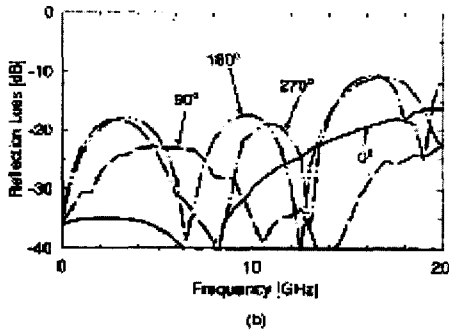


그림 32. (a) Insertion loss 측정치
(b) reflection loss 측정치

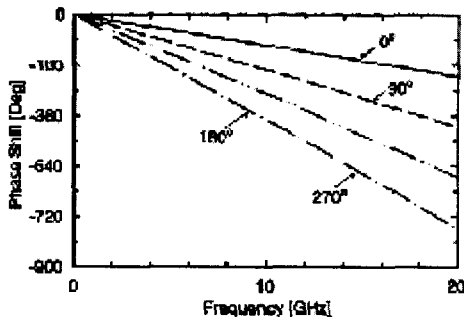


그림 33. SP4T 2-bit Phase shifter 의 phase shift 측정치

IV. RF MEMS Switch

1970년대 bulk, surface micromachining 기술의 출현 이후, Peterson은 electrostatic actuation을 응용한 cantilever beam type의 mechanical RF switch를 처음 시도한다.[16]

Movable 소자인 mechanical RF switch는 일반적으로 사용되고 있는 PIN-diode나 FET switch와 비교하여 몇 가지 장점을 가지고 있다.

Wide bandwidth, Low insertion loss (0.02~0.2dB), Isolation (RF MEMS Switches는 off 상태에서 air gap이 존재하기 때문에 Coff를 갖는다. 따라서 0.1~40 GHz에서 우수한 격리성을 보인다), High linearity(낮은 혼변

조), Compact design(um~mm), low power requirement등 FETs나 PIN-diode switch에 비하여 많은 장점이 있다. 반면 스위치 상용화를 위해 해결해야 할 문제점들을 가지고 있다.

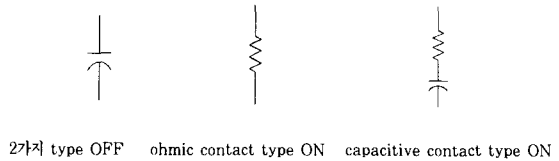
Packaging(스위치의 신뢰성과 연관되는 패키징 단가가 고가이므로 전체 제작비용의 상승) High-power handling(대부분 20~50mW이며 0.2~10W 까지 power handling개선의 필요성) 높은 구동전압(20~80V)을 요구해 전압상승 변환 칩(voltage up - converter chip)이 필요하다. 또 하나의 단점은 전자의 움직임을 이용한 반도체 소자에 비하여 느리다. Membrane switch는 8sec, cantilever switch는 20sec정도이다.

해결해야 할 문제점을 안고있는 RF MEMS Switch 연구 그룹은 아래 표와 같다.

Industry	Academic
Raytheon	Lincoln Labs
Rockwell Science Center	Northeastern University
Analog Devices	University of Michigan
Hughes Research Labs	Purdue University
Thomson CSF	University of Illinois

다음은 RF MEMS Switch의 기본 개념에 대해 다루어 본다. 먼저, RF신호를 전달하는 방법에는 2가지 contact type이 있다.

- Metal-to-Metal contact(ohmic contact)
 - Capacitive contact(metal-to-dielectric)
- 등가회로



FOM(figure of merit) : 스위치 수행능력에 대한 일반적인 측정.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{on} C_{off}}$$

이 식의 의미는 사용 가능한 가장

큰 주파수 즉 cut off 주파수를 의미하며, GaAs MESFET나 PIN-diode에 비해 10배 이상 큰 수 천 GHz로 계산된다.[17]

즉, MEMS 스위치의 낮은 손실, 낮은 기생성분 특성을 증명한다. 또한 사용 가능한 가장 낮은 주파수 영역은 값에 의해 결정된다.

구조물 형태로는 주로 cantilever, bridge, membrane 구조물 등이 연구되어 왔으며 스위치 on/off 방식에 따라 series switch와 shunt switch로 나뉜다. 지금까지 연구되어진 스위치의 동작 특성을 살펴보겠다.

MEMS Series Switches

위 그림은 두 가지 타입의 MEMS Series Switches 이다. (a), (b)는 broadside switch 이고 (c)는 inline series switch이다. 두 타입의 차이점은 actuation의 방향이다. 즉 (a), (b)는 cantilever가 transmission line과 수직이고 (c)는 일치한다. 근본적인 차이는 (c)의 경우 RF signal이 inline switch를 지난다. 결과적으로 inline switch 자체를 두꺼운 메탈로 제작해야 한

다. 반면, broadside switch는 contact 되는 부분만 메탈처리 한다. 나머지 actuation 부분은 dielectric 또는 dielectric/metal cantilever 또는 fixed - fixed beam 형태이다.

