

습식 식각법으로 제조된 박막 인덕터의 임피던스 특성

논문
10-8-9

Impedance Properties of Thin Film Inductors by Fabricated Wet Etching Method

김현식*, 송재성**, 오영우*

(Hyun-Sik Kim, Jae-Sung Song, Young-Woo Oh)

Abstract

In this study, the thin film air core and magnetic core inductors, consisting of planar coil and/or CoNbZr amorphous magnetic layers on a Si substrate, were fabricated as spiral type by using rf magnetron sputtering and wet etching methods. The etchant solution was achieved by iron chloride solution(17.5 mol%) mixed with HF (20 mol%) during 150 sec, which etched Cu films and CoNbZr/Cu/CoNbZr multi-layer films. They were about 10 μm of thickness and 10 \times 10 mm^2 of size. The properties of thin film magnetic core inductor were 400 nH of inductance and 1 of Q value at 10 MHz, and the resonance frequency was about 300 MHz.

Key words(중요 용어) : Air Core(공심), Magnetic Core(자심), Thin Film Inductor(박막인덕터), Wet Etching Method(습식 식각법), Impedance(임피던스)

1. 서 론

최근 고도 정보사회의 발전에 따라 비디오 기기, 퍼스컴, 핸드폰, 평판형 디스플레이 등 휴대형 전자 기기들은 소형화, 박막화 및 경량화가 급격히 추진되고 있으며, 이 기기들에 내장되는 인덕터, 변압기 등 자기소자를 포함한 전자회로들은 소형 고집적화, 고주파에의 기술 추세에 대응하는 능력을 강력히 요구받고 있다. 그렇지만, 메모리 반도체를 중심으로 한 반도체의 집적화 기술이 비약적으로 진보한데 비해, 자기소자의 소형 집적화는 여러 가지 기술난제로 인해 진전 속도가 매우 느린 실정이며, 이로 인해 아직까지 자기소자를 탑재한 전자기기는 보드 용적이 크고, 표면 실장화가 이루어지지 않고 있다. 따라서 자기소자의 소형·박막화는 전자부품기술에서 매우 중요한 과제로 등장하고 있다¹⁾.

일반적으로 박막 인덕터는 페라이트 칩 인덕터보다 단위체적당 인덕턴스가 높고, cloth 인덕터 보다

는 고주파 대응면에서 우수하다. 이는 향후 박막 자기소자가 고주파 대응 자기 소자로써 매우 큰 응용 잠재력이 있음을 의미한다²⁾. 이러한 장점으로 인해 박막 자기소자의 연구는 1960년대 처음으로 시작된 이래 1990년대 일본을 중심으로 활발한 연구가 진행 중에 있으며, Nishikawa는 850 MHz 대역용 다층 박막 공심 필터를 실용화 가능성을 보고하였고, 최근에는 Yamaguchi는 자성 박막 인덕터를 이용한 LC 필터에 응용한 결과를 보고하고 있다³⁾.

한편 마이크로 자기소자의 고성능화를 위해서는 새로운 소자구조의 고안, 고주파 자성재료의 개발과 더불어 박막 제조기술 및 미세 가공기술이 확립되어야 한다. 그러나, 지금까지 행해진 자기소자 연구에 있어서 미세 가공기술은 다른 기술에 비해 충분치 않아 소자제작에 많은 어려움을 낳고 있다. 특히 국내에서는 최근에서야 관심을 갖고 연구가 시작된 상태이다⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 수십 MHz대역의 박막 인덕터를 개발하는 것을 목표로 하여 박막 제조, 미세 가공과 측정 등의 기술을 확립하고, 습식 식각법으로 박막 공심 인덕터와 자성막/도체막/자성막으로 구성된 내부 코일형 박막 자심 인덕터를 제조하여 주파수에 따른 임피던스 특성 변화를 고찰하였다.

* : 경남대학교 공과대학 무기재료공학과

** : 한국전기연구소 비정질재료연구팀

접수일자 : 1997년 6월 2일

심사완료 : 1997년 8월 7일

2. 소자의 제조 공정

본 실험에서 스파이럴 코일형을 기본 구조로 하여, 박막 공정, 사진 공정, 식각 공정을 통하여 박막 공심 인덕터 및 박막 자심 인덕터를 제조하였다.

