

나선형 박막 인덕터의 주파수 특성

박대진, 민복기, 김인성, 송재성

한국전기연구원

Characteristics of spiral type thin film inductors for the frequency

Dae-Jin Park, Bok-Ki Min, In-Sung Kim and Jae-Sung Song

KERI

Abstract

In this study, Spiral inductors on the SiO₂/Si(100) substrate were fabricated by the magnetron sputtering method. Cu thin film with the thickness of 2 μm was deposited on the substrate. Also we fabricated square inductors through the wet chemical etching technique. The inductors are completely specified by the turn width and the spacing between spirals. Both the width and spacing between spirals were varied from 10 to 60 μm and from 20 to 70 μm, respectively. Inductance and Q factor dependent on the frequency were investigated to analyze performance of spiral inductors.

Key Words : spiral, inductor, inductance, Q factor, thin film

1. 서 론

박막 저항, 박막 캐패시터와 함께 많은 연구가 수행되고 있으며 집적화 및 ASIC화를 위한 박막 인덕터는 100 nH 보다 낮은 용량에서는 단일 소자 뿐만 아니라 디바이스에서도 기술적 진전이 상당히 이루어져 있다. 단일 부품들은 높은 인덕턴스와 Q 값 그리고 낮은 직류 저항을 나타내는 솔레노이드 형태가 일반적이다. 그러나 통신용 부품과 같이 높은 주파수의 요구에 따른 박막 인덕터의 제작은 전자회로의 소형화, 경량화 추세에 따른 시대적 흐름이다.^[1, 2]

본 연구에서 박막 인덕터의 전체크기는 720×720 μm²으로 하고 선폭을 10~60 μm로, 선 간격을 20~70 μm로 변화 시켰다. 고주파용 회로 설계 기술을 기반으로 선폭과 선 간격의 변화에 따른 박막 인덕터를 제작하고 주파수에 따른 인덕턴스와 Q 값을 측정함으로써 인덕터의 주파수 특성을 이해하고 수동소자로써의 라이브러리를 확립하고자 함이 목적이다.

2. 실험

2.1 시료제작

박막 인덕터 제조시 사용되는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템의 금속 타겟은 99.999%의 구리(Cu)를 사용한다. 21×21 mm²로 자른 SiO₂ 기판을 TCE(trichloroethylene), 아세톤, 메탄올로 깨끗하게 세척한 후 SiO₂ 기판을 진공 챔버에 장착시키고 진공도 10⁻⁷ Torr 이하로 초기 진공 상태를 만들어 준다. 스퍼터링 시스템의 플라즈마 방전을 위해 아르곤(Ar) 가스를 50 sccm 으로 주입시킨다. 아르곤 분압은 4 mTorr로 맞추고 RF 전원을 서서히 올리면 플라즈마가 발생하여 증착이 시작된다. 전력을 200 W 까지 올리고 구리 타겟의 산화막을 제거하기 위해 10분 정도 예비 증착을 한다. 예비 증착이 끝나면 구리를 증착하는데 반사 전력이 1 W에서 구리의 증착율은 22.2 Å/sec이므로 두께 2 μm의 구리를 증착하기 위해서 약 15분이 소요된다.

그림 1은 인덕터의 제조공정을 나타낸 것이며

구리가 증착된 시료위에 노광(photo-lithography) 공정을 거쳐 습식식각에 의해 시료가 완성된다. 구리의 식각액은 일반적으로 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 와 증류수를 1:1로 희석시켜 사용한다. 구리 식각액의 식각율은 $570 \text{ \AA}/\text{sec}$ 이며, 2 \mu m 의 두께를 가진 구리를 식각하려면 약 35초가 소요된다. 식각이 완전히 끝나면 시료를 증류수에 깨끗이 세척한 후 질소 가스로 건조시키면 시료의 제작이 끝난다.

