

인덕터 크기에 따른 솔레노이드 형 RF 칩 인덕터 특성 변화

論 文
55C-7-1

Variation of Characteristics of Solenoid-Type RF Chip Inductors on Inductor Size

尹宜重* · 金宰煜†
(Eui-Jung Yun · Jae-Wook Kim)

Abstract - In this study, the variations of the important characteristics of solenoid-type RF chip inductors utilizing a low-loss Al_2O_3 core material on inductor dimensions were investigated systematically. Four dimensions of the chip inductors fabricated in this work were $1.0 \times 0.5 \times 0.5$ mm³, $1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm³, $2.1 \times 1.5 \times 1.0$ mm³, and $2.4 \times 2.0 \times 1.4$ mm³ and copper (Cu) wire with 40 μ m diameter was used as the coils. High frequency characteristics of the inductance, quality factor, and impedance of developed inductors as a function of inductor dimensions were measured using an RF Impedance/Material Analyzer (HP4291B with HP16193A test fixture). It was observed that the developed inductors with the number of turns of 6 have the inductance (L) of 12 to 82 nH and exhibit the self-resonant frequency (SRF) of 3.6 to 1.2 GHz. The SRF of inductors decreases with increasing the inductor size while the L increases with the inductor size. The smallest inductors of $1.0 \times 0.5 \times 0.5$ mm³ exhibited the L of 12 nH, SRF of 3.6 GHz, and the quality factor of 67 near the frequency of 1.1 GHz. The calculated data predicted the high-frequency data of the L, and Q of the developed inductors well.

Key Words : RF, Chip, Inductor, Solenoid, Al_2O_3

1. 서 론

칩 인덕터는 노트북 컴퓨터, 캠코더, 호출기, 셀룰러폰 등과 같은 최신 전자제품의 회로에서 필수적인 수동소자 중의 하나이다[1-7]. 칩 인덕터의 중요·응용분야로는 커패시터와 결합하여 LC 필터로 사용하고, 트랜지스터를 위한 AC 초크로 사용하고, 회로정합에 사용하고, EMI 필터로 사용된다. 최근에는 고성능의 소형 무선통신제품을 실현하기 위하여 GHz 대역에서 동작하는 소형 RF 칩 인덕터의 필요성이 증가하는 추세에 있다. 기존에 많이 사용되어진 자성 페라이트 코어 재료는 투자율이 300 MHz 이상에서 급속히 감소하는 문제점을 지니고 있다[8]. 또한 최근 고주파 영역인 GHz 영역에서의 코어 재료로써 주목을 받고 있는 Y-hexagonal ferrite[9]가 있으나 소결과정중 이상이 생기기 쉽고 Curie 온도가 110°C로 낮은 단점이 있으므로 본 논문에서는 제조공정이 간단하고 용이한 Al_2O_3 를 코어 물질로 사용하여 Y-hexagonal ferrite에 버금가는 특성을 가진 인덕터 제작에 주력하였다.

최근 실리콘을 기초로 한 RF 칩 인덕터의 일반적인 형태는 솔레노이드 형태가 아닌 박막 spiral 형태이다. 그러나 이와 같은 박막 spiral 형태의 인덕터는 반도체 substrate에서의 에너지 분산으로 인하여 높은 주파수에서 품질계수가 감

소하는 경향(substrate effect)을 나타낸다[10]. 그러므로 substrate로부터 인덕터를 분리함으로써 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다.

솔레노이드 형태의 칩 인덕터는 위에서 언급한 원하지 않는 substrate effect를 제거할 수 있다[10-12]. 또한 점유 면적을 적게 증가시키면서 단순히 권선수를 증가함으로써 큰 인덕턴스를 얻을 수 있으며, 간단하고 일반적으로 잘 알려진 식을 사용하여 쉽게 인덕턴스를 계산하거나 설계할 수 있다.

또한, 인덕터의 크기 변화에 따른 인덕터의 주요특성 변화를 체계적으로 발표한 논문을 찾아보기 어려워 본 논문에서는 저손실 Al_2O_3 코어 물질을 이용하여 솔레노이드 형태를 갖는 여러 가지 크기의 RF 칩 인덕터를 제작하였고 그들의 RF 성능을 체계적으로 비교 분석하였다.

