

FeZrBAG 자성막을 이용한 박막 인덕터의 임피던스 특성

송재성 · 민복기 · 허정섭

한국전기연구소 박형전기소자연구 T.F.T.
경남 창원시 성주동 28-1

김현식

(주)메트론 기술 연구소
부산시 수영구 민락동 167-26 태인빌딩 3층

(2000년 8월 22일 받음, 2000년 9월 20일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 double rectangular spiral형 공심 인덕터를 유사 LIGA 공정으로, $Fe_{86.7}Zr_{3.3}B_4Ag_6$ 자성막을 dc magnetron sputtering법으로 각각 제조한 후 인덕터의 구조를 변화시켜, 인덕터의 임피던스 특성에 미치는 자성막의 특성 인자에 대해 연구하였다. 공심 인덕터의 전류 방향과 자성 박막의 자화 용이축이 수직일 경우 인덕터의 인덕턴스가 향상되었고, 공심 인덕터와 $Fe_{86.7}Zr_{3.3}B_4Ag_6$ 자성막 사이 절연막이 없는 경우 자성막의 자속 집중효과가 증가하여 절연막이 있는 경우보다 인덕턴스는 높고, 저항의 증가율이 높았으며, $Fe_{86.7}Zr_{3.3}B_4Ag_6$ 자성막의 투자율이 높을수록 인덕터의 인덕턴스에 기여하는 부분이 증가하므로 인덕턴스는 향상되었다. 또한 인덕터의 주파수 특성은 공심 인덕터의 특성에 지배적인 영향을 받으므로 인덕터의 주파수 특성을 향상시키기 위해서는 자성막의 특성보다 공심 인덕터의 특성을 향상시키는 것이 바람직하다.

I. 서 론

자기 소자란(magnetic device) 회로상에 인가되는 전기 신호를 전·자기 변환의 원리에 의해 변조하는 소자를 의미한다. 즉, 전기장 주위에 형성되는 자기장으로 인해 에너지의 변환 시 에너지의 위상이 변환되는 원리를 이용하는 소자이다. 따라서 소자의 효율은 전기 신호가 자기 신호로, 다시 자기 신호가 전기 신호로 바뀌는 효율이 가장 주요한 인자로 작용한다[1, 2]. 이러한 자기 소자의 가장 대표적인 형태로는 인덕터(inductor) 및 트랜스포머(transformer)가 있다.

현재 전자기기의 경박단소화가 진행되고 있으며, 저손실, 고주파 특성이 요구되고 있다. 하지만, 기기를 제어하는 중추소자를 구동시키는 전원 공급 소자는 중추소자의 개발 단계에 미치지 못하는 실정이다[3]. 일례로 자기 신호를 전기 신호로 교환해 주는 인덕터나, 각각의 중추 소자에 적절한 전압을 유지시켜주는 트랜스포머의 경우에는 아직도 벌크의 형태로 사용되고 있으며 고주파수 대역에서 사용되지 못하고 있다. 이러한 원인은 인덕터나 트랜스포머에 주된 역할을 하는 자성체가 벌크형 페라이트 연자성체로서 낮은 포화 자속 밀도에 의해 부품의 크기가 커지며, 고주파 대역에서 낮은 투자율 특성을 나타냄으로 소자의 효율이 감소하기 때문이다[4]. 따라서 자성체를 이용

하는 자기 소자의 특성을 개선하기 위한 방안으로 기존의 효율이 낮은 페라이트 자성체를 보다 고효율의 자성체로 대체하려는 노력과 소자의 경박단소화를 위한 박막형 자기소자를 제조하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

