

RF MEMS 인덕터의 특성 추출을 위한 De-embedding 방법

°이 영 호, 김 용 대, 김 지 혁*, 육 종 관

연세대학교, 서울대학교*

E-mail : leeyoungho@yonsei.ac.kr

Accurate De-embedding Scheme for RF MEMS Inductor

°Young-Ho Lee, Yong-Dae Kim, Ji-Hyuk Kim*, Jong-Gwan Yook

Yonsei University, Seoul National University*.

Abstract

In this paper, an air-suspension type RF MEMS inductor is fabricated, and an appropriate de-embedding scheme for 3-dimensional MEMS structure is applied and verified with inductance calculation algorithm. With the presented de-embedding method, parasitics from contact pads and feeding lines are effectively and accurately de-embedded using open and short calibration procedure, and only spiral and posts can be characterized as a high-Q inductor structure. The validity of the de-embedding method is verified by the comparison of the measured and calculated inductances of two 1.5 and 2.5 turn square spiral inductors. The open-short de-embedded inductance error is below 5% each case in comparison with the calculated value based on H.M. Greenhouse's algorithm.

Key words : RF MEMS inductor, de-embedding, inductance calculation

I. 서 론

모든 이동 통신 기기가 초소형화 하고 있는 추세에 따라 단말기에 채택되는 소자들의 소형화에 대한 연구 및 개발이 많이 진행되고 있다. 사용자들의 다양한 요구에 부응하는 멀티미디어 서비스의 제공을 위해서는 소자를 작게 만들면서도 성능이 저하되어서는 안 된다는 어려움이 있다. Micro Electro Mechanical System의 약자인 MEMS는 반도체 가공 방법을 응용해 미세기계구조를 가공하는 기술 또는 가공된 제품을 지칭한다. 수 마이크로미터 스케일의 구조물의 웨이퍼상 제작이 가능하므로 각광받는 기술이며, 본 논문에서의 RF MEMS 인덕터는 이러한 MEMS 디바이스를 만드는 공정을 이용해 제작한 인덕터를 말한다.

인덕터는 초고주파 회로에서 교류신호를 막는 choke나 입력과 출력 단의 정합을 위한 정합회로의

구성, 또는 공진 회로 구성에 커패시터나 저항과 함께 사용된다. 기존의 off-chip 인덕터는 크기 문제 때문에 on-chip 집적에 적합하지 않다. 집적화를 위해서 평면형 MMIC 인덕터가 많이 연구되어 왔지만 손실이 있는 silicon 기판 위에서 5 ~ 15 정도의 낮은 Q값을 보인다. 이러한 문제를 극복하기 위해 conductivity가 높은 도체의 사용[1], 도체 손실을 줄이기 위한 여러 층의 도체를 shunt시키는 방법[2], high resistivity 물질의 사용[3], 두꺼운 passivation 층을 만드는 방법[4], 인덕터의 layout을 최적화하는 방법[5] 등이 적용되었지만 성능은 RF 통신 시스템의 성능을 보장하기에 충분하지 못했다. 또한 이러한 MMIC 인덕터의 라이브러리는 반도체 파운드리가 제공하는 형태로 정리되어 있기 때문에 RF/Microwave 엔지니어들이 회로를 디자인할 때 자유도가 떨어진다는 단점이 있다.

손실이 있는 silicon 기판위에서 높은 Q값을 가지

는 인덕터를 설계하기 위해서는 스파이럴 부분이 기판으로부터 높이 띄워 제작 되어야 하며 기판과의 접촉 면적이 최소화 되어야 한다. 그러므로 인덕터 집적시 feed line 부분은 제외하고 스파이럴과 포스트 부분만 집적하는 것이 MEMS 공정의 이점을 최대한 이용하는 구조이다. 그러나 이 경우, 집적할 부분의 정확한 성능을 추출하는 것이 해결해야 할 과제가 된다.

보통 open pattern의 Y-parameter를 빼는 방법이 MMIC 인덕터의 성능을 평가할 때 가장 많이 쓰이는 방법이지만, 이 방법으로는 스파이럴과 포스트만 집적시의 성능을 정확히 특성화할 수 없다. 본 논문에서는 인덕터 test sample 옆에 함께 제작한 open과 short pattern의 측정 결과를 이용해서 집적하려고 하는 인덕터 부분의 성능을 특성화 하고 de-embedding 방법의 타당성을 검증한다.

