밀리미터파 수동소자 기술

이종철
광운대학교 전자공학부
RFIC/MMIC 교육 및 연구센터
E-mail : jclee@daisy.kwangwoon.ac.kr

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 레이다 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 ㎓ 대역은 차량 충돌방지 시스템(Vehicular Collision-Avoidance System), 12~45 ㎓ 대역은 여러 가지 군사용 위성통신용으로, 그리고 30~95 ㎓ 대역은 다양한 차량 관련, 군사용 레이다, 미사일 추적장치용 등으로 할당되어 있다. 특히 60 GHz 대역은 강력한 산소분자 흡수 특성으로 인해 Wireless Local Area Networks(WLAN's)-특히 건물 내 네트웍, 격리된 신호처리를 요하는 다른 상업적, 군사적 분야-에 응용이 가능한 것으로 주목받고 있다. 또한 21세기에는 W 밴드 (75.0~110.0 ㎓) 및 F 밴드 (90.0~140.0 ㎓) 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)연구가 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, 전력결합기(power combiner) 등의 수동 소자들의 개발도 필수적이라 하겠다.

본 고에서는 이러한 마이크로파 및 밀리미터파 대

역의 수동소자 기술과 그 응용 예들을 살펴보고자 한다.

Ⅱ. 단일 평면(Uniplanar) 구조

Coplanar waveguide(CPW) 및 Slotline 구조는 현재 광범위하게 사용되고 있는 마이크로 스트립 구조와는 달리 접지면이 신호면과 동일한 평면에 위치해 있으므로, MMIC/MIMIC 구현에 유리하며, 마이크로스트립 구조로 실현할 수 없는 밀리미터파 대역의 회로 구현을 할 수 있다는 장점이 있으며, 반도체 능동 및 수동소자들을 회로내에 직렬 또는 병렬 연결 형태로 손쉽게 집적시킬 수도 있다[4~6].

이러한 CPW와 Slotline 구조를 적절히 결합시켜 기본적인 공진기를 구성하고, 이러한 구조를 이용한 복잡한 구조를 갖는 회로 요소들을 설계하는 연구 결과들이 최근 발표되고 있다[4, 7, 8]. 그림 1에는 이러한 구조들의 예를 표시하였다. 그림에서 여러 가지 다양한 단일 평면 형태의 직렬 공진기 구조에 대한 가능성들을 살펴볼 수 있다. 이것은 여러 진행 모드들이 동시에 존재하며 하나의 회로 내에 실현됨을 의미하며, 새로운 방식에 의한 회로 설계의 가능성들을 제안하고 있다.

그림 2에는 그림 1에서 예시한 구조들에 대한 이론치와 실험치에 대한 그림이 표시되었다. 이 그림에 표시된 회로들에 대한 이론적인 해석은 간단한 전송로 이론과 결합된 method of moment 방법(Galerkin's technique)에 의해 구해지는 space-domain integral-equation (SDIE) 방식이 사용되었다[9, 10]. 이 방법은 CPW 구조의 discontinuity 문제를 연구하는 데 적용되어 왔고, 대체로 적용범위 내에서 정확도가 우수한 것으로 알려져 있다. 그림 2에 표시된 실험치는 0.254 ㎜ 두께의 Al_2O_3 기판위에 약 3 ㎛의 금도금하여 회로를 구성하여 측정한 결과치이다.

Ⅲ. Microelectromechanical Systems (MEMS) or Micromachined 수동소자

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 공정과의 큰 차이가 있다면, 전자가 2차원적인 기술이라면, 후자는 3차원적

