

단일칩 집적화를 위한 RF MEMS 수동 소자 (RF MEMS Passives for On-Chip Integration)

박은철 · 최윤석 · 윤준보
하두영 · 홍성철 · 윤의식

한국과학기술원
전자전산학과

요 약

본 논문에서는 RF와 마이크로파 응용을 위한 MEMS 수동 소자에 대한 내용이다. 이 수동 소자들을 만들기 위해서 개발된 3차원 MEMS 공정은 기존의 실리콘 공정과 완전한 호환성을 가지고 한 칩으로 집적화시킬 수 있는 공정이다. 이 3차원 MEMS 공정은 기존 실리콘 공정이 가지고 있는 한계를 극복하기 위한 방법으로써 개발되었다. 개발된 공정을 이용하여 실리콘 공정에서 구현할 수 없었던 좋은 성능의 인덕터, 트랜스포머 및 전송선을 RF와 마이크로파 응용을 위해서 구현하였다. 저 전압, 높은 차단율을 위한 push-pull 개념을 도입한 MEMS 스위치를 구현하였다. 또한 높은 Q를 갖는 MEMS 인덕터를 최초로 CMOS 칩과 집적화에 성공하여 600 kHz 옵셋 주파수에서 -122 dBc/Hz의 특성을 갖는 2.6 GHz 전압 제어 발진기를 제작하였다.

Index Terms - MEMS 공정, 인덕터, 트랜스포머, RF 스위치, 단일칩 수동 소자, VCO, RF IC, RF MEMS.

I. 서 론

무선 통신 시장이 점차 커짐에 따라 RF 및 마이크로파 대역의 응용을 위한 고 성능, 집적화 가능한 수동 소자의 개발에 대한 요구가 증가하고 있다.

MEMS는 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 기술로 많이 연구되어 왔다. MEMS 기술이 RF 및 마이크로파에서 최근에 주목 받고 있는 이유는 MEMS 구조의 특성이 금속 저항과 기판 손실을 크게 줄일 수 있어서 기존의 실리콘 공정에서 구현하기 어려운 낮은 손실을 갖는 수동소자와 높은 차단 특성을 요구하는 스위치 및 높은 주파수 선택도를 갖는 공진기 등의 고 성능 RF 소자를 구현할 수 있기 때문이다. 또한 MEMS로 제작되는 수동 소자들은 기존의 공정에서 사용하는 사진작업을 이용하기 때문에 기존 IC 공정과의 호환성이 우수한 것도 중요한 요인이다.

본 논문에서는 MEMS 기술 중 표면 미세 가공 기술을 이용하여 특성이 우수한 수동 소자를 만들 수 있는 3차원 MEMS 공정을 소개한다. 이 공정의 특징은 두꺼운 전기 도금 공정과 구조체를 기판으로부터 띄워서 제작함으로써 기존의 실리콘 공정이 가지고 있었던 문제점인 금속 저항과 기판 손실을 크게 줄일 수 있어 RF 및 마이크로파용 수동 소자 개발에 적합한 MEMS 공정이다^{[1]-[3]}. 또한 기판 손실을 줄이기 위해서 기판 식각^[4], 포러스화^[5] 및 구동형 장치^[6]를 사용한 다른 공정에 비해서 제작 공정이 간단하며 실리콘 IC 공정과 완벽한 호환성을 가지는 장점을 가진다. 공정을 이용하여 RF 및 마이크로파 대역에서 사용될 높은 Q를 갖는 인덕터, 높은 전달 특성을 갖는 트랜스포머 및 낮은 손실을