II. 본 론

2-1 인덕터의 여러 파라미터

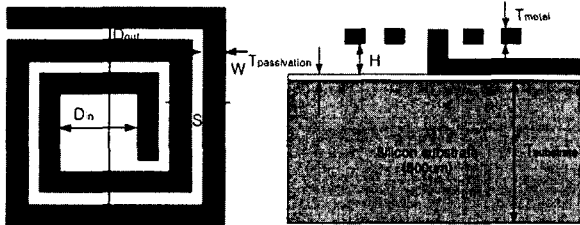


그림 1. RF MEMS 인덕터의 구조

인덕터의 수평, 수직 구조에 대해서 여러 파라미터가 존재하는데, 수평 구조에 대해서는 인덕터의 폭, 간격, 내부직경, 턴수, 그리고 수직 구조에 대해서는 기판 두께, 도체 두께, elevation 높이, passivation 높이 등이 있다. 제작 공정의 제한 조건에 의해서 수직 구조에 대한 파라미터는 변화시킬 수 없으며, de-embedding에 사용한 인덕터들의 dimension은 표 1에 정리 하였다. open pattern은 인덕터 test sample에서 스파이럴과 포스트를 제거하였고, short pattern은 open pattern의 두 라인을 연결하여 제작하였다. 사용한 도체는 copper이며, 기판은 유전율 11.9, resistivity 25 Ω.cm의 silicon을

사용하였고, 유전율 4의 5 micron oxide로 passivation하였다.

	L3	L29	L34	L35
폭	30	30	20	20
간격	20	20	10	10
내부직경	140	140	240	240
턴수	2	2	1.5	2.5
elevation	20	0	20	20
passivation	5	5	5	5
도체두께	10	10	10	10
기판두께	500	500	500	500
layout	Oct.	Oct.	Rect.	Rect.

표 1. De-embedding에 사용된 인덕터 dimension[microns]

2-2 인덕터 모델 및 de-embedding 방법

평면형 MMIC 회로에서 가장 널리 쓰이는 de-embedding 방법은 open pattern의 Y-parameter를 빼는 방법이다. 하지만 이 방법은 feed line을 인덕터의 일부로 간주하기 때문에 de-embedding후에도 inductive한 기생 성분이 제거 되지 않고 성능에 영향을 미친다.

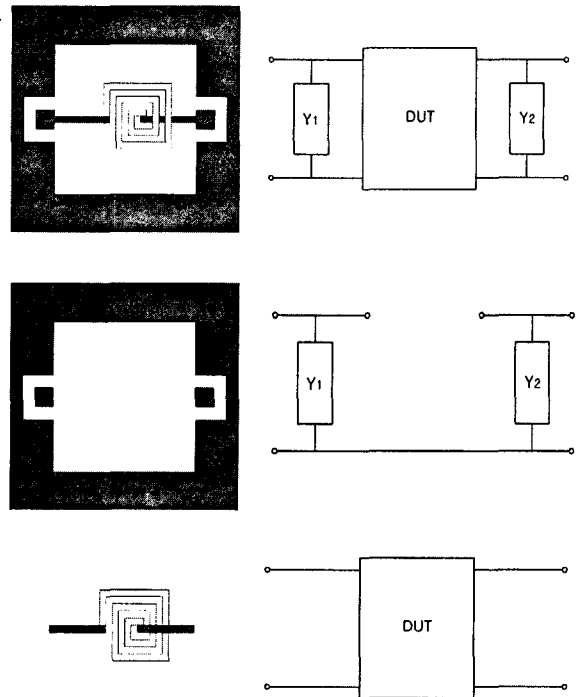


그림 3. Open Y-parameter subtraction method에 사용된 test structure 패턴들

Open과 short 패턴을 모두 이용하는 de-embedding (이하 open-short de-embedding)의 경우, 앞에서와 동일한 인덕터 test sample을 dut에 series 기생성분과 shunt 기생성분이 연결된 등가회로 모델로 보고, open pattern의 측정값을 이용해 shunt성분을 제거하고, open-short pattern의 측정값을 이용해서 series 성분을 제거한다. 이로 인해 de-embedding된 데이터는 스파이럴과 포스트 부분만의 성능을 특성화하게 된다.

