

MEMS에 의한 On-chip 고종횡비 Air Core Solenoid 인덕터의 제작

Fabrication of Micromachined On-chip High Ratio Air Core Solenoid Inductor

Jeong-Bong Lee², 김경환^{1,a}
(Jeong-Bong Lee² and Kyung-Hwan Kim^{1,a})

Abstract

We present high aspect ratio air-core solenoid inductors with 100 μm and 200 μm tall via structures on Pyrex wafer. The effect of various parameters such as different number of turns, via heights, pitch distance between turns on inductor's radio frequency (RF) characteristics have been studied. The highest Q factor we obtained from various solenoid inductors is 72.8 at 9.7 GHz, which was produced by a 3-turn inductor.

Key Words : Solenoids, Inductors, Q factor, Micromachining, High-frequency radio communication

1. 서론

현재의 무선통신기술의 발전과 함께 무선통신기계의 소형화 및 저소비전력의 요구 또한 증대하였고 고성능의 휴대용무선통신기기제작을 위해 필수적인 고성능 수동 On-Chip 인덕터의 개발이 요구되고 있다. 이들 중 spiral type 인덕터[1,2]들이 디자인의 설계 및 제작공정의 상대적 편의성 때문에 주로 사용되고 있다. 기판에 관련된 큰 손실 및 기판으로의 수직적인 자속의 영향 등의 관점에서 최근에 연구자들은 chip 면적을 줄이면서 인덕터의 성능을 향상시키는 대안으로 3차원 on-chip 인덕터를 구현하게 되었다[3-5].

본 연구에서는 무선통신에 응용 가능한 큰 품질계수(Q)과 큰 인덕턴스를 얻을 수 있는 다양한 고종횡비(High Aspect Ratio)의 air core solenoid type의 인덕터를 설계 및 제작하였다.

2. MEMS 인덕터의 설계

인덕터의 품질계수는 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다. $Q=wL/R_s$, 여기서 L은 인덕턴스 R_s 은 표피효과에 의해 동작주파수에 의존성이 있는 코일의 등가직렬저항이다.

큰 품질계수의 인덕터를 구현하기 위해서는 표유용량과 등가 직렬저항값을 최소화 시켜야한다. 표유용량의 주요한 원인으로는 기판과 도체(기판기생효과) 및 도체와 도체사이의 정정용량도 포함된다. 솔레노이드 인덕터의 인덕턴스는 다음과 같이 간단하게 표현될 수가 있다. $L=N^2tw\mu/l$, 여기서 N은 턴 수, t, w, l, μ 은 각각 Via 높이, 폭, 길이, 코어의 투자율이다. 그러므로 제한적인 2차원 구조(길이와폭)에서 큰 인덕턴스를 얻기 위해서 폭보다 높이가 큰 고종횡비구조($t>w$)가 요구된다. 퍼멀로이($Ni_{81}Fe_{19}$)와 같은 자기철심재료는 고주파수에서 매우 손실이 커서 1 GHz이상의 고주파수에서는 손실이 적은 air core가 선택될 수가 있다. air-core가 적용된다면 인덕터의 자기적특성은 그 형상구조에 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 인덕터의 RF특성에 관한 여러 변수들의 영향을 규명하기 위하여 그림 1에 나타낸 것과 같은 4가지의 다른 형태의 구조를 설계하였다.

1. 강원대학교 전기정보공학부
(경기도 성남시 수정구 복정동 산65)
2. Department of Electrical Engineering, University of Texas at Dallas(UTD)
a. Corresponding Author : khkim@kyungwon.ac.kr
접수일자 : 2006. 3. 2
1차 심사 : 2006. 6. 14
심사완료 : 2006. 6. 16

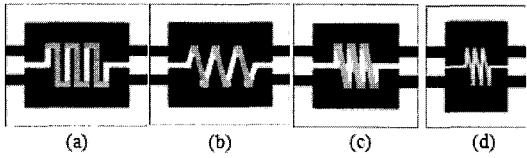


그림 1. Group (a) A, (b) B, (c) C, (d) D의 설계.

Fig. 1. Design layout for Group (a) A, (b) B, (c) C and (d) D.

모든 설계에 대해서 도체의 두께는 20 μm 코어폭은 200 μm 으로 하였다. 그룹A-C에 대해서는 도체 폭을 40 μm , 그룹D에 대해서는 도체폭을 20 μm 으로 하였다. turn사이의 피치거리는 그룹A에서 D까지 각각 120, 130, 80, 50 μm 로 정하였다.