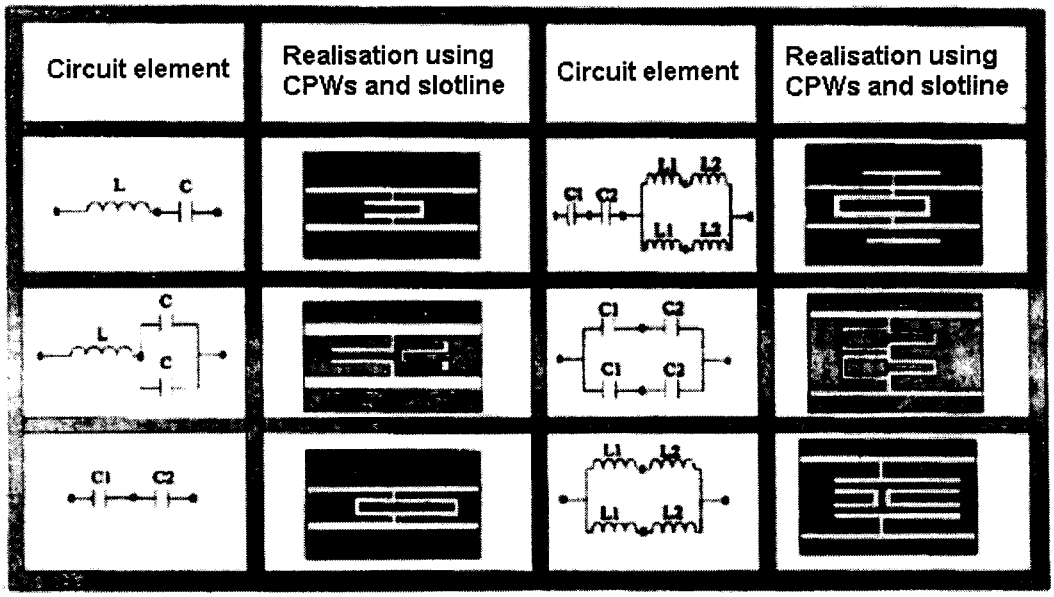


그림 1. Uniplanar 회로 기술에서의 회로 요소들에 대한 예[4].

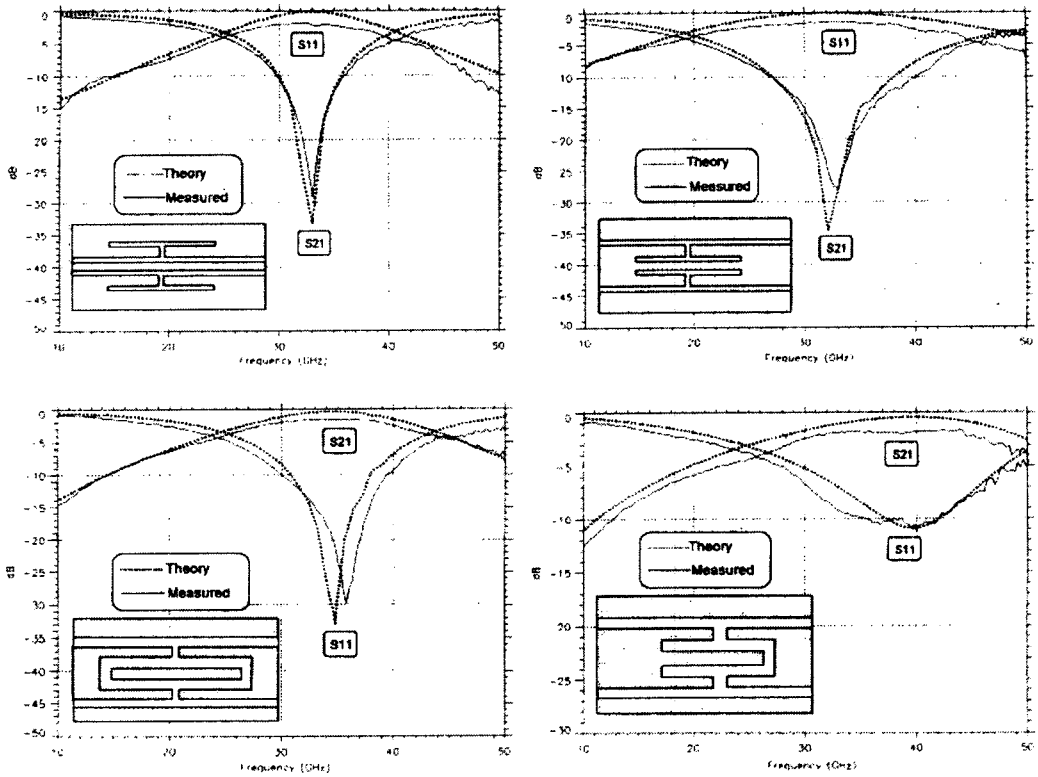


그림 2. Uniplanar 회로 요소들에 대한 이론치와 측정치 데이터[4].

