

MEMS기술을 이용한 RF 수동소자 기술

연세대학교 이상노, 김일권, 육종관

- 차 례
- I. 서론
- II. MEMS 수동소자 기술
- III. 결론

I. 서론

현재, 통신서비스의 발전과 더불어 많은 서비스를 하나의 시스템에서 구현하는 것에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 것을 만족하기 위해서는 현재의 시스템에 보다 많은 부품들이 들어가야 하며, 이를 위해 부품들의 크기는 줄어들면서 더 나은 성능의 부품을 개발하는 것이 점차 필요하게 되었다.

무선통신용 RF부는 단일칩화를 목표로 많은 학계와 기업체에서 연구와 개발을 진행하고 있으나, 사용되는 수동소자 특히 인덕터나 공진기의 크기에 따른 집적화의 어려움을 겪고 있다. 1990년대 중반 이후의 다양한 RF MEMS 기술의 도입으로 저손실 전송선로(1), Micromachined 멤브레인을 이용한 공진기(2) 및 여파기 등의 연구가 이루어졌으며 다른 많은 RF 응용 소자들이 기존의 소자를 대체하기 위해 연구중이다. RF MEMS 기술은 현존 시스템에 비해 무게, 가격, 성능 및 전력 소모 등에서 진보된 시스템을 구현할 수 있는 기술로 많은 관심이 고조되고 있다. 이러한 RF MEMS 구조기술은 효율적이고 저가격 회로와 시스템을 구현하는데 용이한 기술이다. 특히 현재의 통신용 트랜시버의 경우, 수동소

자가 전체 시스템 보드의 대부분의 면적을 차지하고 있는 상황에서 수동소자의 소형화 및 고성능화는 미래의 통신시스템을 구현하는데 필수적인 요건이라 할 수 있다.

MEMS 기술을 이용하여 높은 Q값을 갖는 크기가 작은 수동소자 부품을 개발하는 것은 저전력, 저비용으로 구현이 가능하며 트랜시버의 시스템을 직렬화하는데 용이하다. 특히 높은 Q값을 갖는 MEMS 필터의 경우 현재의 트랜시버의 Q값을 증가시킴으로써 높은 성능을 갖는 구조를 제공하며 동시에 트랜시버의 크기 및 배터리의 크기를 줄여줄 수 있을 것이다.

본고에서는 MEMS 기술을 이용한 RF 수동 소자 중 저손실 전송선로, High Q 인덕터, 캐패시터 그리고 MEMS 공정을 이용한 TFBAR 대역통과 여파기에 대해서 살펴보고자 한다.

II. MEMS 수동소자 기술

1. ECPW (Elevated CPW)

저손실의 고성능 전송선로를 구현하기 위해 표면

마이크로머쉬닝 공정을 이용하여 ECPW(Elevated Coplanar Waveguide)가 개발되었다(3). 저저항성 실리콘기판이 갖는 유전체 손실을 최소화하며, 구조적인 파라미터에 의해 다양한 특성임피던스를 갖기 위한 구조로 CPW의 신호선로를 공기중으로 부양함으로써 유전체의 영향을 최소화할 수 있는 구조이다. [그림 1]에 ECPW의 기본구조가 소개되어 있다.