2.1. 박막 공정

박막 인덕터는 평면 코일, 자성막 그리고 절연막으로 구성되어 있지만, 본 실험에서는 절연막이 없는 공심 인덕터와 자심 인덕터를 기본 형태로 하여 소자를 제조하였다.

본 실험에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 장치(HRS-521A-TMP)를 이용하여 구리막과 자성막을 제조하였다. 타겟트는 직경 4"인 구리(99.99%)와 $\text{Co}_{89}\text{Nb}_{8.5}\text{Zr}_{2.5}$ (이하 CoNbZr로 나타냄.)를 사용하였으며, 기판은 Si-wafer를 증류수, TCE(trichloroethylene), 아세톤, 에틸 알코올 순으로 10분간 초음파 세척기를 이용하여 2회 반복하여 세척한 후, Ar 가스로 건조시킨 후 사용하였다. 또한, 챔버내 불순물을 제거하기 위하여 초기 진공도를 로터리 펌프와 TMP(turbo molecular pump)를 이용하여 초기 진공도를 3×10^{-7} torr이하로 하여, MFC(mass flow controller)로 Ar 유량을 8 cc/min으로 일정하게 유지시킨 후, 메인 밸브를 이용하여 챔버내 증착 압력을 조절한 후, RF 전력을 가하여 플라즈마를 안정하게 형성시켜, 타겟트의 표면에 이미 형성되어 있는 산화막 및 오염물 등을 제거하기 위해 shutter를 닫은 상태에서 20분 정도 예비 스퍼터링을 행한 후, 두께 10 μm 의 단층 구리막과 자성막(0.7 μm)/구리막(10 μm)/자성막(0.7 μm)으로 구성된 다층막을 제조하였다. 표 1에 본 실험에서 사용한 증착 조건을 나타내었다.

표 1. 구리막과 자성막 증착 조건

Table 1. Deposition conditions of Cu and magnetic films.

Condition Films	Vacuum ($\times 10^{-7}$ torr)	Substrate Tempera- ture	Target- Substrate Distance (mm)	RF Power (W)	Ar Pres- sure (m torr)	Thick- ness (μm)
Cu	< 3	R.T.	50	200	20	10
CoNbZr	< 3	R.T.	50	100	10	0.7

2.2 미세 가공공정

제조된 Cu막과 CoNbZr/Cu/CoNbZr 다층막 위에 PR를 도포하기 전에 박막과 Photoresist(PR)의 접착력을 향상시키기 위해 HMDS(Hexametyldisilane)를 도포한 후 PR을 스핀 코팅기를 이용하여 1.2 μm 로 균일하게 도포시킨 후 PR을 건조시키고 접착도를 향상시키기 위해 건조기에서 95 $^{\circ}\text{C}$ 에서 30분간 soft baking을 행하였다. 노광은 이미 제조된 Cr 마스크와 Aligner(Canon PLA-600F, proximity mask aligner)를 이용하여 UV광으로 12 mW 노출에너지로 9초 동안 행하였고, 노광된 시료를 현상액과 물을 6:1로 혼합한 용액에서 70초 동안 현상한 후, 잔여 용제를 제거하고 다층막과 PR의 접착도를 향상시키기 위해 110 $^{\circ}\text{C}$ 에서 30분간 hard baking을 행하였다.

Cu막은 염화철 수용액으로 식각하였고, CoNbZr/Cu/CoNbZr 다층막은 17.5 mol%의 염화철 수용액에 HF를 20 mol% 혼합한 식각 용액에서 150초 동안 식각한 후, PR stripper 용액에서 PR을 제거하여 박막 인덕터를 제조하였다⁵⁾.