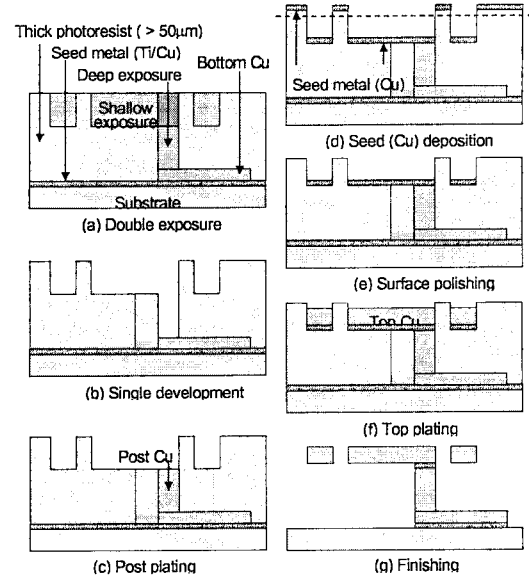
「본 연구는 과학기술부의 국가 지정 연구실 사업의 일환으로써 수행되었으며 과학기술부의 프론티어 21 사업과 교육부의 두뇌 한국 21 사업으로부터 부분적인 재정 지원을 받음」

갖는 전송선 등의 수동 소자를 개발하였다.

본문의 순서는 본 연구에서 개발한 3차원 MEMS 공정에 대해서 설명하고 그 공정으로 개발된 각각의 수동 소자의 제작 및 측정 결과에 대해서 설명하고 마지막으로 0.18 μm CMOS 공정을 이용하여 능동 소자를 제작한 후에 높은 Q의 MEMS 인덕터를 집적화한 전압 제어 발진기에 대해서 소개하겠다.

II. 3차원 MEMS 제작 공정

제작 공정은 매우 간단하다. 먼저 두꺼운 감광막을 이용하여 3차원적인 도금 틀을 형성하고 현상된 부분을 도금 공정을 이용하여 차례대로 채우고 마지막으로 감광막을 제거함으로써 3차원 구조체를 만든다. [그림 1]은 공정 순서를 보여준다. 공정은 도금을 위한 시드 층 (Ti/Cu)을 증착함으로써 시작된다. 하부 전극을 두꺼운 감광막을 이용한 사진 작업을 한 후 전기 도금법으로 형성된다. 감광막을 제거한 후 두 번째 감광막을 기판에 도포를 한다 (그림 1-a). 노광 시간에 따라서 감광막이 현상되는 깊이를 조절할 수 있다는 원리^[11]를 이용하여 두 개의 마스크를 사용하고 노광 시간을 조절해서 원하는 부분만 노광을 시킨다음 노광된 부분을 현상한다 (그림 1-b). 현상이 끝난 후 전기 도금법을 이용하여 하부 전극에서부터 얇게 현상된 부분까지의 지지대를 채운다 (그림 1-c). 얇게 현상된 부분을 도금하기 위해서 두 번째 도금 시드 층 (Cu)을 기판에 증착시킨다 (그림 1-d). 원하는 부분 (얇게 현상된 부분)만을 도금하기 위해서 그 이외 부분의 시드 층은 기계 마모법으로 제거된다 (그림 1-e). [그림 1-d]의 점선은 기계 마모법을 통해서 제거되는 부분의 경계선을 나타낸다. 얇게 현상된 부분은 세 번째의 전기 도금법으로 도금되어 상부 전극을 형성한다 (그림 1-f). 이때 얇게 현상된 부분으로 남아있는 시드 층은 지지대와