3. 제작

On-Chip 인덕터를 제작하기 위하여 고저항, 저유전상수를 가지는 직경3인치, 두께 700 μm 의 Pyrex glass wafer를 기판으로 사용하였으며 웨이퍼에 전해도금을 위한 seed layer을 증착하였으며 그 위에 두께 20 μm 로 SU8(Microchem Corp., Newton, MA)을 스핀코팅 하여 패터닝을 하였다. 이어서 구리를 바닥도체의 형태로 도금하였다. 다른 층의 두께 100~200 μm 의 SU8이 첫 번째 층 위에 스핀코팅 되었다. 그 층은 패터닝 되었고, 그 후 구리를 vias 형태로 도금하였다. 마지막 20 μm 의 SU8은 스핀코팅 후 top conductor의 형태로 도금되었다. SU8 도금 몰드층과 금속 seed layer은 plasma etching(20 % CF_4 : 80 % O_2)과 wet chemical etching으로 제거되었다. 그림 2는 인덕터의 제작공정을 나타낸다.

그림 2는 높이 200 μm , 5-turn인 인덕터의 D그룹 SEM 사진이다.

4. 측정

다양한 형태로 제작된 인덕터는 Cascade Summit 12 k on-wafer probing system을 가진 Anritsu 37369A vector network analyzer를 사용하여 측정하였다.

Q factor, 인덕턴스, 자기 공진 주파수(SRF)와 같은 주요 인덕터의 특성은 측정된 S-parameter

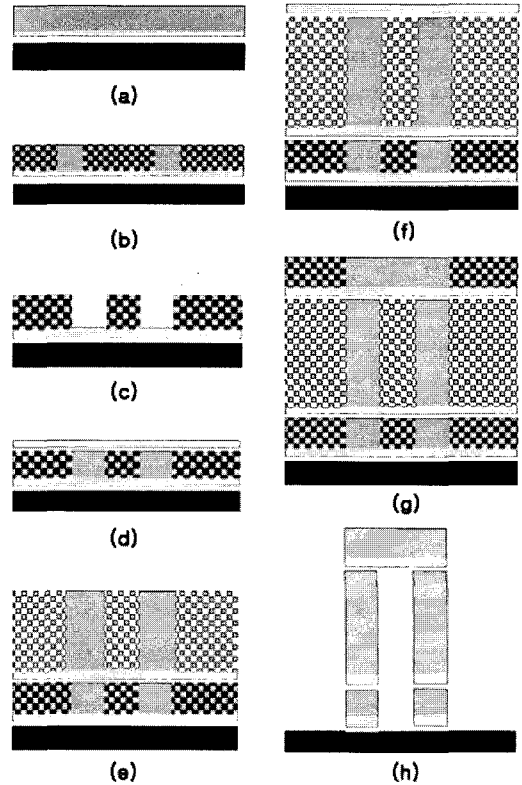


그림 2. 인덕터의 제작공정: (a) SU8 PR 스핀코팅 및 베이킹, (b) UV노광, 후노광 및 베이킹, (c) 현상, (d) via구조 도금을 위한 2번째 seed layer, (e) UV노광, 후노광 및 베이킹, (f) 3번째 seed layer을 위한 금증착, (g) 구리도금, (h) 최종 SU8 몰드 제거, seed층 제거.

Fig. 2. Process Sequences for fabrication of Inductor: (a) Spin coat SU8 PR and baking, (b) UV exposure, post-exposure Baking, (c) Development plasma cleaning (d) 2nd seed layer for via structure electroplating, (e) UV exposure, post-exposure baking, (f) 3rd seed layer deposition-Au, (g) Cu electroplating (h) Final SU8 mold removal, seed layer removal.

data에서 얻었다. 0.031 mm²의 면적을 차지한 via높이 200 μm 의 그룹 C에서 3-turn 인덕터(그림 3)에 의해 9.7 GHz에서 72.8의 최대Q값을 얻었다. 이 인덕터는 peak Q frequency에서 2.15 nH의 인

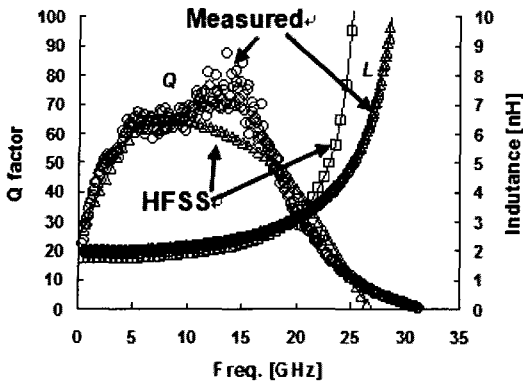


그림 3. Group C의 3-turn inductor에 대한 측정된 품질계수 Q 와 인덕턴스 L.
 Fig. 3. Measured Q and L for the 3-turn inductor in Group C.