이러한 박막형 자기소자는 실제 기술, 박막제조 기술, 미세가공 기술, 특성평가 기술들로 이루어져 있으며[6], 지금까지는 소자설계, 자심 재료의 선정과 증착 방법, 도체막의 종류, 제조공정 등의 연구가 주로 진행되어 왔으며[7, 8], 특히 박막 인덕터의 임피던스 특성과 자성막과의 상관관계에 대한 연구는 주로 모의 해석에 의한 연구만[9, 10] 이루어졌을 뿐 실험적인 연구는 체계적으로 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 박막 인덕터의 임피던스 특성에 영향을 미치는 자성막의 인자에 대한 체계적인 고찰을 하기 위해 double rectangular spiral형 공심 인덕터를 유사 LIGA 공정으로 제조한 후 별도로 제작된 FeZrBAG계 자성막을 이용하여 인덕터 구조를 다양하게 변화시켜, 박막 인덕터의 특성 변화에 대해 고찰하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서는 double rectangular spiral형 인덕터를 기본 구조로 설정하여 LIGA like process를 이용하여

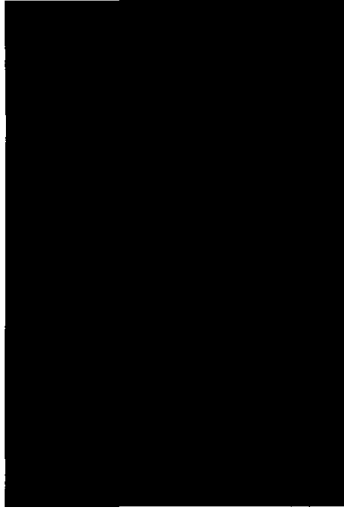


Fig. 1. OM image of thin-film inductor.

150 μm 두께의 corning glass위에 PR(SU-8 series) 패턴 형성 후 선택적 전기도금(selective electro-plating)에 의한 방법으로 구리막을 15 μm의 두께로 도금하여 최종 공심 인덕터를 제조하였다. 제조된 인덕터의 크기는 7.3×20.3 mm²이고, 선폭 145 μm, 선간격 45 μm이며, 직류저항은 3.95 Ω이다. 그림 1에 본 연구에 제조한 박막 인덕터를 나타내었다.

FeZrBAG 비정질 박막을 제조하기 위해 DC 마그네트론 스퍼터링 장치를 이용하였으며, (100)으로 배향된 Si-wafer 위에 0.5 μm의 두께로 증착하였다. 초기 진공도는 3×10⁻⁶ torr 이하이고, Ar 유량은 13 sccm, 증착 전류는 100 mA, 증착 압력 4 mtorr로 고정한 조건에서 증착시 기판을 수냉하였다. 증착된 박막의 조성은 Fe_{86.7}Zr_{3.3}B₄Ag₆

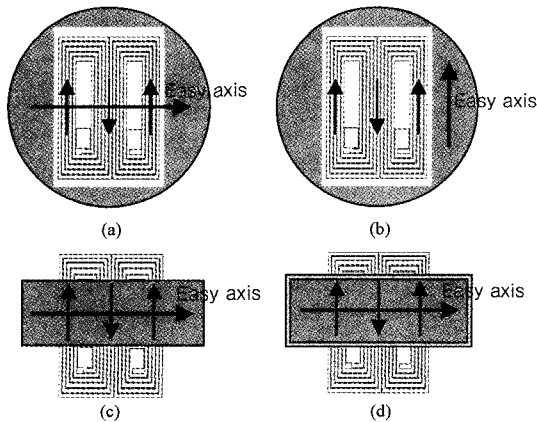


Fig. 2. Various types of thin-film inductors.

(이하 FeZrBAG로 표기)이었다. 증착된 FeZrBAG 박막의 자기적 특성을 제어하기 위해 진공 자장중 열처리 장치를 이용하여 진공도를 10⁻⁶ torr 이하로 한 후, 자장은 1.5 kOe로 인가하여 일축 자장중(uniaxial field annealing, UFA)에서 300~600 °C 온도 범위에서 1시간동안 열처리를 행한 후 자기적 특성을 측정하였다.