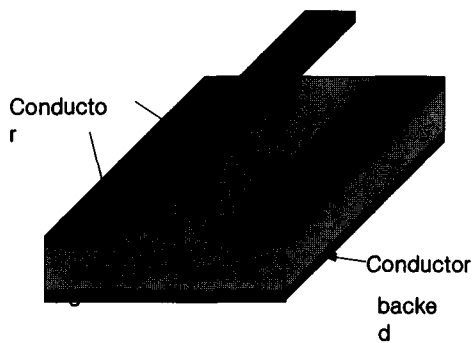


그림 1. ECPW(Elevated CPW)의 구조

[그림 2]는 ECPW의 S/W , H/W 의 변화에 따른 다양한 특성임피던스의 변화를 보여주고 있다. 여기서 S 는 신호선로와 접지면과의 이격거리, W 는 신호선로의 폭, H 는 공기중으로 부양된 신호선로의 유전체와의 이격거리이다. 특히, S/W 가 음인 경우는 신호선로와 접지면이 서로 겹쳐진 구조를 의미한다. 그림에서 확인할 수 있듯이 S 가 작아질수록 작은 특성임피던스를 갖게 되며, w 의 경우는 주어진 높이와 S 에 대하여 w 가 증가 할수록 인덕턴스가 낮아지는 효과로 인하여 작은 특성임피던스를 나타내게 된다.

[그림 3]은 Surface Micromachining 공정기법을 이용하여 제작한 ECPW의 공정도 예이다. 10 (m의 폴리이미드위에 PR 코팅과 후막공정, 도금작업을 통해 씨드층과 신호선로의 브리지, 신호 패턴을 위한 공정이 이루어진다.

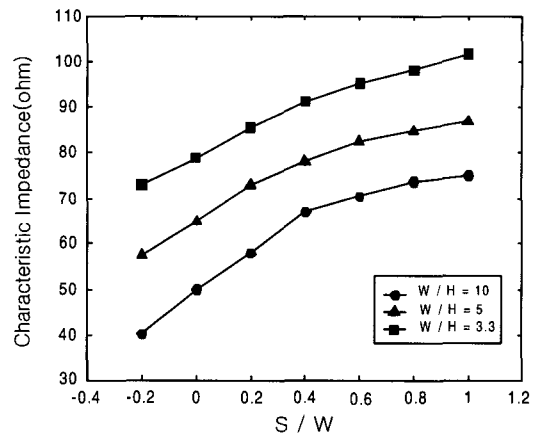


그림 2. S/W , W/H 에 의한 ECPW의 특성임피던스 계산결과

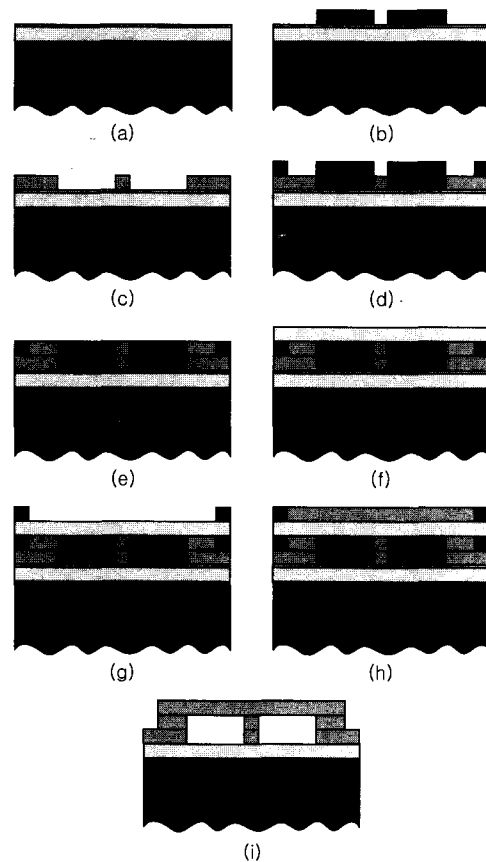


그림 3. ECPW의 제작 공정도

구분	W (m)	Ha (m)	Hp (m)	Z0 (Ω)	유효유전율	(dB/cm)
TFM S	50	0	15	44	2.55	1.45
	100	0	15	26	2.66	1.51
	150	0	15	18	2.74	1.62
EFM S	50	10	5	64	1.24	0.91
	100	10	5	38	1.27	0.95
	150	10	5	27	1.29	1.01

표 1. TFMS 및 ETFMS 특성비교

[그림 4]는 MEMS 공정을 통해 제작된 ECPW를 벡터분석기와 프로브스테이션을 이용하여 손실상수를 측정된 결과이다. S가 각각 100 (m, 20 (m인 경우 기존의 CPW에 비해 ECPW가 40 GHz에서 1.2 ~ 3.0 dB/cm 적은 손실을 보여주고 있다. 특히, S가 -20 (m인 경우, 전자기장이 공기중에 더 많이 분포함으로써 유전체가 갖는 손실을 최소화할 수 있는 구조임을 알 수 있다.