인 제조 기술이라는 점이다. 본 고에서는 일반 MEMS 제조공정과 이러한 기술이 밀리미터파 소자에 응용되고 있는 연구 결과들을 살펴보고자 한다.

Ⅲ-1. MEMS 제조 기술

(a) Bulk micromachining

Bulk micromachining 기술은 surface micromachining 기술에 대한 상대적인 용어로, 회로를 기판의 표면보다는 bulk 기판 상에 구현하는 것을 의미한다. 이 공정은 웨이퍼 또는 기판 물질의 일부분을 선택적으로 제거하는 것을 포함하게 된다[16](그림 3). 여기에 포함되는 제조공정을 LIGA라고 부르는데, 'LI'는 X-ray lithography, 'G'는 electrodeposition, 'A'는 molding process를 나타내는 독일어적 표현용어이다. 이러한 과정은 식각(etching) 프로세스에 의해 가능하다. 웨이퍼 벌크 내에 다양한 기계적인 구조들을 제작하기 위해 높은

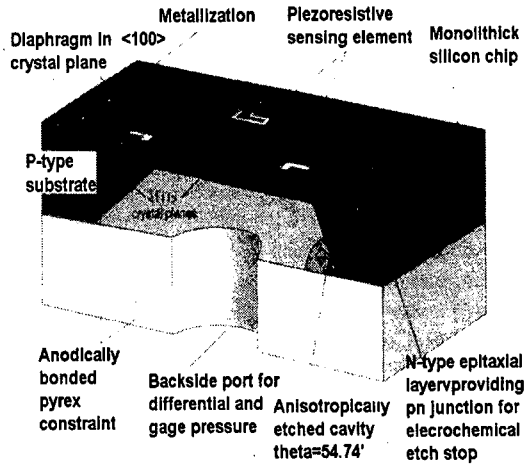


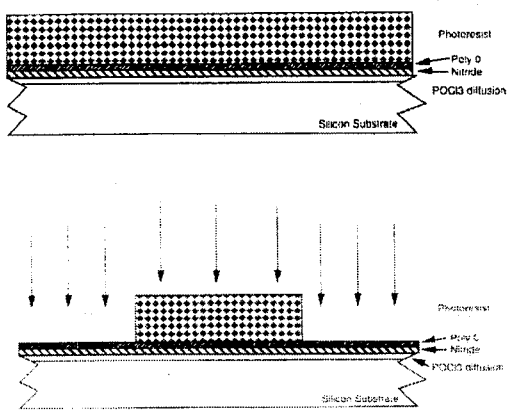
그림 3. Bulk micromachined pressure sensor[16].

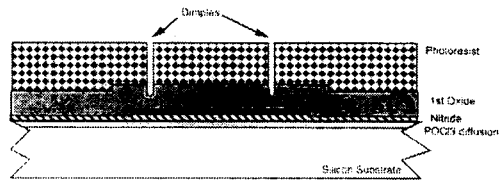
방향성을 갖는(anisotropic) 에천트와 비방향성(isotropic) 에천트, 그리고 웨이퍼의 결정학적 방향(crystallographical orientation)을 주의깊게 결합하므로써 식각되는 비율이 조절되게 된다. 또한 식각이 천천히 진행되는 과도핑(heavily doping)된 영역과 식각 프로세스가 모두 멈추게 되는 pn 접합 부분을 적절히 생성시키므로써 deep cavity 형성이 가능하게 된다. 이러한 deep cavity는 압력 센서를 위한 진동판(diaphragm)과 같이 많은 소자 응용에 필수적인 구조이다.

