

마이크로머싱 기술을 이용한 spiral inductor의 제작 및 시물레이션 결과

김현호*, 주병권*, 이진국* 오명환*, 김수원**
*한국과학기술연구원, **고려대학교 전자공학과

Fabrication and Simulation Results of Spiral Inductors using the Micromachining Technology

Hyun-Ho Kim*, Byeong Kwon Ju*, Jeon Kook Lee*, Myung Hwan Oh*, and Soo Won Kim**

*KIST, **Dept. of Electronics Eng. Korea University

Abstract - The purpose of this paper is to demonstrate for the design and the fabrication of suspended spiral inductors using the micromachining technology. Also, the characteristics of spiral inductors with substrate lossless are simulated by lumped-element model. The absence of the lossy silicon substrate after micromachining results in significantly improved quality factor characteristics of 14. Micromachined spiral inductors have the improvement of a quality factor of about 60% than spiral inductors on silicon which is not micromachined.

1. 서 론

무선통신시스템 수요의 증가로 인해 마이크로전자산업과 결합한 여러 형태의 소자들이 연구 개발되어지고 있다. 그 중에서 GHz 이상의 고주파에 적용되는 인덕터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지 연구되어 온 실리콘 IC기술로는 낮은 Q인자(quality factor)로 인해 회로의 성능을 높이는 데 저해를 가져왔다. 특히 on-chip 인덕터의 Q인자는 스피럴 패턴을 형성할 때 박막의 직렬 저항에 의해 제한된다. 또한, 실리콘 기판에 의해 생성된 전류들의 에너지 손실이 가장 크기 때문에 실리콘 기판의 제거를 통해 높은 Q인자를 가질 수 있다. 실리콘 위에 형성된 스피럴 인덕터의 손실이 GaAs에 형성된 것보다 크기 때문에 높은 Q값을 가지도록 디자인하기는 어려워져서 GaAs 기판위에 스피럴 인덕터를 많이 제작했다. 그러나 실리콘 기판을 사용하였을 때는 저가격, 집적화 등의 장점을 가지고 있기 때문에 많은 RF IC에서 실리콘 공정을 선택하게 되었다[1-2].

본 연구에서는 인덕터의 성능에 관한 실리콘 기판의 효과를 살펴봄으로써 스피럴 인덕터의 디자인이나 성능에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 또한 실리콘 기판의 손실을 없애기 위해서 표면 마이크로머싱 기술을 이용하여 스피럴 인덕터의 설계 및 제작에 관해 기술하였으며, 제작된 스피럴 인덕터의 시물레이션 특성과 기판의 손실을 분석하기 위하여 간단한 lumped-element 회로 모델을 이용하여 결과를 나타내었다[3-5]. 또한 인덕터의 Q값에 영향을 미치는 선폭, 선간의 간격, 그리고 금속의 두께 등을 일정하게 함으로써 기판에 의한 손실을 살펴볼 수 있었다.

2. 본 론

2.1 스피럴 인덕터의 제조

그림 1은 스피럴 인덕터의 전체적인 공정 순서를 각각의 도식적인 구조로 나타낸 것이다. 제작 공정을 순서에 따라 설명을 하면 다음과 같다. 실리콘 기판위에 멤브레인 층으로 다층유전막(Si₃N₄/ SiO₂/ Si₃N₄)을 LPCVD 방법으로 증착하였으며, 이 다층절연막은 우수한 멤브레인의 역할을 하였다[그림 1(a)]. 하부전극은 reactive sputtering을 이용하여 다층 절연막 위에 Cr(5000Å)을 증착하고 식각을 하여 패턴닝하였다[그림 1(b)]. 상부패턴과 하부패턴과의 절연을 위해서 SiO₂(5000Å)의 절연막을 증착하였다.[그림 4(c)]. 상부의 스피럴 인덕터 패턴과 하부의 패턴과의 contact을 위해서 contact window를 RIE 식각을 이용하여 건식식각함으로써 형성하였다 [그림 4(d)]. 스퍼터링의 방법에 의해 상부 금속(Cr, 8000 Å)을 증착하고 스피럴 인덕터의 패턴을 형성하였다. 제작된 스피럴 인덕터의 선폭은 17µm, 선과 선사이의 거리는 17µm, 2 turns으로 형성되었다[그림 1(e)]. 멤브레인 형성하기 위해서 실리콘 식각장을 패턴닝하고, 다층절연막 (Si₃N₄/ SiO₂/ Si₃N₄)을 RIE(reactive ion etching)를 사용하여 식각하였다. 실리콘 식각은 25wt.% TMAH 식각액을 사용하여 수행되었으며, 멤브레인을 형성하기 위한 공정은 90°C의 온도에서 3시간 30분동안 식각함으로써 행성 하였다[그림 4(f)].

