

主 題

RF-MEMS를 이용한 밀리미터파 소자 기술

광운대학교 박경열, 이종철

차 례

- I. 서 론
- II. Microelectromechanical Systems (MEMS) or Micromachining Process
- III. 결 론

I. 서 론

최근 통신 시장의 급속한 발달로 밀리미터파 대역의 이용 가능성이 크게 현실화되고 있으며, 일부 지역에서는 상품화 요구도 가시화되고 있다. 이러한 밀리미터파 대역은 전통적으로 주로 군사용으로 주파수가 할당되어 레이더 시스템, 전자전, 미사일 추적장치등으로 연구되어져 왔다.

그러나 새로운 상업적 필요성에 의해 군사용과 더불어 밀리미터파 대역의 민수 사용이 기대되고 있다. 30 GHz 대역은 Local Multipoint Distribution Service (LMDS), 60-77 GHz 대역은 차량 충돌방지 시스템 (Vehicular Collision-Avoidance System), 12-45 GHz 대역은 여러 가지 군사용 위성 통신용으로, 그리고 30-95 GHz 대역은 다양한 차량관련, 군사용 레이더, 미사일 추적장치용 등으로 할당되어 있다. 특히 60 GHz 대역은 강력한 산소분자 흡수 특성으로 인해 Wireless Local Area Networks(WLAN's)-특히 건물 내 네트워크, 격리된 신호처리를 요하는 다

른 상업적, 군사적 분야-에 응용이 가능한 것으로 주목받고 있다. 또한 21세기에는 W 밴드 (75.0-110.0 GHz) 및 F 밴드 (90.0-140.0 GHz) 대역에서의 통신 수요도 창출될 것으로 예측되고 있다 [1-3].

지금까지는 주로 GaAs 기판 위에 단일 집적 마이크로파 회로(MMIC)로써 이러한 통신 분야의 RF/마이크로파용 능동 및 수동 소자들을 설계, 제작하고 있지만, 주파수가 밀리미터파 대역으로 높아짐에 따라 현재의 MMIC 제조 기술로는 성능의 한계에 다다를 것으로 예측되고 있다. 따라서, 미국을 비롯한 선진 각국들에서는 이러한 밀리미터파 대역에서 좀 더 많은 선택도를 가지면서도, 값싸고, 가볍고, 신뢰성 있는 소자들을 만들기 위한 밀리미터파 단일집적 회로(MIMIC)연구이외에 저가, 고집적 회로를 형성할 수 있는 MCM(Multichip - Module technology), 반도체 가공기술을 응용한 초소형 구조물을 만드는 MEMS (Micro-ElectroMechanical System) 기술을 RF에 접목한 RF-MEMS 가 이미 진행되고 있다.

마이크로파 또는 밀리미터파 단일 집적 회로들로 구성되는 통신 시스템에는 LNA, Power Amp., Oscillator, Mixer 등의 능동소자(Active Device) 뿐만 아니라, 신호의 전송 및 수신에 필요한 고성능의 안테나, 그리고 이러한 능동소자와 능동소자, 그리고 안테나를 연결하는 필터, 공진기, 커플러, 전력 결합기(power combiner) 등의 수동소자들의 개발도 필수적이라 하겠다.

본 고에서는 이러한 마이크로파 및 밀리미터파 대역의 MEMS소자 기술과 그 응용 예들을 살펴보고자 한다.

II. Microelectromechanical Systems (MEMS) or Micromachining Process

MEMS 기술은 1959년 Feynman에 제안된 이래 반도체 제조 공정의 발달과 함께 발전된 분야이다 [11]. 이 기술에서는 회로를 기판위에 구현하기 위하여 사진 및 화학적 식각 기술(photographic and chemical etching technique)이 사용된다. 반도체 집적회로 기술의 발달에 따라 MEMS 또는 마이크로머쉬닝 분야에서도 구현되는 회로의 크기가 초미세화 되어 가고, 따라서 일반 IC 공정이 갖고 있는 장점들을 거의 공유하게 되었다 [12-15]. 하지만 이러한 기술이 일반 반도체 IC 공정의 큰 차이가 있다면, 전자가 2차원적인 기술이라면, 후자는 3차원적인 제조 기술이라는 점이다. 본 고에서는 일반 MEMS 제조공정과 이러한 기술이 밀리미터파 소자에 응용되고 있는 연구 결과들을 살펴보고자 한다.

1. MEMS 제조 기술

(a) Bulk micromachining

Bulk micromachining 기술은 웨이퍼 또는

기판 물질의 일부분을 선택적으로 제거하는 것을 포함하게 된다 [16] (그림 1). 이러한 과정은 식각(etching) 프로세스에 의해 가능하다. 웨이퍼 벌크 내에 다양한 기계적인 구조들을 제작하기 위해 높은 방향성을 갖는 에천트(anisotropic etchant)와 비방향성 에천트(isotropic etchant), 그리고 웨이퍼의 결정학적 방향(crystallographical orientation)을 주의깊게 결합함으로써 식각되는 비율이 조절되게 된다. 또한 식각이 천천히 진행되는 과도핑(heavily doping)된 영역과 식각 프로세스가 모두 멈추게 되는 pn 접합 부분을 적절히 생성시키므로써 deep cavity 형성이 가능하게 된다.