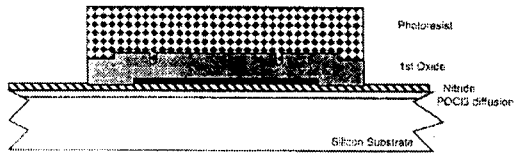
(b) Surface micromachining

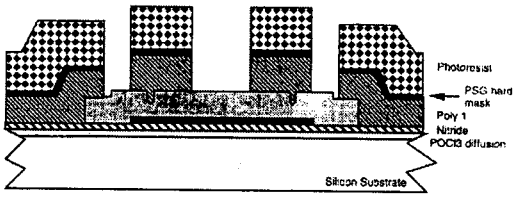
Surface micromachining 기술에서는 박막층(thin-film layers)을 웨이퍼 또는 기판위에 증착시키고, 이 film 위에 회로를 구현하는 방법이다. open area 또는 free-standing mechanical 구조가 필요한 영역에 증착된 박막층은 *sacrificial (S) material*이라 불리우고, free-standing 구조외의 material은 *structural material*이라고 불린다. 이 기술은 60년대, 70년대에 미국 IBM을 중심으로 발전하였는 데, Westinghouse Electric Co.에서는 이 방법을 사용하여 micromechanical switch, electronic filter등을 개발하였으며, IBM에서는 display, electrostatically actuated mechanical switches와 sensor등을 개발하였다.

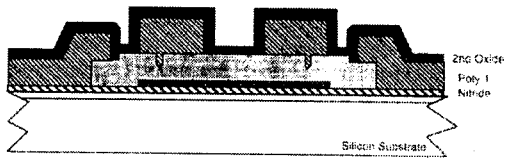
그림 4에는 이 surface micromachining 공정 흐름도를 표시하였다[17].

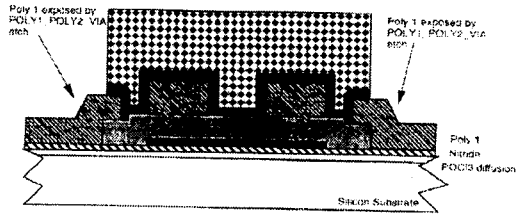


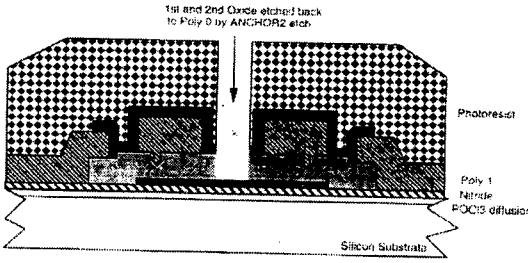












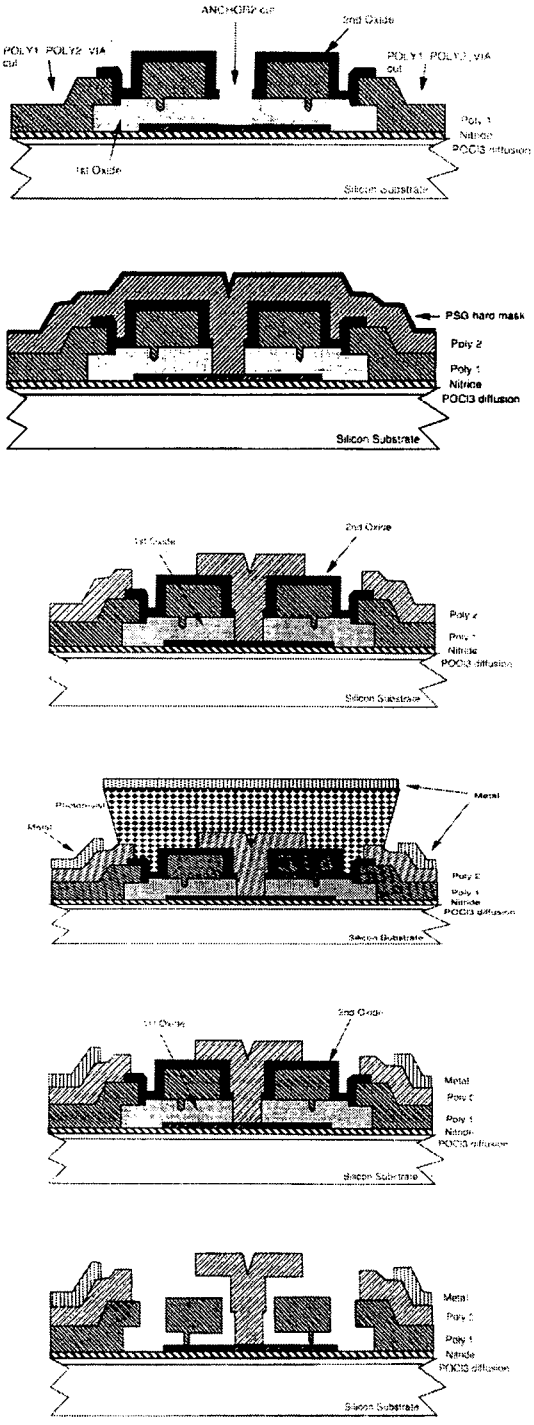


그림 4. Surface micromachining 공정 흐름도 [17].

