

패턴드 그라운드 쉴드를 적용한 나선형 인덕터 특성 연구

고재형, 김형석  
 중앙대학교 전자전기공학부

A Study on Characteristic of Spiral Inductor with Patterned Ground Shield

Jae-Hyeong Ko, Hyeong-Seok Kim  
 School of Electrical and Electronics Engineering Chung-Ang University

**Abstract** - This paper presents the characteristic of rectangular and octagonal spiral inductor using PGS(Patterned Ground Shield). We investigated variation of inductance and Q-factor with changing of turn number at fixed width, spacing and inner diameter. We confirmed that characteristic of inductance and Q-factor be applied PGS in rectangular and octagonal types spiral inductor by EM simulation tool. Inductance decreased irrespective of structure but Q-factor increased. When PGS not exist, Q-factor of Inductor is analogous at classification frequency but, rectangular is a few larger than octagonal in small turn number. The other side, When PGS is inserted, we confirmed that octagonal lager then rectangular in many turn number. Q-factor is improved in case of octagonal structure and small turn number by PGS effect.

1. 서 론

최근 무선 통신 시장에서 Si VLSI(Silicon very large scale integration) 기술의 발달로 인해 IC는 SoC(System on Chip) 실리콘 고주파 집적회로로 진화하고 있다. 집적회로에 들어가는 RF 소자들 중 나선형 인덕터는 부품의 소형화에 중요한 영향을 미치는 수동 소자이다. 나선형 인덕터의 주요 성능을 나타내는 인덕턴스와 Q(Quality)-factor는 인덕터의 구조, 선로 폭, 길이, 간격 및 턴 수에 따라 영향이 크다[1][2].

인덕터의 성능을 개선시키는 방법에는 conduction loss나 dielectric loss 및 eddy current loss를 줄이는 방법 등 여러 가지가 있다[3].

본 논문에서는 인덕터의 성능을 개선시키기 위해 eddy current loss를 줄이는 방법 중 인덕터와 실리콘 사이에 PGS(Patterned Ground Shield)를 적용하는 방법을 다루었다.

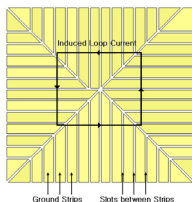
먼저 인덕터를 사각형 구조와 팔각형 구조에 대해 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 인덕터의 설계 변수 중 선로 폭과 선로 간격 및 내부 지름을 고정시키고 턴 수를 변화 시키면서 인덕턴스와 Q-factor를 알아 보았고, 인덕터의 Q-factor의 개선을 위해 PGS를 삽입하여 Q-factor의 향상을 알아 보았다.

2. 본 론

2.1 인덕터의 모델링

고정된 선로 폭과 간격 및 내부 지름에서 턴 수를 증가 시키면서 서로 다른 형태를 가지는 인덕터의 구조에 따른 인덕턴스와 Q-factor의 변화를 알아보기 위해 EM 시뮬레이션을 하였다. 사각형 구조와 팔각형 구조의 인덕터를 시뮬레이션 하였으며 두 종류의 인덕터의 선로 폭과 간격은 각각 10 $\mu$ m과 2 $\mu$ m로 고정하며 내부 지름은 120 $\mu$ m로 유지하며 턴 수를 1.5, 3.5, 5.5 턴으로 변화를 주었다.

동일한 선로 폭과 간격 및 내부 지름의 인덕터에서 턴 수가 증가함에 따라 인덕터의 점유 면적이 일정 비율로 증가하도록 설계 하였다.



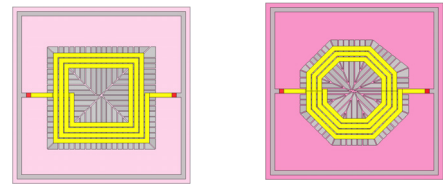
<그림 2> 패턴드 그라운드 쉴드[2]

인덕터의 Q-factor를 향상 시키기 위해 인덕터와 실리콘 substrate 사이의 기생 손실 성분을 줄이고자 그림 1과 같이 PGS 구조를 삽입하고

각 구조에 대해서 이를 비교 하였다.

