

## 자성물질을 이용한 나선형 인덕터의 고주파 특성 분석

차승용<sup>1</sup>, 김경범<sup>1</sup>, 정영재<sup>1</sup>, 최윤석<sup>1</sup>, 조근휘<sup>1</sup>, 이재성<sup>1</sup>, 황성우<sup>1</sup>, 현응경<sup>2</sup>, 이성래<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 전자전기공학과, <sup>2</sup>고려대학교 신소재공학부

### Characterization and Analysis of Integrated RF Ferromagnetic Spiral Inductors

S. Y. Cha<sup>1</sup>, G. B. Kim<sup>1</sup>, Y. C. Jung<sup>1</sup>, Y. S. Choi<sup>1</sup>, K. H. Cho<sup>1</sup>, J. S. Rieh<sup>1</sup>, S. W. Hwang<sup>1,\*</sup>, E. K. Hyun<sup>2</sup>, S. R. Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical Engineering, Korea University, Anam, Sungbuk, Seoul 136-701, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam, Sungbuk, Seoul 136-701, Korea

**Abstract** : This paper presents characterization and analysis of integrated ferromagnetic inductors in RF regime. Two different materials (CoFe/NiFe) are used as ferromagnetic material. Systematic studies of the inductance ( $L$ ), the Q-factor ( $Q$ ) and the structure of the inductor have been performed.

**Key Words** : Inductor, Ferromagnetic film, Ferromagnetic resonance, Inductance, Quality factor

### 1. Introduction

RFIC (Radio Frequency Integrated Circuit)을 구현하는데 있어서 가장 큰 어려움은 좋은 성능을 가지는 on-chip 인덕터 개발이다. 인덕터 개발의 난점은 크게 두 가지로 요약될 수 있는데 그 첫 번째는 높은 Q-factor ( $Q$ )를 얻는 것이고, 두 번째는 주어진 면적 내에서의 큰 인덕턴스 ( $L$ )를 얻는 것이다. 그 동안  $Q$ 를 높이기 위한 연구결과가 많이 있었으나[1]-[3],  $L$ 높이기 위한 연구는 상대적으로 미약했다. 주어진 면적에 큰  $L$ 을 가지는 인덕터개발에 대한 연구로는 MEMS-oriented microfabrication techniques을 이용한 연구결과가 발표되었으나[1], 이 또한 면적을 줄이기에는 쉽지 않다. 다른 연구로는 multi-layer 인덕터가 있다[4]. Multi-layer 인덕터는 air-core 인덕터보다 높은  $L$ 을 가지나 낮은 Q-factor를 가지는 문제점을 가진다. 구조를 변화 시켜서  $L$ 을 높이는 방법은 기생 저항과 정전용량이 높아져서  $Q$ 가 낮아지게 되는 문제점을 안고 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 자성물질을 이용한 ferromagnetic 인덕터를 제작하였다. Ferromagnetic 인덕터의 연구는 1979년 처음으로 소개된 이후[5] 몇몇 연구가 있었으나[6-7], 이 연구들은  $L$ 의 증가만을 보여주었을 뿐 다양한 자성물질과 인덕터의 turn수 및 size 변화에 따른 인덕터의 특성 등을 체계적으로 나타내고 있지 못하다.

그래서 본 연구에서는 On-chip 인덕터 설계의 기본 파라미터인 turn 수, width, spacing 이외에 ferromagnetic 물질을 설계 파라미터로 하여  $L$ 과  $Q$ 의 변화를 분석하였다.

### 2. Design of RF-band Ferromagnetic Inductors using 3D Field Simulator

Ferromagnetic 물질의 resistivity ( $\rho$ ), permeability ( $\mu$ ) 와

thickness는 인덕터의 특성에 종대한 영향을 미친다[6]. 최상의 인덕터특성을 가지는 ferromagnetic film의 optimum thickness를 얻기 위해서 3D-field simulation 사용하였다. 본 연구에서 사용된 ferromagnetic 물질인 CoFe/NiFe은 약  $\rho=10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$ ,  $\mu=300$ 이고, 이 파라미터를 이용한 3D-field simulation에서는 ferromagnetic film의 두께가  $0.5 \mu\text{m}$  이하일 때 좋은 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

