

산화물 박막을 이용한 인덕터, 캐패시터 및 LC 복합 소자 제조

김민홍 · 여환국 · 황기현 · 이대형 · 김인태 · 윤의준 · 김형준 · 박순자

서울대학교 재료공학부

Fabrication of Inductors, Capacitors and LC Hybrid Devices using Oxides Thin Films

Min Hong Kim, Hwan Kuk Yoe, Ki-Hyun Hwang, Dae Hyung Lee, In-Tae Kim,

Eui Joon Yoon, Hyung Joon Kim, Soon Ja Park

School of Materials Science and Engineering Seoul National University Seoul 151-742

(1996년 11월 6일 받음, 1996년 12월 5일 최종수정본 받음.)

초 록 고밀도 고기능 전자소자의 발전과 고주파 이동통신의 증대에 따라 전자소자의 소형화, 집적화가 요구되고 있으며, 이는 전자소자의 박막화를 필요로 한다. 캐패시터, 인덕터는 전기 회로를 구성하는 기본적인 소자로서 그 응용 범위는 무수히 많으며, 따라서 이들 소자의 박막화는 전자소자의 소형화, 경량화에 큰 영향을 끼치리라 생각된다. 본 연구에서는 강자성 및 강유전 산화물 박막을 이용하여 인덕터, 캐패시터, LC복합소자를 제조하였다. 고온 산화분위기에서 안정한 Au를 리프트 오프법으로 금속배선 패턴을 형성하였고, 스퍼터링, 화학기상증착법 등을 이용하여 산화물 박막을 증착하였다. 0.5-15GHz에서 network analyzer로 측정하고 Microwave Design System으로 분석한 결과 5nH의 인덕턴스, 10,000pF의 캐패시턴스, 10^6 - 10^8 Hz 정도의 공진 주파수 값을 얻었다.

Abstract Miniaturization of microwave circuit components is an important issue with the development in the mobile communication. Capacitors, inductors and hybrid devices of these are building blocks of electric circuits, and the fabrication of these devices using thin film technology will influence on the miniaturization of electronic devices. In this paper, we report the successful fabrication of the inductors, capacitors and LC hybrid devices using a ferroelectric and a ferromagnetic oxide thin film. Au, stable at high temperatures in oxidizing ambient, is patterned by lift-off process, and oxide thin films are deposited by ion beam sputtering and chemical vapor deposition. These devices are characterized by a network analyzer in 0.5-15GHz range. We got the inductance of 5nH, capacitance of 10,000 pF and resonant frequencies of 10^6 - 10^8 Hz.

1. 서 론

고주파 무선 통신에 대한 수요의 증가로 인해 고기능, 고성능, 소형 경량을 목표로 전자소자의 박막화가 중요한 과제로 대두되고 있다. 인덕터와 캐패시터는 전자회로의 기본적인 소자로 거의 대부분의 전자소자에 응용될 수 있으며, power supply, 공진기 필터, LC 필터 등으로 고주파 영역의 소자로도 제조될 수 있다.

고주파에서 작동하는 미세회로의 소자 응용은 고주파에서 우수한 물성을 지니는 물질의 개발과 적절한 소자의 설계, 그리고 우수한 물성을 지닌 박막의 증착과 적절한 소자 제조 공정의 개발이 뒷받침되어야 한다¹⁾. 미세 인덕터 소자는 미세회로의 transformer, resonator, power supply 등에 이용될 수 있으며²⁾, 공정이 간단한 평면형 구조, 높은 인덕턴스 값을 얻기 위한 닫힌 자장을 형성하는 인덕터 소자의 설계 등에 대한 연구가 진행되고 있다³⁾. 고주파에서 자성체를 이용하는 경우, 와전류에 의한 손실이 주요하게 일어나므로 금속에 비해 높은 비저항을 지니는 산화물 자성

체 특히 Ni-Zn 페라이트에 대해 집중적인 연구가 진행되고 있다⁴⁾.