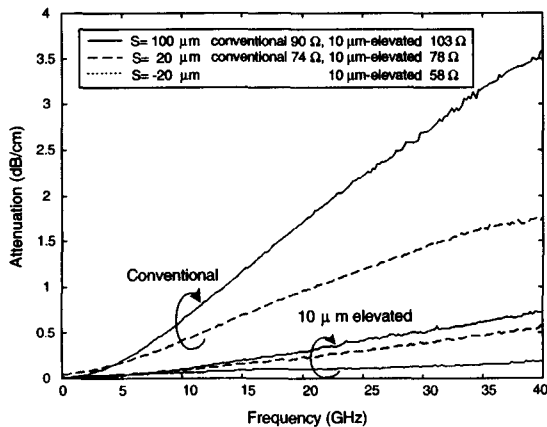


그림 4. ECPW의 손실상수 측정결과

2. TFMS (Thin Film Microstrip)

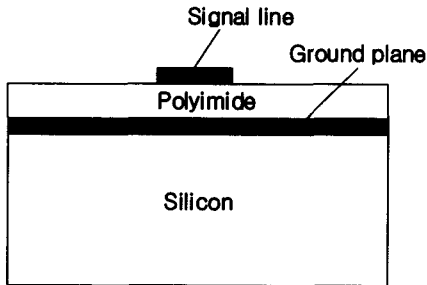
실리콘에 의한 기판 손실을 줄이기 위한 또다른 노력의 일환으로 기존의 Microstrip 선로에 비해 박막의 유전층을 갖는 TFMS (Thin Film Microstrip) 선로가 개발되었다. TFMS 선로에 이

용되고 있는 박막의 유전체층으로는 폴리이미드(4), BCB(5), SiON(6) 등이 있으며, 박막 층을 이용한 간단한 비아공정을 통해 다양한 스티브를 이용한 필터 등의 소자개발이 가능하다. 한편, 다층의 박막 층을 이용한 MCM (Multichip Module) 구조가 가능하며 MMIC공정과도 호환성이 있는 장점을 갖고 있다. [그림 5]는 TFMS와 Elevated TFMS의 단면구조를 보여주고 있다.

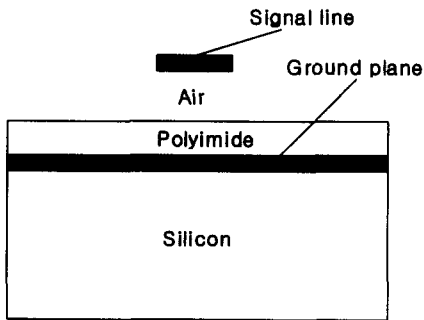
[표 1]은 10 GHz에서 계산된 TFMS 및 ETFMS 선로의 특성임피던스, 유효유전율 및 40 GHz에서의 손실상수를 나타내고 있다. ETFMS의 경우 TFMS 선로에 비해 선로의 손실이 적고, 유효유전율의 변화량이 작으므로 분산특성을 최소화할 수 있음을 알 수 있다. ETFMS 선로의 중요한 파라미터에는 선로폭 (W), 공기층의 두께 (Ha), 폴리이미드층 두께 (Hp) 등이 있다.