각각 별도로 제조된 박막 인덕터와 자성막을 이용하여 다양한 구조로 변화시켰으며, 인덕터의 임피던스 특성은 Network Analyzer를 이용하여 평가하였다. 본 연구에서 구성한 인덕터의 구조를 그림 2에 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 자성 박막의 특성

그림 3은 열처리 온도에 따른 Fe_{86.7}Zr_{3.3}B₄Ag₆ 비정질 박막의 특성 변화를 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서와 같이 증착된 FeZrBAG 비정질 박막의 전기 비저항은 150 μΩcm이며, 400 °C에서 감소하기 시작하며 이는 400 °C부터 결정화가 시작됨을 알 수 있다. 그림 3(b)는 보자력의 변화를 나타낸 것으로 증착된 상태에서는 0.6 Oe의 값을 가지며, 열처리 온도가 증가함에 따라 서서히 증가하며, 그림

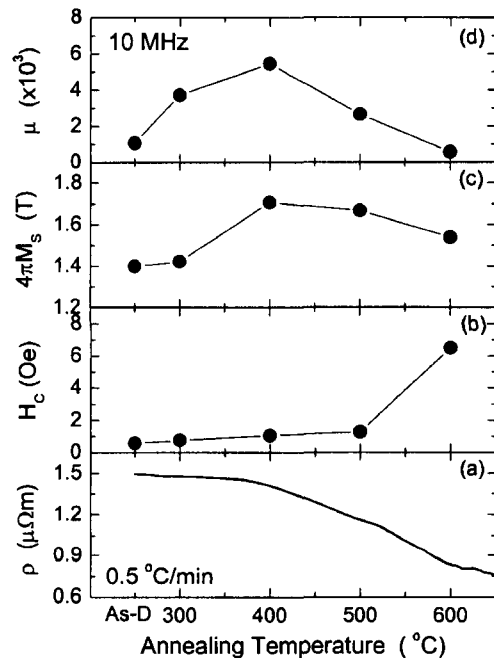


Fig. 3. Changes in the ρ(a), Hc (b), 4πMS (c), and μ (d) as function of the annealing temperature for amorphous Fe_{86.7}Zr_{3.3}B₄Ag₆ thin films.

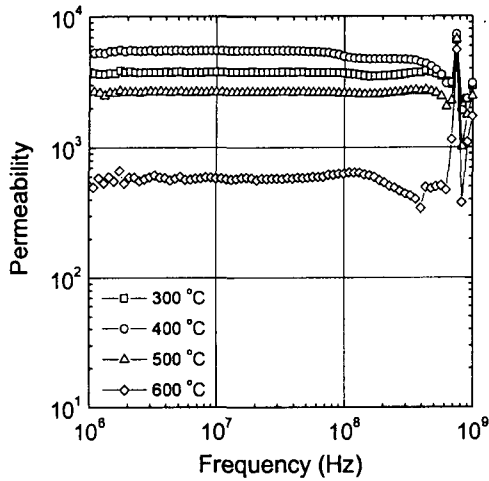


Fig. 4. Changes in the permeability (μ) as function of the frequency for $\text{Fe}_{86.7}\text{Zr}_{3.3}\text{B}_4\text{Ag}_6$ thin films.

3(c)의 포화자화의 경우 전체적으로 1.4 T 이상의 높은 값을 가지며, 열처리 온도가 증가함에 따라 증가하여 400 °C에서 UFA한 경우 1.7 T로 가장 높은 값을 나타내었다. 그림 3(d)는 10 MHz에서 측정된 투자율의 변화를 나타낸 것으로 열처리 온도가 증가함에 따라 투자율이 증가하며, 400 °C에서 5,800 정도로 상당히 높은 값이며, 이는 고평화자화와 저보자력에 기인한 것으로 생각된다.

그림 4는 FeZrBAG 자성막의 투자율 특성을 나타낸 것으로 자성막은 100 MHz 이상의 일정한 주파수 특성을 나타내었으며, 특히 400 °C에서 열처리를 행한 경우 5800으로 가장 높았으며, 300 MHz의 주파수까지 안정한 특성을 나타내고 있다. 이러한 FeZrBAG 박막의 우수한 자기 특성과 구조 변화는 김 등이 보고한 논문[11]에 자세하고 포함되어 있다.