미세 캐패시터는 DRAM, FRAM 등의 반도체 소자에 이용되고 있으며⁵⁾, LC 필터, 공진기 필터 등의 다양한 응용 범위를 가지고 있다. 최근 이동 통신에 사용되는 고주파 유전체에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며⁶⁾, BaTiO₃와 같은 페로브스카이트 구조의 산화물은 강유전성, 압전성, 초전성 및 전기광학 성질을 지니고 있어¹⁰⁾ 주목을 받고 있으며, 증착방법, 공정방법 등을 최적화하여 보다 우수한 물성의 박막을 얻으려는 연구가 활발히 진행되고 있다¹¹⁾.

본 연구에서는 고기능 소자로서의 응용가능성이 높은 산화물 박막을 이용한 인덕터, 캐패시터의 기본소자의 제조공정을 확립하여 이를 제조하고, 고주파 물성을 측정하여 고주파소자로서의 응용가능성을 알아보았다. 인덕터 물질로는 ion beam spottering법으로 Ni-Zn 페라이트를 증착하였고¹²⁾, 평면 배선 방식과 3차원적 배선 방식인 토로이달형 인덕터를 제조하였다. 단순한 평판형 구조의 캐패시터를 설계하고 초음파 분무를 이용한 MOCVD법으로 BaTiO₃를

증착하였다¹²⁾. LC복합소자는 여러 가지 인덕터에 바로 평판형 캐패시터를 연결한 형태로 제조하였으며, 제조된 소자들은 Network analyzer와 HP사의 Microwave Design System으로 분석하였다.

2. 실험 방법

산화물 박막을 이용한 소자를 제조할 때에는 고온 산화분위기에서 박막이 증착되므로 이 분위기에서 산화되지 않는 귀금속계 금속 배선의 형성이 필요하다. 본 연구에서는 상하부 전극으로 Au를, 기판으로 SiO₂가 1000Å 열산화된 Si(100)웨이퍼를 사용하였다. SiO₂위에 Au의 접착력이 나쁘고, 식각이 어려우므로 쉽게 금속배선 패턴을 형성할 수 있는 리프트 오프(lift-off)법으로 상하부 전극 패턴을 형성하였다. 적절하게 감광막 표면을 monochlorobenzene으로 처리한 후¹³⁾, 5×10⁻⁶Torr 이하의 기초진공도를 유지하면서 열진공 증착법으로 접착층 Cr 300Å을 증착한 후 바로 4000Å의 Au를 증착하였다.

그 후 Fig. 1에 나와있는 바와 같이 산화물 증착, 산화물 식각, via 배꿈, 상부전극 패턴형성의 순서로 소자를 제작하였다¹⁴⁾. 박막 인덕터 소자로는 흔히 사용되는 평면형 구조인 나선형(spiral)과 뇌문형(meander line) 이외에도 3차원적 구조를 지녀 코아물질의 특성이 잘 나타나리라 기대되는 toroidal형을 설계하였다. 선폭을 모두 20μm로 고정하였으며, 간격을 달리하면서 토로이달형은 회전수를 15에서 22까지를 변화시켰다. 캐패시터 소자는 흔히 이용되는 간단한 평판형으로 400μm×400μm, 600μm×600μm, 400μm×800μm 등으로 면적을 다르게 설계하였으며, LC 복합소자는 여러 가지 모양의 인덕터 소자와 캐패시터 소자를 직접 연결한 형태로 설계하였다.

강자성체인 Ni-Zn 페라이트는 ion beam sputtering법으로¹⁵⁾, 강유전체인 BaTiO₃는 초음파 분무를 이용한 MOCVD법으로¹⁶⁾, SiO₂는 플라즈마 화학기상증착법으로

로 증착하였다. 상하부 전극의 연결을 위한 via를 형성하기 위해 Ni-Zn 페라이트는 50°C로 가열된 HCl로, SiO₂는 7 : 1 BOE(Buffered Oxide Etchant)로, BaTiO₃는 불산이 첨가된 질산으로 각각 식각하였다. Via filling과 상부전극 배선 형성도 리프트 오프법을 사용하였다.