2.3 인덕터의 구조

본 연구는 스파이럴(spiral) 평면 코일을 기본 형태로 하여 박막 인덕터를 제조하였는데 이는 스파이럴형 코일의 경우 인접한 도체와 전류의 방향이 같은 방향이지만, meander형 코일은 도체와 전류의 방향이 반대 방향이기 때문에 meander형 코일에 비해 더 높은 인덕턴스를 기대할 수 있기 때문이다⁶⁾. 본 실험에서 제조한 박막 인덕터는 샌드위치형 내부코일형으로 표 2에 공심 인덕터 및 자심 인덕터의 사양을 정리하였다.

표 2. 제조된 박막 인덕터의 사양

Table 2. Specifications of thin film inductors.

Inductor	Size (mm ²)	Type	w _c (μm)	d _c (μm)	t _{Cu} (μm)	t _{CNZ} (μm)	Turns
Air Core	10×10	spiral	200	72	10	-	10
Magnetic Core	10×10	spiral	200	72	10	0.7	10

2.4 박막 인덕터의 특성 평가

제조된 박막 인덕터의 주파수 특성을 측정하기 위해 측정 원리에 기초로 하여 마이크로 스트립 선로로 구성된 별도의 접속 zig를 그림 1와 같이 제작하

였다. 제작된 zig는 1 MHz ~1 GHz의 주파수 영역까지 측정 가능하도록 설계되었다. 또한, 소자와 zig를 bonding wire(Cu, $\varphi=0.1$ mm)을 사용하여 납땜으로 접속시킨 후 1 MHz에서 1 GHz의 주파수 영역에서 network analyser(HP 3752C)를 이용하여 인덕턴스 L과 저항 R를 측정한 후 성능지수 Q는 다음의 식으로 계산하여 구하였다⁷⁾.

$$Q = \omega \frac{L}{R} \quad (\omega = \frac{f}{2\pi})$$

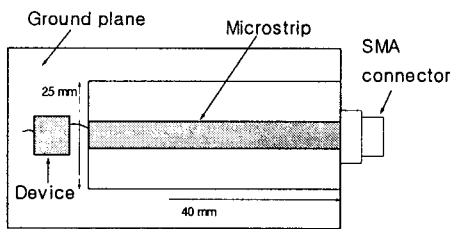


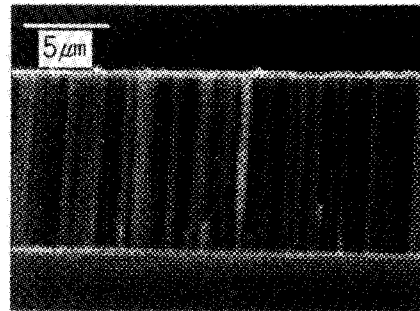
그림 1. 임피던스 특성 측정용 Zig
Fig. 1. Fabrication of zig used for measuring system

3. 결과 및 고찰

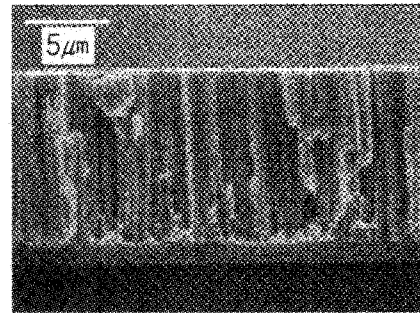
3.1 박막 인덕터의 제조특성

그림 2는 rf 마그네론 스퍼터링법을 이용하여 표 1에 나타난 증착 조건에서 증착된 Cu 막과 CoNbZr/Cu/CoNbZr 다층막의 단면 구조를 나타낸 것으로, 증착된 구리막은 전형적인 주상정 구조(columnar structure)를 하고 있다. 또한 다층막에 대해서는 하부 CoNbZr막은 매우 치밀한 단면 구조로 이루어져 있으며, 중간층인 Cu막은 전형적인 주상 조직으로 수직 방향으로 길게 성장된 조직을 나타내고 있다. 또한, 상부 CoNbZr막은 Cu막 위에 증착되었기 때문에 주상조직의 사이를 채우면서 Cu막과 비슷한 양상으로 증착되어 있어서 사진상으로는 Cu막과 상부층 CoNbZr막을 식별하기는 어렵지만, 식각 양상의 변화를 관찰하면 상부층 CoNbZr막을 확연하게 구분할 수 있다.