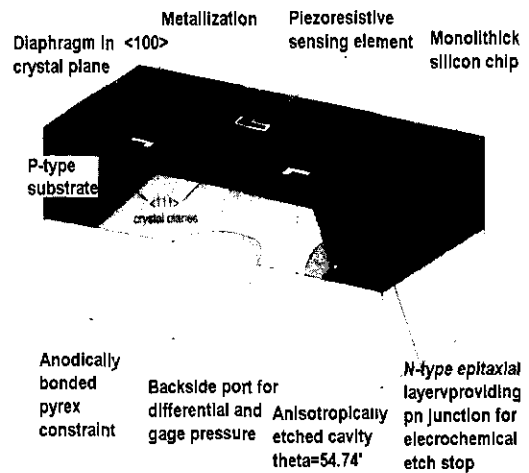
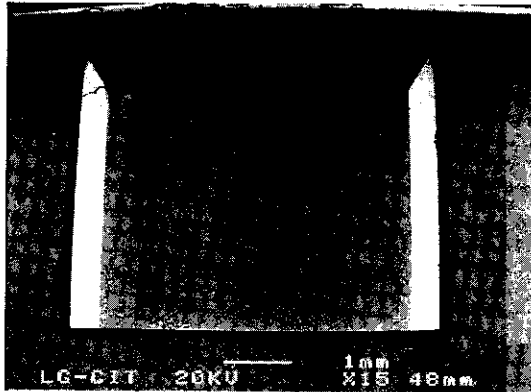


그림 1. Bulk micromachined pressure sensor [16].

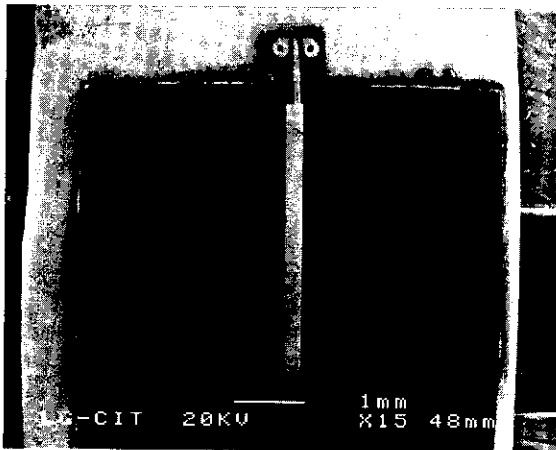
이러한 deep cavity는 압력 센서를 위한 진동판(diaphragm)이나 높은 Q값을 갖는 cavity 공진기 제작등 많은 소자 응용에 필수적인 구조이다.(그림 2.참조)

(b) Surface micromachining

Surface micromachining 기술에서는 박막층(thin-film layers)을 웨이퍼 또는 기판위에 증착



(a)



(b)

그림 2. bulk-micromaching을 이용한 cavity resonator(17)

시키고, 이 film 위에 회로를 구현하는 방법이다. open area 또는 free-standing mechanical 구조가 필요한 영역에 증착된 박막층은 sacrificial (S) material이라 불리우고, free-standing 구조외의 material은 structural material이라고 불린다. 이 기술은 60년대, 70년대에 미국 IBM을 중심으로 발전하였는데, Westinghouse Electric Co.에서는 이 방법을 사용하여 micromechanical switch, electronic filter등을 개발하였으며, IBM에서는 display, electrostatically actuated mechanical switches 와 sensor등을 개발

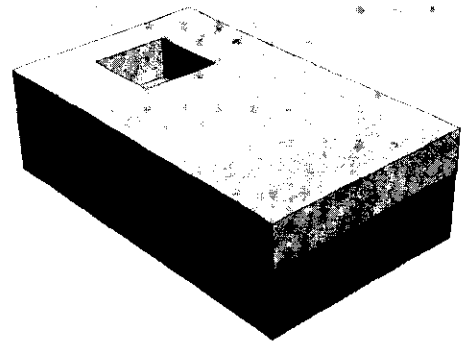
하였다.

그림 3에는 이 surface micromachining 공정 흐름도를 표시하였다 [18].

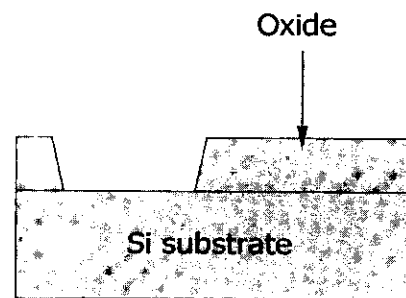
(c) LIGA process

MEMS 기술의 장점은 구조의 2차원적 한계를 극복하고 3차원적 구조를 만들어 낼수 있다는데 있다.

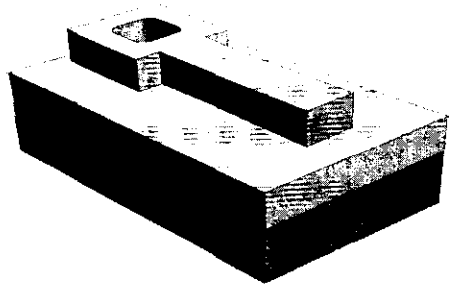
가공기술면에서도 전절에서 소개한 bulk micro-machining과 surface micromachining 기술은 2차원적 구조물 가공기술이고, 3차원 구조를 제작하는데에는 LIGA(Lithographie, Galvanoformung, Abformung : Lithography, Electroforming, Molding)기술을 이용하고 있다.