제조과정중 공정이 안정적으로 진행되는지를 관찰하기 위하여 광학현미경, SEM, α-step 등을 사용하였다. 제조된 소자에 대하여 network analyzer로 0.5GHz에서 15GHz까지 s-parameter를 측정하였고, HP사의 Microwave Design System이라는 상용프로그램을 사용하여 5% 이내의 오차율로 소자의 등가회로 및 회로값 등의 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

위의 방법으로 제작한 소자들중 대표적인 토로이달형 박막 인덕터, 평판형 캐패시터, 그리고 이들의 LC 복합 소자의 광학현미경 사진은 Fig. 2와 같다. 본 연구에서 박막 인덕터를 network analyzer로 측정하여 분석한 등가회로는 Fig. 3과 같다. 소자부에는 인덕터(L)와 인덕터 배선간의 기생캐패시터(C_g)가 존재하고, 접지 사이에는 반도체 기판인 Si와 Au사이의 SiO₂가 나타내는 캐패시터(C₀₁, C₀₂)가 있었다. 코아물질과 소자 설계에 따른 등가회로상의 각 소자값을 Table 1에 나타내었다. 소자의 설계에 따라 다르지만, 인덕턴스값은 대략 0.2nH에서 5nH 정도의 값을 가지고 있었다. SiO₂를 코아로 사용하였을 경우에 평면형 인덕터와 3차원적 구조인 토로이달형 인덕터 소자 사이에 인덕턴스값의 큰 차이를 관찰하지 못하였다. 이는 소자의 크기가 작을 뿐만 아니라 열린 자속경로를 가지고 있기 때문으로 생각된다¹⁷⁾. 같은 코아 면적에 대해 금속배선수가 증가함에 따라 인덕턴스 값이 증가하는 일반적인 경향도 관찰되었으며, 큰 면적에서 많은 회전수로 큰 인덕턴스값을 얻을 수 있으리라 기대된다.

강자성체인 Ni-Zn 페라이트와 SiO₂를 코아물질로 사용하였을 경우에 인덕턴스 값의 큰 변화를 관찰하지 못하였고, 소자 설계에 따라서는 SiO₂코아의 경우가 큰 인덕턴스 값을 나타내기도 하였다. 코아물질에 따른 인덕턴스값의 차이가 나지 않는 이유는 고주파에서 자성체의 주요 손실인 와전류 손실을 결정하는 코아물질의 비저항과 관련된 것으로 보인다. 이는 Table 1에 나타낸 바와 같이 기생 캐패시터에 연결된 저항(R₀₁)이 페라이트 코아의 경우에는 대략 수십 Ω 미만이지만, SiO₂ 코아의 경우에는 백에서 수만 Ω이라는 것에서 추정할 수 있다. Ni-Zn페라이트에서 과잉 Fe가 있을 때 비저항이 급격히 감소함이 알려져 있고¹⁸⁾, 증착에 이용된 타겟의 조성은 Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe_{0.1}O₃로 Fe 과잉인 박막이 증착되어 낮은 비저항을 지닐 것으로 추정할 수 있다. 실제로 동일한 조건에서 증착한 2600Å의 Ni-Zn페라이트의 박막은 1.2Ωcm의 낮은 비저항을 지

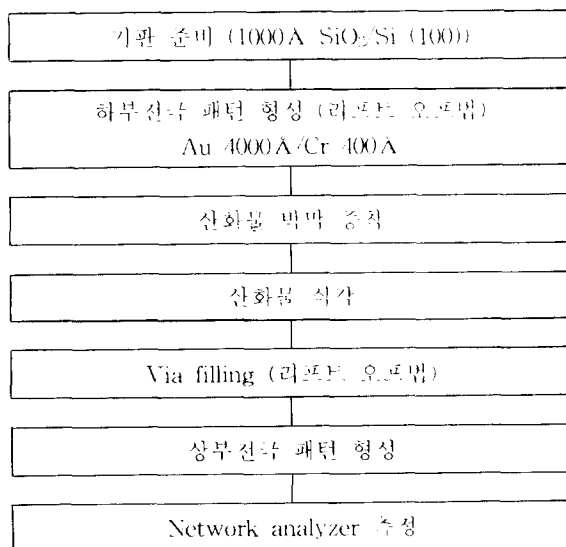


Fig. 1. Fabrication flow chart of the L, C and LC devices.