MEMS Series Switch의 electrical model

결과적으로 up-state capacitance는 2~4fF, contact resistance는 1옴, 40GHz까지 insertion loss는 -0.1dB 이하이고 cut off frequency는 30~80THz에 이른다.

MEMS Shunt Switch

Raytheon사에서 처음 제안한 MEMS Capacitive Shunt Switch이다.[18],[19] fixed - fixed metal beam 디자인 형태로서 두개의 anchor가 CPW ground plane에 위치한다. 결과적으로 얇은 금속으로 만들어진 membrane이 ground 역할을 할 수 있다. 10~60V의 pull-down voltage를 Electrode(transmission line)에 가함으로써 electrostatic actuation이 일어난다. 스위치가 up-state position일 때 ground와 신호선 사이가 low capacitance(25~75fF)로써 스위치가 ON 동작하여 RF signal이 통과하게 되며, down-state position에

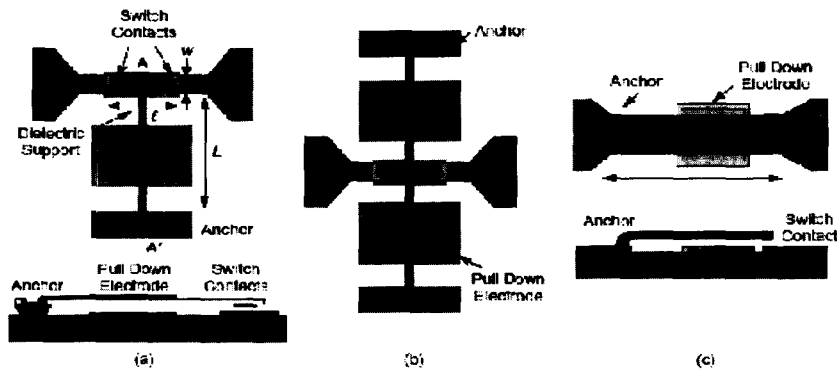


그림 34. (a) One electrode (b) Two electrode (c)Inline switch

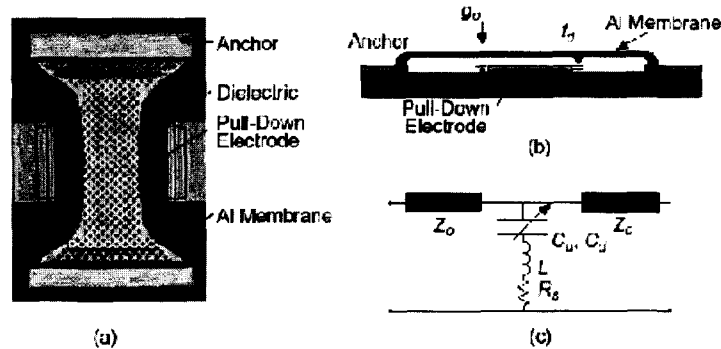


그림 35.

서는 1.2~3.6pF의 capacitance에 의해 short circuit이 되어 스위치가 OFF 동작하게 된다. 비교적 spring constant가 작은 membrane type은 cantilever beam type 보다 높은 전압을 요구하는 대신 스위칭 속도가 빠르다. 그 후 actuation voltage를 9V까지 떨어트린 meander spring-suspended switch가 발표되는 등 switch 개선을 위한 연구가 진행 중에 있다.[20]

1995년, dc-contact(series), capacitive (shunt) switch가 발표된 이후, 오늘날 0.1-120 GHz까지 다양한 switch들이 연구되고 있다. 향후 RF MEMS Switch의 몇 가지 단점들을 개선한다면 다양한 통신 시스템의 응용과 변화가 예상된다.

REFERENCES

- [1] Hector J. De Los Santos "RF MEMS circuit Design for wireless communications" Artech House 2002
- [2] Andrew R. Brown, Gabriel M. Rebeiz "A Ka-band Micromachined Low-Phase-Noise Oscillator" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.47 August 1999.
- [3] Kun Wang, Ark-Chew Wong, and Clark T.-C. Nguyen "VHF Free-Free Beam High-Q Micromechanical Resonators" Journal of Microelectromechanical Systems., Vol.9 September 2000
- [4] Krishnaswamy, S. V., et al., "Compact FBAR Filter Offer Low-Loss Performance," Microwave RF, September 1991, pp.127-136
- [5] Kun Wang, Clark T.-C. Nguyen "High-Order Medium Frequency Micromechanical Electronic Filters" Journal of Microelectromechanical Systems., Vol.8 December 1999
- [6] K.Y.Park, J.Y.Park, H.K.Choi, J.C.Lee, B.Lee, J.H.Kim, N.Y.Kim, J.Y.Park, G.H.Kim, D.W.Kim, J.U.Bu, K.W.Chung "A Novel Ka-band Bandpass Filter Using LIGA Micromachined Process" Microwave Conference, Asia-Pacific, 2000
- [7] Serge Perrot, Christian Person "Narrow-band Filters for Millimeter-Wave Applications" EUMC, 2000