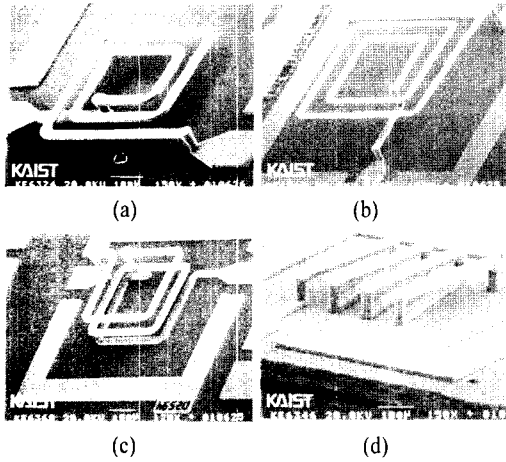


[그림 1] 고성능 수동 소자 개발을 위한 3차원 MEMS 공정 순서

하부 전극을 통해서 바닥의 시드 층과 전기적으로 연결되어 있기 때문에 세 번째 도금시에 모든 현상된 부분이 같이 도금된다. 마지막으로 도금 틀과 희생 층 역할을 한 감광막과 시드 층을 제거 함으로써 최종적인 3차원 구조가 형성된다 (그림 1-g).

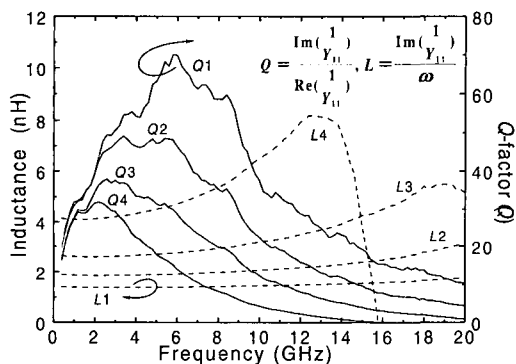
III. 높은 Q의 MEMS 인덕터

인덕터는 전압 제어 발진기, 진력 증폭기, 주파수 혼합기 등에서 사용되어 RF 회로의 특성을 결정하는 주요 소자이다. 최근 실리콘 IC의 동작 주파수가 높아져감에 따라서 실리콘 공정을 이용한 RF 대역의 수동 소자 개발이 활발히 진행되고 있으나 기존의 실리콘 공정에서 사용하는 박막 공정으로는 높은 Q를 갖는 인덕터를 제작하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구로써 최근에 RF 및 마이크로파 대역 응용을 위한 새로운 MEMS 제작 공정을 발표하였다^[7]. 이 공정은 두꺼운 금속 배선으로



[그림 2] 제작된 3차원 인덕터의 전자현미경 사진

금속 저항 손실을 줄이고 기판으로부터 구조체를 높이 띄워서 제작함으로써 기판으로의 손실을 최소화 할 수 있는 공정이다. 또한 적층형 공정이므로 기존의 실리콘 공정과 완벽히 호환되며 공정이 안정적이고 구조적으로도 견고한 공정 특성을 가진다. 3차원적인 구조를 갖는 나선형 인덕터가 설계되었고 표준 실리콘 기판 위에서 본 공정을 통해 구현되었다. [그림 2]는 본 공정으로 구현된 여러 종류의 인덕터 중 일반 나선형 인덕터 (그림 2.(a)-(b)), 적층



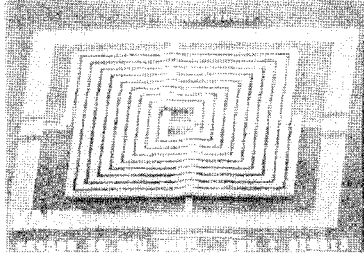
[그림 3] 나선형 인덕터의 주파수에 따른 인덕턴스와 Q값

형 인덕터 (그림 2.(c)) 및 슬레노이드 형 인덕터 (그림 2.(d))의 SEM 사진을 보여준다. 제작된 인덕터들은 최고 $100\ \mu\text{m}$ 까지 기판으로부터 띄워져 있으며 나선형 인덕터의 특성을 측정된 결과를 [그림 3]에 나타내었다. [그림 3]으로부터 1.3 nH 인덕터의 경우 6 GHz에서 Q가 최고 70으로까지 측정되었음을 알 수 있다.