그림 3에 습식 식각된 CoNbZr/Cu/CoNbZr 다층막의 단면을 나타내었다. Cu막에 대한 습식 식각은 질산이나 염화철 수용액으로 가능하며, 많은 연구가 이루어졌지만, CoNbZr 자성막에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 그러나 본 연구에서 제조한 17.5 mol%의 염화철 수용액에 HF를 20 mol% 혼합한 식각용액으로 150초 동안 식각하였을 때 거의 수직인



Cu films



CoNbZr/Cu/CoNbZr films

그림 2. 스퍼터링법으로 증착된 Cu 막과 CoNbZr/Cu/CoNbZr 다층막의 단면 구조

Fig. 2. The cross-section structure of deposited Cu films and CoNbZr/Cu/CoNbZr multi-layers films by sputtering method

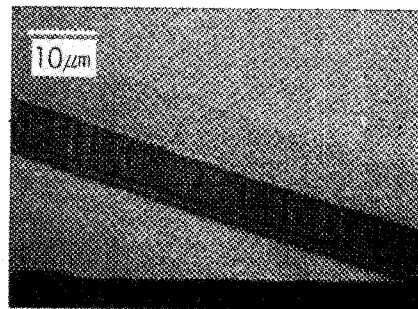


그림 3. 습식 식각된 CoNbZr/Cu/CoNbZr 다층막의 단면 조직

Fig. 3. Cross structure of CoNbZr/Cu/CoNbZr multi-layer were etched by wet etching method.

식각 단면구조를 하고 있어 매우 양호한 식각 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 Wimmers 등

의 연구 결과와 비교해 보면, 이들은 HNO₃와 HF를 혼합한 식각용액에서 CoNbZr막을 식각한 결과 최적의 조건에서도 등방성으로 식각되어 수직에 가까운 식각 특성을 얻지 못하였지만⁸⁾, 본 연구에서는 이방성 식각 특성을 얻을 수 있었으며, 이는 마이크로 자기소자의 패턴을 보다 정밀하게 형성시킬 수 있다고 생각된다.

그림 4에 습식 식각법으로 제조된 스파이럴 코일 형태의 내부 코일형 박막 자심 인덕터의 외형을 나타내었다. 현재는 박막 자심 인덕터의 패턴은 이온 밀링과 같은 건식법으로 형성시켜왔지만, 본 연구에서는 습식법으로도 양호한 패턴을 형성시킬 수 있으며, 그림에서 알 수 있듯이 식각 잔류물이 남아 있지 않음을 확인하였다.

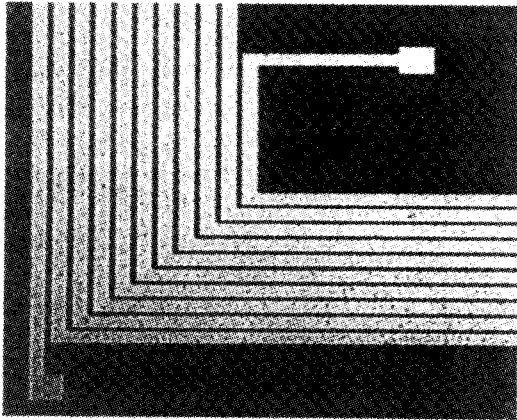


그림 4. 스파이럴 코일형의 박막 인덕터의 외형
Fig. 4. Shape of magnetic core thin film inductor of spiral coil type.

3-2 박막 인덕터의 고주파특성

스파이럴 코일형 박막 인덕터의 등가회로는 R과 L은 직렬이고, 표유용량 C는 병렬로 연결된 형태로 나타낼 수 있으며, 이때 회로의 임피던스 Z는 다음과 같은 식으로 나타내어진다⁷⁾.

$$Z = \frac{j\omega L + R}{1 + j\omega C (R + j\omega L)}$$

이 식에서 ω 는 각주파수이다. 일반적으로 소자가 인덕터의 역할을 하기 위해서는 $\omega L \gg R$ 의 조건을 만족시켜야 하며, 이는 $Q = \omega L / R$ 로 표시되는 성능지수(quality factor) Q로 나타낼 수 있으며, Q값이 클수록 인덕터의 성능은 우수하다. 또한 이식에서 분