3. High-Q MEMS Inductor

RF 회로에서 정합회로, 또는 공진부를 형성하기 많이 사용되는 인덕터는 10 이상의 Q값을 필요로 한다. Q값 향상을 위해 실리콘 기판에 의한 손실을 최소화하기 위하여 기판 금속 접지면 패턴을 최적화하여 전류에 의한 기판손실을 감소하는 방법(7), 금속 패턴에 의한 손실을 감소하기 위한 레이아웃을 최적화 하는 방법(8), 실리콘 기판 위에 절연물질을 이용하여 기판에 의한 손실을 감소시키는 방법(9) 등이 연구되어 왔다. 한편, 공기 중으로 스파이럴 인덕터



(a) TFMS 구조



(b) Elevated TFMS (ETFMS) 구조

그림 5. RF MEMS 전송선로 구조

패턴을 부양함으로써 Q값을 향상시키는 방법이 연구되고 있다. [그림 6]에는 레이아웃의 최적화를 통해서 금속에 의한 옴손실을 최소화하며, 동시에 공기 중에 부양함으로써 기판에 의한 에디전류 손실을 최적화한 인덕터의 제작 결과이다[10]. 이러한 공정기법은 실리콘 기판 자체를 가공하는 벌크공정에 비해 공정단가가 적으며 집적화하는데 보다 쉽다. 제작된 인덕터의 Q값을 비교한 결과가 [그림 7]에 보이고 있으며, 2 GHz에서 18의 Q값이 측정되고 있다. 이러한 인덕터는 주파수 합성기용 집적화된 LC 공진부 형성에 적합할 것으로 기대되고 있다.

4. Tunable Capacitor

튜너블 커패시터는 튜너블 필터, 주파수 합성기 등

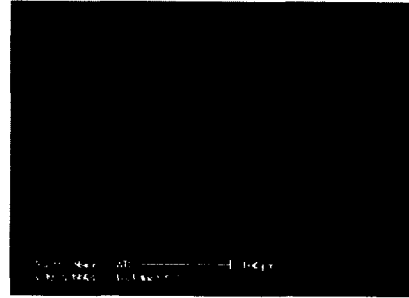


그림 6. 레이아웃 최적화를 통해 제작된 인덕터

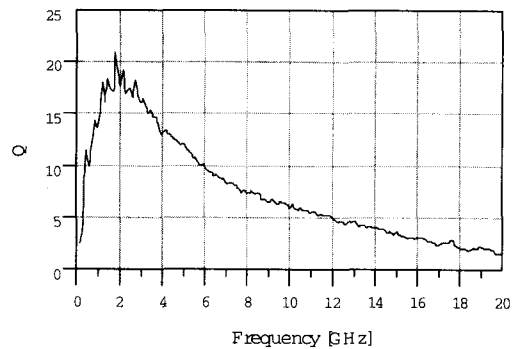


그림 7. 제작된 인덕터의 Q

의 튜너블 마이크로파 소자에 적용되며, 튜닝 전압에 따른 정확한 응답 특성이 요구된다. MEMS 공정을 이용하여 제작한 튜너블 필터가 [그림 8]에 보이며, 이러한 구조는 튜닝전압에 의해 상부의 멤브레인 금속층이 유동함으로써 커패시턴스를 조절하는 구조이다. 제작된 튜너블 커패시터는 350 (m X 350 (m의 면적을 갖고 있으며 RF 측정을 위해 CPW 형태의 급전구조로 구성되어 있다. [그림 9]는 전압에 따른 커패시턴스의 변화량을 나타내며, 튜닝전압에 따라 커패시턴스 값이 미세하게 조절될 수 있음을 보여준다.

전압 변화에 따른 Q값 변화가 [그림 10]에 보이며, Q값이 커패시턴스와는 반대의 경향을 보임을 확인할 수 있다.