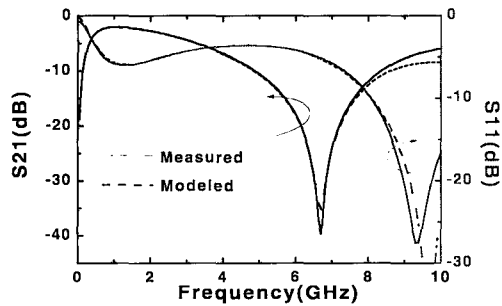
IV. 고성능 MEMS 트랜스포머

트랜스포머는 많은 RF 집적회로에서 임피던스 매칭 및 변환, 신호 전달, 위상 변화등에 널리 사용된다^{[8],[9]}. 하지만 기존의 집적 트랜스포머는 얇은 금속선으로 인한 큰 저항손실과 고주파에서 손실이 큰 실리콘을 사용함으로 나타나는 기판 손실로 인해 오프 칩 트랜스포머에 비해 나쁜 특성을 보이게 된다. 이런 문제점들을 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있는데 저항 손실을 줄이기 위해서 두꺼운 금속선을 형성하거나 저항도가 낮은 금속을 사용하고 기판 손실을 줄이기 위해서 고저항 실리콘 기판이나 절연 기판, 또는 두꺼운 절연 층을 형성하는 방법 등이 지금까지 제안되었다.

본 연구실에서 제안한 표면 미세 가공 기술을 이용해서 집적 트랜스포머를 제작하였고 고주파 특성을 측정하였다^{[10],[11]}. 제작에 사용한 제작 공정은 고주파에서 발생하는 실리콘 기판 손실을 줄이기 위한 수십 μm 이상의 공기 층을 제공하고 저항 손실을 줄일 수 있도록 $10\ \mu\text{m}$ 이상의 두꺼운 구리 선을 제공한다. [그림 4]는 제작한 나선형 트랜스포머의 SEM 사진이다. [그림 5]는 트랜스포머의 측정 결과로 S 매개 변수를 보여준다. 측정은 0.1 GHz에서 10 GHz까지의 주파수 범위에서 실행하였으며 측정 패드로 인한 기생 성분은 오픈 패드를 통해서 제거하였다. 최소 삽입 손실 (S_{21})은 1 GHz에서 약 1.9 dB이며 자기 결합 계수는 약 0.81의 높은 값을 가진다^[11].



[그림 4] 제작된 1:1 MEMS 트랜스포머



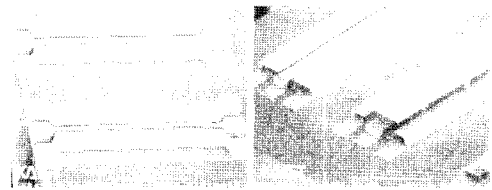
[그림 5] 측정된 MEMS 트랜스포머의 주파수 특성

V. 저 손실 MEMS 전송선

소자의 크기가 동작주파수에 따른 파장에 비해서 무시할 수 없을 때 그 소자는 더 이상 이산 모델로 설명할 수 없고 분산 모델로 간주되어야 한다. 따라서 이 영역의 주파수에서는 strip line이나 waveguide 등의 전송선이 인덕터, 커패시터 등의 낮은 주파수에서 사용된 이산 소자를 대신해서 마이크로파나 밀리미터파에서 사용되고 있다. MMIC 회로에서 사용되는 전송선은 제작 공정이 간단한 microstrip이나 평판형 도파관 등의 평면형 전송선이 사용된다. Microstrip은 기판 바닥면을 접지면으로 이용하기 때문에 주위에 접지면이 같이 있어야 하는 평판형 도파관에 비해서 크기를 줄일 수 있는 장점이 있는 반면 전자파가 기판을 통해서 형성되기 때문에 실

리콘과 같이 기판 손실이 큰 기판에서는 전파 손실이 크기 때문에 MMIC 응용으로는 그 사용이 부적절하다. 최근에 실리콘 공정으로 전자파가 상대적으로 기판으로의 결합이 적은 평판형 도파관을 이용한 전송선 연구가 진행되고 있다^[12]. 하지만 전송선에서도 인덕터의 경우와 마찬가지로 기존의 실리콘 공정을 사용하였을 때 발생하는 급속 저항 손실과 기판 손실로 인해서 큰 전자파 손실을 야기시킨다.

