

論文2003-40SD-10-3

무선통신시스템을 위한 극소형 RF 칩 인덕터의 개발

(Development of Microscale RF Chip Inductors for Wireless Communication Systems)

尹宜重*, 金宰煜**, 鄭英暢**, 洪哲鎬*

(Eui-Jung Yun, Jae-Wook Kim, Young-Chang Jung, and Chol-Ho Hong)

요약

본 논문에서는 고성능의 극소형, 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터를 연구하였다. 제작된 RF 칩 인덕터의 크기는 $1.0 \times 0.5 \times 0.5 \text{mm}$ 이었다. 코어의 재료 (96% Al_2O_3)와 모양 (I-type)은 인덕터의 성능을 극대화 시키도록 Maxwell three-dimensional field simulator를 이용하여 결정 되었다. $40\mu\text{m}$ 의 직경을 가진 가는 구리(Cu)도선을 코일로 사용하였다. 개발된 인덕터의 인덕턴스 (L), 품질계수 (Q), 그리고 커패시턴스 (C)들에 대한 고주파 특성은 RF 임피던스/재료 분석기 (HP16193A 시험 fixture가 장착된 HP4291B)를 사용하여 측정 되었다. 개발된 인덕터들은 250MHz - 1 GHz의 주파수 영역에서 11 - 39 nH 범위의 인덕턴스 값과 28 - 50 범위의 품질계수 값을 가지는데 이는 전 세계적으로 가장 좋은 칩 인덕터 업체 중의 하나인 CoilCraftTM에 의해 생산된 인덕터들의 특성과 유사한 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 데이터는 개발된 인덕터의 L, Q, C 등의 고주파 특성을 잘 예측하고 있다.

Abstract

In this study, microscale, high-performance, solenoid-type RF chip inductors were investigated. The size of the RF chip inductors fabricated in this work was $1.0 \times 0.5 \times 0.5 \text{mm}$. The materials (96% Al_2O_3) and shape (I-type) of the core were determined by a Maxwell three-dimensional field simulator to maximize the performance of the inductors. The copper (Cu) wire with $40\mu\text{m}$ diameter was used as the coils. High frequency characteristics of the inductance (L), quality-factor (Q), and capacitance (C) of developed inductors were measured using an RF Impedance/Material Analyzer (HP4291B with HP16193A test fixture). The inductors developed have inductances of 11 to 39 nH and quality factors of 28 to 50 over the frequency ranges of 250MHz to 1 GHz, and show results comparable to those measured for the inductors prepared by CoilCraftTM that is one of the best chip inductor company in the world. The simulated data predicted the high-frequency data of the L, Q, and C of the inductors developed well.

Keyword : microscale, RF chip inductor, solenoid-type, Maxwell 3D field simulator, Al_2O_3 core

I. 서론

* 正會員, 湖西大學校 情報制御工學科

(Dept. of Information and Control Eng., Hoseo Univ.)

** 正會員, 湖西大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Hoseo Univ.)

※ 이 논문은 한국과학재단 지정 지역협력연구센터 인 호서대학교 반도체 제조장비 국산화연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

接受日字:2003年3月26日, 수정완료일:2003年10月13日

칩 인덕터는 개인통신서비스, 무선 LAN, 위성통신과 GPS에 등에 대한 고집적 RF 회로에서 필수적인 수동 소자 중의 하나로써, 커패시터와 결합한 LC 필터, 트랜지스터를 위한 AC 초크, 회로정합과 EMI 필터 등의 응용분야에 사용된다^{1) 9)}. 최근에는 고성능의 소형 무선 통신제품을 실현하기 위하여 GHz 대역에서 동작하는

소형 RF 칩 인덕터의 필요성이 증가하는 추세에 있다. 기존에 많이 사용되어진 자성 페라이트 코어 재료는 투자율이 300MHz 이상에서 급속히 감소하는 문제점을 지니고 있다^[9, 10]. 또한, 기존의 칩 인덕터들은 성능 면에서는 우수하나 크기와 무게면에서 문제점을 가지고 있다.