그림 8. 제작된 튜너블 커패시터

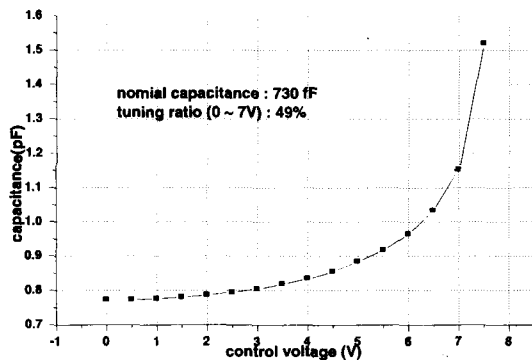


그림 9. 전압에 따른 커패시턴스 변화

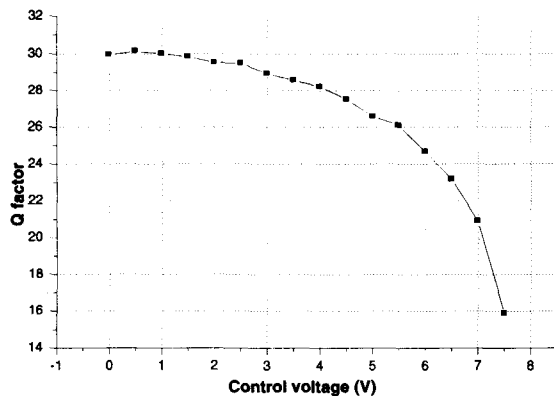


그림 10. 전압에 따른 Q 변화

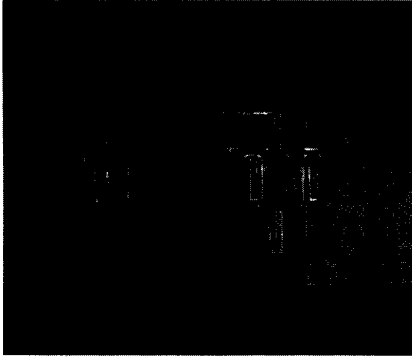
5. TFBAR (Thin Film Bulk Acoustic Resonator) Filter

박막공진기(TFBAR)를 이용한 여파기가 근래에 들어 이동통신용 대역통과여파기의 대안으로 제시되고 있는데 박막공진여파기는 실리콘기판 위에 제작될 수 있어 기존의 회로들과의 집적화에 문제가 없으며, 세라믹 필터나 SAW 필터가 갖는 고전력에 대한 내구성 제약, 사용주파수의 한계 등의 단점들을 극복할 수 있다.

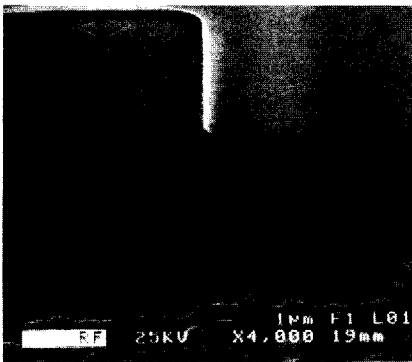
박막공진기는 AlN, ZnO, PZT 등의 얇은 압전체를 두 개의 도체사이에 위치시켜 제작되며, 최근의 연구들에 의하면 AlN 와 ZnO를 이용한 박막공진기 여파기가 1 ~ 2 GHz 대역의 이동통신용 RF 여파기로 제안되었다[11]~[13].

박막공진기의 공진주파수는 구조와 물질 변수들에 의해 결정되는데 그 중에서도 압전물질과 도체를 포함하는 두께가 가장 큰 영향을 미친다. 박막공진기는 사다리형 혹은 격자형으로 배열되어 여파기를 구성하는데, 격자형의 경우 같은 성능을 내기 위해 사다리형 보다 약 2배 정도의 공진기들이 필요하다는 단점 때문에 주로 사다리형 구조를 사용한다. 사다리형 구조에 있어서 병렬단의 공진기는 직렬단의 공진기에 비해 약 2~3%정도 낮은 공진주파수를 갖도록 설계되며, 주로 위쪽 도체의 두께를 조절함으로써 얻어진다.