그라운드 쉴드에 유도되는 루프 전류를 줄이기 위해 그라운드 쉴드에 저항을 증가하고자 그림 1에서처럼 그라운드 쉴드는 나선형 인덕터에 수직으로 슬롯을 나눈다. 슬롯은 유도된 루프 전류를 차단시키면서 개방 회로처럼 유도한다[2].

시뮬레이션으로 검증한 PGS는 그림 2와 같이 각각의 strip과 slot을 각각 10 $\mu$ m와 2 $\mu$ m로 일정하게 그라운드 쉴드를 나누고 나선형 인덕터의 크기보다 10 $\mu$ m 크게 설계하였다.

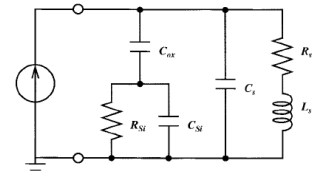


(a) 사각형 인덕터 (b) 팔각형 인덕터  
 <그림 2> PGS를 삽입한 인덕터 모델

2.2 Q-factor와 Patterned Ground Shield

실리콘 위에 있는 인덕터의 등가 회로는 그림 3과 같이 substrate 그라운드와 원 포트에 등가 모델링 할 수 있다[2][4].

인덕터의 인덕턴스와 저항은 각각  $L_s$ 와  $R_s$ 로 직렬로 나타낼 수 있다.  $C_s$ 는 spiral과 underpass 간에 겹치면서 생기는 두 포트간의 커플링 커패시턴스이다.  $C_{ox}$ 는 실리콘 substrate와 spiral간의 oxide층에 생기는 커패시턴스이고 실리콘 substrate의 커패시턴스와 저항은 각각  $C_s$ 와  $R_s$ 로 모델링 할 수 있다[5].



<그림 3> 인덕터의 등가 회로[2]

인덕터의 성능을 나타내는 Q-factor는 일반적으로 한 주기당 저장되는 에너지에 대한 소비하는 에너지의 비로 식(1)과 같이 나타낸다[2][6].

$$Q = \frac{wL_s}{R_s} \frac{R_p}{R_p + [(wL_s/R_s)^2 + 1]R_s} \left[ 1 - \frac{R_s^2(C_s + C_p)}{L_s} - w^2L_s(C_s + C_p) \right] \quad (1)$$

$$= \frac{wL_s}{R_s} \cdot \text{substrate loss factor} \cdot \text{self-resonance factor}$$

여기서

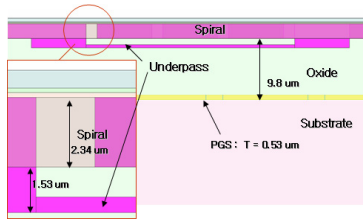
$$R_p = \frac{1}{w^2 C_{ox}^2 R_s} + \frac{R_s(C_{ox} + C_s)^2}{C_{ox}^2} \quad (2)$$

$$C_p = C_{ox} \frac{1 + w^2(C_{ox} + C_s)C_s R_s^2}{1 + w^2(C_{ox} + C_s)^2 R_s^2} \quad (3)$$

식(1)에서  $R_p$ 가 무한대로 갈수록 substrate loss factor는 1에 가까워진다. 즉,  $R_p$ 가 무한대로 증가할수록 substrate loss factor를 줄일 수 있다.  $R_p$ 가 무한대로 증가 할 수 있는 조건은 식(2)에서 볼 수 있듯이  $R_s$ 의 값이 0이거나 무한대이면  $R_p$ 가 무한대의 값을 갖는다. 이를 통해 실리콘 substrate가 단락되거나 개방될 때 에너지 손실을 제거할 수 있어 Q-factor 값을 향상 시킬 수 있다.

### 2.3 시뮬레이션 결과 및 분석

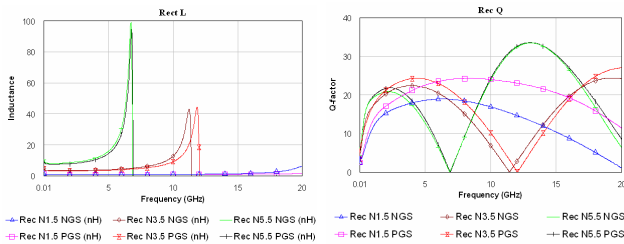
구조에 따른 인덕터의 특성을 비교하기 위해 사각형의 인덕터와 팔각형의 인덕터의 턴 수에 따른 인덕턴스와 Q-factor를 알아보았다. Q-factor의 개선을 위해 각각의 인덕터에 삽입한 PGS에 따른 인덕턴스와 Q-factor의 변화도 알아보았다. PGS는 그림 4와 같이 실리콘 substrate와 oxide 층 사이에 삽입한다.