최근 실리콘 공정을 기초로 한 소형 경량의 RF 칩 인덕터의 일반적인 형태는 솔레노이드 형태가 아닌 박막 spiral 형태이다. 그러나 이와 같은 박막 spiral 형태의 인덕터는 반도체 substrate에서의 에너지 손실로 높은 주파수에서 품질계수가 감소(substrate effect)하는 문제점을 갖고 있어^[9, 11] substrate로부터 인덕터를 분리하면 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다.

솔레노이드 형태의 칩 인덕터는 위에서 언급한 원하지 않는 substrate effect를 제거할 수 있다^[11, 12]. 또한 점유 면적을 적게 증가시키면서 단순히 권선수를 증가시켜 큰 인덕턴스를 얻을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 소형 RF 칩 인덕터의 성능을 유지하면서 소형 경량의 박막 인덕터의 장점도 살릴 수 있는 극소형의 RF 칩 인덕터를 설계하고 제작하였다. 동일 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 높은 인덕턴스, 고품질계수와 높은 자기공진주파수를 갖는 코어 재료와 모양을 선정하여 고성능 인덕터 코어의 최적 구조를 도출하였다. 도출된 최적 구조의 코어를 사용하고 권선수를 변화시키면서 RF 칩 인덕터를 제작하였으며, 그들의 RF 성능을 시뮬레이션 결과 및 미국의 CoilCraft의 제품과 비교 분석하였다.

II. RF 칩 인덕터의 최적 설계

높은 인덕턴스와 고품질계수를 갖는 코어 재료 및 형태를 선정하기 위하여 Ansoft사의 RF 및 무선 통신용 3차원 구조물 전자계 해석 시뮬레이션 도구인 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 극소형 RF 칩 인덕터의 최적 구조를 도출하였다.

코어 재질을 선정하기 위해 1.0×0.5×0.5mm 크기의 C-type 코어 구조에 40μm 직경의 Cu 코일을 4회 권선한 동일 조건하에 코어의 재질을 98%, 96% 및 92% 순도의 Al₂O₃, AlN, Diamond, Sapphire, 그리고 BeO로 가변하면서 시뮬레이션을 수행하였다.

<그림 1>은 코어 재질에 따른 인덕턴스(L)-주파수

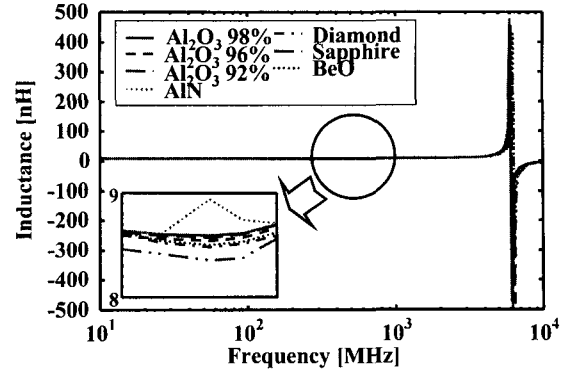


그림 1. 코어 재질에 따른 인덕턴스-주파수 특성의 시뮬레이션 결과

Fig. 1. Simulation Results of the L-f Characteristic with Various Core Materials.

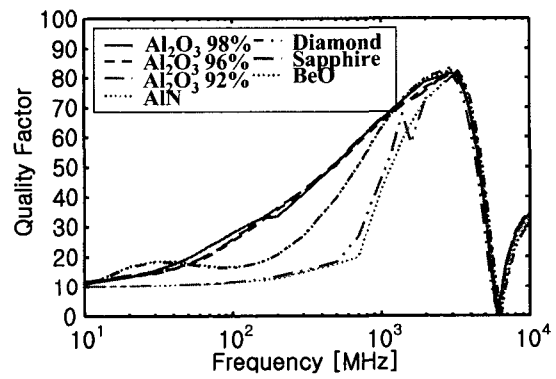


그림 2. 코어 재질에 따른 품질계수-주파수 특성의 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Simulation Results of the Q-f Characteristic with Various Core Materials.

(f) 특성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. <그림 1>에서 보듯이 제안된 모든 재질들은 거의 비슷한 인덕턴스 값을 가짐을 알 수 있다.

<그림 2>는 코어 재질에 따른 품질계수(Q)-주파수(f) 특성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 98% 및 96% Al₂O₃와 Sapphire가 우수한 품질계수 특성을 가짐을 알 수 있다.