MEMS 공정을 이용하여 제작한 박막 공진기의 구조사진이 (그림 11)에 나타나 있다. 사진에서 보듯이 두 개의 도체 사이에 얇은 AlN가 압전물질로 사용되었고, 그 도체 아래와 기판 사이에 air-gap이 위치한다. 이 air-gap은 기판과의 접촉에 의한 압전체의 overmode를 제거시켜주는 역할을 하며, 두 개의 air-bridge를 사용하여 입출력 평면형 평형선로(Coplanar waveguide : CPW)와 도체를 연결하였다.



(a) 평면사진



(b) 측면 사진

그림 11. 박막 공진기의 구조사진

네 개의 박막공진기 여파기를 제작하여, 이 중 두 개는 기존의 구조인 2/1단과 3/2 단 여파기로, 공진기의 추가 효과를 살피기 위해 나머지 두 개는 4/1단 및 4/2단 여파기로 제작하여 모의실험 결과와 비교한 결과가 [그림 12] ~ [그림 15]에 보여주고 있다 [14]~[16].

[그림 12] 와 [그림 13]은 2/1단과 3/2단의 사다리형 대역통과 여파기의 S 파라미터 특성을 나타내며, -3 dB 이내의 좋은 삽입손실과 매우 날카로운 저지대역 특성을 보여 주고 있다.

[그림 14]은 [그림 12]의 2/1단 구조의 양쪽 직렬단에 공진기를 하나씩 모두 두 개를 추가하여 4/1단을 구성한 경우의 결과이다. 이 때는 여파기의 저

지대역에서 약 6 dB 정도의 추가적인 성능향상을 보이고 있다. [그림 15]는 [그림 13]의 3/2단 구조의 가운데에 공진기 하나를 추가하여 4/2단을 구성한 경우이며, 약 3 dB의 저지대역감쇠 성능 향상을 볼 수 있다. 네 가지의 대역통과 여파기 모두 약 52 MHz의 대역폭을 가지므로 2 GHz 대역에서 약 2.5%의 대역폭을 가지게 되어 주파수 선택을 위한 RF 여파기로서 적합한 특성을 보이고 있다.