### 3. Fabrication

그림1(a)는 본 연구에서 사용된 인덕터의 단면을 나타내고 있으며,  $W$ 는 metal line의 width,  $S$ 는 spacing,  $N$ 은 turn 수를 나타낸다. 그림 1(b)는 제작된 인덕터의 광학현미경 사진이다. Initial wafer는 면 저항이  $35 \Omega\cdot\text{cm}$  인 P-100 silicon wafer를 사용했으며 TEOS source로  $\text{SiO}_2$ 층을  $4 \mu\text{m}$  두께로 증착 하였다. 그리고 first metal인 Al을 sputter를 이용하여  $2 \mu\text{m}$ 두께로 증착 한 후  $\text{SiO}_2$ 을  $2 \mu\text{m}$  두께로 증착 하였다. Second metal층은 Al을  $1 \mu\text{m}$ 의 두께로 4 turn부터 8 turn까지 width를  $10 \mu\text{m}$ , spacing을  $5 \mu\text{m}$ 로 설계된 rectangular spiral 인덕터를 형성하였다. 마지막으로 top  $\text{SiO}_2$   $2 \mu\text{m}$  증착과 CoFe/NiFe ferromagnetic film을  $0.3 \mu\text{m}$ ,  $0.5 \mu\text{m}$  2가지 두께로 sputter한 후 liftoff 하였다.

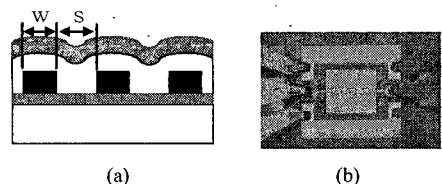


Fig. 1. Cross Section and Micrograph of inductor

#### 4. Characterization of RF-band

##### Ferromagnetic Inductor

측정은 HP8753E Network Analyzer, Summit 9000 probe station과 Cascade GSG air coplanar probe tip을 이용하였다. 측정된 S-parameters로부터  $L$ 와  $Q$  값은 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} L &= \text{Im}(1/Y_{11}) / 2\pi f \\ Q &= \text{Im}(1/Y_{11}) / \text{Re}(1/Y_{11}) \end{aligned} \quad (1)$$

그림 2는 ferromagnetic film으로 CoFe을 사용하고 turn수를 4부터 8인 인덕터로부터 측정된  $L$ 과  $Q$ 를 보여준다. 그림 2(a)에서 알 수 있듯 turn 수가 증가하면서  $L$ 이 증가하고 있다. 6 turn 인덕터의 경우 1 GHz 에서  $L=3.9$  nH 에서  $L=4.62$  nH 로 약 18.46 % 증가한다. 그러나  $Q$ 는 3.07에서 2.01로 약 34.39 % 감소하고 있다. 이는 air-core 인덕터에 비해 ferromagnetic 인덕터의 series resistance가 증가 하여  $Q$ 가 감소하는 것이다. 그림 3은 ferromagnetic film으로 NiFe을 사용한 인덕터의 측정결과이다. 6 turn의 경우 1 GHz에서  $L=5$  nH 로 약 28.04 % 증가하나  $Q$ 는 3.07에서 2.19로 28.41 % 감소한다. NiFe Ferromagnetic 인덕터는 CoFe ferromagnetic 인덕터에서는 볼 수 없는 ferromagnetic resonance (FMR) frequency가 약 2.5 GHz에서 발생하고 있다. CoFe는 ferromagnetic resonance (FMR) frequency가 측정영역보다 고주파 영역에 있기 때문에 발생하지 않는다. 그림 4에서는 CoFe과 NiFe의 두께에 따른  $L$ 값을 비교하였다. 작은 turn 수에서 0.5  $\mu\text{m}$ -thick CoFe ferromagnetic 인덕터가  $L$ 값이 많게는 11% 더 증가하나 turn수가 증가 할수록 ferromagnetic 인덕터의 resonance frequency가 저주파로 옮겨 가게 되어  $L$ 의 증가율이 떨어지게 된다. 비슷한 resistivity와 permeability를 가지는 ferromagnetic 물질이라도 ferromagnetic resonance (FMR) frequency가 다르며 turn수에

따라서 즉, 인덕터의 size에 따라서 그 성능은 많이 다르게 된다. 이 때문에 원하는 특정 주파수에서 높은  $L$ 을 가지는 인덕터의 개발은 ferromagnetic film물질 고유의 파라미터 인 resistivity, permeability, thickness뿐만 아니라 인덕터의 turn수, 인덕터의 size와도 관계를 가지므로 인덕터 설계 시 이 모든 것을 고려해야 한다.