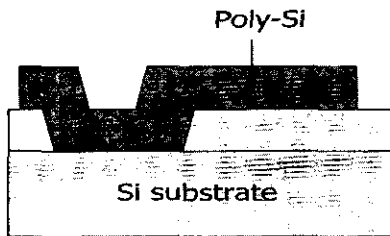
Deposit & pattern oxide



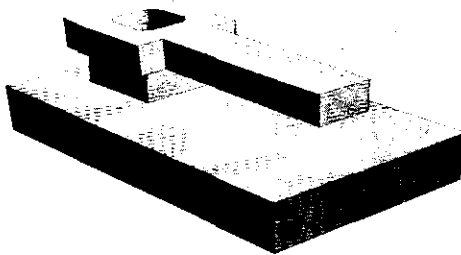
(a)



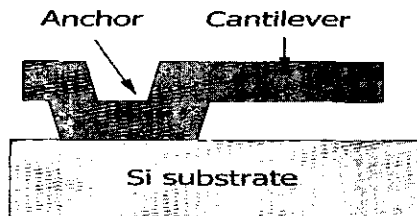
Deposit & pattern poly



(b)



Sacrificial etch



(c)

그림 3. Surface micromachining 공정 흐름도 [18].

LIGA 공정은 수 μm 에서부터 1 mm까지의 높이를 가지면서도 높은 aspect ratio를 갖는 구조물

을 만들 수 있어 통신분야, 초소형기계분야등 고 부가가치분야에 응용되고 있다(그림 4. 참조[19]). LIGA 공정기술은 주조방식(molding)과 같은 방법으로써 구조물은 수백 μm 의 두꺼운 photo resist(PMMA)에 원하는 구조의 X-ray mask를 올려 반도체의 사진공정처럼 X-ray를 투과시킨 후 현상시킨다음 만들어진 구조(mold)안에 니켈, 구리 또는 금 등을 채워 구조물을 만드는 기술이다.[19]

LIGA 공정은 bulk나 surface micromachining등 반도체 가공기술과는 달리 두께나 높은 aspect ratio를 요하는 구조물 제작에 유리하다. 하지만 X-ray lithography를 하기 위해서는 충분한 에너지를 갖는 synchrotron이 필요하다. 이는 고가일 뿐 아니라 몇몇 선진국만이 보유하고 있

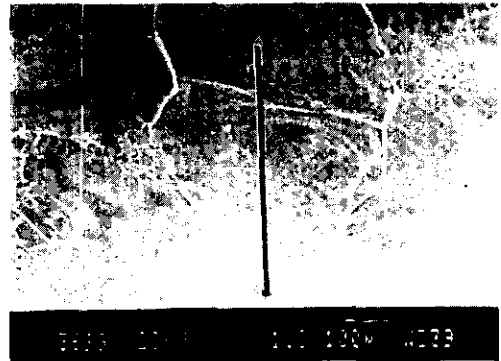


그림 4. 높은 aspect ratio를 갖는 LIGA 구조물[20]

는 기술이다. 현재 국내에서는 LIGA 공정기술 확보가 G-7 과제로 선정되어 있어 포항공대의 방사선 가속기를 이용한 과제가 전자부품연구소 (KETI) 주관으로 진행중이다.[20]

국외에서도 미국 국방부 주관으로 MIT, Stanford Univ., Univ. of Michigan, Ann Arbor, Univ. of Maryland 등 다수의 대학들이 참여한 MURI (Multidisciplinary University Research Initiative) - Program

에 밀리미터파 대역의 통신소자 개발에 LIGA 공정 기술을 이용하여 수행중이다.[21]

X-ray lithography의 경제적 단점을 극복하기 위해 반도체사진공정에 많이 응용되는 UV-light을 이용한 LIGA-like process 공정도 대학연구소와 각 기업체 연구소에서 활발히 진행되고 있다.

그림 5는 LIGA-like process를 이용한 Ka 대역에서의 대역통과 필터의 SEM과 측정결과를 보여주고 있다.[22]

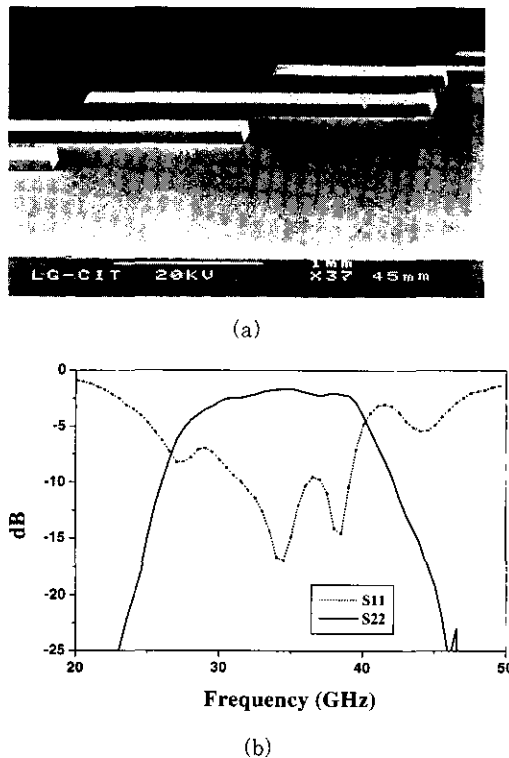


그림 5. Ka-대역 대역통과필터의 SEM (a) 과 측정 결과(b) [22]