본 논문에서는 3차원 MEMS 공정을 이용하여 낮은 급속 저항을 갖고 기판 손실로부터 자유로운 저손실의 MEMS 전송선을 개발하였다. 개발된 전송선은 접지면과 함께 기판으로부터 40 μm 이상 띄워져 있으므로 유전체나 기판으로의 손실이 크게 줄일 수 있다. [그림 6]은 3차원 MEMS 공정을 이용하여 제작한 여러 종류의 전송선에 대한 주파수 특성을 보여준다. 전송선은 두께는 15 μm , 너비는 25 μm , 접지면과의 간격은 10 μm , 기판과의 간격이 40 μm 로 표준 실리콘 기판 위에서 제작되었다. [그림 7]은 측정된 평면형 도파관의 Smith 차트를 보여준다. 측정값으로부터 평면형 MEMS 도파관은 18 GHz에서 -0.1 dB/mm의 낮은 손실 특성을 보였다.

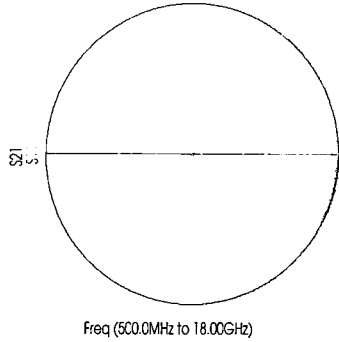


(a) 평면형 도파관 (b) 상하 접지면형 도파관



(c) 동축선형 도파관

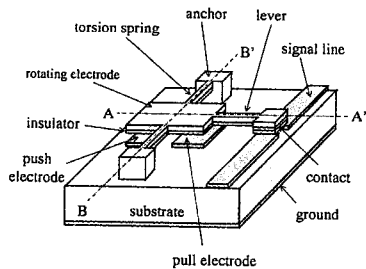
[그림 6] MEMS 공정으로 제작된 여러 종류의 도파관



[그림 7] 평면형 도파관의 측정 결과

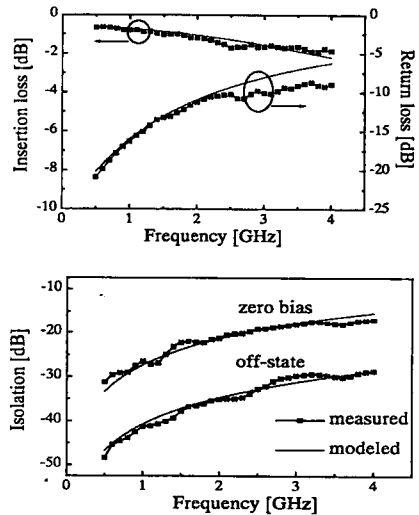
VI. 저 전압용 RF MEMS 스위치

RF 스위치는 phase shifter, 위상 배열 안테나 및 단말기등 RF 통신 시스템에서 많이 사용되고 있는 부품이다. 통상적으로 FET나 p-i-n 다이오드와 같은 반도체 소자가 스위치 동작을 위해서 사용되었으나 삽입 손실이 크고 낮은 차단 특성이 나왔다. 따라서 높은 삽입 손실과 낮은 차단 특성을 갖는 반도체 스위치의 대안으로써 MEMS 스위치에 대한 연구가 활발히 보고되고 있다. 대부분의 MEMS 스위치는 원하는 정전력에 의해서 구동되기 때문에 차단율을 얻기 위해서는 상대적으로 높은 동작 전압 (> 20 V)이 요구된다. 이러한 높은 동작 전압 때문에 MEMS 스위치는 그 특성의 우수함에도 불구하고 이동 단말기에서 그 사용이 제한되어 있었다.