3.2. 인덕터의 특성

그림 5는 자성막의 자기 이방성 방향에 따른 인덕터의 특성 변화를 나타낸 것으로 그림 2(a)와 (b)의 구조로 하여 특성을 평가하였다. 그림에서와 같이 공심 인덕터의 경우보다 자성막이 있을 경우 인덕턴스 값은 증가하였고, 전류의 방향과 자성막의 자화 용이축 방향이 수직일 경우가 가장 높은 특성을 나타낸다. 도체에 전류가 흐를 경우 자기장은 전류의 방향과 90° 방향으로 형성된다. 따라서 본 연구에서와 같이 double rectangular spiral형 인덕터의 경우 전류의 방향과 자성막의 자화 용이축이 수직인 경우 자성막의 자화 용이축 방향의 자기특성을 이용하는 것이고,

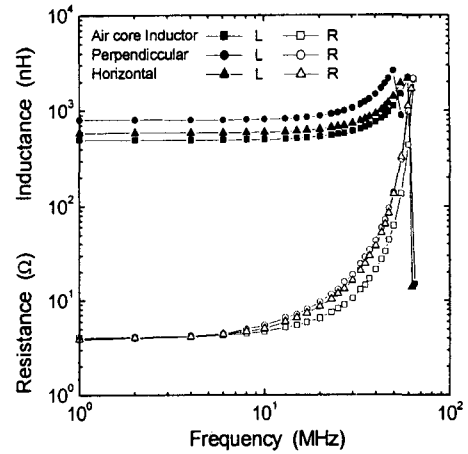


Fig. 5. Relationships between impedance of thin-film inductor and easy-direction of magnetic films.

수평인 경우는 자화 곤란축의 자기 특성을 이용하는 것이다. 본 연구에서와 같이 공심 인덕터에 자성막을 전류의 방향과 수직으로 배열한 경우 수평으로 배열한 경우 보다 인덕터의 인덕턴스 증가율이 높지만, 공명 주파수는 감소함을 알 수 있다. 따라서 자성막의 자기 이방성 방향에 따라 인덕터의 주파수 특성이 달라져 자성막의 자기 이방성이 인덕터의 인덕턴스 특성에 밀접한 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 저항의 주파수 특성은 자화 용이축의 방향에 따라 변화가 없어 자성막의 손실은 자기 이방성과 큰 관계가 없음을 알 수 있다.

그림 6은 자성막과 도체막 사이의 절연막 유무에 따른 인덕터의 특성 변화를 나타낸 것으로 그림 2의 (c)와 (d)

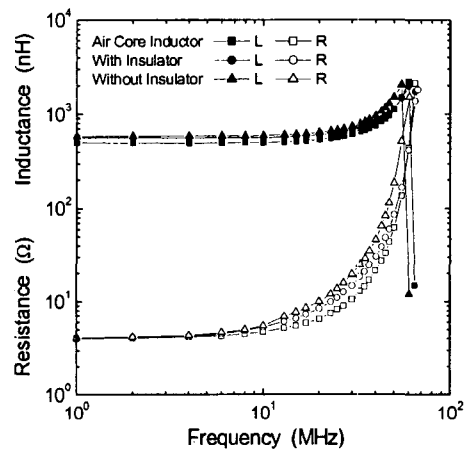


Fig. 6. Relationships between impedance of thin-film inductor and with or without insulator film.

의 구조에서 특성을 평가하였다. 그림에서와 같이 절연막이 없는 경우 다소 높은 인덕턴스를 가지며, 이는 도체막과 자성막이 밀접할수록 자속이 보다 더 집중됨을 의미한다. 또한 절연막이 있는 경우 반대의 경우보다 저항의 증가율이 다소 낮지만, 공심 인덕터에 비해 저항의 증가율은 다소 높았다. meander형 인덕터에서는 절연막 유무에 따라 공진 주파수가 급격히 변하지만 본 연구에서와 같이 spiral형 인덕터의 경우 절연막 유무에 따라 전체 주파수 특성은 큰 변화가 없어 double rectangular spiral 구조에서는 공심 인덕터의 특성이 주파수 특성에 많은 영향을 받을 수 있다.