Ⅲ-2. 밀리미터파 MEMS 수동소자

MEMS 또는 micromachining 기술을 이용한 밀리터파 소자 구현에는 보통 membrane-supported transmission line (microshield) 구조들을 사용하게 된다[18]. 이러한 전송선로 구조는 zero dispersion, very low loss, very small parastics 등의 특성 뿐만 아니라 밀리미터파 영역에서 아주 우수한 성능을 보이고 있다. 이러한 소자들에 대한 측정은 대개 8510C vector network analyzer와 Thru-Reflect-Line(TRL) calibration technique을 사용하여 이루어지고 있다[19, 20]. 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 passive 소자들에 대한 연구 결과들에 대해 고찰해 보고자 한다.

(a) Micromachined Filter

밀리미터파 통신 시스템에 대한 시대적 요구가 다가옴에 따라 PCS network에서 기지국 (base station) 통신에 사용될 38 ㎓ radio link와 다목적 이동통신 시스템에 사용될 60 ㎓ 대역에서 사용될 수 있는 micromachined bandpass filter를 소개하고자 한다[21]. 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 스커트 특

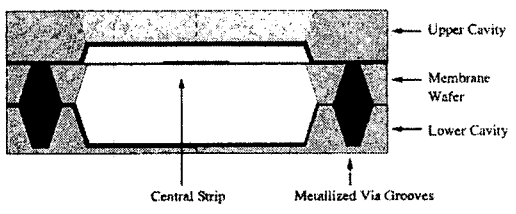


그림 5. Shielded Membrane Microstrip (SMM) 전송로 구조[21].

성, 그리고 스펙을 만족하는 삽입손실을 얻기가 쉽지 않게 된다.

Si 또는 GaAs micromachining 기술은 대부분의 이러한 단점을 얇은 membrane을 갖는 기판위에 회로를 구현함으로 해결할 수 있다. 본고에서는 37 ㎓ 2 pole filter와 60 ㎓ 4 pole 필터를 소개하고자 한다. 그림 5에는 filter 설계에 사용한 기본 Shielded Membrane Microstrip (SMM) 구조를 v시하였다.

그림 6에는 그림 5에 표시한 구조와 비슷한 3-layer micromachined microshield 전송로 구조를 이용한 단일 37 ㎓ micromachned bandpass filter를 표시하였으며, 그림 7에는 이 구조에 대한

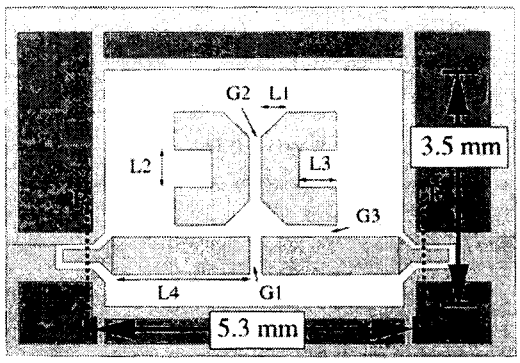


그림 6. 37 ㎓에서의 2-pole bandpass filter의 layout[21].

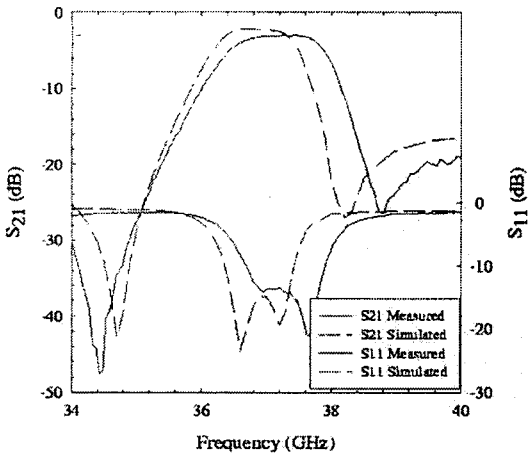


그림 7. 37 ㎓에서의 2-pole bandpass filter의 이론치와 측정치 데이터[21].