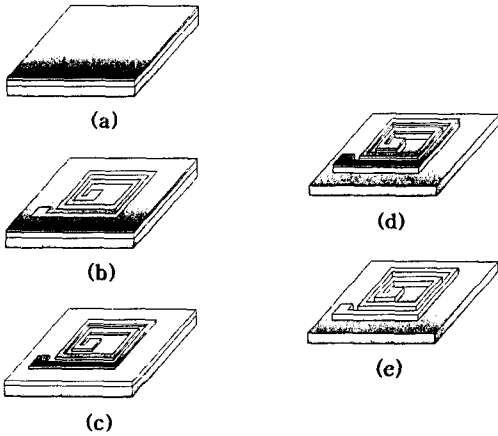


그림 1. 나선형 박막 인덕터의 제조 공정

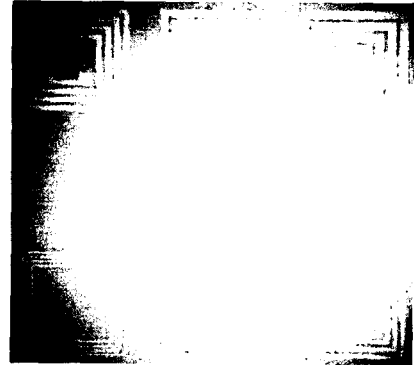
Fig. 1. Process of a spiral type thin film inductor

- (a) SiO_2 기판 위에 구리를 두께 2 \mu m 로 증착시키고 포토레지스트를 균일하게 코팅시켜 건조시킨다.
- (b) 시료를 mask aligner에 장착하여 UV 선으로 포토레지스트를 감광시킨다.
- (c) 감광된 시료를 developer에 담가 감광된 부분의 포토레지스트를 제거해 준다.
- (d) 시료를 식각액에 담가 구리를 식각한다.
- (e) 시료에 남아 있는 포토레지스트를 아세톤으로 제거해준다.

그림 2는 선폭과 선 간격의 변화에 따른 주파수 특성을 알아보기 위해 만든 시료이다. 먼저 첫 번째 시료는 감은수를 4회로 고정시키고 선폭을 10 \mu m 부터 60 \mu m 까지 10 \mu m 씩 변화시켜 만든 6개의 박막 인덕터이다. 인덕터 하나의 전체 크기는 $720 \times 720 \text{ \mu m}^2$ 이고 선 간격은 모두 20 \mu m 이다. 두 번째 시료는 감은수를 4회로 고정시키고 선 간격을 20 \mu m 부터 70 \mu m 까지 10 \mu m 씩 변화시켜 만들었다. 6개의 시료 모두 선폭이 20 \mu m 이고 전체 크

기는 $720 \times 720 \text{ \mu m}^2$ 이다.

HP 4194A impedance analyzer를 이용해 3~15 MHz 대역에서 인덕터의 형상에 따른 인덕턴스와 Q 값을 측정하였다.



(a)



(b)

그림 2. 완성된 시료의 사진

Fig. 2. Photograph of completed samples

- (a) 선폭 $10 \sim 60 \text{ \mu m}$ 로 변화시켜 만든 나선형 박막 인덕터
- (b) 선 간격 $20 \sim 70 \text{ \mu m}$ 로 변화시켜 만든 나선형 박막 인덕터

3. 결과 및 고찰

나선형 박막 인덕터의 동가회로는 일반적으로 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.^[3] 박막 인덕터의 임피던스는 코일 자체의 R과 L 이외에 기판의 산화막(SiO_2)에 의한 캐패시터(C_{ox})와 Si 기판에 의한 임피던스(R_{s1} , R_{s2} , C_{s1} , C_{s2}) 등 주파수에 의존하는 양이 있다.

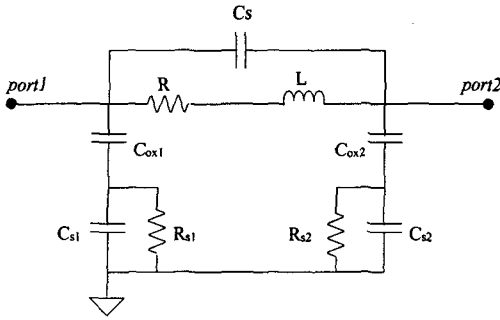


그림 3. 박막 인덕터의 동가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of an inductor