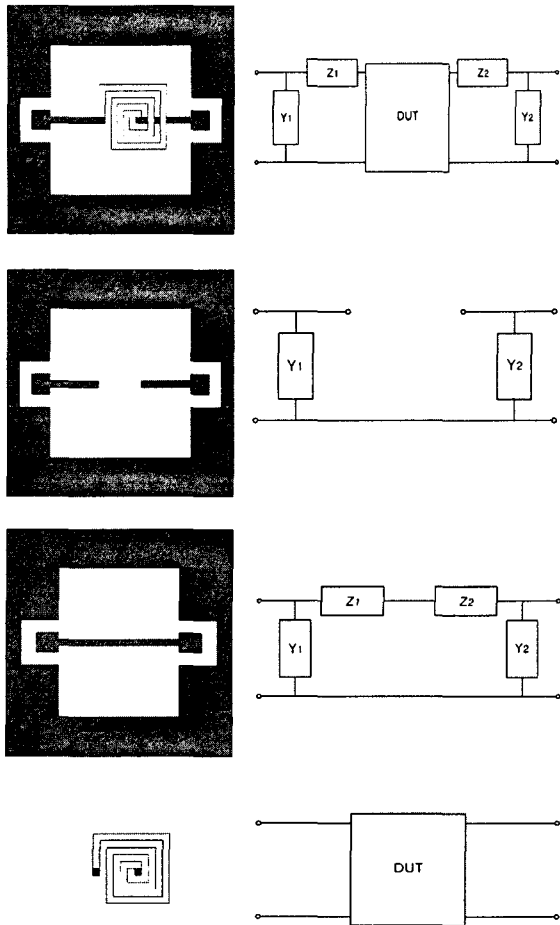


그림 4. Open-short de-embedding에 사용된 test structure 패턴들

Open-short de-embedding이 원하는 구조물의 인덕턴스를 정확하게 계산하는 지 확인하기 위해 그림 5와 같이 손실이 있는 silicon기판으로부터 20 micron elevation 시킨 폭 40, 도체 두께 10, 길이 1000 micron의 직선 인덕터를 open, short pattern과 함께 제작하고, de-embedding 될 부분을 100 micron씩 늘려가면서 de-embedding된 결과를 비교

한다. Simulation data를 가지고 open de-embedding과 open-short de-embedding을 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다. 두 de-embedding 방법 모두 Q값은 거의 동일한 성능을 보였지만, 인덕턴스 값을 관찰해보면 open만 사용한 de-embedding된 결과들은 인덕턴스가 증가하는 데 반해서, open-short을 둘 다 사용한 결과들은 거의 일정한 인덕턴스 값을 보인다. 이는 rectangular 단면을 갖는 직선 도체의 인덕턴스를 계산하는 공식 [6]에 대입한 값 0.83 nH와도 일치한다.

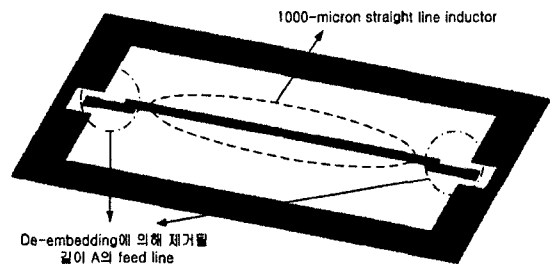


그림 5. De-embedding을 검증하기 위한 샘플

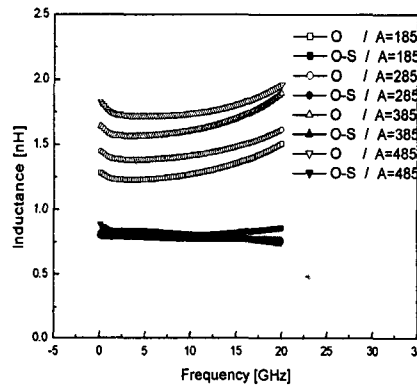
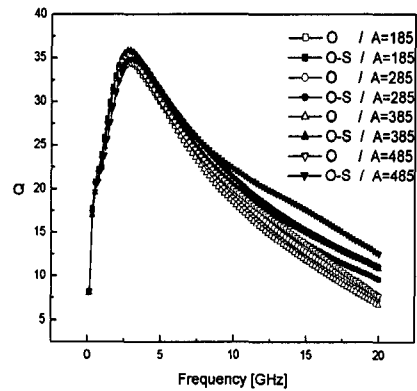


그림 6. De-embedding된 simulation data

2-3 측정 결과 및 토의

그림 7은 손실이 있는 기판으로부터 20 micron 띄워 제작된 인덕터와 바닥에 제작된 인덕터의 성능을 비교하고 있다. 거의 동일한 인덕턴스를 가지고 있지만, elevation한 인덕터가 그렇지 않은 인덕터보다 높은 Q값을 가지는데, 이는 손실이 있는 silicon 기판과의 접촉 면적이 작아서 기생 capacitance를 작게 형성하기 때문이다.