2. 실 험

크기가 각각 $1.0 \times 0.5 \times 0.5$ mm³, $1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm³, $2.1 \times 1.5 \times 1.0$ mm³, $2.4 \times 2.0 \times 1.4$ mm³인 4가지 형태의 인덕터를 제작하였고 권선수(N)는 1~6이었다. 그림 1은 본 논문에서 제작된 초소형($1.0 \times 0.5 \times 0.5$ mm³) 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터 구조를 나타낸 것이다.

본 논문의 인덕터의 코어 재료는 기존의 ferrite가 아닌 1 GHz에서 7.48의 낮은 유전율 상수와 4.89×10^{-5} 의 낮은 loss tangent를 가지며 900°C 이하에서 소결된 Al_2O_3 물질을 사용하였다. 분말 형태의 유전체 물질을 유기용매, 결합제(PVB, poly-vinyl butyral), plasticizer (DOP, dioctyl phthalate), 미량의 다른 화합물 등과 혼합하여 Al_2O_3 paste를 제조하였으며, 두께를 0.5~1.4 mm로 변화시켰다.

† 교신저자, 正會員 : 남서울대학교 電子工學科 專任講師 · 工博
E-mail : jwkim@nsu.ac.kr

* 正會員 : 湖西대학교 情報制御工學科 副教授 · 工博
接受日字 : 2006年 2月 24日
最終完了 : 2006年 6月 7日

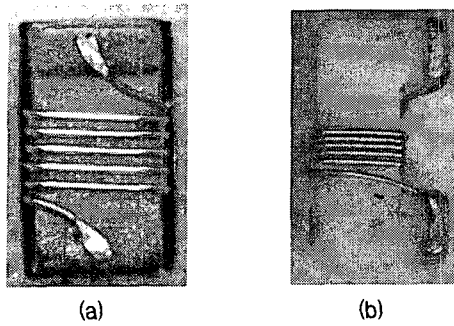


그림 1 개발된 1.0×0.5×0.5 mm 크기의 RF chip 인덕터 사진; (a) 밑면도, (b) 측면도

Fig. 1 Photographs of the developed RF chip inductors with the size of 1.0×0.5×0.5 mm; (a) bottom view, (b) side view.

코일은 chip 인덕터의 skin-effect의 원인이 되는 metal loss를 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 40 μm의 직경인 Cu를 사용하였다. 외부전류원은 코일의 양단을 코아 하층부의 양끝 단자에 본딩한 후 인가하였다. 양끝 단자는 P 7.2 wt%, Ni 32.6 wt%, W 60.2 wt%로 이루어진 박막층을 seed 층으로 사용하여 그 위에 도금처리 방식으로 Au 막(두께=200 μm)을 적층시켰다.

인덕터의 인덕턴스, 품질계수, 임피던스 크기와 위상에 대한 주파수 특성과 각 인덕터들의 등가회로 파라미터는 RF Impedance/Material Analyzer (HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였고, 자기공진주파수 (SRF)는 Network Analyzer (HP8719D)로 측정하였다. 또한 코아 물질의 loss tangent와 상대투자율은 각각 HP16453A와 HP-16454A test fixture를 HP4291B에 장착하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작된 권선수가 6인 인덕터들의 인덕턴스와 SRF는 Network Analyzer (HP8719D)로 측정하였고 표 1에 요약되어져 있다.

표 1 Network Analyzer (HP8719D)로 측정한 개발된 인덕터(권선수N=6)들의 L 과 SRF 측정값

Table 1 The measured L and SRF values of the developed RF chip inductors (no. of turns N=6) obtained from Network Analyzer (HP8719D).

Sample No.	Inductor Size (mm)	Inductance (nH)	SRF (GHz)
1	1.0×0.5×0.5	12	3.6
2	1.5×1.0×0.7	22	3.0
3	2.1×1.5×1.0	47	1.8
4	2.4×2.0×1.4	82	1.2

표 1로부터 가장 작은 1.0×0.5×0.5 mm 크기의 샘플이 가장 작은 12 nH의 인덕턴스와 가장 큰 3.6 GHz의 SRF를 나타내고, 가장 큰 2.4×2.0×1.4 mm 크기의 샘플은 가장 큰 82 nH

의 인덕턴스와 가장 작은 1.2 GHz의 SRF를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 인덕터의 크기가 증가함에 따라 인덕턴스는 증가하고 SRF가 감소하는 경향을 나타낸다.