그림 4는 인덕터의 전류흐름을 나타낸 그림이다. 각각의 도선은 자기 인덕터를 가지고 있으며 인접하는 선들끼리는 상호 인덕터를 갖는다. 두 도선에 흐르는 전류의 방향이 같으면 상호 인덕터는 양의 값을 가지고 방향이 반대면 음의 값을 갖는다. 또한 전류의 방향이 서로 직각이면 상호 인덕터는 없다.^[4]

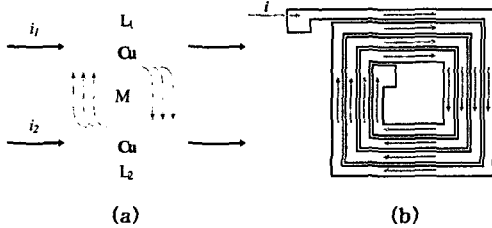


그림 4. (a) 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스.
(b) 박막 인덕터의 전류흐름.

Fig. 4. Self and mutual inductance in spirals

한편, 박막 인덕터의 와전류와 표피효과를 고려할 때 인덕턴스는 다음과 같다.

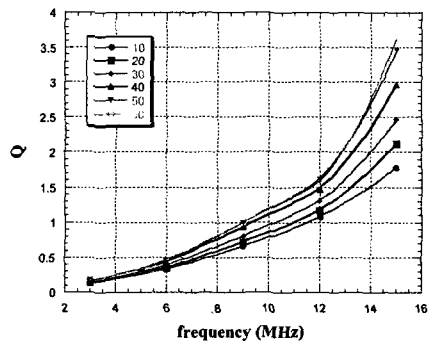
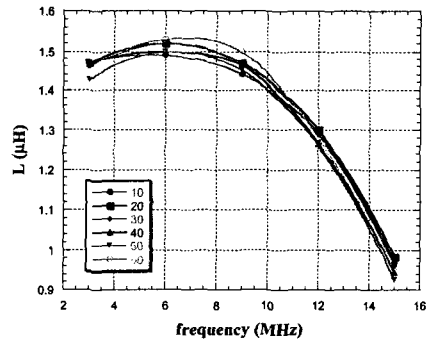
$$L_{total} = K_1(f)L_{self}^\alpha + \sum_q [1 + K_2 B(\tau)t\pi\sigma\omega^2 f]L_{mutual}^\alpha$$

$$Q = \frac{\text{stored energy}}{\text{dissipated energy}} = \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z}$$

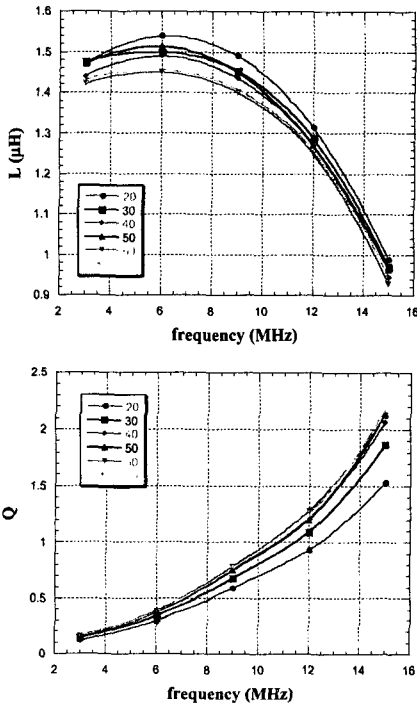
DC영역에서 와전류와 표피효과의 영향이 극히 작아서 인덕턴스의 값은 단순히 $L_{self}^\alpha + L_{mutual}^\alpha$ 으로 근사할 수 있다. 즉 저주파 영역에서 인덕턴스는 주파수의 영향이 적음을 의미한다.^[3]

본 연구에서 박막 인덕터의 인덕턴스는 1.7 μH 부터 수십 nH까지 측정 되었으며, Q 값은 최대 3.64까지 측정 되었다. 그림 5는 선폭과 선 간격의 변화에 따른 주파수에 대한 인덕턴스와 Q 값을 측정한 그래프이다. 선폭과 선 간격이 증가할수록 Q 값이 증가함을 보여주고 있다. 선폭이 증가하면 저항은 선폭의 제공으로 줄어들므로 저항의 영향이 크게 작용했음을 알 수 있다. 선 간격이 증가하면 상호 인덕턴스의 값이 작아지므로 전체적으로 인덕턴스와 Q 값이 작아진다.^[3] 3~15 MHz 대역에서 주파수가 증가할수록 인덕턴스가 감소하는 것은 저항과 기생 캐패시턴스의 영향이 더 크게 작용하여 주파수의 의존성이 크게 나타나지 않음을 보여준다.