2. 밀리미터파 MEMS 수동소자

MEMS 또는 micromachining 기술을 이용한 밀리미터파 소자 구현에는 보통 membrane-supported transmission line (microshield) 구조들을 사용하게 된다 [23]. 이러한 전

송선로 구조는 zero dispersion, very low loss, very small parasitics 등의 특성 뿐만 아니라 밀리미터파 영역에서 아주 우수한 성능을 보이고 있다. 이러한 소자들에 대한 측정은 대개 HP 8510C vector network analyzer와 Thru-Reflect-Line (TRL) calibration technique을 사용하여 이루어지고 있다 [24, 25]. 최근에는 미국 U. of Michigan, Ann Arbor의 Dr. Linda P. B. Katehi와 Dr. Gabriel M. Rebeiz를 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 고에서는 이러한 micromachined 소자들에 대한 연구 결과들에 대해 고찰해 보고자 한다.

(a) Micromachined Filter

밀리미터파 통신 시스템에 대한 시대적 요구가 다음에 따라 PCS network에서 기지국 (base station) 통신에 사용될 38 GHz radio link와 다목적 이동통신 시스템에 사용될 60 GHz 대역에서 사용될 수 있는 micromachined bandpass filter를 소개하고자 한다 [26]. Waveguide 기술이 가장 좋은 성능을 나타내고 있지만, 높은 제조비와 부피가 커지는 단점을 안고 있다. 일반적인 수동 전송로(microstrip 또는 CPW)은 기판에서의 유전체 손실과 방사손실이 커져 필터 공진기의 unloaded Q 값을 감소시키고, 결과적으로 높은 삽입 손실과 우수하지 못한 저지특성을 보이게 된다. 따라서 이러한 일반적인 전송로 구조로는 협대역의 특성, 우수한 스킵트 특성, 그리고 스펙을 만족하는 삽입손실을 얻기가 쉽지 않게 된다.

Si 또는 GaAs micromachining 기술은 대부분의 이러한 단점을 앓은 membrane을 갖는 기판 위에 회로를 구현함으로써 해결할 수 있다. 본고에서는 37 GHz 2 pole filter와 60 GHz 4 pole 필터를 소개하고자 한다. 그림 8에는 filter 설계에 사용한 기본 Shielded Membrane Microstrip (SMM) 구조를 도시하였다.

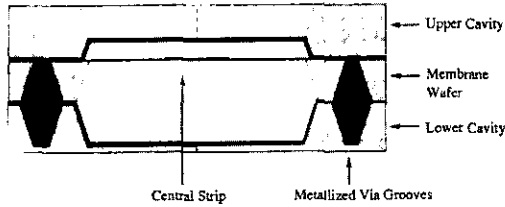


그림 6. Shielded Membrane Microstrip (SMM) 전 송로 구조(26).

그림 7에는 그림 6에 표시한 구조와 비슷한 3-layer micromachined microshield 전송로 구조를 이용한 단일 37 GHz micromachined bandpass filter를 표시하였으며, 그림 7에는 이 구조에 대한 밀리미터파 특성을 나타내었다. 37 GHz 에서의 unloaded Q값은 420 이고, 회로의 size는 5.3×3.5 mm 이다. 측정은 HP8510C Network Analyzer를 사용하였으며, 캘리브레이션은 NIST MULTICAL 소프트웨어 [24, 25]를 사용하는 TRL 과정을 이용하였다. 삽입 손실은 2.3 dB, 상대적 대역폭은 3.5 %를 나타내고 있다.

그림 9에는 60 GHz 4 pole 필터의 layout을 표시하였다. size는 5.7×4.0 mm 이다. 그림 12에는 이 구조에 대한 특성을 표시하였다. 측정된 unloaded Q값은 60 GHz에서 450이었다. 상대적인 passband는 8%. 측정된 삽입 손실은 1.5

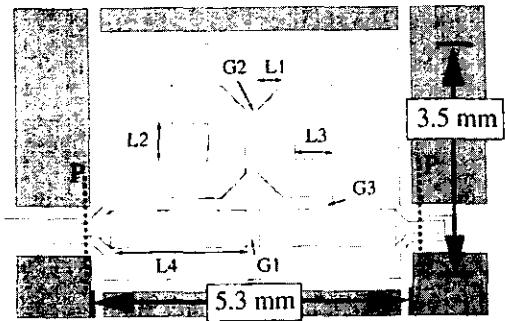


그림 7. 37 GHz에서의 2-pole bandpass filter의 layout (21).