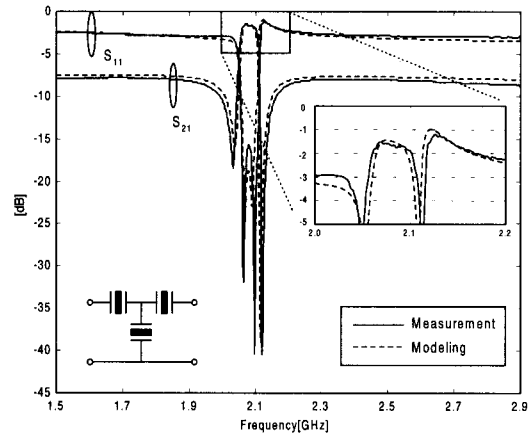


그림 12. 2/1단 여파기 주파수 응답특성

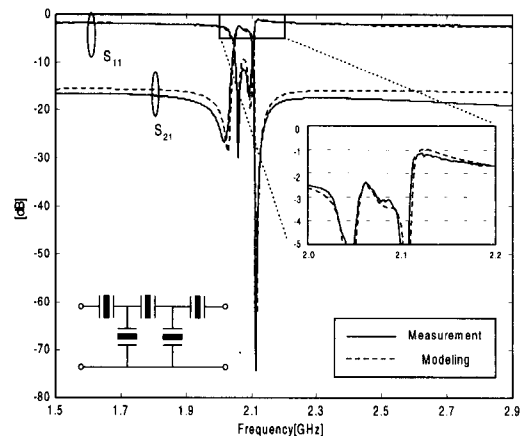


그림 13. 3/2단 여파기 주파수 응답특성

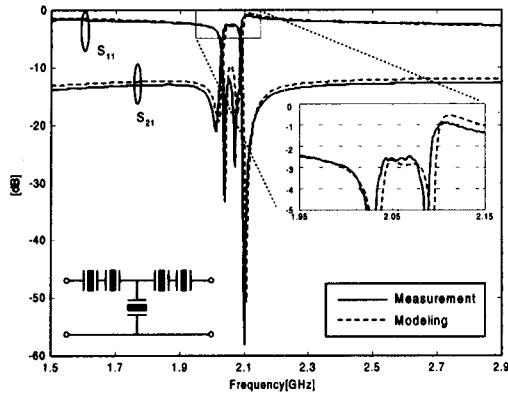


그림 14. 4/1단 여파기 주파수 응답특성

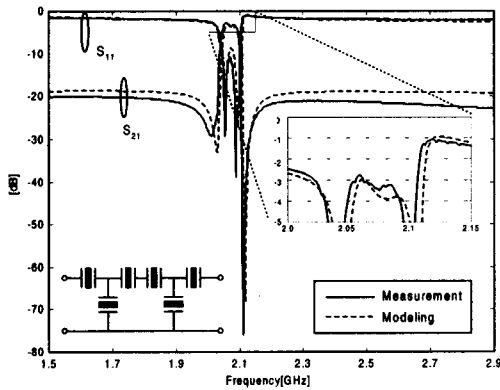


그림 15. 4/2단 여파기 주파수 응답특성

III. 결 론

본 논문에서는 이동통신용 RF MEMS 수동소자 개발에 대한 연구동향을 고찰하였다. RF MEMS 수동소자기술은 저전력, 고신뢰성의 RF 소자 기술로 각광받고 있으며, MMIC 기술과의 집적화를 위한 연구가 진행되고 있다. 저손실 전송선로 기술로써 ECPW, ETFMS 선로가 개발되어, 마이크로파 대역에서 감쇄 손실이 우수하고, 분산 효과가 적은 구조로 적합함을 확인하였다. 매칭회로와 튜닝 소자에

서 중요한 MEMS 인덕터와 튜너블 커패시터의 개발 결과 10 이상의 Q값을 얻는 인덕터를 개발하였으며, 미소의 전압 변화에 따라 48%의 튜닝 범위를 갖는 커패시터를 개발하였다. 마지막으로 박막형 공진기를 이용한 여러가지 박막 필터를 설계, 제작함으로써 MEMS 기술이 무선통신의 소형화된 구조를 위해 대체할 중요한 기술임을 고찰하였다.

감사의 글

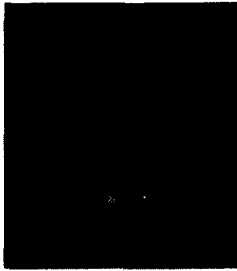
자료를 제공해 주신 서울대학교 MINT 연구실과 (주)엠에스솔루션께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] T. M. Weller, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "High Performance Microshield Line Components," IEEE Trans.. Microwave Theory and Tech..., vol. 43, pp. 534-543, March 1995.
- [2] T. M. Weller and L. P. Katehi, "Miniature Stub and Filter Designs Using The Microshield Transmission Line," IEEE MTT-S, vol. 2, pp. 675-678, 1995.
- [3] S.-J. Yoon, S.-H. Jeong, J.-G. Yook, Y.-J. Kim, S.-G. Lee, O.-K. Seo, K.-S. Lim, and D.-S. Kim, "A novel CPW structure for high-speed interconnects," IEEE MTT-S, vol. 2, pp. 771-774, 2001.
- [4] G. E. Ponchak and A. N. Downey, "Characterization of Thin Film Microstrip Lines on Polyimide," IEEE Trans., on Components, Hybrids, and Manufacturing Tech..., vol. 21, pp.