- [8] Futoshi Kuroki, Satoru Shinke, Tsukasa Yoneyama, Hiroya Sato "Band-Widening of Ceramic Resonator Loaded NRD Guide Band-Pass Filter at 60 GHz" EUMC, 2001
- [9] P.Blondy, A.Pothier, E.Fourn, C.Champeaux, P.Trissant, A.Catherinot, G.Tanne, E.Rius, C.Person, F.Huret "Tunable Interdigital Coplanar Filters Using MEMS Capacitors" EUMC, 2002
- [10] Gabriel M. Rebeiz, Guan-Leng Tan, Joseph S. Hayden "RF MEMS Phase shifters: design and Applications" IEEE Microwave Magazine June 2002
- [11] N.S. Barker and G.M. Rebeiz " Optimization of Distributed MEMS Phase Shifter" IEEE MTT-S Digest
- [12] Andrea Borgioli, Yu Liu, Amit S. Nagra, and Robert A. York "Low-Loss Distributed MEMS Phase" IEEE Microwave and Guide Wave Letters, Vol. 10, No. 1, January 2000
- [13] Joseph S. Hayden and Gabriel M. Rebeiz "Low-Loss Cascadable MEMS Distributed X-Band Phase Shifters" IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 10, No. 4, April 2000
- [14] Yu Liu, Andrea Borgioli, Amit S. Nagro, and Robert A. York "K-Band 3-Bit Low-Loss Distributed MEMS Phase Shifter" IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 10, No. 10, October 2000
- [15] G.L. Tan, R.E. Mihailouich "A Very-Low-Loss 2-Bit X-Band RF MEMS Phase Shifter" 2002 IEEE MTT-S Digest
- [16] K. E. Peterson, "Micromechanical membrane switches on silicon," IBM Journal of Research and Development, Vol. 23, pp. 376-385, July 1971.
- [17] Yao, Z.J. ; Chen, S. ; Eshelman, S. ; Denniston, D. ; Goldsmith, C. "Micromachined low-loss microwave switches," in Microelectromechanical Systems, Journal of, Vol. 8, Issue : 2, June 1999, pp. 129-134.
- [18] C.L. Goldsmith, J. Randall, S. Eshelman, T.H. Lin, D. Denniston, S. Chen, and B. Norvell, "Characteristic of micromachined switches at microwave frequencies," IEEE Int. Microwave Symp. Dig., pp. 1141-1144, June 1996.
- [19] C.L. Goldsmith, Z. Yao, S. Eshelman, and D. Denniston, "Performance of low-loss RF MEMS capacitive switches," IEEE Microwave Guided Wave Lett., Vol.8, pp.269-271, Aug. 1998.
- [20] Pacheco, S.P., L.P.B. Katehi, and C. Nguyen, "Design of Low Actuation Voltage RF MEMS Switch," 2000 IEEE Int. Microwave Symp., Boston, MA, 2000.



이 중 철

1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업
 1985년 2월 : 한양대학교 전자공학과 석사 1989년 12월 : 미국 Arizona State Univ. 전자공학 석사
 1994년 5월 : 미국Texas A&M Univ. 전자공학 박사 1998년 4월 : 광운대학교 전자공학과 조교수 2002년 4월~현재 : 광운대학교 전자공학과 부교수 관심분야 : 초고주파 및 광전자 공학, RF MEMS, 밀리미터파 능동 및 수동소자



이 재 선

2002년 2월 : 순천향대학교 정보통신공학과 졸업
 2002년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 석사 과정 관심분야 : Passive Device, RF MEMS, Base-band design



이 훈

2002년 2월 : 강남대학교 전자공학과 졸업 2002년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 석사 과정 관심분야 : RF MEMS



김 기 병

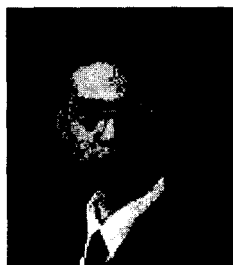
2000년 2월 : 순천향대학교 정보통신공학과 졸업
 2002년 2월 : 광운대학교 전자공학과 석사 2002년 3월~현재 : 광운대학교 전자공학과 박사과정
 관심분야 : Ferroelectric Device, RF MEMS,

RF-Tunable Device



이상근

2002년 2월 : 호서대학교 전자공학과 졸업
 2002년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 석사 과정 관심분야 : Passive Device, RF MEMS, Ferroelectric Device



윤 대 순

2000년 2월 : 국민대학교 전자공학과 졸업 2002년 2월 : 광운대학교 전자공학과 석사 2002년 3월~현재 : 광운대학교 전자공학과 박사 과정 관심분야 : RF MEMS, Ferroelectric Device