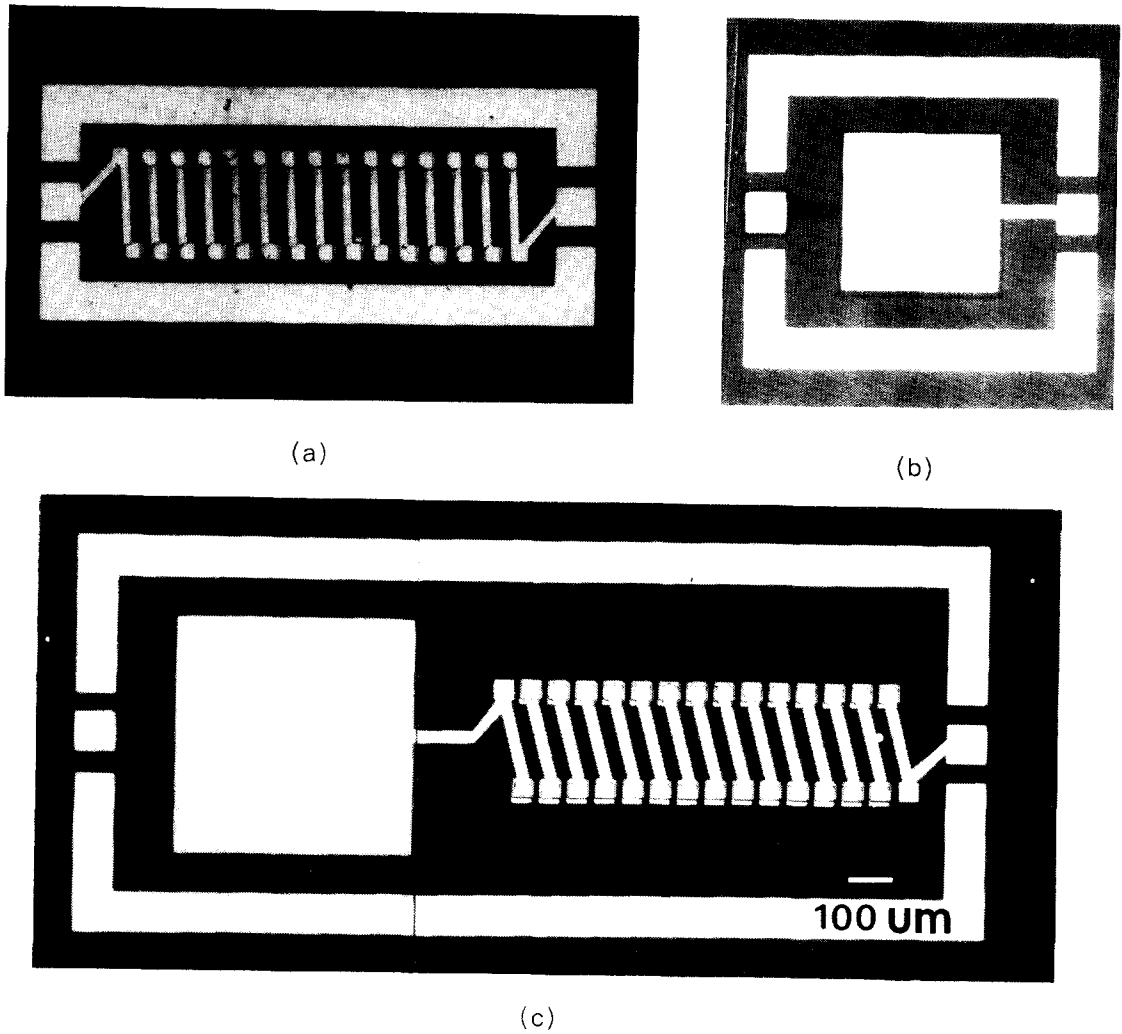


Fig. 2. The optical photographs of a) an inductor device of toroidal type, b) a capacitor device and c) an LC device with a toroidal type inductor.