<표 1>은 코어 재질에 따른 주파수 특성의 시뮬레이션 결과를 요약하여 나타낸다. 인덕턴스, 품질계수 및 SRF (Self-Resonance Frequency ; 자기공진주파수)가 모두 우수한 재질로는 98%와 96%의 Al₂O₃와 Sapphire를 들 수 있으나, 가격이 가장 저렴한 96%의 Al₂O₃를 코어 재질로 선정하였다.

코어의 형태를 선정하기 위하여 다음의 <그림 3>과

표 1. RF 칩 인덕터에 대한 주파수 특성의 시뮬레이션 결과 요약

Table 1. Summary of Simulation Results of the Frequency Characteristics for RF Chip Inductors.

Core Materials	L(nH) @250MHz	Q @250MHz	SRF(GHz)
Al ₂ O ₃ 98%	8.62	38.9	6.11
Al ₂ O ₃ 96%	8.57	37.6	6.05
Al ₂ O ₃ 92%	8.43	14.5	6.01
AlN	8.61	14.0	6.17
Diamond	8.55	23.7	6.38
Sapphire	8.60	39.5	6.01
BeO	8.57	23.7	6.31

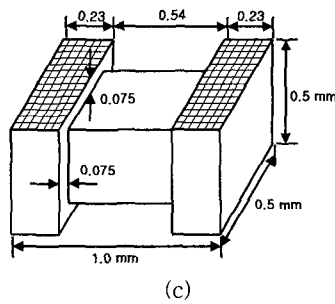
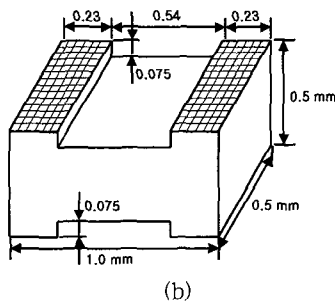
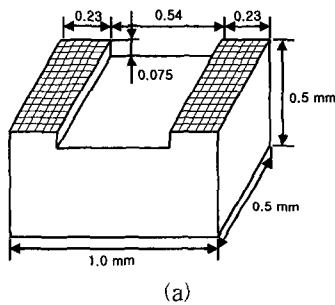


그림 3. 시뮬레이션을 위한 코어의 다양한 구조: (a) C형, (b) H형, (c) I형.

Fig. 3. Various Structures of the Core for Simulation: (a) C-type, (b) H-type, and (c) I-type.

같은 C-type, H-type 및 I-type의 세 가지 구조에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 위한 조건으로는 C-type, H-type 및 I-type의 최외각 크기는 1.0×0.5×0.5mm로 고정하고 metalization 부분은 W-Ni-Au를 이용하였고 40μm 직경의 Cu 코일을 0.4mm의 슬레노이드 길이에 4회 권선 하였다.

<그림 4>는 C-type, H-type 및 I-type의 세 가지 형태에 따른 인덕턴스-주파수 특성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 최외각 크기는 세 가지 형태가 모두 동일 하나 코일이 감기는 부분의 경우 C-type의 단면적이 가장 크고 I-type이 가장 작으므로 250MHz의 주파수에서 C-type이 8.57nH의 인덕턴스를 가지며, H-type의 7.70nH와 I-type의 5.87nH보다 높은 값을 가짐을 알

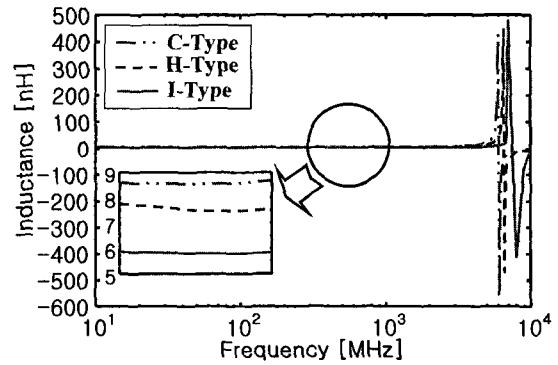


그림 4. 코어 형태에 따른 인덕턴스-주파수 특성의 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Simulation Results of the L-f Characteristic with Various Core Structures.