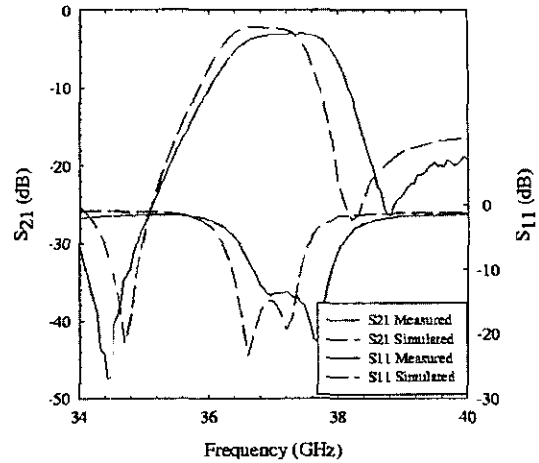


그림 8. 37 GHz에서의 2-pole bandpass filter의 이론치와 측정치 데이터 (26).

dB, 반사 손실은 -14 dB 이하의 값을 나타내고 있다. 측정된 out of band rejection 특성은 35 dB 이상이었다.

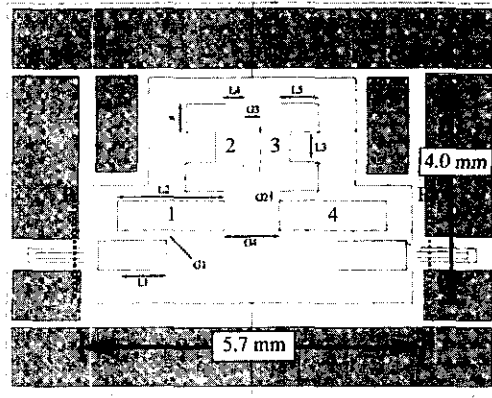


그림 9. 61.5 GHz에서의 4-pole bandpass filter의 layout (26).

(b) Micromachined Coupler
앞서 이미 설명한 SMM(Shielded Membrane Microstrip) 구조를 이용한 밀리미터파 대역의 directional coupler에 대한 연구 결과를 소

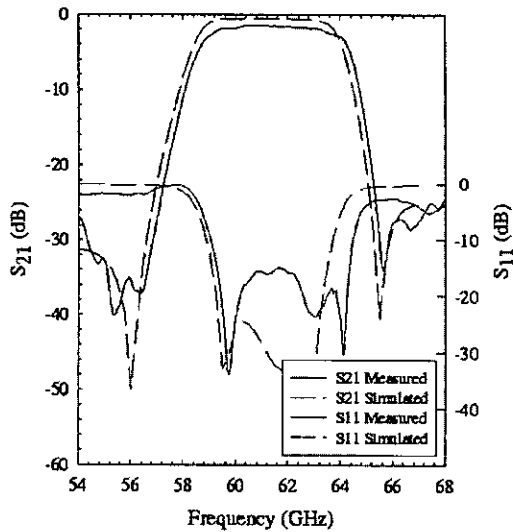


그림 10. 61.5 GHz에서의 4-pole bandpass filter의 이론치와 측정치 데이터 [26].

개하고자 한다. 그림 11에는 설계 및 제작된 micromachined coupler에 대한 사진을 표시하였다 [27]. 회로 설계는 이상적인 전송로 이론과 참고 문헌 [28]에 따라 이루어 졌다. coupler의 길이 L 은 20 GHz 이상의 주파수 대역에서 20 dB 이상의 커플링 특성을 나타내도록 4.5 mm로 정해졌다. 기판에 대한 파라미터는 상대 유전율이 1.05, 두께가 50 μm , 그리고 shield cover의 높이는 500 μm 이다. Coupler에 대한 시뮬레이션은 IE3D 소프트웨어를 이용한 coupled SMM 선로의 2.5D model을 사용하였다 [24]. Membrane은 상대 유전율이 4.5, 두께가 1.5 μm 인 균일한 sheet로 간주되었다.

측정은 micromachined filter의 경우와 마찬가지로 HP 8510C network analyzer와 thru-reflect-line(TRL) 방법 [24, 25]을 사용하는 NIST사의 MultiCal 프로그램을 이용하여 on-wafer 측정이 이루어 졌다. On-wafer 접촉은 150 μm 의 피치를 갖는 Picoprobe의 ground-signal-ground 형태의 프로브를 사용하였다. 그

림 14에는 밀리미터파 coupler에 대한 이론치와 측정치 데이터를 표시하였다. 측정된 coupling 응답(S_{31})은 10-60 GHz에서 20.1 ± 2.5 dB이며, 이론치와 상당히 일치함을 알 수 있다. 측정된 분리도(S_{41}) 특성은 예상치보다 훨씬 커서 52 GHz에서 최소 지향도(directivity)가 5-6 dB 정도인데, 이러한 불일치는 비이상적인 on-wafer 종단(termination)에 의한 측정에서의 부정확성에서 기인한다고 판단된다.

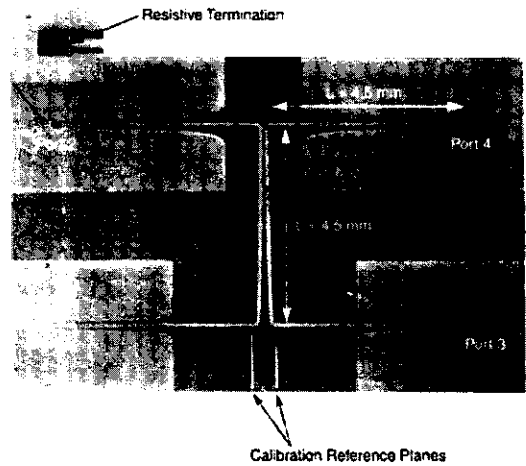


그림 11. 밀리미터파 micromachined coupler 사진[27].