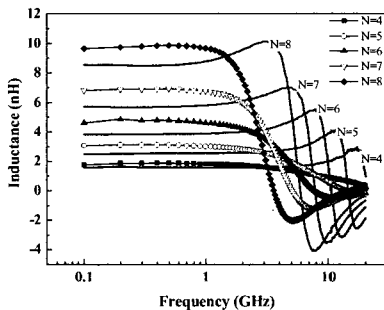
그림 5는 ferromagnetic film에 5  $\mu\text{m}$  slit이 있을 때의  $L$ 과  $Q$ 보여준다. Ferromagnetic film에 slit이 있으면 slitless 인덕터의 resistance보다 낮아지게 되어 ferromagnetic resonance (FMR) frequency를 high-frequency로 옮겨 보다 높은 주파수 대역까지 high- $L$ 를 유지 할 수 있게 한다.

#### 5. Conclusion

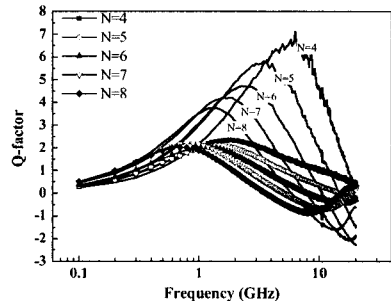
두 종류의 ferromagnetic 물질을 이용하여 CoFe, NiFe의 ferromagnetic 인덕터를 제작하였고, turn 수에 따른  $L$ ,  $Q$ 를 측정하여 체계적으로 분석하였다. 이렇게 제작된 ferromagnetic 인덕터는 같은 size의 air-core 인덕터보다 1 GHz 에서 Q-factor의 감소 없이  $L$ 이 20% 이상 증가함을 보여주었다. 향후 resistivity가 높은 기판을 사용하면  $Q$ 값 또한 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

#### References

- [1] J. Y. C. Chang, et al., IEEE Electron Device Lett. **14**, 246 (1993).
- [2] J. Burghartz, et al., IEEE Trans. MTT. **45**, 1961 (1997).
- [3] T. Gokdemir, et al., in Proc. Dig. 1997 IEEE RFIC Symp., Denver, CO, **233** (1997).
- [4] Y. Koutsoyannopoulos, et al., IEEE Trans. Circuits and Systems II. **47**, 699 (2000).
- [5] R. F. Soohoo, IEEE Trans. Magn. **15**, 1803 (1979).
- [6] S. Tanabe, et al., IEEE Trans. Magn. **35**, 3580 (1999).
- [7] M. Yamaguchi, et al., J. Appl. Phys. **85**, 7919 (1999).



(a)



(b)

Fig. 2. 0.3  $\mu\text{m}$ -thick CoFe ferromagnetic inductor. (a)  $L$  versus frequency. (b)  $Q$  versus frequency. Straight line : air-core inductor, line and symbol : ferromagnetic inductor.

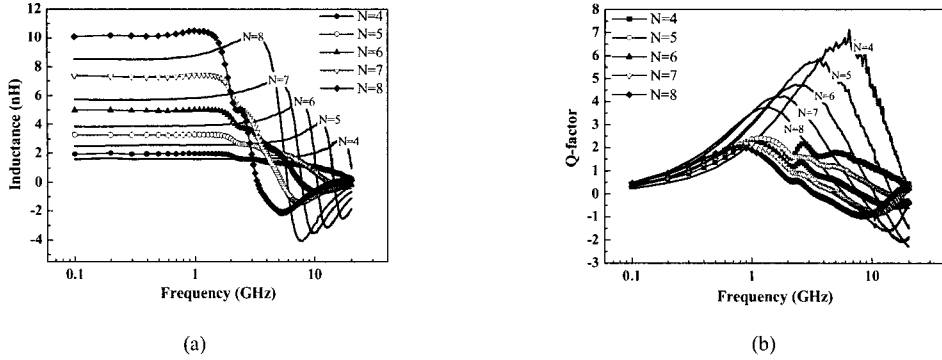


Fig. 3. 0.3  $\mu\text{m}$ -thick NiFe ferromagnetic inductor. (a)  $L$  versus frequency. (b)  $Q$  versus frequency. Straight line : air-core inductor, line and symbol : ferromagnetic inductor.