그림 2는 RF Impedance/Material Analyzer (HP4291B)로 측정한 4가지 크기의 인덕터 들에 대한 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 인덕턴스는 약 800 MHz 까지 거의 일정하였으며 12-82 nH 범위의 높은 값을 갖는다. 또한 800 MHz 이상의 주파수 영역에서는 크기가 큰 인덕터 일수록 더 낮은 주파수에서 인덕턴스가 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 다음과 같은 인덕턴스 표현 식으로부터 설명 할 수 있다[13].

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A_c}{2l} \left[\frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} + \frac{l-z}{\sqrt{(l-z)^2 + a^2}} \right] \quad (1)$$

여기서 A_c 는 코아의 단면적, l 은 솔레노이드의 길이, z 는 솔레노이드의 한쪽 끝에서부터 솔레노이드 내부의 한 field 점까지의 거리, a 는 솔레노이드의 반경이고, μ_0 와 μ_r 은 각각 코아의 진공투자율과 상대투자율이다. 즉, 동일 권선수에 대하여 인덕터의 크기가 클수록 식 (1)의 A_c/l 의 비가 커지므로 인덕턴스가 커지게 되며, 인덕턴스가 커짐에 따라 SRF가 감소하게 됨을 알 수 있다. 또한 그림 2에서 크기가 2.4×2.0×1.4 mm인 샘플 경우에는 1.2 GHz 정도에서 SRF가 나타남을 알 수 있다. 이러한 인덕턴스와 SRF 사이의 관계는 Network Analyzer로 얻어진 표 1의 결과와 일치함을 알 수 있다.

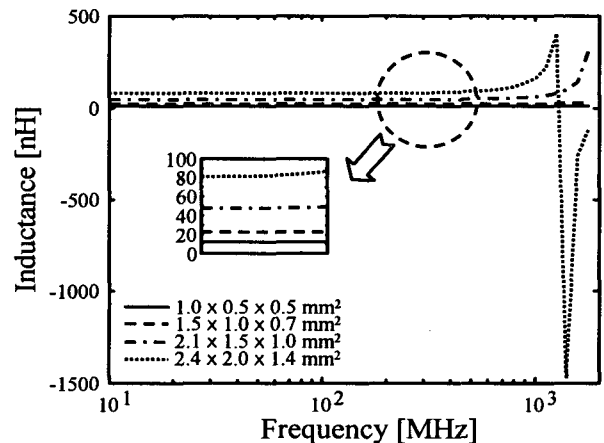


그림 2 개발된 인덕터들의 인덕턴스-주파수 특성

Fig. 2 Inductance-frequency characteristic of the developed inductors

그림 3은 4가지 크기의 인덕터들에 대한 커패시턴스-주파수 특성을 나타낸다. 각 인덕터들의 커패시턴스가 SRF 부근에서 음의 값으로부터 양의 값으로 전위됨을 알 수 있다. 또한 인덕터의 크기가 클수록 더 낮은 SRF에서 커패시턴스가 양의 값으로 전위되어 inductive 상태에서 capacitive 상태로 변한다는 것을 나타내며, 이는 인덕터의 크기가 클수록 더 낮은 주파수에서 분산커패시턴스 효과가 나타남을 알려준다.