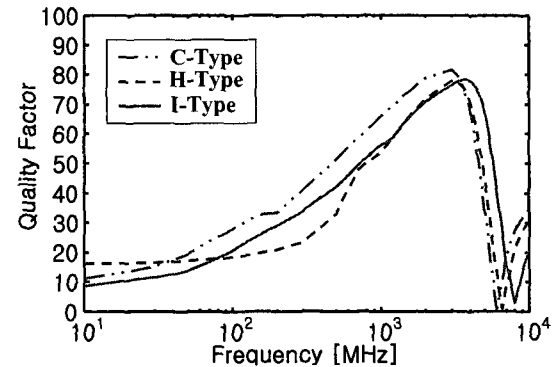


그림 5. 코어 형태에 따른 품질계수-주파수 특성의 시뮬레이션 결과

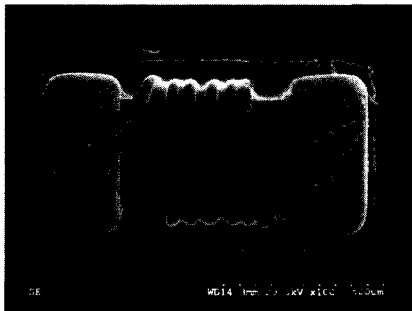
Fig. 5. Simulation Results of the Q-f Characteristic with Various Core Structures.

수 있다. 그러나 인덕턴스의 반전이 나타나는 SRF는 C-type이 6.05GHz로 H-type의 6.55GHz와 I-type의 7.81GHz보다 작음을 알 수 있다.

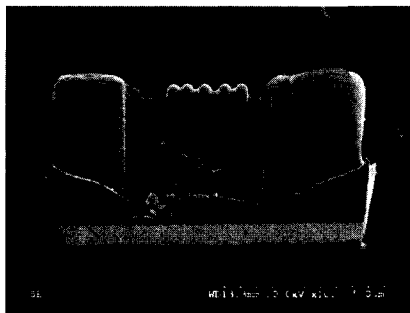
<그림 5>는 C-type, H-type 및 I-type의 세 가지 코어 형태에 따른 품질계수-주파수 특성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 품질계수의 값은 전 주파수영역에서 비슷하였으나 I-type의 경우가 품질계수의 값이 0이 되는 주파수(SRF)가 7.8GHz로 가장 큼을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 품질계수와 SRF의 고주파 성질이 우수한 I-type을 코어의 형태로 선정하였다.

III. 실험

<그림 6>은 II절의 결과 얻어진 칩 인덕터의 최적 구조를 이용하여 본 논문에서 제작한 RF 칩 인덕터의 밑면도와 측면도를 나타낸다. 코어의 크기는 1.0mm×0.5mm×0.5mm이고 코어의 재료로는 96% Al₂O₃ alumina를



(a)



(b)

그림 6. 제작된 RF 칩 인덕터 (N=6): (a) 밑면도, (b) 측면도

Fig. 6. The Fabricated RF Chip Inductors (N=6): (a) bottom view and (b) side view.

사용하였다. 96% Al₂O₃은 8.8의 낮은 유전율 상수와 0.0006의 낮은 loss tangent를 갖는다.

분말 형태의 유전체 물질을 비수용성 용매, 접합제 (PVB, poly-vinyl butyral), plasticizer (DOP, dioctyl phthalate), 미량의 다른 화합물 등과 혼합하여 900°C 미만의 sintering 온도를 사용하여 Al₂O₃ paste를 만들었다. 두께는 약 1mm로 고정시켰다. 코일은 chip 인덕터의 skin-effect의 원인이 되는 metal loss를 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 40 μm의 직경인 Cu를 사용하였으며, 권선수를 6~12회 가변하였다. 외부전류원은 코일의 양단을 코어 가장자리에 W-paste를 도포하고 Ni과 Au를 도금처리 방식으로 적층하여 Metalizing 한 후 인가하였다.