<그림 4> 시뮬레이션 모델링 규격

#### 2.3.1 사각형 나선형 인덕터

그림 5는 턴 수를 1.5와 3.5 및 5.5 턴의 인덕터를 NGS(No Ground Shield)와 PGS를 삽입하여 구한 인덕턴스와 Q-factor 값이다.



(a) 인덕턴스 (b) Q-factor  
<그림 5> 사각형 인덕터의 인덕턴스와 Q-factor

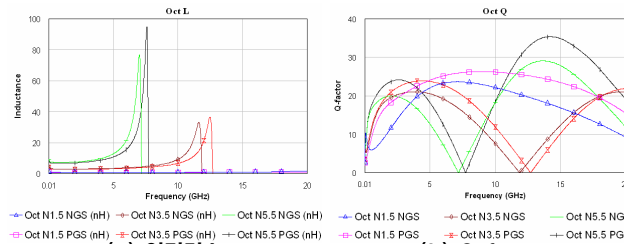
그림 5에서 턴 수가 증가할수록 선로 길이 증가로 인덕턴스는 증가하지만 spira과 underpass가 겹치는 부분 또한 넓어지기 때문에  $C_d$ 의 증가로 자기공진주파수(SRF)가 낮아진다. 낮아진 SRF로 턴 수가 적을수록 선형적인 인덕턴스 범위가 넓어 높은 주파수까지 사용할 수 있다.

사각형 인덕터에 PGS를 삽입하여 Q-factor 값이 약 10% 증가하는 것을 확인 할 수 있다. PGS로 인해 인덕턴스는 다소 낮아지지만 SRF는 증가하여 인덕턴스의 선형성이 증가하는 장점이 있다.

#### 2.3.2 팔각형 나선형 인덕터

구조에 다른 비교를 위해 팔각형 인덕터 또한 사각형 인덕터와 같이 턴 수의 변화에 따른 인덕턴스와 Q-factor의 변화를 보았고 PGS를 삽입하여 Q-factor의 향상을 알아보았다.

그림 6은 팔각형 인덕터의 인덕턴스와 Q-factor의 특성 결과이다.



(a) 인덕턴스 (b) Q-factor  
<그림 6> 팔각형 인덕터의 인덕턴스와 Q-factor

팔각형 인덕터에서도 턴 수 증가로 선로 길이가 증가하여 인덕턴스가 턴 수에 비례한다. 그러나, 사각형 인덕터에 비해 PGS를 삽입함으로써 Q-factor 증가율이 높고 SRF 증가 폭이 증가한다.

#### 2.3.3 구조의 비교 분석

각각의 구조에 대해 턴 수의 변화에 따른 Q-factor 값을 주파수 별로 표 1~2에 나타냈다. PGS를 삽입함으로써 Q-factor 값은 증가하는 특성을 확인 할 수 있다.

표 1에서 사각형 Q-factor의 각각의 주파수에서의 증가율을 나타냈다. 턴 수가 증가할수록 높은 Q-factor 값을 갖지만 증가율에서는 턴 수가 낮을수록 증가율이 높아진다. PGS의 영향으로 Q-factor 값은 2~21% 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

<표 1> 사각형 인덕터의 Q-factor

턴수	주파수(GHz)	1	2	3	4	5
1.5	NGS	11.47	15.30	16.89	17.95	18.64
	PGS	13.22	17.11	19.33	21.15	22.56
	증가율(%)	15.26	11.83	14.45	17.83	21.03
3.5	NGS	17.07	20.28	21.94	22.40	21.91
	PGS	17.01	21.24	23.32	24.25	24.12
	증가율(%)	-0.35	4.73	6.29	8.26	10.09
4.5	NGS	19.15	20.84	20.16	17.38	12.77
	PGS	19.51	21.73	21.28	18.52	13.75
	증가율(%)	1.88	4.27	5.56	6.56	7.67

팔각형 인덕터의 Q-factor의 변화 특성을 표 2에 나타냈다. 팔각형 구조의 인덕터는 Q-factor의 증가율이 2%~96%로 PGS의 영향은 적은 수의 턴 수에서 Q-factor 향상 효과를 크게 볼 수 있다.