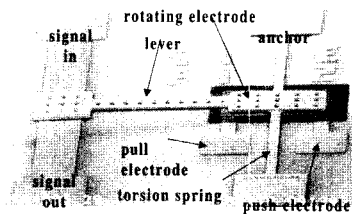


[그림 8] Push-pull MEMS 스위치의 개념도와 제작 결과

본 연구에서는 MEMS 공정을 이용하여 낮은 구동 전압으로 높은 차단 특성을 갖는 push-pull 구조의 스위치를 개발하였다^[13]. 이 push-pull 구조는 지렛대의 원리를 이용한 구조로써 낮은 전압으로 동작하기 때문에 구동부의 변위는 작지만 지렛대 작용으로 반대편 스위치에서의 변위는 큰 변위를 일으킬 수 있어서 높은 차단율을 얻을 수 있는 구조이다. [그림 8]은 제작된 MEMS 스위치의 개념도와 제작된 스위치의 전자 현미경 사진을 보여준다. [그림 9]에 주파수에 따른 삽입 손실과 차단 특성을 나



[그림 9] MEMS 스위치 주파수에 따른 삽입 손실과 차단율 특성

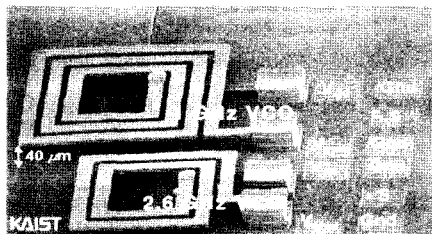


타내었다. DC 측정을 통해서 제작된 스위치의 구동 전압은 5 V 미만의 낮은 전압으로 측정되었다. 제작된 MEMS 스위치는 push-pull 동작에 의해서 1 GHz에서 약 1 dB의 삽입 손실과 40 dB 정도의 높은 차단 특성을 보였다.

VII. MEMS Inductor를 사용한 집적화된 전압 제어 발진기

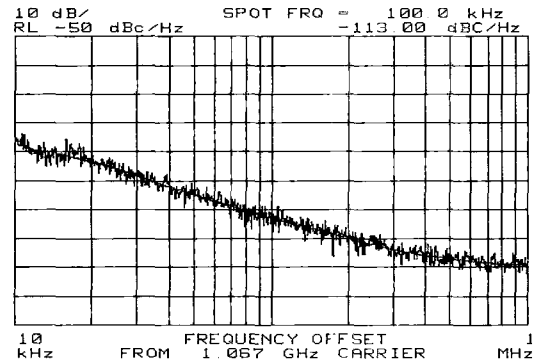
전압 제어 발진기는 위상잡음에 대한 사양이 엄격하기 때문에 아직까지 집적화하지 못한 부품 중 하나로 남아 있다. 위상 잡음은 신호의 순수도를 나타내는 지표로써 발진기에 사용된 공진기 Q값의 제곱에 반비례해서 줄어드는 것으로 알려져 있다. 하지만 기존 공정에서 제공하는 인덕터의 낮은 Q는 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성 향상에 가장 큰 제한 요건으로 작용하여 전압 제어 발진기를 집적화하는데 걸림돌이었다.