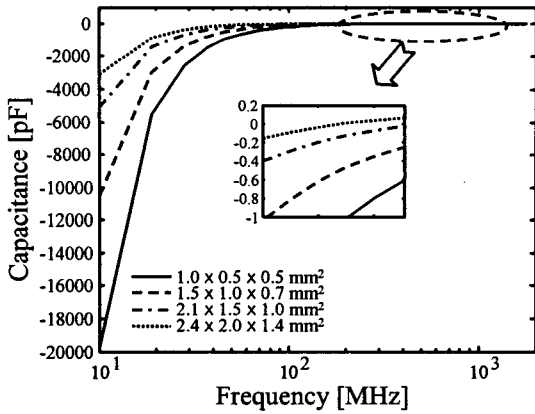


그림 3 개발된 인덕터들의 커패시턴스-주파수 특성
 Fig. 3 Capacitance-frequency characteristic of the developed inductors

그림 4는 인덕터들에 대한 저항-주파수 특성을 나타낸다. 2.4x2.0x1.4 mm² 크기의 샘플 경우에는 SRF인 1.2 GHz 부근에서 급격히 증가하여 최대 피크 값을 갖는다.

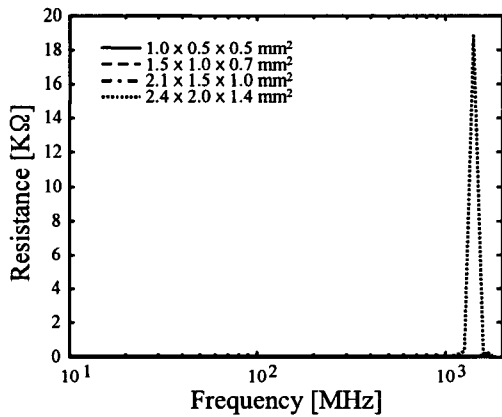


그림 4 개발된 인덕터들의 저항-주파수 특성
 Fig. 4 Resistance-frequency characteristic of the developed inductors

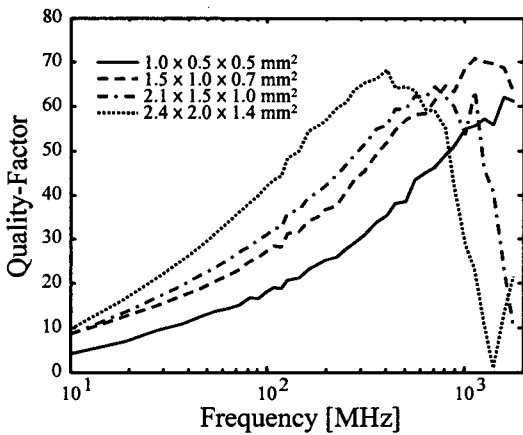


그림 5 개발된 인덕터들의 quality factor-주파수 특성
 Fig. 5 Quality factor-frequency characteristic of the developed inductors

그림 5는 칩 인덕터들의 quality factor-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 500MHz까지의 주파수 범위에서 인덕터의 크기가 작아짐에 따라 Q 값이 감소함을 알 수 있는데, 이는 코어 크기의 감소로 동일 권선수(6회)에 대해 코일간의 간격이 좁아져서 분산 커패시턴스의 영향이 증가하였기 때문이다.

일반적으로 품질계수는 식 (2)[10,14,15]와 같이 표현된다. 인덕터는 SRF에서 peak magnetic 에너지와 peak electric 에너지가 같기 때문에 인덕터의 품질계수는 SRF에서 0의 값을 갖는다[10]. 따라서 그림 5에서 품질계수가 0이 될 때의 주파수를 인덕터들의 SRF로 간주할 수 있고, 이 SRF 값은 2.4x2.0x1.4 mm² 크기의 샘플일 때 약 1.2 GHz가 됨을 알 수 있다. 또한 Q는 400 MHz~1.1 GHz 주파수 범위에서 최대 60~70의 값을 가짐을 알 수 있다.

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{peak magnetic energy} - \text{peak electric energy}}{\text{energy dissipated by the circuit in one period}} \quad (2)$$

$$\text{Peak magnetic energy} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{LV^2}{2[R^2 + (\omega L)^2]} \quad (3)$$

$$\text{Peak electrical energy} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4)$$

$$\text{Energy loss in one period} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \left[\frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \right] \quad (5)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} \left[1 - \frac{R^2 C}{L} - \omega^2 LC \right] = \frac{\omega L}{R} \times \text{self-resonant factor} \quad (6)$$

Magnetic energy와 electric energy는 각각 식 (3), (4)와 같이 표현될 수 있고, 한 주기의 에너지 손실은 주기 $T = 2\pi/\omega$ 에 회로의 분산 전력을 곱한 것이므로 식 (5)와 같이 표현될 수 있다. 여기서 V 는 인덕터 양단의 최대 전압을 의미한다. 식 (3)-(5)를 식 (2)에 대입하면 식 (6)을 유도할 수 있다. 여기서 $\omega L/R$ 은 저장된 자기에너지와 저항 R에서의 ohmic 손실을 나타내며, self-resonant factor는 주파수 증가에 따라 peak electric 에너지가 증가하고 따라서 자기공진주파수에서 Q가 0이 되는 효과 때문에 생기는 자기공명요소이다.