Table 1. The component values of the equivalent circuit for the toroidal and the meander line inductors. Either Ni-Zn ferrites or SiO₂ was used as a core material.

Components	Ferrite Core			SiO ₂ Core		
	Toroidal (15 turns)	Toroidal (17 turns)	Toroidal (21 turns)	Meander	Toroidal (15 turns)	Meander
C ₁	5.2fF	17fF	1.8fF	2.1pF	1.6pF	1.7pF
R ₁ (Ω)	3.8	48	0.012	0.02	120	16000
L	2nH	3nH	5.2nH	0.2nH	2nH	3.5nH
R ₂ (Ω)	116.6	15	43.2	12.6	97.53	15
C ₂	18.7pF	6.0pF	16.3pF	1.5pF	92.6pF	6.8pF
R ₃ (Ω)	5.6	6.0	8.8	18.1	125.2	71
C ₃	7.1pF	3.8pF	20.3pF	14.1pF	10.2pF	0.5pF
R ₄ (Ω)	30	4	0.2	2.4	11.9	5.5

니코 있음이 확인되었다.

캐패시터 소자와 LC복합 소자는 Ni-Zn페라이트와 BaTiO₃박막을 이용하여 제조하였으며 Fig. 4에 캐패시

터 소자의 등가회로를 나타내었다. 박막 인덕터와 마찬가지로 하부전극과 기판사이의 캐패시터(C_{in}, C_{out})가 접지쪽으로 존재하고, 설계된 캐패시터(C₁) 이외에도

Table 2. The component values of the equivalent circuit for capacitors. Either Ni-Zn ferrite or BaTiO₃ was as a core material.

Components	Ni-Zn Ferrite		BaTiO ₃	
	400 × 400 μm ²	600 × 600 μm ²	400 × 400 μm ²	600 × 600 μm ²
C (pF)	2500	3200	10380	24000
L _c (nH)	0.55	0.56	0.49	0.56
R _{lc} (Ω)	5	2	6	2
C _{pl} (H)	720	720	153.5	5760
R _{cp1} (Ω)	48.4	48.4	66	53.5
C _{pc} (pF)	6.1	6.1	4.5	4.8
R _{cp2} (Ω)	63.7	63.7	97	66.7

Table 3. The component values of the equivalent circuit of LC hybrid devices. Either Ni-Zn ferrite or BaTiO₃ was as a core material.

Components	Ni-Zn Ferrite	Ni-Zn Ferrite	BaTiO ₃	BaTiO ₃
	with Toroidal	with Meander	with Toroidal	with Meander
C_i(pF)	98.5	308.5	800	1600
C _c (pF)	20.6	89.1	70.5	69.9
R _{cc} (Ω)	379	3036	3200	6400
L_c(nH)	3.0	3.0	2.5	3.0
R _{lc} (Ω)	97	23	25	17
C _{pl} (pF)	36.5	84.4	196	334.5
R _{cp1} (Ω)	61.2	37.0	59.4	37.4
C _{pc} (pF)	2.8	6.0	6.3	3.2
R _{cp2} (Ω)	11.9	24.0	30	43.3

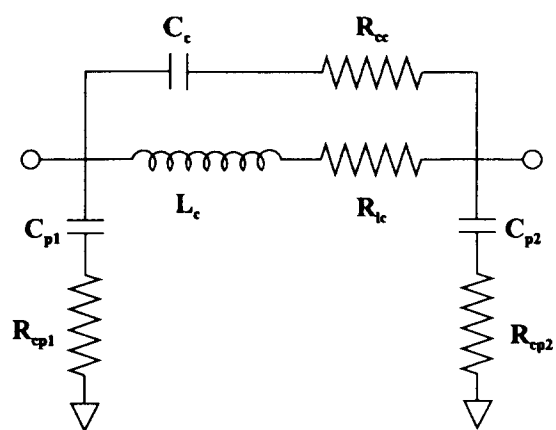


Fig. 3. Equivalent circuit of the inductor devices.