RF 칩 인덕터의 인덕턴스, 품질계수 및 커패시턴스에 대한 주파수 특성은 RF Impedance / Material Analyzer (HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

<그림 7>은 6회 권선에 대한 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 Simulation은 Ansoft의 HFSS를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과이며, CoilCraft는 미국의 CoilCraft회사의 0402CS11NJBW를 측정한 결과이고, Sample #1은 본 논문에서 제작한 6회 권선 샘플의 측정 결과이다. 시뮬레이션은 10MHz~10GHz, 측정은 1MHz~1.8GHz의 주파수 범위 내에서 수행되었다. 그림에서 보듯이 250MHz의 주파수에서 Simulation은

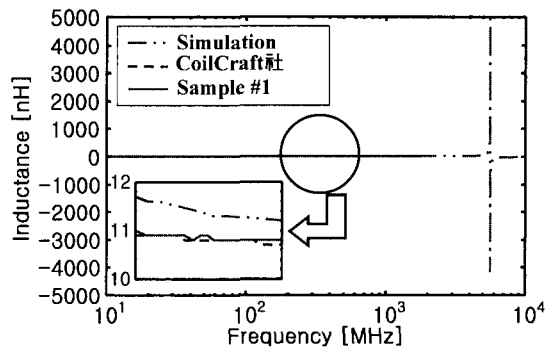


그림 7. 개발된 RF 칩 인덕터의 인덕턴스-주파수 특성(N=6)

Fig. 7. The L-f Characteristic of RF Chip Inductors Developed(N=6).

L=11.2nH, Coilcraft는 L=10.7nH, Sample #1은 L=10.8nH의 유사한 결과를 나타내며, Simulation 곡선이 5.6GHz에서 반전되는 것으로 미루어 보아 SRF가 5.6GHz임을 알 수 있다.

<그림 8>은 6회 권선에 대한 품질계수-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 보듯이 250MHz의 주파수에서 품질계수 값이 Simulation은 29.8, CoilCraft는 28.8, Sample #1은 25.2로 유사한 결과를 나타내며, Simulation 곡선이 5.6GHz에서 0의 품질계수 값을 갖는 것으로 미루어 보아 SRF가 역시 5.6GHz임을 추정할 수 있다.

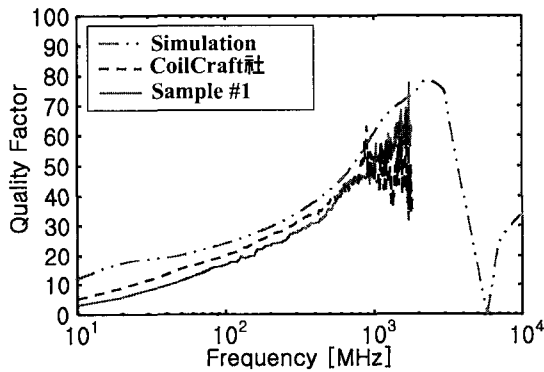


그림 8. 개발된 RF 칩 인덕터의 품질계수-주파수 특성(N=6)

Fig. 8. The Q-f Characteristic of RF Chip Inductors Developed(N=6).

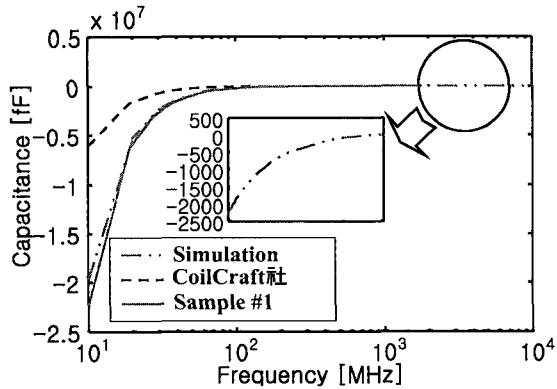


그림 9. 개발된 RF 칩 인덕터의 커패시턴스-주파수 특성(N=6)

Fig. 9. The C-f Characteristic of RF Chip Inductors Developed(N=6).

<그림 9>는 6회 권선에 대한 커패시턴스(C)-주파수(f) 특성을 나타낸다. Simulation 곡선으로부터 커패시

턴스가 SRF인 5.6GHz 부근에서 음의 값으로부터 양의 값으로 전위됨을 나타낸다. 이러한 음의 값으로부터 양의 값으로의 전위는 inductive 상태에서 capacitive 상태로 변환하는 것을 나타내며, 전위 되는 주파수가 SRF임을 알려준다.