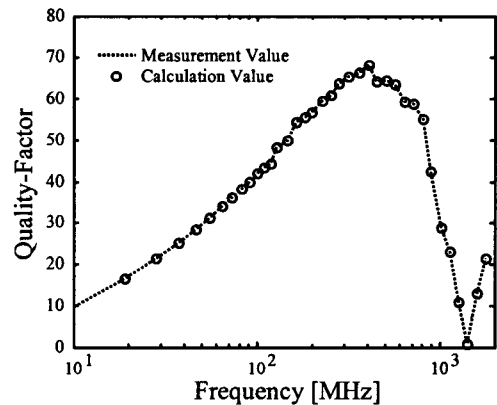


그림 6 개발된 인덕터의 주파수에 따른 quality factor 변화 (크기: 2.4x2.0x1.4 mm²)
 Fig. 6 Variation of quality factor with frequency for the developed inductor (size: 2.4x2.0x1.4 mm²)

그림 6은 2.4×2.0×1.4 mm² 크기의 82 nH 인덕터에 대하여 주파수에 따른 quality factor의 변화를 나타낸다. 그림 6에서 계산 값은 그림 2-4의 인덕턴스, 커패시턴스, 저항을 이용하여 식 (6)에 대입함으로써 얻어진다. 그림 6의 측정된 값은 계산된 값과 잘 일치하므로, 칩 인덕터의 주파수에 따른 Q의 변화를 예측하는데 식 (6)이 유용하게 사용될 수 있다. 낮은 주파수에서는 식 (6)의 self-resonant factor가 거의 1 정도의 값을 갖기 때문에 $\omega L/R$ 로써 묘사될 수 있다. 하지만 주파수가 증가함에 따라 self-resonant factor가 급격히 감소하므로 Q 값이 감소하게 된다.

그림 7은 인덕터들의 임피던스 크기-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 2.4×2.0×1.4 mm²의 임피던스의 크기는 1 GHz 정도에서 급속히 증가하며 1.2 GHz에서 최대가 됨을 나타낸다. 인덕터의 임피던스가 SRF에서 최대가 되므로 SRF는 1.2 GHz가 된다. 본 연구에서 개발된 솔레노이드 RF 칩 인덕터 등가회로(서로 직렬로 연결된 R 과 L에 대하여 C가 병렬로 연결되어있다.)의 합성 임피던스로부터 임피던스 크기는 다음과 같은 식으로 표현되며 그림 7의 결과를 잘 기술하고 있다.

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{\frac{R^2 + (\omega L)^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}} \quad (7)$$

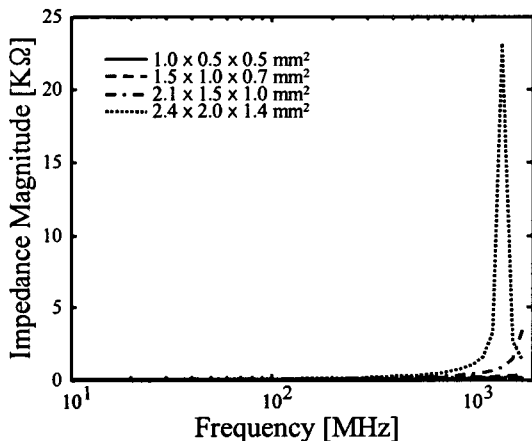


그림 7 개발된 인덕터들의 임피던스 크기-주파수 특성
Fig. 7 Impedance Magnitude-frequency characteristic for the developed inductors