전극배선을 따라 형성되는 인덕터(L_c)와 전극배선의 저항(R_{lc})이 등가회로를 구성하고 있다. Table 2에 다른 산화물 박막을 이용하여 동일한 설계로 제조된 캐패시터 소자의 등가회로상의 소자값을 나타내었다. Ni-Zn 페라이트 박막을 이용한 소자의 경우에는 C_i값이 2500~3200 pF의 값을 지니고 있었고, BaTiO₃ 박막을 이용한 경우에는 고유전율 물질을 사용하였으므로 보

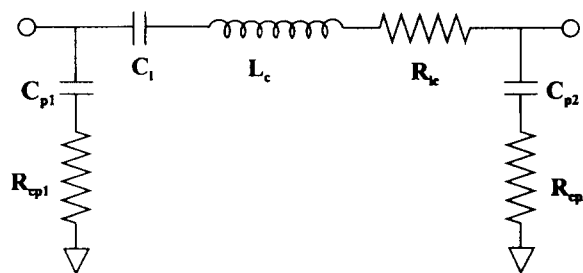


Fig. 4. Equivalent circuit of the capacitor devices.

다 큰 값인 10380~24000pF의 값을 나타내었다. 평판의 면적이 클수록 캐패시턴스 값이 크게 나오는 일반적인 결과를 보였으며, 이로부터 적절한 설계로 고주파소자에 필요한 캐패시터의 제조가 가능함을 알 수 있다. 금속배선에서 나오는 저항값(R_{lc})은 동일한 설계에 대해 물질에 따른 큰 차이가 나지 않았고, 이로부터 금속배선 공정이 재현성있게 수행되었다는 것을 알 수 있다. 앞에서 설명한 박막 인덕터 소자에 비해 낮은 값이기는 하지만, 코어물질에 따른 인덕턴스값(L_c)의 차이가 거의 나지 않는 것은 Ni-Zn 페라이트 박막의 낮은 비저항에 의한 와전류손실과이 크고 금속배선

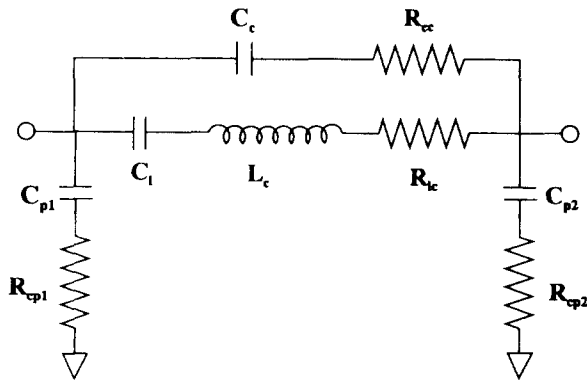


Fig. 5. Equivalent circuit of the LC hybrid devices.

의 길이가 짧아서 충분한 인덕턴스가 나오지 않았기 때문으로 생각된다.

LC 복합소자의 등가회로는 설계대로 앞의 박막 인덕터와 박막 캐피터의 등가회로를 그대로 직렬연결한 형식으로 Fig. 5와 같이 구성하였다. 캐피터 소자와 인덕터가 직렬 연결되고, 인덕터의 기생 캐피터가 병렬로 연결되며, 기관과 전극사이의 캐피터가 존재하는 회로이다. Ni-Zn페라이트 박막과 BaTiO₃박막을 사용한 LC복합소자의 등가회로상의 소자값을 Table 3에 정리하였다. 각 소자는 400×400μm²의 캐피터에 15회전수의 토로이달 형 인덕터와 뇌문형 인덕터가 연결된 것이다. 앞의 인덕터, 캐피터소자와 비교할 때, LC소자의 회로의 길이, 소자의 크기 등이 다름으로 저항, 기생 캐피턴스, 접지와 캐피턴스 값등이 다소 다르게 나타났다. 그러나 설계가 같은 인덕터, 캐피터와 비교할때, 인덕턴스값은 코아물질에 관계없이 대략 3nH로 비슷했으며, 캐피턴스 값은 소자 형태의 변화로 LC복합소자의 경우가 낮은 값을 보였다.