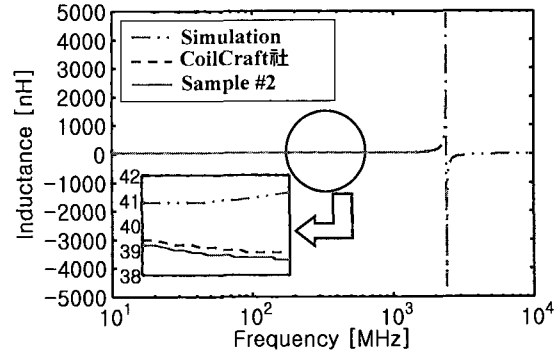


그림 10. 개발된 RF 칩 인덕터의 인덕턴스-주파수 특성(N=12)

Fig. 10. The L-f Characteristic of RF Chip Inductors Developed(N=12).

<그림 10>은 12회 권선에 대한 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 CoilCraft는 미국의 CoilCraft의 0402CS39NJBW를 측정된 결과이고, Sample #2는 본 논문에서 제작한 12회 권선 샘플의 측정 결과이다.

그림에서 보듯이 250MHz의 주파수에서 Simulation은 41.2nH, CoilCraft사는 38.9nH, Sample #2는 38.7nH의 유사한 결과를 나타내며, Simulation 곡선이 2.38GHz에서 반전되는 것으로 미루어 보아 SRF가 2.38GHz임을 알 수 있다.

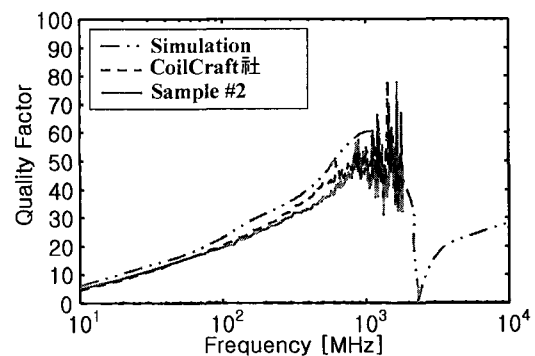


그림 11. 개발된 RF 칩 인덕터의 품질계수-주파수 특성(N=12)

Fig. 11. The Q-f Characteristic of RF Chip Inductors Developed(N=12).

<그림 11>은 12회 권선에 대한 품질계수(Q)-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 250MHz의 주파수에서 Q의 값이 Simulation은 31.8, CoilCraft사는 30.2, Sample #2는 28.3으로 유사한 결과를 나타내며, Simulation 곡선이 2.38GHz에서 0의 Q값을 갖는 것으로 미루어 보아 SRF가 2.38GHz임을 알 수 있다.

<그림 12>는 12회 권선에 대한 커패시턴스(C)-주파수(f) 특성을 나타낸다. Simulation 곡선으로부터 커패시턴스가 2.38GHz 부근에서 음의 값으로부터 양의 값으로 전위됨으로 이 주파수가 SRF임을 알 수 있다.

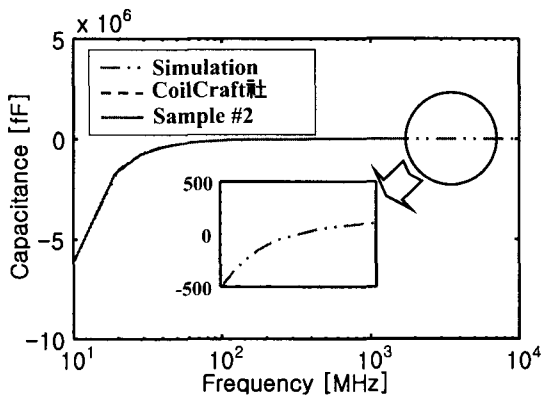


그림 12. 개발된 RF 칩 인덕터의 커패시턴스-주파수 특성(N=12)

Fig. 12. The C-f Characteristic of RF Chip Inductors Developed(N=12).

표 2. 제작된 RF 칩 인덕터의 주파수 특성의 측정 결과 요약

Table 2. Summary of Measurement Results of the Frequency Characteristics for Fabricated RF Chip Inductors.