인덕턴스 와 31 GHz의 SRF를 나타내었다. 또한 인덕터 설계에 대하여 시뮬레이션(HFSS)을 수행하였으며 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 일치함을 알 수 있었다. 그림 3에 HFSS 시뮬레이션 결과와 측정결과를 같이 나타내었다.

5. 결과 및 고찰

인덕터의 턴 수, Via높이, 각 턴 사이의 거리(피치거리) 등 여러 가지 변수의 영향에 따른 RF 특성을 조사하였다.

5.1 Turn수의 영향

인덕터의 턴 수가 인덕터의 동작성능에 미치는 영향을 구하기 위해서 그룹 B와 D의 주요한 인덕터 특성을 그려보았다. 그림 4(a)는 그룹 D에서 5-turn과 10-turn에 대해 측정된 Q값과 인덕턴스이다. 10-turn의 인덕터가 5-turn의 것에 비해 낮은 peak Q값과 SRF값을 그러나 인덕턴스의 경우 큰 인덕턴스를 가진다는 것을 나타낸다. 그림 4(b)는 그룹 B와 D의 Q factor, peak Q에서의 인덕턴스 그리고 SRF에 대한 경향을 보여준다. 경향곡선에 의하면 인덕턴스는 도체나 Via 형태와 설치 간격(pitch distance)보다는 턴 수에 선형적인 관계가 있음을 볼 수 있다. 그러나 인덕턴스 곡선의 기울기는 설치 간격(pitch distance)이 짧을수록 크다는 것을 알 수 있다. 경사도는 B그룹 인덕터(pitch distance 130 μm)의 0.37 nH/turn에서 D그룹 인덕터

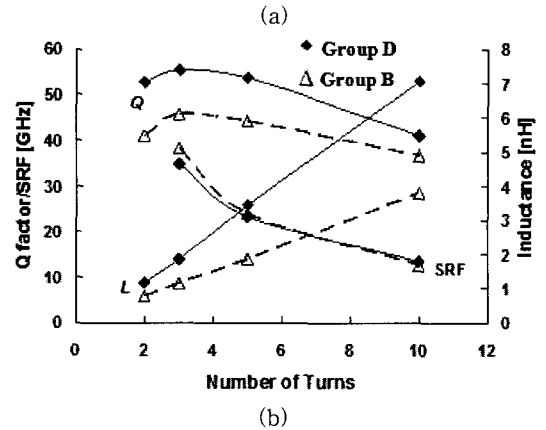
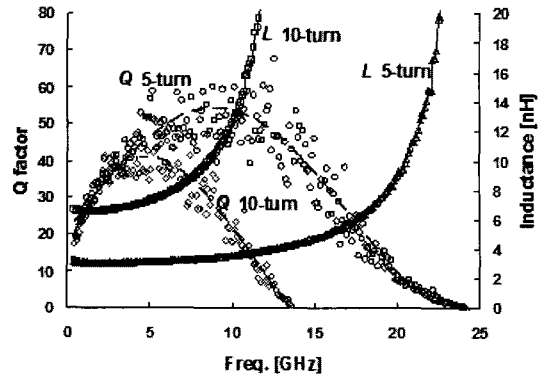


그림 4. (a)Group D의 5-turn inductor과 10-turn inductor에 대한 측정된 품질계수 Q 와 인덕턴스 L, (b) Turn 수의 함수로 나타낸 인덕터의 Q, L 과 SRF의 경향곡선.
 Fig. 4. (a) Measured Q and L for 5 and 10-turn inductors in Group D and (b) overall trend curves for inductor's Q, L and SRF as a function of number of turns.

(pitch distance 50 μm)의 0.78 nH/turn로 급격히 증가하였다. 이것은 작은 설치 간격(pitch distance)이 상호 turn간의 인덕턴스를 효과적으로 증가시키는 것을 나타낸다.