그림 7은 공심 인덕터에 자성막을 여러 가지 구조로 배열시킨 구조에서 인덕터의 특성 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 공심 인덕터의 경우 보다 자성막이 있을 경우 자속의 집중효과가 증가하여 인덕턴스는 상승하고, 도체막 상·하부에 자성막을 동시에 배치한 경우 인덕턴스가 가장 높은 값을 나타내었다. 한편 자성막을 도체막 상·하부에 각각 단독으로 배치한 경우 인덕턴스의 크기는 하부에 배치시킨 경우 다소 높았다. 이는 도체막의 표면 평탄성에 의한 요인이라 생각되며, 본 연구에서 도체막을 도금법으로 제작하였으며, 도체막의 두께는 13~17 μm이었다. 따라서 도체막은 기판과 접한 하부는 표면이 평탄한 반면 도체막의 상부는 두께 분포로 인해 표면 평탄성이 하부보다 열악하므로 상부에 자성막을 배치시킨 경우 하부에 자성막을 배치한 경우 보다 자속 분포가 불균일하게 되고, 이로 인해 자속 집중효과가 상대적으로 작게 되어 인덕턴스가 작게 된다고 생각된다.

또한 저항의 경우 자성막의 상하부에 단독으로 배치시킨 경우 전체적으로 주파수 특성은 유사하지만 공명 주파수는 자성막을 도체막 상부에 위치시킨 56 MHz이고, 하부에 위치한 경우 65 MHz이다. 이는 앞선 인덕턴스의 결과에서와 같이 도체막 상부에 배치한 경우 도체막의 표면 요철에 의해 자성막과 도체막 사이에 미세한 공극이 존재하게 되므로 공기에 의한 표유용량이 증가하게 되므로 공명주파수가 낮아진다고 생각된다[12].

또한 자성막을 도체막 상하부에 동시에 배치시킨 경우 인덕턴스는 2배 증가한 동시에 저항도 주파수가 증가함에 따라 급격히 증가하였다. 이는 고주파 영역에서 인덕터의 저항에서 도체막에 의한 저항 증가분 보다 자성막에 의한 저항의 증가분이 지배적임을 알 수 있고, 자성막의 저항 증가분은 자성막의 손실에 의한 것으로 생각된다[13].

그림 8은 투자율 크기가 다른 자성막을 도체막 상하부에 배치하였을 때 인덕터의 임피던스 특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 자성막의 투자율이 높을수록 인덕턴스는 높은 값을 나타내며, 이는 인덕터의 인덕턴스는 자성막의 투자율과 밀접한 관계가 있으므로 투자율이 높은 자성막을 사용할 경우 높은 인덕턴스 값을 가짐을 알 수 있으며, 투자율이 10 MHz에서 5,800인 Fe_{86.7}Zr_{3.3}B₄Ag₆ 자성막을 배치한 경우 공심 인덕터보다 인덕턴스는 2배 이상 증가하였다. 또한 투자율이 높을수록 인덕터의 저항도 증가함을 알 수 있다.

그림 9는 Fe_{86.7}Zr_{3.3}B₄Ag₆ 자성막의 투자율과 인덕터의 인덕턴스 및 공진 주파수의 변화를 나타낸 것이다. 인덕턴스는 자성막의 투자율이 높을수록 인덕터의 도체막에서

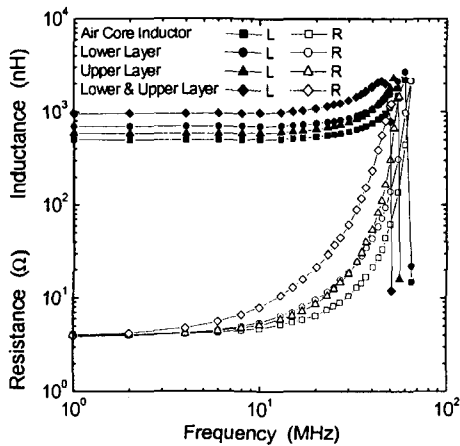


Fig. 7. Relationships between impedance of thin-film inductor and position of magnetic films.