실제 통신소자로의 응용에는 인덕턴스, 캐피턴스 각각의 값이 중요하기도 하지만, 공진주파수로 표현되는 인덕턴스와 캐피턴스의 곱이 더욱 중요해진다. 이는 인덕터, 캐피터의 단일 소자에서도 기생 캐피터, 기생 인덕터가 형성되므로 소자 설계시 이를 반드시 고려해야 한다. 본 연구에서 제조된 소자들에 대해 분석된 소자값으로 공진주파수를 계산해보면 LC 복합소자의 경우 1~6×10⁶Hz 정도의 값이 얻어졌다. 이로부터 다양한 주파수 영역에서 사용될 통신용 소자를 산화물 박막을 이용하여 제조할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

리프트 오프법에 의해 귀금속 Au의 상하부 전극 배선의 형성, 간단한 습식식각을 이용한 via형성 및 via 메꿈 방식으로 산화물 박막을 이용한 박막 인덕터, 캐피터 및 LC복합소자를 제조할 수 있었다. 박막 인덕

터 소자는 대략 수 nH정도의 낮은 인덕턴스를 보였으며, 코아물질에 따른 차이가 없었다. 이는 열린 자장 구조의 소자 설계와 낮은 비저항에 의한 와전류 손실, 작은 소자 크기 등에 의한 것으로 보인다. 박막 캐피터 소자는 고유전 물질인 BaTiO₃박막을 이용한 경우가 보다 큰 소자값을 보였으며, LC소자설계와 일치되게 소자값이 분석되었다. 분석된 소자값에서 공진주파수를 계산하였을 때, LC복합소자는 10⁷Hz정도, 캐피터 소자는 10⁶Hz정도의 공진주파수를 얻었다.

감사의 글

소자 특정 및 분석에 도움을 주신 한국전자통신연구소의 강석봉 연구원, 서울대 전기공학부의 유기현씨께 감사드립니다. 본 연구는 1994년도 교육부 학술조성비(신소재 분야)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M. Yamaguchi, M. Matsumoto, H. Ohzoki, and K.I. Arai, IEEE Trans. Magn 27, S274(1991)
2. K. Kawabe, H. Koyama, K. Shirac, IEEE Trans. Magn. 20, 1804(1984)
3. K. Yamasawa, K. Maruyama, I. Hirogama, P.P. Biringer, IEEE Trans. Magn. 26, 1204(1990)
4. A.F. Goldberg, J.G. Kassakian, M.F.Schlecht, IEEE Trans. Power Elec. 4, 113(1989)
5. K. Shirakawa, S. Ishibashi, Y. Kobayashi, F. Takeda, K. Murakami, IEEE Trans. Magn. 26, 2268(1990)
6. I. Zaquine, H. Benasisi, J.C. Mage, J. Mater. Res. 9, 2425(1994)
7. H.S. Cho, M.H. Kim, H.J. Kim, J. Mater. Res. 9, 2425(1994)
8. R. Moazzami, Semicond. Sci. Technol. 10, 375(1995)
9. K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa, H. Tamura, Br. Ceram. Trans. J. 89, 39(1990)
10. J.N. Herbert, Ferroelectric Transducers and Sensors, Corden and Breach Science Publish, N. Y., (1982)
11. R. Moazzami, Semicond. Sci. Technol. 10, 375(1995)
12. 조해석, 하상기, 이대형, 홍석경, 양기덕, 김형준, 김경용, 유병두, 한국재료학회지 5, 239(1995)
13. In-Tae Kim, Choon-Ho Lee and Soon Ja Park, Jpn. J. Appl. Phys., 33, 5125(1994)
14. 김민홍, 여환국, 황기현, 이대형, 윤의준, 김형준, 한국재료학회지 6, 22(1996)
15. K. Shirakawa, H. Kurata, J. Toriu, IEEE Trans. Magn. 27, 5432(1991)
16. L.G. van Uitert, J. Chem. Phys. 23, 1883(1955)