밀리미터파 특성을 나타내었다. 37 ㎓에서의 unloaded Q값은 420이고, 회로의 size는 5.3×3.5 ㎜이다. 측정은 HP8510C Network Analyzer를 사용하였으며, 캘리브레이션은 NIST MULTICAL 소프트웨어[19, 20]를 사용하는 TRL 과정을 이용하였다. 삽입 손실은 2.3 dB, 상대적 대역폭은 3.5 %를 나타내고 있다.

그림 8에는 60 ㎓ 4 pole 필터의 layout을 표시하였다. size는 5.7×4.0 ㎜ 이다. 그림 9에는 이

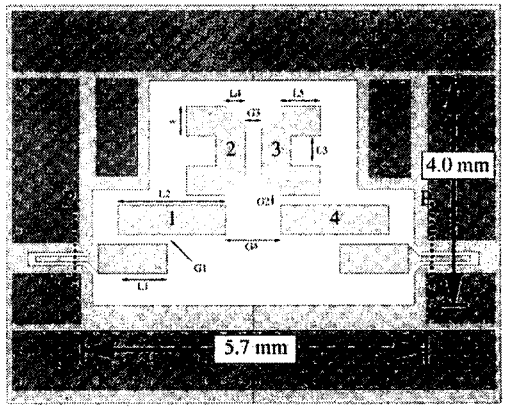


그림 8. 61.5 ㎓에서의 4-pole bandpass filter의 layout[21].

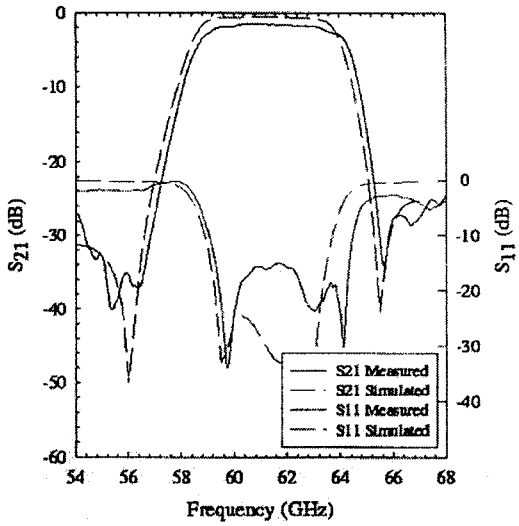


그림 9. 61.5 ㎓에서의 4-pole bandpass filter의 이론치와 측정치 데이터[21].

구조에 대한 특성을 표시하였다. 측정된 unloaded Q값은 60 ㎓에서 450이었다. 상대적인 passband는 8%, 측정된 삽입 손실은 1.5 dB, 반사 손실은 -14 dB 이하의 값을 나타내고 있다. 측정된 out of band rejection 특성은 35 dB 이상이었다.

(b) Micromachined Coupler

앞서 이미 설명한 SMM(Shielded Membrane Microstrip) 구조를 이용한 밀리미터파 대역의 directional coupler에 대한 연구 결과를 소개하고자 한다. 그림 10에는 설계 및 제작된 micromachined coupler에 대한 사진을 표시하였다[22]. 회로 설계는 이상적인 전송로 이론과 참고 문헌[23]에 따라 이루어 졌다. coupler의 길이 L은 20 GHz 이상의 주파수 대역에서 20 dB 이상의 커플링 특성을 나타내도록 4.5 ㎜로 정해졌다. 기판에 대한 파라미터는 상대 유전율이 1.05, 두께가 50 ㎛, 그리고 shield cover의 높이는 500 ㎛이다. Coupler에 대한 시뮬레이션은 IE3D 소프트웨어를 이용한 coupled SMM 선로의 2.5D model을 사용하였다[24]. Membrane은 상대 유전율이 4.5, 두께가 1.5 ㎛인 균일한 sheet로 간주되었다.