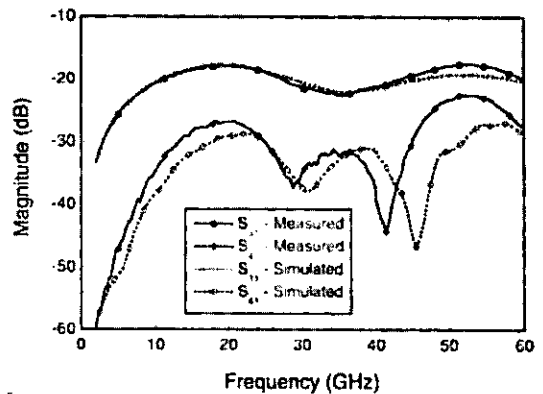


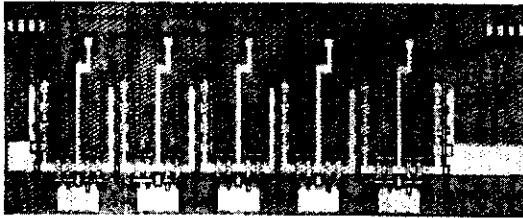
그림 12. Micromachined coupler의 coupled port와 isolation port의 이론치와 측정치 데이터 [27].

3. 밀리미터파 MEMS 기타 응용

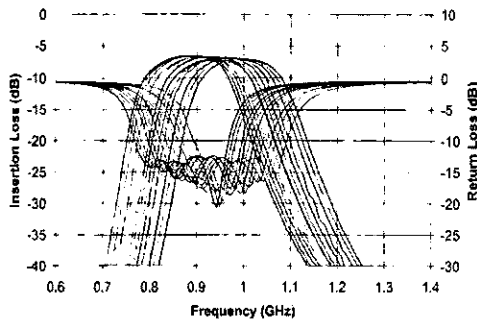
현재 미국을 필두로 선진국들은 다양한 RF-MEMS 응용분야를 개발, 상용화하고 있다. 수동소자뿐만 아니라, 능동소자, component module까지 점점 응용분야를 넓혀가고 있다.

(a) 가변대역통과여파기 (tunable bandpass filter)

그림 15는 미국의 대표적인 방위산업체인 raytheon사가 개발한 RF-MEMS를 이용한 5단 가변 대역통과 여파기이다. 중심주파수는 806~917 MHz에 변화영역은 8 MHz씩이고 대역폭은 165 MHz, 삽입손실은 6~7 dB, 반사손실은 전대역에서 10 dB이하로 나타나고 있다.[28]



(a)

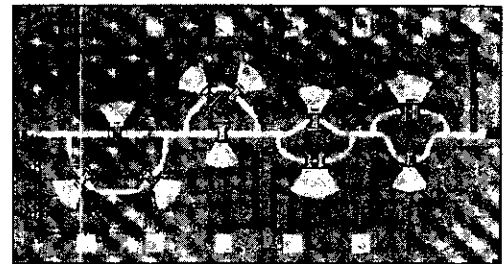


(b)

그림 13. 5단 가변 대역통과필터의 layout (a)과 측정결과 (b) [28].

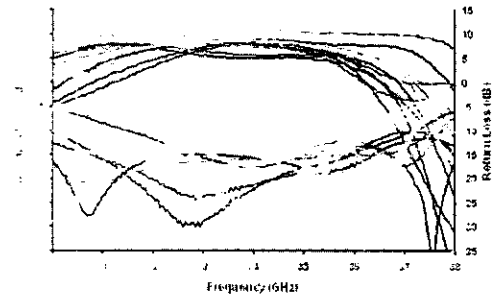
(b) 위상변화기(phase shifter)

그림 16은 RF-MEMS와 C-MOS 공정을 혼재한 Ka -대역의 ASIC에 의해 조절되는 위상변화기 (phase shifter) 이다[29]. 위상 변화는 0° ~ 337.5° 까지 22.5° 간격으로 변화하면서 최소 손실 2.25 dB, 평균 손실 2.5 dB를 보이고 있다.



180° 90° 45° 22.5°

(a)



(b)

그림 14. Ka-대역 위상 변화기(phase shifter)의 layout (a)과 측정결과 (b)

기존의 위상변화기는 아날로그단과 콘트롤러단을 각각 분리 구현, 집적화 했으나 MEMS 기술을 이용, 아날로그단인 위상변화기와 C-MOS 공정으로 구현한 콘트롤러단인 ASIC단을 동일 기판위에 집적화하므로 다른 소자구현기술보다 pin 수를 줄이고, 더욱 쉽게 집적화할 수 있는 장점을 갖는다.