모 중에서 $j\omega C (R + j\omega L)$ 항을 무시할 정도로 작게 해야하며 만약, R이 무시할 정도로 작다면, $\omega^2 LC \ll 1$ 이 만족되는 주파수 범위에서만 인덕터로 사용 가능하다. 결국 인덕터의 공진 주파수 f_R 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

일반적으로 인덕터는 f_R 는 소자 크기에 반비례하기 때문에 크기가 작을수록 사용 주파수 영역이 넓어진다. 따라서 평면 코일과 자성막으로 구성된 박막 인덕터는 벌크 인덕터에 비해 높은 주파수 영역에서 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 종래의 벌크 인덕터의 Q 값은 소자의 크기와 비례 관계에 있지만, 평면 인덕터의 Q 값은 소자의 크기에 관계없이 일정하기 때문에 인덕터의 구조, 형상, 도체막의 두께, 저손실 자성막을 이용하는 방법 등과 같은 방법으로 Q를 증가하는 방법이 필요하다.

그림 5에 크기가 10×10 mm², 선폭 200 μm, 코일 간격 72 μm, 코일 turn수 10회인 공심 인덕터와 자심 인덕터의 인덕턴스(L)의 주파수 특성을 나타내었다. 공심 인덕터는 300 MHz영역까지 30 nH의 일정한 값을 가지며, 공진 주파수인 400 MHz 이상에서는 L

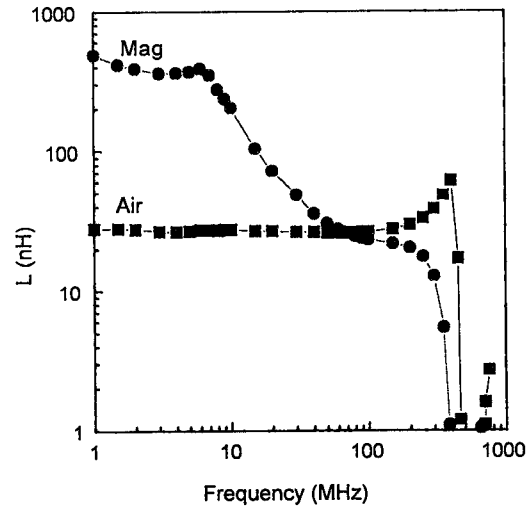


그림 5. 박막 공심 및 자심 인덕터의 주파수 변화에 따른 인덕턴스(L) 변화

Fig. 5. Frequency characteristics of inductance(L) for thin film air core and magnetic core inductors

값이 급격히 감소하였다. 자심 인덕터의 경우는 10 MHz 영역까지는 400 nH의 거의 일정한 값을 가지며, 이는 공심 인덕터보다 10배 이상 향상된 값이다. 그러나, 그 이상의 주파수 영역에서는 급격히 감소하는데, 이는 자성 박막인 CoNbZr의 자심 재료의 와전류 손실의 증가로 인해 고주파 손실이 급격히 증가하였기 때문이라 생각된다. 또한 100 MHz 영역에서는 공심 인덕터의 L과 같은 값을 나타내며, 공진 주파수는 공심 인덕터보다 다소 낮은 300 MHz이다.

그림 6은 공심 및 자심 인덕터의 주파수 변화에 따른 저항(R) 변화를 나타낸 것이다. 공심 인덕터의 경우 100 MHz 이하의 주파수 영역에서는 R은 일정하지만, 공진 주파수 영역에서는 주파수의 증가와 함께 표피효과와 근접효과가 현저하게 변함에 따라 R은 급격히 증가한다. 이때 공진 주파수는 400 MHz 정도이며, 100 MHz 이하의 주파수 영역에서 저항 R은 2Ω의 값을 나타내었다. 자심 인덕터의 경우, 공심 인덕터 보다 저항이 상당히 증가하였으며, 그림 5의 L의 변화와 같이 3단계의 변화를 나타냈는데 이는 앞서 언급한 것처럼 자성막의 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