본 연구에서는 개발된 3차원 MEMS 인덕터를 사



[그림 10] MEMS 인덕터를 사용하여 집적화된 전압 제어 발진기

용하여 낮은 위상 잡음을 갖는 1 GHz와 2.6 GHz에서 동작하는 전압제어 발진기를 집적화하는데 최초로 성공하였다. 집적화된 전압 제어 발진기는 TSMC에서 제공하는 0.18 μm 공정을 이용하여 능동 소자와 가변 커패시터를 제작하였고 제작된 chip 위에 다음 3차원 MEMS 공정을 이용하여 인덕터를 집적화시켰다. [그림 10]은 집적화된 전압 제어 발진기의 전자 현미경 사진이다. HP8564E 스펙트럼 분석기를 사용하여 제작된 1 GHz 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 측정된 결과를 [그림 11]에 보였다. 위상 잡음은 중심 주파수 1 GHz 발진기의 경우 100 kHz 벗어난 주파수에서 -113 dBc/Hz 로 측정되었으며 2.6 GHz 발진기에서는 600 kHz 벗어난 주파수에서 -122 dBc/Hz 로 측정되었다. 두 전압 제어 발진 모두 3 V 전원에서 15 mW의 전력을 소모하는 것으로 측정되었다. 제작된 MEMS 전압 제어 발진기의 특성을 <표 1>에 요약하였다.



[그림 11] GHz MEMS VCO의 위상 잡음 특성

<표 1> Measurement results of MEMS VCOs

Type	Free running frequency	Output power (dBm)	Phase noise (dBc/Hz)	Harmonics (dB)	Power consumption (mW)	Tuning range
1 GHz VCO	1.08 GHz	-4.83	-113 @ 100 kHz	< -18	15	1.08 ~ 1.83 GHz
2.6 GHz VCO	2.62 GHz	0	-122 @ 600 kHz	< -17	15	2.62~4.22 GHz

Ⅷ. 결 론

RF와 마이크로파 대역에서 사용될 고성능 수동 소자를 제작하기 위해서 집적화 가능한 3차원 MEMS 기술이 기존 실리콘 공정에서의 문제점을 극복하기 위해서 개발되었다. 이 공정을 사용하여 인덕터, 트랜스포머 및 전송선을 설계하고 제작하였다. 표준 실리콘 기판 위에서 제작된 MEMS 인덕터는 GHz 대역에서 Q가 70까지 측정되었다. MEMS 트랜스포머의 경우 최소 삽입 손실 (S_{21})은 1 GHz에서 약 1.9 dB, 자기 결합 계수는 약 0.81의 높은 값을 나타내었다. MEMS 전송선은 18 GHz에서의 삽입 손실이 0.1 dB/mm 미만으로 측정되었다. Push-pull 개념을 도입한 MEMS 스위치는 5 V 이하의 낮은 전압에서 구동되며 1 GHz에서 40 dB의 높은 차단 특성을 보였다. 마지막으로 MEMS 인덕터를 이용한 집적화된 VCO의 제작 및 측정을 통해서 MEMS 수동 소자가 RF 및 마이크로파 부품 개발에 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] J.-B. Yoon, C.-H. Han, E. Yoon, and C.-K. Kim, "Monolithic fabrication of electroplated solenoid inductors using three-dimensional photolithography of a thick photoresist", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pt. 1, no. 12B, pp. 7081-7085, Dec. 1998.
- [2] J.-B. Yoon, B.-I. Kim, Y.-S. Choi, and E. Yoon, "3-D Lithography and Metal Surface Micromachining for RF and Microwave MEMS", *IEEE Int. MEMS Conf. Tech. Dig.*, pp. 673-676, Jan. 2002.
- [3] J.-B. Yoon, Y.-S. Choi, B.-I. Kim, Y. Eo, and E. Yoon, "CMOS-compatible, surface micromachined, suspended spiral inductors and their proper model for multi-GHz silicon RF IC's", submitted to *IEEE Electron Device Lett.*
- [4] C.-Y. Chi, Y.-H. Kao, J.-J. Luo, K.-M. Chau, "The enhanced Q spiral inductors with MEMS technology for RF applications", *Conf. Microwave*, pp. 1326-1329, 2000.
- [5] C. M. Nam, Y.-S. Kwon., "High-Performance Planar Inductor on Thick Oxidized Porous Silicon (OPS) Substrate", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 7, no. 8, pp. 236-238, Aug. 1997.
- [6] L. Fan, R. T. Chen, A. Nespola, and M. C. Wu, "Universal MEMS Platforms for Passive RF Components: Suspended Inductors and Variable Capacitors", *Proc. MEMS '98*, 1998.
- [7] J.-B. Yoon, B.-I. Kim, Y.-S. Choi, and E. Yoon, "3-D Lithography and Metal Surface Micromachining for RF and Microwave MEMS", *IEEE Int. MEMS Conf. Tech. Dig.*, pp. 673-676, Jan. 2002.
- [8] J. R. Long, "Monolithic Transformer for Silicon RF IC Design", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, pp. 1368-1382, Sep. 2000.
- [9] J. Hartung, "Integrated Passive Components in MCM-Si Technology and their Application in RF-Systems", *Int. Conf. on Multichip Modules and High Density Packaging*, pp. 256-261, 1998.
- [10] J.-B. Yoon, C.-H. Han, E. Yoon and C.-K. Kim, "Monolithic Integration of 3-D Electroplated Microstructures of Unlimited Number of Levels Using Planarization with a Sacrificial Metallic Mold (PSMM)," *IEEE MEMS '99 Tech. Dig.*, pp. 624-629, Jan. 1999.