- 171-176, May 1998.
- [5] V. B. Krishnamurthy, H. S. Cole, and T. Sitnik-Nieters, "Use of BCB in high frequency MCM interconnects," *IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol.*, vol. 19, pp. 42-47, Feb. 1996.
- [6] T. Hiraoka, T. Tokumitsu, and M. Aikawa, "Very small wide-band MMIC magic T's using microstrip lines on a thin dielectric film," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 37, pp. 1569-1575, Oct. 1989.
- [7] C. Patrick Yue and S. Simon Wong, "On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-Based RF IC's," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, pp. 780-787, May 1998.
- [8] Jose M. Lopez-villegas, J. Samitier, C. Cane, P. Losantos, and J. B. "Improvement of the Quality Factor of RF Integrated Inductors by Layout Optimization," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 48, pp. 76-83, Jan. 2000.
- [9] Yorgos K. Koutsoyannopoulos and Yannis Papananos, "Systematic Analysis and Modeling of Integrated Inductors and Transformers in RF IC Design," *IEEE Transactions on Circuit and Systems*, vol. 47, pp. 699-713, Aug. 2000.
- [10] 정성현, 이상노, 육종관, 박한규, "High-Q MEMS Inductor의 최적화 설계," 2001년도 추계 마이크로파 및 전파 학술대회, pp. 227-230, 2001.
- [11] J.D. Larson III, P.D. Bradley, S. Wartenberg, and R.C. Ruby, "Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system," 2000 IEEE Ultrasonics Symposium Digest, vol. 1, pp. 863-68, 2000.
- [12] P.D. Bradley, R.C. Ruby, J.D. Larson III, Y. Oshmyansky and D. Figueredo, "A Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) Duplexers for USPCS Handset Applications," 2001 IEEE MTT-S Digest, vol. 1, pp. 367-70, 2001.
- [13] Q. X. Su, P. Kirby, E. Komuro, A. Imura, Q. Zhang, and R. Whatmore, "Thin-film bulk acoustic resonators and filters using ZnO and Lead-Zirconium-Titanate thin films," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 4, pp. 769-78, April 2001.
- [14] K. W. Kim, J. G. Yook, M. G. Gu, W. Y. Song, Y. J. Yoon and H. K. Park, "TFBAR Filters for 2 GHz Wireless Applications," *IEEE MTT-S Dig.*, vol. 2, pp 1181~1184, 2002
- [15] K. W. Kim, J. G. Yook, and H. K. Park, "CAD model analysis of the air-gap type TFBAR," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 384-385, Sep. 2002.
- [16] K. W. Kim, G. Y. Kim, J. G. Yook, and H. K. Park, "Air-gap type TFBAR-based filter topologies,"

Microwave and Optical Technology
Letters, vol. 34, no. 5, pp. 386-387,
Sep. 2002.



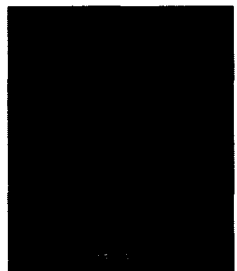
이상노

1998년: 고려대학교 전파공
학과(공학사) 2001년: 광주
과학기술원 정보통신 공학과(공
학석사) 2001년 2~현재:
연세대학교 전기전자공학과
박사과정 주 관심분야: 초고
주파수로 설계



김일권

1999년: 연세대학교 전파공
학과(공학사) 2001년: 연세
대학교 전기전자 공학과(공
학석사) 2001년 2~현재:
연세대학교 전기전자공학과
박사과정 주 관심분야: 초고
주파수로 설계



육종관

1998년: University of
Michigan 전기전자공학과
(공학박사) 1997년 1월~
1998년 10월: University
of Michigan Research
Fellow 1998년 11월~
1999년 2월: Qualcomm
Inc. Senior Engineer

1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학부 조교
수 주 관심분야: 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF
MEMS, 박막공진구조