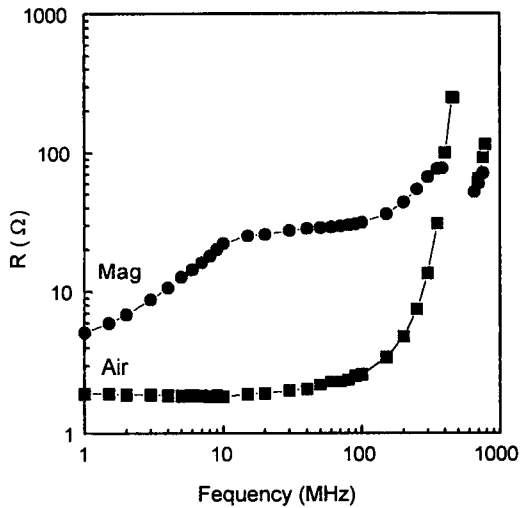


그림 6. 박막 공심 및 자심 인덕터의 주파수 변화에 따른 저항(R) 변화

Fig. 6. Frequency characteristics of resistance(R) for thin film air core and magnetic core inductors

그림 7은 공심 및 자심 인덕터의 성능지수의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 전체적으로는 공심 인덕

터와 자심 인덕터는 다른 주파수 특성을 나타내었다. 공심 인덕터는 주파수가 증가함에 따라 성능지수도 증가하는 경향을 나타냈으며 200 MHz영역에서 10정도의 높은 값을 가지며 공명 주파수에서 급격히 감소한다. 그러나 자심 인덕터의 경우 Q 값은 전체적으로 1 이하 낮은 특성을 나타내었다. 이는 본 연구에서 제작된 스파이럴형 내부 코일 자심 인덕터는 자성막 두께에 대한 코일의 폭과 간격이 매우 크기 때문에 자속의 대부분은 자성막 외부로 누설된다고 생각된다. 따라서 자성막의 두께를 증가시키고, 코일 폭과 간격을 줄여 자성막으로부터 누설 자속을 감소시켜, L을 증가시키므로써 Q를 증가시킬 수 있으리라 생각된다⁹⁾.

이상의 결과를 종합해 보면, 공심 인덕터가 자심 인덕터보다 전체적으로 주파수 특성이 우수하였지만, 10 MHz영역에서는 자심 인덕터의 임피던스 특성이 공심 인덕터보다 우수하였다.

본 실험에서 제조한 박막 공심 인덕터는 전체적으로 전형적인 주파수 특성을 나타냈지만, 다소 낮은 값을 가졌는데, 이는 코일 간격이 넓고 권선 수가 작기 때문이라 생각된다. 일반적으로 박막 인덕터의 경우 코일 간격이 작고 권선 수가 많을 수록 인덕턴스는 증가하기 때문에 코일 간격을 줄여 권선 수를 증가시킴으로써 더 높은 인덕턴스와 성능 지수를 얻

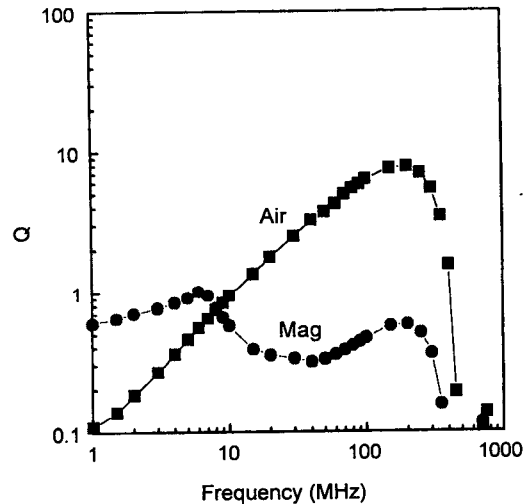


그림 7. 박막 공심 및 자심 인덕터의 주파수 변화에 따른 성능지수(Q) 변화

Fig. 7. Frequency characteristics of quality factor (Q) for thin film air core and magnetic core inductors