사각형 박막 인덕터는 코일 모서리 부분의 전류흐름에 있어서 이 주파수 대역에서는 손실이 아주 커서 Q 값이 전체적으로 작게 나타났다. 따라서 Q 값을 크게 하기 위해 사각형 보다는 원형으로 제작하는 것이 더 용이하다.^[4]



(a)



(b)

그림 5. 선폭(a)과 선 간격(b)의 변화에 따른 주파수에 대한 인덕턴스와 Q 값.

Fig. 5. Inductance and Q factor based on the coil width and spacing for the frequency.

코일의 선폭을 10~60 μm로, 선 간격을 20~70 μm로 변화시킴으로써 인덕턴스와 Q 값을 측정하여 라이브러리를 구성하였다.

4. 결론

나선형 박막 인덕터를 선폭과 선 간격에 따라 달리 디자인하고, 노광 공정과 습식 식각 방법으로 인덕터를 제작하여, 주파수 특성에 대해 연구한 결과 다음과 같다.

3~15 MHz 주파수 대역에서 인덕턴스는 약 수 μH까지 측정되었고 Q 값은 약 3 정도 까지 측정되었다. 코일의 선 폭과 선 간격이 넓을수록 높은 Q 값을 얻을 수 있다. 박막 인덕터가 수동 소자로써의 역할을 기대하려면 Q 값이 10이상으로 향상

되어야한다 원형 박막 인덕터나 다층 공심 인덕터로 Q 값을 보상할 수 있으며,^[5, 6] 또한 시료와 기판 사이의 기생 캐패시터를 최소화해야 하며 박막 인덕터를 구성하는 물질은 전도도가 우수한 물질을 찾아야 한다.

개별소자 기술 측면에서 제조기술과 박막기술을 적용한 R, L, C 단위소자 제조기술 확보로 수동소자 디바이스의 제품화 기술이 가능하다. 표준 공정 기술 확보로 인덕터의 선폭과 선 간격을 변화하여 그림 5와 같은 결과를 이용해 라이브러리를 확립함으로써 소자의 신뢰성과 재현성을 향상시킨 후, 향후 수십 GHz에서 응용 가능한 MMIC 개발에 핵심기술로 응용 가능할 것으로 기대한다.

참고 문헌

- [1] Piljae park, *et. al.* "Variable Inductance Multilayer Inductor With MOSFET Switch Control", IEEE electron device letters. Vol. 25, No. 3, 2004
- [2] M. Yamaguchi, S. Arakawa, H. Ohzeki, Y. Hayashi and K. I. Arai, "Characteristics and Analysis of a Thin Film Inductor with Closed Magnetic Circuit Structure", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 28, No. 5, 3015-3017, 1992
- [3] B. -L. Ooi and D.-X. Xu, "Modified inductance calculation with current redistribution in spiral inductors", IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., Vol. 150, No.6, 445-450, 2003
- [4] Wan C. Tang and Y. Leonard Chow, "Inductance Formula of a Square Spiral Inductor on Grounded Substrate by Duality and Synthetic Asymptote", IEEE MITT-S Digest, 2069-2072, 2002
- [5] Guo LiHui, Yu Mingbin, Chen Zhen, He Han, and Zhang Yi, " High Q Multilayer Spiral Inductor On Silicon Chip for 5~6 Ghz", IEEE Electron Device Letters, Vol. 23, No. 8, 470-472, 2002
- [6] Robert Rodriguez, John M. Dishman, Fred T. Dickens and Edward W. Whelan, "Modeling of Two-Dimensional Spiral Inductors", IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. Chmt-3, No.4, 535-541, 1980