구분	권선수(N)	L(nH) @250MHz	Q @250MHz	SRF (GHz)
Simulation	6	11.2	29.8	5.60
	12	41.2	31.8	2.38
CoilCraft	6	10.7	28.8	3.60
	12	38.9	30.2	2.24
Sample	6	10.8	25.2	1.8<
	12	38.7	28.3	1.8<

<표 2>는 제작된 RF 칩 인덕터의 주파수 특성을 비교한 결과로서, <그림 7~12>를 요약하였다. 표의 결과로부터 Simulation은 10MHz~10GHz 범위에서 수행되어 SRF 특성을 알 수 있으나 HP4291B의 주파수 범위

는 1MHz~1.8GHz로 SRF 특성을 확인할 수 없으므로 CoilCraft사의 경우는 제품 사양에서 제공하는 3.6GHz(6회 권선)와 2.24GHz(12회 권선)의 SRF를 제시하였다^[13]. Sample #1과 #2의 경우는 <그림 7~12>의 주파수 특성 곡선에서 CoilCraft사와 비슷한 형태를 이루는 것으로 미루어 비슷한 SRF 값을 가질 것으로 추정된다.

V. 요약 및 결론

시뮬레이션을 통하여 높은 인덕턴스와 고품질계수를 갖는 코어의 재질과 형태를 각각 96% Al₂O₃과 I-type으로 선정하였으며, 시뮬레이션 결과에 따라 1.0×0.5×0.5mm 크기의 솔레노이드형 RF 칩 인덕터를 40μm 직경의 Cu 코일을 이용하여 권선수 6~12회로 제작하였다.

제작된 인덕터의 권선수가 6회일 때 250MHz의 주파수에서 10.8nH의 인덕턴스와 25.2의 품질계수를, 권선수가 12회일 때 250MHz에서 38.7nH의 인덕턴스와 28.3의 품질계수를 가지며, 이 결과는 시뮬레이션 결과 및 검증된 CoilCraft사 제품의 측정 결과와 유사하였다.

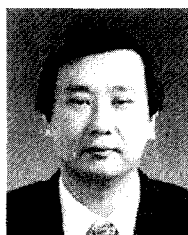
본 논문에서는 기존의 소형 RF 칩 인덕터의 성능을 유지하면서 소형 경량의 박막 인덕터의 장점도 살릴 수 있는 극소형의 RF 칩 인덕터가 성공적으로 설계 제작되었고 그 성능도 검증되었다.

참 고 문 헌

- [1] Minda Denesh, John R. Long, "Differentially Driven Symmetric Microstrip Inductors," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 1, pp. 332-341, Jan, 2002.
- [2] Rob Groves, David L. Harame, 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.
- [3] I. Wolff and H. Kapusta, "Modeling of Circular Spiral Inductors for MMICs," IEEE MTT-s Digest, pp. 123-126, 1987.
- [4] 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.
- [5] W. H. Hayt Jr., "Engineering electromagnetics," 5th ed. New York : McGRAW -Hill, 1989.
- [6] R. F. Soohoo, "Magnetic Thin Film Inductors for Integrated Circuit Applications," IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-15, 1803, 1979.
- [7] Chong H. Ahn, Mark G. Allen, "Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, no. 6, pp. 866-876, Dec, 1998.
- [8] 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.
- [9] Myung-Hee Jung, Jae-Wook Kim, Eui-Jung Yun, "Development of High-Performance Solenoid-Type RF Chip Inductors," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39 (2000), pp. 4772-4776, Part 1, No. 8, August 2000.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Coilcraft, "Inductors Transformers Filters Catalog," May 2001.

저 자 소 개



尹宜重(正會員)

1985년 2월 : 고려대 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 12월 : 미국 University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1994년 5월 : 미국 University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년 6월~1996년 8월 : 미국 University of Texas at Austin 부설 Center for Magnetics Post Doctor 연구원. 1996년 9월~현재 : 호서대 정보제어공학과 부교수

金宰煜(正會員)

1993년 2월 : 호서대 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 8월 : 호서대 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1998년 8월~현재 : 호서대 전자공학과 박사과정

鄭英暢(正會員)

1969년 2월 : 전북대 전기공학과 졸업(학사). 1976년 2월 : 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 2월 : 숭실대 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1979년 2월~현재 : 호서대 전자공학과 정교수

洪哲鎬(正會員)

1977년 2월 : 성균관대 전자공학과 졸업(공학사). 1981년 2월 : 성균관대 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1989년 2월 : 성균관대 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1983년 3월~1989년 2월 : 인덕대학 전자공학과 조교수. 1989년 3월~현재 호서대 : 정보제어공학과 정교수