[11] Y.-S. Choi, J.-B. Yoon, B.-I. Kim, Y. Eo, and E. Yoon, "A High-Performance MEMS Transformer for Silicon RF ICs", *IEEE Int. MEMS Conf. Tech. Dig.*, pp. 653-656, Jan. 2002.

[12] B. Kleveland, et al., "Exploiting CMOS Reverse Interconnect Scaling in Multigigahertz Amplifier and Oscillator Design", *IEEE Journal*

of Solid-State Circuits, vol. 36, no. 10, Oct. 2001.

[13] D. Har, E. Yoon, and S. Hong, "A Low-Voltage Actuated Micromachined Microwave Switch Using Torsion Springs and Leverage", *IEEE trans. MTT*, vol. 48, no. 12, pp. 2540-2545, Dec. 2000.

≡ 필자소개 ≡

박 은 철



1996년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학석사)
 현재: 동 대학원 박사과정
 [주 관심분야] MEMS를 이용한 RF 모듈 집적화와 MEMS 구조체를 이용한 고성능 전압 제어 발전기

윤 준 보



1993년, 1995년, 1999년: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학사, 공학석사, 공학박사)
 1999년~2000년: U. of Michigan 박사 후 연구원
 2000년~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 연구 조교수

[주 관심분야] 마이크로/나노 미소구조체 개발 및 이를 이용한 센서와 구동기, optical-MEMS, bio-MEMS, RF/microwave MEMS.

최 윤 석



1997년: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학석사)
 현재: 동 대학원 박사과정
 [주 관심분야] MEMS를 이용한 RF용 수동 소자의 모델화와 제작

하 두 영



1994년, 1996년, 2000년: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학사, 공학석사, 공학박사)
 2000년~2001년: UCLA 박사 후 연구원
 2001년~현재: 전자통신연구원 연구원
 [주 관심분야] RF MEMS, 저 전압 구동 조 교주파 스위치

홍 성 철



모델

1982년, 1984년: 서울대학교 전자공학과
(공학사, 공학석사)

1989년: U. of Michigan 전기공학과 (공학
박사)

현재: 한국과학기술원 전자전산학과 교수
[주 관심분야] 단일 칩 초 고주파 IC,
quantum device, 전력 증폭기 및 device

윤 의 식



1982년, 1984년: 서울대학교 전자공학과
(공학사, 공학석사)

1990년: U. of Michigan 전기공학과 (공학
박사)

1990년 ~ 1994년: National Semiconductor
연구원

1995년~1996년: Silicon Graphics 연구원

현재: 한국과학기술원 전자전산학과 부교수

[주 관심분야] 마이크로 센서, 마이크로 시스템 집적화 및
VLSI 회로 설계