그림 8은 인덕터들에 대한 임피던스 위상-주파수 특성을 나타낸다. 인덕터의 임피던스 위상은 SRF 이하에서 +90°(유도성), SRF에서 0°(순저항), 그리고 SRF 이상에서 -90°(용량성)가 되며 유도성-용량성 전환점에서 공진주파수를 알아내는 중요한 역할을 한다[10]. 따라서 그림에서 2.4×2.0×1.4 mm² 크기의 82 nH 인덕터는 1.2 GHz 정도에서 SRF를 가짐을 확인할 수 있다. 또한 개발된 인덕터 등가회로의 합성 임피던스로부터 임피던스 위상은 다음과 같은 식으로 표현 가능하며 그림 8의 결과를 잘 설명 한다.

$$\angle Z(j\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right) \quad (8)$$

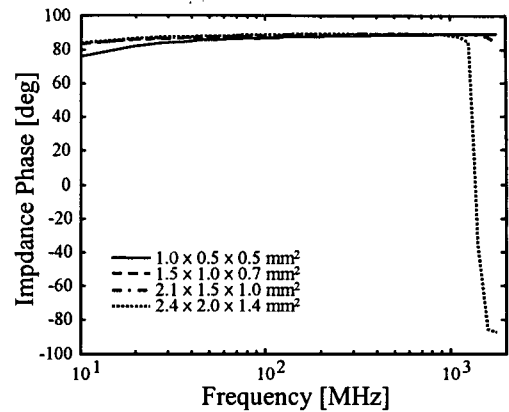


그림 8 개발된 인덕터들의 임피던스 위상-주파수 특성
Fig. 8 Impedance Phase-frequency characteristic for the developed inductors

4. 결 론

7.48의 낮은 유전율 상수와 1 GHz에서 약 4.89×10^{-5} 의 낮은 loss tangent를 갖는 Al₂O₃ 코어 재료를 이용한 솔레노이드 형태의 여러 크기의 RF 칩 인덕터를 비교 분석하였다.

(1) 제안된 인덕터의 크기는 각각 1.0×0.5×0.05 mm², 1.5×1.0×0.7 mm², 2.1×1.5×1.0 mm², 2.4×2.0×1.4 mm²이며, 코일로 사용된 Cu의 직경은 약 40 μm였다. (2) 권선수를 6회로 하였을 때 12~82 nH 범위의 인덕턴스를 갖고, 3.6~1.2 GHz의 SRF를 가지며 최대 60~70의 Q값이 400 MHz~1.1 GHz의 주파수 범위에서 얻어졌다. (3) 인덕터 크기가 감소함에 따라 인덕턴스는 감소하고 SRF는 증가하였다. (4) 1.0×0.5×0.5 mm² 크기의 가장 작은 인덕터는 L=12 nH, SRF=3.6 GHz, Q=67(주파수=1.1 GHz 일때)의 특성을 나타낸다. (5) 인덕터에 대한 R, L, C의 고주파 특성으로부터 추론된 SRF는 Network Analyzer로 측정된 값과 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 "2005년 국제 협력 연구 과제(과제번호:F01-2005-000-10003-0)의 지원으로 이루어짐.

참 고 문 헌

- [1] Rob Groves, David L. Hareme, Dale Judus, "Temperature Dependence of Q and Inductance in Spiral Inductors Fabricated in a Silicon-Germanium/BiCMOS Technology," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, no. 9, pp. 1455-1459, Sep, 1997.
- [2] M. H. Jung, J. W. Kim, and E. J. Yun, "Development of high-performance solenoid-type RF chip inductors utilizing low-loss Al₂O₃ core materials", Japanese J. Appl. Phys., vol. 39, no. 8, pp. 4772-4776, Aug. 2000.
- [3] Y. Kobayashi, S. Ishibashi, K. Shirakawa, J. Toriu, H.

Matsuki, K. Murakami, "New Type Micro Cloth-Inductor and Transformer with Thin Amorphous Wires and Multi-Thin Coils," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 28, no. 5, pp. 3012-3014, Sep, 1992.