을 수 있으리라 기대된다⁷⁾. 또한, 습식 식각법으로 제조한 박막 자심 인덕터의 경우 공심 인덕터보다 주파 특성이 열화되었는데, 이는 자성막의 두께가 다소 얇고, 제조된 자기소자가 열처리를 하지 않아 자성막의 특성을 충분히 발휘하지 않았기 때문이라 생각되며, 향후 자성막의 특성 향상에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 박막 제조공정과 습식 식각법으로 선폭 200 μm , 선 간격 72 μm , 턴수 10인 스파이럴 코일형 공심 인덕터와 자성막(0.7 μm)/도체막(10 μm)/자성막(0.7 μm)으로 구성된 내부 코일형 자심 인덕터를 제조하여 주파수에 따른 임피던스 특성 변화를 비교·고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 염화철 수용액에 HF를 혼합한 식각 용액으로 습식 식각법에 의해 박막 공심 인덕터 및 박막 자심 인덕터의 미세 패턴을 형성할 수 있는 기술을 확립하였다.
- 2) 1 MHz~1 GHz 주파수 범위에서 반사계수와 별도의 zig를 이용하여 임피던스 특성을 비교적 정확하게 측정할 수 있었다.
- 3) 박막 자심 인덕터는 CoNbZr 자성막의 특성으로 인해, 박막 공심 인덕터에 비해 L 값은 수 MHz영역에서 10배 이상의 증가하였으며 임피던스 특성이 향상되었지만, 주파수가 증가할수록 열화되었다.

참 고 문 헌

1. 김희중 "마이크로 자기 소자의 기술동향" 한국자기학회지, Vol. 4, No. 1, pp.69, 1994.
2. K. Sharae, "A New Development in Magnetics-Micromagnetic Device-", T. IEE Japan, Vol. 111-A, No. 4, pp.259, 1991.
3. Y. Shimada "Recent developments of micro magnetic devices and related technologies" 日本電氣學會마그네틱스研究會 MAG-97-1, pp.1, 1997.
4. 김영학, 송재성 "공심 평면인덕터의 임피던스 해석" 한국자기학회지, Vol. 6, No. 3, pp.174, 1996.
5. 김현식, 민복기, 송재성, 이영생, 오영우, "CoNbZr/Cu/CoNbZr 다층막의 습식 식각에 관한 연구" 한국전기전자재료학회, Vol. 10, No. 7, pp.645, 1997.
6. K. Yamamoto, K. Shirakawa, "마이크로 磁氣素子と ディバイスの 開發" T. IEE Japan, Vol. 111-A, No. 4, pp.268, 1991.

7. 松本, "薄膜インダクタの基礎特性に関する研究" 日本東北大學校 大學院, 修士學位 論文, 1991.
8. O. J. Wimmers, F. J. Touwslager, and J. J. Ponjee, "Taper Etching of an Amorphous Soft Magnetic CoNbZr Alloy Using an Interfacial Organosilane Layer" J. Electrochem. Soc., Vol. 136, No. 6, pp.1769, 1989.
9. K. Shirakawa, H. Kurata, "Thin Film Inductor with Multilayer Magnetic Core" IEEE, trans., Japan, Vol. 8, No. 3, pp.169, 1993.

저자소개



김현식

1967년 3월 20일생. 1993년 경남대학교 공과대학 무기재료공학과 졸업. 1995년 동대학원 무기재료공학과 졸업 (석사). 1993년~현재 한국전기연구소 비정질재료연구팀 위촉 연구원. 1995년~현재 경남대학교 대학원 무기재료공학과 박사과정.



송재성

1956년 8월 31일생. 1980년 서울대학교 공과대학 금속공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 재료공학과 졸업 (박사). 1982년~현재 한국전기연구소 비정질재료연구팀 책임 연구원.



오영우

1951년 5월 30일생. 1978년 부산대학교 공과대학 무기재료공학과 졸업. 1988년 동대학원 무기재료공학과 졸업 (석사, 박사). 1990년 Carnegie-Mellon Univ. Post-Doc.. 1985년~현재 경남대학교 공과대학 무기재료공학과 교수.