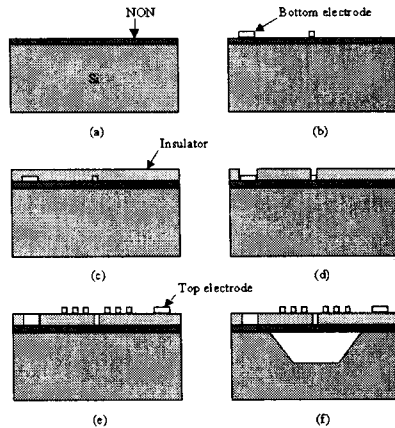


Fig. 1. Process flow of the inductor

그림2는 그림 1(e)에서 도시한 구조의 사진을 나타내 고 있는데 실리콘 기판위에 형성된 인덕터의 일반적인 형태이다. 그림 3은 제조된 suspended 스피럴 인덕터의

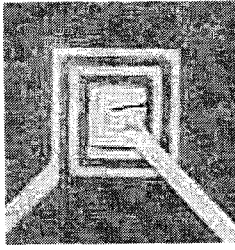
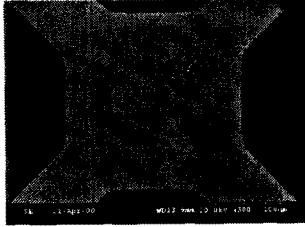
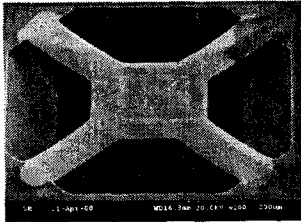


Fig. 2. Photograph of a spiral inductor



(a)



(b)

Fig. 3. SEM photographs of the micromachined inductor

SEM 사진을 보이고 있다. 제작된 suspended 스페럴 인덕터의 선폭은 $17\mu\text{m}$, 선과 선사이의 거리는 $17\mu\text{m}$, 2 turns으로 형성되었다.

위의 제조공정에 의해 제조된 스페럴 인덕터는 실리콘 기판의 손실을 없앴으로서 높은 Q(quality factor)를 가지는 소자를 제조가 가능하였다.

2.2 Lumped-element 모델

그림4는 스페럴 인덕터의 lumped-element 모델을 나타내었다. 실리콘 기판을 제거하였으므로 기판의 영향으로 인한 기판 손실 factor들이 제거된 등가회로를 보이고 있다. 각각에 대한 파라미터의 값들은 한 포트가 접지가 된 one-port로 모델된 여러 가지 파라미터들을 추출함으로써 얻어지게 된다.

그림 4에서 C1은 스페럴 인덕터 사이에 존재하는 커패시터를 나타내고, C2와 C3는 스페럴 인덕터 밑의 절연막에 의한 커패시터를 나타내었다. 또한 L1은 스페럴 인덕터의 인덕턴스를, R1은 인덕터의 직렬저항을 나타냈다. 이 모델에서는 패드에 의한 영향, 즉 패드에 의한 저항 및 커패시터 성분은 고려하지 않고 모델링되어졌다.

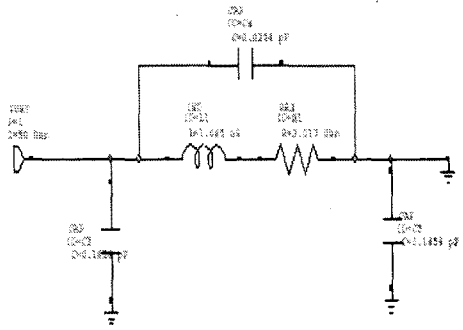
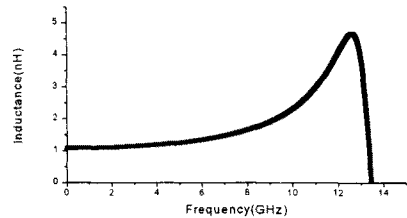


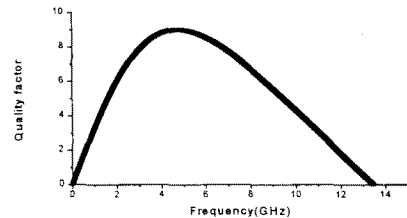
Fig. 4. Equivalent circuit model of a spiral inductor with the substrate lossless.