[4] S. G. Kim, E. J. Yun, J. Y. Kim, J. D. Kim, and K. I. Cho, "Microfabrication and characteristics of double-rectangular spiral type thin-film inductors with an upper NiFe magnetic core", J. Appl. Phys., vol. 90, no. 7, pp. 3533-3538, Oct. 2001.

[5] M. H. Jung and E. J. Yun, "Development of high-performance ultra-small size RF chip inductors for wireless communication system application", Key Engineering Materials, vol. 277-279, pp. 177-182, Jan. 2005.

[6] Chong H. Ahn, Mark G. Allen, "Micro-machined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, no. 6, pp. 866-876, Dec, 1998.

[7] M. Yamaguchi, K. Suezawa, K. I. Arai, Y. Takahashi, S. Kikuchi, Y. Shimada, W. D. Li, S. Tanabe, and K. Ito, "Microfabrication and characteristics of magnetic thin-film inductors in the ultrahigh frequency region," J. Appl. Phys., vol. 85, no. 11, pp. 7919-7922, 1999.

[8] Takanori Tsutaoka, Teruhiro Kasagi, Kenichi Hatakeyama, "Magnetic Field Effect on the Complex Permeability for a Mn-Zn Ferrite and its Composite Materials," Journal of the European Ceramic Society, pp. 1531-1535, 1999.

[9] Tae-Ok Kim, Uoung-Woo Oh, "The Formation Process of the Hexagonal Ferrite During Calculating the Mixture of Ba(OH)₂, Zn(OH)₂ and 6Fe(OH)₃," Journal of the Korean Ceramic Society, vol. 17, no. 3, pp. 121-128, 1980.

[10] C. Patrick Yue, S. Simon Wong, "On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-Based RF IC's," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 33, no. 5, pp. 743-752, May 1998.

[11] Jun-Bo Yoon, Chul-Hi Han, Eui-Sik Yoon and Choong-Ki Kim, "Monolithic Fabrication of Electroplated Solenoid Inductors Using Three-Dimension Photolithography of a Thick Photoresist," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37, pp. 7081-7085, Part1, No. 12B, Dec 1998.

[12] 윤의중, 정영창, "극소형 솔레노이드 RF 칩 인덕터의 설계 및 제작에 대한 연구", 전기학회논문지, 52C권 11호, pp. 501-507, 11월, 2003.

[13] C. H. Durney and C. C. Johnson, "Introduction to Modern Electromagnetics," New York : McGRAW- Hill, Chap. 2, pp. 101, 1969.

[14] K. Shirakawa, K. Yamaguchi, M. Hirata, T. Yamaoka, F. Takeda, K. Murakami, and H. Matsuki, "Thin Film Cloth-Structured Inductor for Magnetic Integrated Circuit," IEEE Trans. on Magnetics, pp. 2262-2264, 1990.

[15] H. Matsuki, N. Fujii, K. Shirakawa, J. Toriu, K. Murakami, "Magnetic-Multi-Turn Planar Coil Inductor," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 27, no. 6, pp. 5438-5440, Nov, 1991.

저 자 소 개

윤 의 중 (尹 宜 重)



1962년 2월 21일생. 1985년 2월 고려대 공대 전자공학과 졸업(학사). 1988년 12월 미국 The University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 5월 미국 The University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년 6월~1996년 8월 미국 The University of Texas at Austin 부설 Center for Magnetics Post-Doctor 연구원. 1996년 9월~현재 호서대 정보제어공학과 부교수.
주관심분야 : Metal/ Oxide/Metal (MOM) 박막소자에서의 양자화현상, Fiber-Optic Magnetic Sensor 개발, 자성박막 재료 및 소자의 개발, chip inductor 개발
Tel : 041-540-5675
E-mail : ejyun@office.hoseo.ac.kr

김 재 욱 (金 宰 煜)



1970년 7월 6일생. 1989년 3월~1993년 2월 호서대 전자공학과 졸업(학사). 1993년 3월~1998년 8월 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1998년 8월~2002년 8월 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사) 2006년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 전임강사. 주관심분야 : 자동제어, 퍼지제어, chip inductor 개발, 자성박막 재료 및 소자의 개발
Tel : 041-580-2119
Fax : 041-582-2117
E-mail : jwkim@nsu.ac.kr