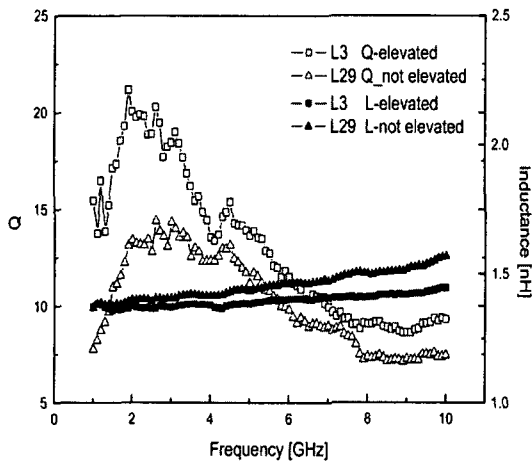


그림 7. Elevation된 인덕터의 Q값 향상

여기서 사용한 de-embedding 방법으로 인덕턴스 값이 잘 계산 되는지 확인하기 위해 L34와 L35 인덕터를 H.M. Greenhouse의 inductance calculation algorithm [6]을 이용하여 계산한 값과 비교하였다. Open-short de-embedding된 인덕턴스와 계산된 인덕턴스가 거의 동일한 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

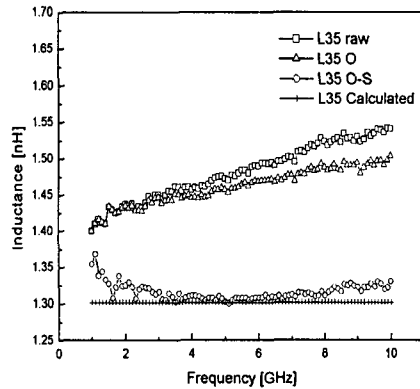
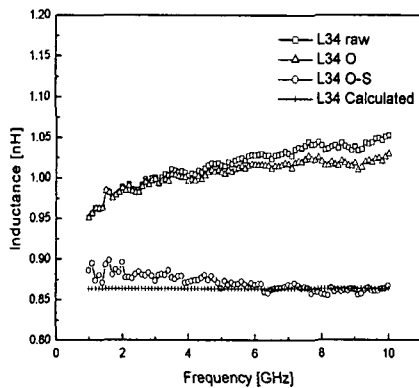


그림 8. Open-short de-embedding된 인덕턴스 값 비교

III. 결론

본 논문에서는 손실이 있는 silicon 기판위로 20 micron elevation 시킨 스파이럴 인덕터의 성능을 정확히 추출하는 de-embedding방법의 적용이 제시되었다. 기존의 open pattern을 이용해서 shunt 기생성분을 제거하는 것에 더해 open-short pattern을 이용해서 series 기생성분까지 제거하였다. 이는 실제로 집적화할 인덕터의 일부만의 특성을 추출해 낼 수 있으므로 RF MEMS 제작 기술을 가장 잘 이용하는 구조라 할 수 있다. 실제 제작된 인덕터의 측정치를 de-embedding한 결과와 계산값은 5% 내외의 오차를 보임을 확인할 수 있었다.

IV. 참고문헌

[1] Ashby, K.B.; Finley, W.C.; Bastek, J.J.; Moinian, S.; Koullias, I.A., "High Q inductors for wireless applications in a complementary silicon bipolar process," Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Proceedings of the 1994, pp. 179 -182, Oct. 1994

[2] Merrill, R.B.; Lee, T.W.; Hong You; Rasmussen, R.; Moberly, L.A., "Optimization of high Q integrated inductors for multi-level metal CMOS," Electron Devices Meeting, pp. 983 -986, Dec. 1995

- [3] Zu, L.; Yicheng Lu; Frye, R.C.; Lau, M.Y.; Chen, S.-C.S.; Kossives, D.P.; Jenshan Lin; Tai, K.L., "High Q-factor inductors integrated on MCM Si substrates," Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on, pp. 635 -643, Aug. 1996
- [4] Lopez-Villegas, J.M.; Samitier, J.; Cane, C.; Losantos, P.; Bausells, J., "Improvement of the quality factor of RF integrated inductors by layout optimization," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, IEEE Transactions on, pp. 76 -83, Jan. 2000
- [5] Tchamov, N.T.; Niemi, T.; Mikkola, N., "High-performance differential VCO based on Armstrong oscillator topology," Solid-State Circuits, IEEE Journal of, IEEE Transactions on, Volume: 36 pp. 139 -141, Jan. 2001