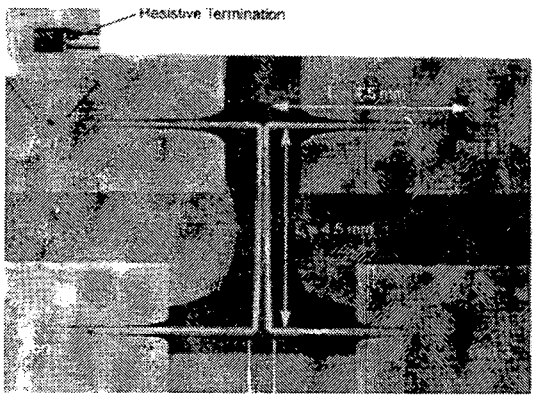


그림 10. 밀리미터파 micromachined coupler 사진[22].

측정은 micromachined filter의 경우와 마찬가지로 HP 8510C network analyzer와 thru-reflect-line(TRL) 방법[19, 20]을 사용하는 NIST사의 MultiCal 프로그램을 이용하여 on-wafer 측정이 이루어 졌다. On-wafer 접촉은 150 ㎛의 피치를 갖는 Picoprobe의 ground-signal-ground 형태의 프로브를 사용하였다. 그림 11에는 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 ㎓에서 최소 지향도(directivity)가 5~6 dB 정도인 데, 이러한 불일치는 비이상적인 on-wafer 종단(termination)에 의한 측정에서의 부정확성에서 기인한다고 판단된다.

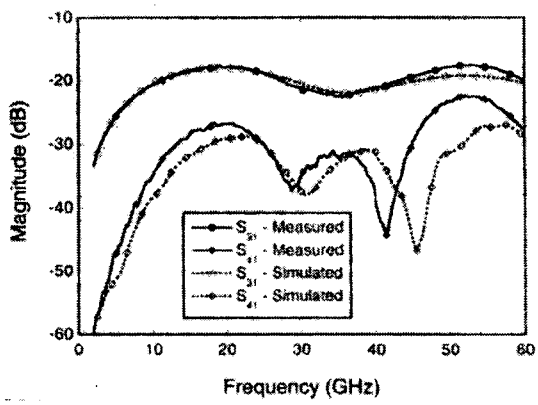


그림 11. Micromachined coupler의 coupled port와 isolation port의 이론치와 측정치 데이터[22].

Ⅳ. 결 론

본 고에서는 최근 활발히 진행되고 있는 밀리미터파 대역에서의 수동소자 기술에 대한 배경, 현황, 그리고 그 연구 결과에 대해 살펴보았다. 밀리미터파 대역에서의 응용 분야가 확대됨에 따라 기존의 마이크로스트립 전송로를 이용한 설계 방식으로는 한계가 있으며, Uniplanar 구조인 CPW와 Slotline 구조를 이용한 수동소자들이 밀리미터파 대역에서의 수동소자에 주로 사용될 것으로 기대되고 있다.

한편 기존의 MEMS 또는 micromachining 기술을 이용한 밀리미터파 반도체 소자 기술이 활발히 진행되면서, 그 응용 분야가 점차 확대되어가고 있다. 본 고에서 소개한 Filter, Coupler 뿐만 아니라, 공진기, 스위치등에도 응용되고 있으며, passive elements인 인덕터, 커패시터등에도 이미 이러한 기술이 적용되고 있다. 반도체 집적 공정 기술이 발전함에따라 MEMS 또는 micromachining 기술로 얻을

수 있는 회로의 size는 더욱 소형화되어 지고, 적용 주파수 대역도 그 회로 성능의 우수성을 그대로 유지하며 더욱 확장되리라 예측된다.

참 고 문 헌

[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. 1270-12761, 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. Microelectromechanical 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, 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] H. J. De Los Santos, *Introduction to Microelectromechanical(MEM) Microwave Systems*, Artech House, Boston, 1999.

[18] 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.

[19] R. B. Marks, "A Multiline Method of Network Analyzer Calibration", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, no. 7, pp. 1205-1215, July 1991.

[20] R. B. Marks and D. F. Williams, Multical v 1.00, NIST, Aug. 1995.

[21] 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.

[22] 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.

[23] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Reading, MA : Addison-Wesley, 1990.

[24] R. W. Klopfenstein, "A Transmission Line Taper of Improved Design", *Proc. IRE*, vol. 44, pp. 31-35, Jan. 1956.