<표 2> 사각형 인덕터의 Q-factor

턴수	주파수(GHz)	1	2	3	4	5
1.5	NGS	11.47	15.30	16.89	17.95	18.64
	PGS	13.22	17.11	19.33	21.15	22.56
	증가율(%)	15.26	11.83	14.45	17.83	21.03
3.5	NGS	17.07	20.28	21.94	22.40	21.91
	PGS	17.01	21.24	23.32	24.25	24.12
	증가율(%)	-0.35	4.73	6.29	8.26	10.09
4.5	NGS	19.15	20.84	20.16	17.38	12.77
	PGS	19.51	21.73	21.28	18.52	13.75
	증가율(%)	1.88	4.27	5.56	6.56	7.67

구조와 상관없이 나선형 인덕터에 PGS를 삽입하면 일반적으로 고주파에서 더 많은 Q-factor 향상을 보이는 특성이 있다. 또한, 5.5턴 보다는 1.5턴에서의 Q-factor 증가율이 높음을 확인 할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 EM 시뮬레이션 툴을 사용해 PGS를 삽입하여 두 종류 구조의 나선형 인덕터의 특성 변화에 대해 시뮬레이션을 하였다. 일정한 선로 폭과 간격 및 내부 지름에서 턴 수의 변화에 따른 인덕턴스와 Q-factor의 변화를 보았다. PGS를 실리콘 substrate와 oxide 경계면에 삽입하여 인덕터의 Q-factor 변화 특성을 확인한바 구조에 상관없이 모두 향상되는 것을 알 수 있었다. PGS로 인해 인덕턴스는 모두 감소하지만 SRF가 높아지면서 이 향상되는 장점이 있다. PGS가 없을 때의 인덕터의 Q-factor는 주파수대에 따라 비슷하지만 사각형 구조에서 적은 턴 수에서 팔각형 구조 보다 다소 높은 값을 갖지만 PGS를 삽입함으로써 많은 턴 수에서는 팔각형 구조의 Q-factor 값이 높게 나오는 것을 확인 할 수 있었다. PGS의 Q-factor 향상 특성은 사각형 구조 보다는 팔각형 구조와 많은 턴 수 보다는 적은 턴 수에서 높은 특성을 갖는 것을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

PGS에 대한 시뮬레이션을 통해 PGS를 사용하여 Q-factor를 향상 시킬 수 있으나 인덕턴스의 감소 및 구조에 따른 Q-factor 증가율을 감안 하면서 PGS를 사용해야 할 것으로 사료된다.

### [감사의 글]

본 연구는 기초전력연구원의 전력선행기술 신규과제지원으로 함.

### [참고 문헌]

- [1] Gray PR, Meyer RG. "Future direction in silicon IC's for RF personal communication". Proc IEEE Custom Integ Circ Conf, p. 83-90, May 1995.
- [2] C. Patrick Yue, S. Simon Wong. "On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-Based RF IC's", IEEE J Solid-State Cir., vol. 33, p.743-752, May 1998.
- [3] Shang-Yu Liang, Shu-Hui Tsai, Chun-Hsien Lee, and Ruey-Shing Huang. "Modeling and Comparison of Different Micromachined Tree-Dimensional Inductors", IEEE 2002.
- [4] C. P. Yue, C. Ryu, J. Lau, T. H. Lee, and S. S. Wong, "A physical model for planar spiral inductors on silicon", in Int. Electron Devices Meet. Tech. Dig., Dec. 1996, pp. 155-158.
- [5] C. Patrick Yue, S. Simon Wong. "Physical Modeling of Spiral Inductors on Silicon", IEEE transaction on electron devices, vol. 47, p.560-568, March 2000.
- [6] Ali M. Niknejad, Rovert G.. Meyerl., "Analysis, Design and Optimization of Spiral Inductor and Transformers for Si RF IC's", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 33, p. 1470-1481, Oct. 1998.