두 그룹 모두 턴 수 3에서 가장 높은 Q 값을 보여주었으며, 그 후에는 선형적으로 감소하는 양상을 보여주었다. 우리는 인덕턴스 대 직렬 저항간의 비가 3 turn에서 가장 크다고 추측하고 있다. 다시 말해서 3-turn의 인덕터가 상대적으로 낮은 저항값에 비해 높은 인덕턴스값을 나타낸다는 것이다. 그 이상의 턴 수에서는 길어진 도체로 인한

직렬 저항의 급속적인 증가를 보인다. 그리고 턴수의 증가로 인한 자기 결합영향보다 접촉저항증가가 더 크게 작용하게 되는 것이다. 따라서, 많은 턴수의 인덕터가 적은 턴수의 인덕터에 비해 낮은 Q값을 갖게 되는 것이다.

단일 설계된 모든 2-turn의 인덕터에 대한 SRF는 40 GHz를 넘어서기 때문에 우리의 장비로는 측정할 수 없다. 예측한바와 같이 인덕터가 턴수가 커지면 SRF는 감소하게 된다. 높은 인덕턴스는 보다 많은 권선, 보다 넓은 도체와 via 구조간의 대향 면적 범위 그리고 기판간의 접촉 면적을 넓게 하여 제작할 수 있으며, 보다 낮은 SRF를 갖는 인덕터를 제작할 수 있다. 비록 D 그룹의 인덕터가 B그룹에 비해 높은 인덕턴스를 가지고 있지만, D 그룹의 인덕터는 좁은 폭의 바닥도체를 가지고 있으므로 기판과의 접촉면이 작게 확보된다. 따라서 기판과 금속간의 정전용량이 상당량 줄어들게 되고, 따라서 높은 SRF를 유지하게 되는 것이다. 그러므로, 많은 턴수의 인덕터는 작동 주파수 범위의 영역을 감소시키지만 이런 영향은 얇은 금속을 사용함으로써 해서 최소화 시킬 수 있다.

5.2 Via 높이의 영향

100 μm 와 200 μm via높이 구조를 갖는 인덕터를 1 via높이에 따른 인덕터 특성을 연구하기 위해 제작하였다. HFSS 시뮬레이션 결과, 다른 parameters 즉 턴수, core 폭, pitch distance등, 을 동일하게 유지했을때, 더 큰 via높이를 가진 인덕터는 더 큰 Q factor와 인덕턴스, 낮은 SRF를 발생한다. 그룹 C에서 3-turn 인덕터의 측정 결과 그림 5(a)와 같이 동일 패턴을 나타낸다. 그림 5(b)는 더 큰 via를 가진 인덕터가 더 큰 Q 와 인덕턴스를 가짐을 보여주고 그 Q의 증가율 약 45 %이다. 100 μm와 200 μm via를 가진 인덕터는 SRF에서 비슷한 경향을 보여주는 반면에, 더 큰via를 가진 인덕터의 SRF가 작은 via를 가진 인덕터보다 더 낮았다.

그림 5(b)에서 인덕턴스는 여전히 턴수와 선형 관계임을 보여준다. 다시 말해, 더 큰 via를 가진 인덕터는 더 작은 via를 가진 것 보다 더 급한 기울기를 가지고 있다. 큰 via구조에 의해 만들어진 더 큰 자속 영역이 턴간의 상호 자기적결합을 주어 큰 인덕턴스를 만들어 낸다고 생각된다. 인덕턴스의 턴수 증가에 따른 변화율 변화가 3-turn 과 10-turn 인덕터에서 각각 50 %에서 73.5 %로 증