2.3 결과 및 고찰

그림 5는 실리콘 기판의 손실을 가지고 있는 스페럴 인덕터의 주파수에 따른 인덕턴스와 Q값을 나타낸 것이다. 최대의 Q값은 5GHz에서 약 9의 값을 가지게 되었다. 그림 6에서는 실리콘 기판의 손실이 없는 스페럴 인덕터에 대해서 Q값 및 인덕턴스를 나타내었는데, 6GHz에서 약 14의 Q값을 가졌다. 실리콘 기판에 의한 손실은 스페럴 인덕터와 기판의 기생 효과에 의해서 결정되어지는데 마이크로머신닝된 스페럴 인덕터의 경우는 실리콘이 존재하는 경우보다 약 60%의 Q값의 향상을 보였다.

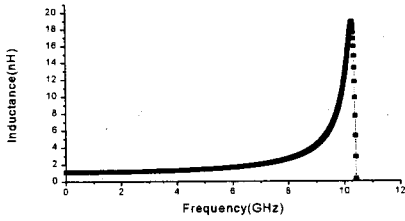


(a) Inductance of the conventional model.

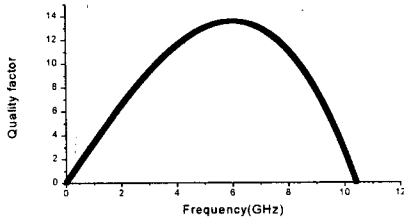


(b) Quality factor of the conventional model

Fig. 5. L and Q versus frequency of a spiral inductor with the substrate loss.



(a) Inductance of the suspended model.



(b) Quality factor of the suspended model.

Fig. 6. L and Q versus frequency of a spiral inductor with the substrate lossless.

실리콘 기판 위에 형성된 스파럴 인덕터는 마이크로머시닝공정을 통해서 air-gap 형태로 제작을 함으로써 직접 실리콘 위에 형성된 스파럴 인덕터보다 Q값의 향상을 볼 수 있었다.

3. 결 론

스파럴 인덕터의 특성을 결정하는 요소인 선폭, 선과 선사이의 거리, turn 수 등을 제외하고 실리콘 기판에 의한 손실만을 고려하여 스파럴 인덕터의 특성에 미치는 변화를 조사하기 위하여 lumped-element 모델을 행하여 Q값과 인덕턴스를 시뮬레이션하였고, 실제 마이크로머시닝된 스파럴 인덕터를 설계 및 제작을 하였다.

lumped-element 모델에서 실리콘 기판을 마이크로머시닝한 소자에 대한 여러 가지 파라미터를 추출하였는데 1.1nH의 인덕턴스를 가졌다. 또한 실리콘 기판의 손실에 의해서 생긴 Q값의 변화에서는 약 60% 향상된 것을 알 수 있었으며, 실리콘 기판손실을 없앤 스파럴 인덕터의 최대 Q값은 14를 보였다. 지금까지 높은 Q값을 가지는 인덕터들이 많이 연구되어졌지만 이 연구에서는 기판의 손실만을 고려하였다. 그래서 여러 연구자에 의해 제작된 스파럴 인덕터보다 Q값이 크지 않지만 마이크로머시닝된 스파럴 인덕터를 제작하였을 경우 Q값의 향상을 볼 수 있었다. 이러한 소자들은 표준 IC 공정에서 사용되어진다면 RF 소자의 성능을 향상을 가져다 줄 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

[1] J. Y. C. Chang, A.A. Abidi, and M.Gaitan, "Large suspended inductors on silicon and their use in a

2 μ m CMOS RF amplifier," IEEE Electron Device Lett., vol. 14, pp.246-248, May 1993.
 [2] R.P. Ribas, J.Lescot, J.L. Leclercq, N. Bennouri, "Micromachined planar spiral inductor in standard GaAs HEMT MMIC technology," IEEE Electron Device Letters, vol. 19, No. 8, 1998.
 [3] J. R. Long and M. A. Copeland, "The modeling, characterization, and design of monolithic inductors for dilicon RF IC's," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 32, pp. 357-369, Mar. 1997.
 [4] A. M. Niknejad and R. G. Meyer, "Analysis and optimization of monolithic inductors and transformers for RF IC's," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 32, pp. 375-378, May 1997.
 [5] C. patrick Yue, changsup Ryu, Jack Lau, "A Physical Model for Planar Spiral Inductors on Silicon," IEDM, 1996, pp. 155-158.