(c) 저위상잡음발진기(Low-phase-noise oscillator)

현재까지는 발진기를 제작하는데 있어 높은 Q 값

을 얻기 위해서는 유전체 공진기(dielectric resonator)를 많이 사용하였다. 하지만 유전체 공진기는 기판에 집적화하는데 있어 공진기의 위치에 따라 커플링양이 달라지게 된다. 그림 15는 이를 극복하기 위해 MEMS기술을 이용, membrane 타입의 헤어핀 공진기를 제작하여 충분히 만족하는 높은 Q 값을 갖는 공진기를 제작, 발진기에 응용하였다.[30]

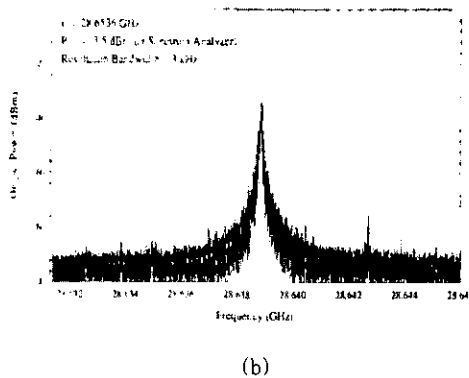
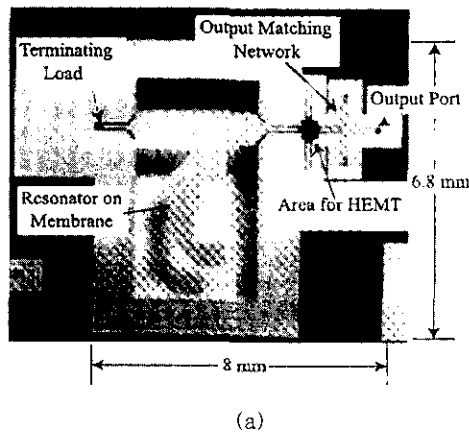


그림 15. Ka-대역 저위상잡음 발진기의 layout (a)과 위상잡음측정결과 (b) [30]

중심 주파수 28.65 GHz로 unloaded Q 값이 약 460정도 이며 위상잡음은 100-kHz offset 주파수에서 -92 dBc/Hz, 1-MHz offset 주파수에서는 -122 dBc/Hz을 위상잡음을 갖는다. 이는

micromachined 공진기를 이용, 유전체 공진기를 사용하는 hybrid 구현기술만큼 충분히 경쟁력이 있음을 보여준다.

III. 결 론

본 고에서는 최근 활발히 진행되고 있는 밀리미터파 대역에서의 MEMS 기술에 대한 배경, 현황, 그리고 그 연구 결과에 대해 살펴보았다. 밀리미터파 대역에서의 응용 분야가 확대됨에 따라 기존의 소자 구현 방식으로는 한계가 있으며, 이를 극복하기 위해 기존의 MEMS 또는 micromachining 기술을 이용한 밀리미터파 반도체 소자 기술이 활발히 진행되고, 그 응용 분야가 점차 확대되어가고 있다. 본 고에서 소개한 Filter, Coupler, 공진기, 뿐만 아니라 스위치, 광소자, 디스플레이 분야등에서도 응용되고 있으며, passive elements인 인덕터, 커패시터등에도 이미 이러한 기술이 적용되고 있다. 반도체 집적 공정 기술이 발전함에 따라 현재 RF-MEMS 기술은 과거의 소자간의 단위공정을 벗어나 C-MOS공정과 아울러 전체 일괄집적공정으로 발전하고 있다.

이를 통해 집적화하는데 있어 소자간 bonding에 의한 손실을 줄이고 기존의 hybrid와 MMIC 공정에 비해 C-MOS 공정과 집적화하기가 용이하고 적은 손실, 높은 선형성을 갖을 뿐 아니라, 공정기술의 발전으로 micromachining 기술로 얻을 수 있는 회로의 size는 더욱 소형화되어 지고, 적용 주파수 대역도 그 회로 성능의 우수성을 그대로 유지하며 더욱 확장되리라 예측되며, 또 한 산업적 생산을 위한 공정기술의 수율, 비용, 재현성, 집적도에 관한 연구가 더욱 필요로 하고 있다.

*참고문헌

- [1] V. M. Lubecke, K. Mizuno, and G. M. Rebeiz, "Micromachining for Terahertz Applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1821-1831, Nov. 1998.
- [2] K. J. Herrick, J. G. Yook, and L. P. B. Katehi, "Microtechnology in the Development of Three-Dimensional Circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1832-1844, Nov. 1998.
- [3] S. Boret, H. Happy, G. Dambrine, E. Delos, A. Cappy, and E. Rius, "Broadband Distributed Model of CPW Passive Elements for the Design of mm-Wave ICs and Experimental Verification from 0.5 GHz to 110 GHz," *'98 Asia-Pacific Microwave Conf. Dig.*, pp. 817-820, 1998.
- [4] K. Hettak, N. Dib, A. F. Sheta, and S. Toutain, "A Class of Novel Uniplanar Series Resonators and Their Implementation in Original Applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 9, pp. 1270-1276, Sept. 1998.
- [5] L. Verweyen, W. H. Haydl, A. Tessmann, H. Massler, T. Krems, and Jo. Schneider, "Coplanar Branch-Line and Rat-Race Couplers for W-Band Applications," *26th Proc. European Microwave Conf.*, pp. 602-605, 1996.
- [6] K. Hettak, J. Ph. Coupez, T. Le Gouguec, S. Toutain, P. Legaud, and E. Penard, "Improved CPW to Slotline Transitions," *'96 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 1831-1834, 1996.
- [7] K. Hettak, N. Dib, and A. Omar, "A New Class of Miniature Radiationless CPW Shunt Stubs printed on the Center Conductor," *'99 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 1335-1338, 1999.
- [8] E. A. Soliman, P. Pieters, E. Beyne, and G. A. E. Vandenbosch, "Suppression of the Parasitic Modes in CPW Discontinuities Using MCM-D Technology-Application to a Novel 3-dB Power Splitter," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2426-2430, Dec. 1998.
- [9] N. Dib, L. P. B. Katehi, G. Ponchak, and R. Simons, "Theoretical and Experimental Characterization of Coplanar waveguide Discontinuities for Filter Applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, no. 5, pp. 873-882, May 1991.
- [10] N. Dib and L. P. B. Katehi, "Modeling of Shielded CPW Discontinuities Using the Space Domain Integral Equation Method (SDIE)," *J. Electromagnetic Waves Applicat.*, vol. 5, pp. 503-53, April 1991.
- [11] R. P. Feynman, "There's Plenty of Room at the Bottom," presented at the American Physical Society Meeting in Pasadena, CA, Dec. 26, 1959; reprinted with permission of Van Nostrand Reinhold in *J. Microelec-*