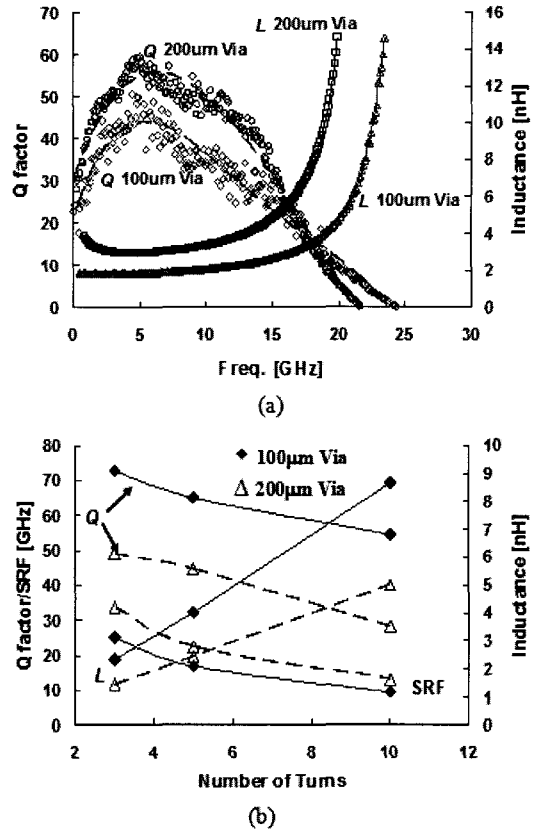


그림 5. (a) Via 높이 100 μm과 200 μm의 Group C의 3-turn인덕터의 측정된 품질계수Q와 인덕턴스L (b) Via 높이로 나타낸 주요한 인덕터 RF특성에 대한 경향곡선.

Fig. 5. (a) Measured Q and L of 3-turn inductor in Group C with 100 and 200 μm via structures and (b) trend curves for inductor's major RF characters with different via height.

가하기에 이 효과는 더 많은 턴수의 인덕터에서 더욱 명백하다. 따라서, 더 큰 인덕턴스는 더 큰 Q factor의 결과를 가져온다. Q의 일정한 변화의 이유는 큰 via 구조에 의한 더 큰 저항의 발생이 원인으로 생각된다. 저항의 증가 외에, via사이 면적 영역의 증가 때문에 기생효과가 증가하여 Q의 증가를 제한하는 또 다른 인자로 작용할 수 있다. 더 큰 via 구조에 의해 발생한 더 큰 인덕턴스와 via간 기생효과는 SRF감소의 주된 원인이 된다.

6. 결론

본 논문에서는 매우 높은 Q-factor air core high aspect ratio 솔레노이드 인덕터를 제작 및 측정 하였다. 이러한 형태의 인덕터는 많은 흥미로운 특징들을 - 높은 Q factor, 인덕턴스 값 및 상당히 넓은 동작 주파수 범위를 포함한 - 가지고 있다. 턴 수의 증가가 높은 인덕턴스 값을 유도 하지만 낮은 Q와 SRF를 야기한다는 것을 알 수 있었다. 매우 얇은 두께의 금속과 좁은 설치간격(pitch distance)을 가지는 인덕터는 동일한 폭과 높이를 가지고 있으나 보다 넓은 설치간격과 넓은 금속으로 만들어진 코어들 보다 더 좋은 RF 특징을 가지고 있다. via 높이의 증가는 인덕터의 품질계수(Q)와 인덕턴스를 효과적으로 증가시키지만, SRF 영역에 현저한 감소의 원인이 된다. 기판과 금속간의 접촉면의 감소는 높은 품질계수(Q)와 SRF를 얻는데 기여한다. 하지만 인덕턴스의 조절에 있어서 중요하게 작용하지 않는다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 학술진흥재단 대학교수해외 방문연구지원사업(과제번호:D00048)에 의해 수행되었습니다. 본 연구에서 제작 및 측정에 도움을 준 UTD의 Hong Lu와 Brandon Pillans에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] C. Chen, Y. Fang, C. Yang, and C. Tang, "A deep submicron CMOS process compatible suspending high-Q inductor", IEEE Electron Device Letters, Vol. 22, No. 11, p. 522, 2001.
- [2] E.-C. Park, Y.-S. Choi, J.-B. Yoon, S. Hong, and E. Yoon, "Fully integrated low phase-noise VCOs with on-chip MEMS inductors", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 51, No. 1, p. 289, 2003.
- [3] J. B. Yoon, B. K. Kim, C. H. Han, E. Yoon, and C. K. Kim, "Surface micromachined solenoid on-Si and on-glass inductors for RF applications", IEEE Electron Device Lett, Vol. 20, No. 9, p. 487, 1999.
- [4] Y. Kim and M. Allen, "Surface micromachined solenoid inductors for high frequency applications", IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Tech., Part-C, Vol. 21, No. 1, p. 26, 1998.
- [5] N. Chomnawang, J.-B. Lee, and W. A. Davis, "Surface micromachined arch-shape 3D solenoid inductors for high frequency applications", SPIE Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems, Vol. 2, No. 4, p. 275, 2003.