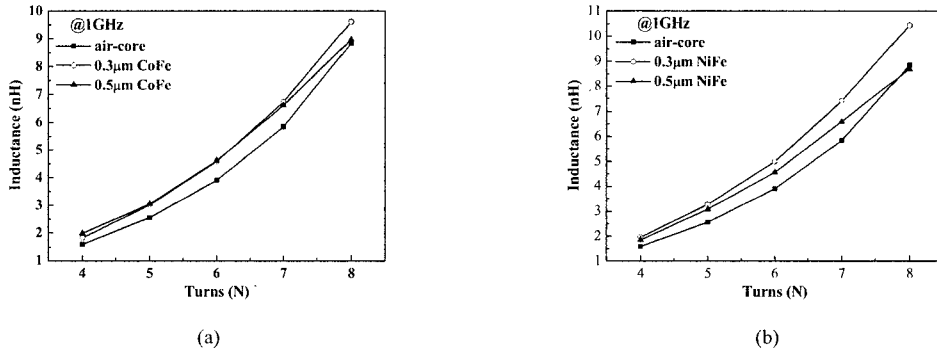


Fig. 4.  $L$  versus number of turns. (a) CoFe ferromagnetic inductor. (b) NiFe ferromagnetic inductor.

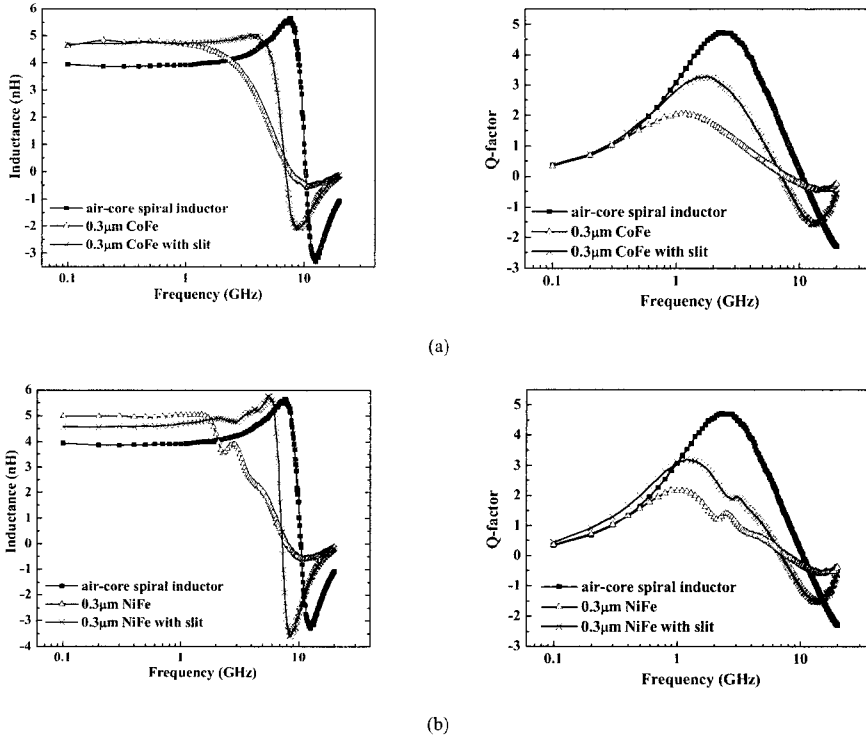


Fig. 5. 6 turn spiral inductor. (a) CoFe ferromagnetic film with slit/slitless. (b) NiFe ferromagnetic film with slit/slitless.