- tromechanical Systems*, vol. 2, 1992, pp. 60-66.
- [12] L. P. B. Katehi and G. M. Rebeiz, "Novel Micromachined Approaches to MMICs Using Low-Parasitic, High-Performance Transmission Media and Environments," *'96 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 1145-1148, 1996.
- [13] T. L. Willke and S. S. Gearhart, "LIGA Micromachined Planar Transmission Lines and Filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 10, pp. 1681-1688, Oct. 1997.
- [14] L. P. B. Katehi, et al., "Si micromachining in high-frequency applications," *The Industrial Electronics Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1997, pp. 1547-1575.
- [15] C. Y. Chi and G. M. Rebeiz, "Planar Microwave and Millimeter-Wave Lumped Elements and Coupled-Line Filters Using Micromachining Techniques," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, no. 4, pp. 730-738, April 1995.
- [16] J. Bryzek, K. Petersen, and W. McCulley, "Micromachines on the March," *IEEE Spectrum*, pp. 20-31, 1994.
- [17] 송기재, 윤법상, 배중선, 박경열, 이종철, 이병제, 김중현, 김남영, 박재영, 김근호, 부종욱, 정기웅, "Micromaching 기술을 이용한 밀리미터파 cavity 공진기," 한국 전자파학회 논문지 심사중.
- [18] William C. Tang, "Overview of MEMS Fabrication Technology," *IEEE, MTT-S workshop notes (Microwave and Photonic appl. of MEMS)*, Boston, 2000.
- [19] 신상모, "MEMS 기술의 동향," 전자공학회지 제 24권, 제10호, pp.1175~1195, 1997년 10월
- [20] 전자부품연구소, 메카트로닉센터 Homepage
- [21] EE school of Stanford Univ. Homepage
- [22] K. Y. Park, J. Y. Park, H. K. Choi, J. C. Lee, J. H. Kim, B. Lee, N. Y. Kim, J. Y. Park, G. H. Kim, D. W. Kim, J. U. Bu, and K. W. Chung, "A Novel Ka-Bandpass filter using LIGA Micromachined Process," Proc. 2000 Asian-Pacific Microwave Conference, pp. 1306-1309, Sydney, Australia, Dec. 2000.
- [23] L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "Novel Micromachined Approaches to MMICs Using Low-Parasitic, High-Performance Transmission Media and Environments," *'96 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 1145-1148, 1996.
- [24] R. B. Marks, "A Multiline Method of Network Analyzer Calibration," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, no. 7, pp. 1205-1215, July 1991.
- [25] R. B. Marks and D. F. Williams, Multical v 1.00, NIST, Aug. 1995.
- [26] P. Blondy, A. R. Brown, D. Cros, and G. M. Rebeiz, "Low-Loss Micromachined Filters for Millimeter-Wave Communication Systems," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.

- 46, no. 11, pp. 1845-1849, Nov. 1998.
- [27] S. V. Robertson, A. R. Brown, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "A 10-60 GHz Micromachined Directional Coupler," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1845-1849, Nov. 1998.
- [28] C. Smith, "RF-MEMS Devices and Circuits for Radar and Receiver Application," *IEEE, Proceeding of MTT-S*, Boston, 2000
- [29] B. Pillans, et al, "Ka-Band RF-MEMS phase shifters for phased array application," *IEEE Proceeding of MTT-S*, Boston, 2000.
- [30] A. R Brown, "A Ka-band Micromachined Low-phase-noise Oscillator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 47, no. 8, pp.1504-1508, June, 2000.

박 경 열

1995~1999 광운대학교 전파공학과 공학사
 1999~2001 광운대학교 대학원 전파공학과 공학석사
 2000 대한민국 국회산업자원부 인턴
 관심분야 : RF MEMS, MMIC

이 종 철

1979~1983 한양대학교 전자공학과 공학사
 1983~1985 한양대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 1987~1989 Arizona State Univ. EE Dept. 공학석사
 1990~1994 Texas A&M Univ. EE Dept. 공학박사
 1994~1996 현대전자(주) 시스템IC연구소 광소자개발실 선임연구원
 1996~1998 광운대학교 전파공학과 전임강사
 1998~현재 광운대학교 전자공학부 조교수
 관심분야 : Optoelectronics, RF MEMS, RFIC/MMIC, Millimeterwave Devices