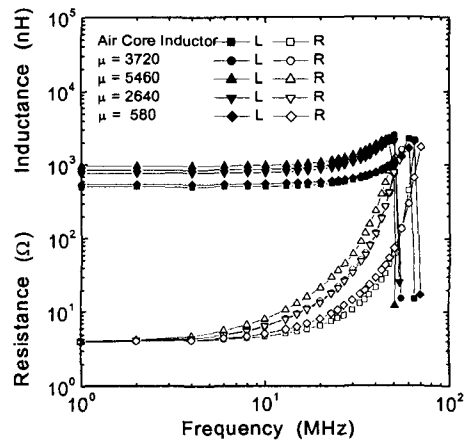


Fig. 8. Relationships between impedance of thin-film inductor and permeability of magnetic films.

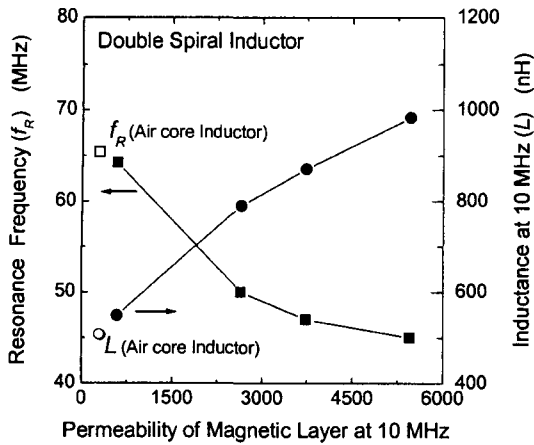


Fig. 9. Relationship between resonance frequency and inductance of thin-film inductor and permeability of magnetic films.

발생하는 자속의 집속효과가 증가함으로 자성막의 투자율에 비례하여 증가한다. 그러나 공명 주파수의 경우 자성막의 투자율이 증가함에 따라 감소하는데 이는 아래 식과 [14] 같이 자성막의 투자율 증가로 인해 인덕턴스가 증가하며, 이로 인해 공명 주파수가 감소된다고 생각된다.

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

IV. 결 론

본 연구에서는 double rectangular spiral형 공심 인덕터를 제조하고, 인덕터 특성에 미치는 자성막의 인자에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인덕터의 전류의 방향과 자성 박막의 자기 이방성 방향이 수직일 경우 인덕턴스가 향상되었다.
- 2) 도체막과 자성막 사이 절연막이 없는 경우 자속의 집

속 효과가 크기 때문에 인덕턴스는 높은 값을 가진다.

3) 자성막의 투자율이 높을수록 인덕터의 인덕턴스에 기여하는 부분이 증가하므로 인덕턴스는 향상되었지만, 자성막의 투자율-주파수 특성은 인덕터의 인덕턴스-주파수 특성에 큰 영향을 미치지 않았다.

4) 인덕터의 주파수 특성은 공심 인덕터의 특성에 지배적인 영향을 받으며, 인덕터의 주파수 특성을 향상시키기 위해서는 공심 인덕터의 특성을 향상시키는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구에 사용된 인덕터를 제작하는데 많은 도움을 주신 홍익대학교 김형준 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김희중, 한국자기학회지, 4(1), 69(1994).
- [2] 김현식, 민복기, 송재성, 오영우, 한국전기전자재료학회지, 11(6), 486(1998).
- [3] 신동훈, 박사학위논문, 홍익대학교(2000).
- [4] 송재성, "고주파 박형자기소자 개발" 산업자원부(1999).
- [5] K. Yamamoto, K. Shirakawa, T. IEE Japan, 111-A(4), 268 (1991).
- [6] 민복기, 김현식의 2, 대한전기학회지, 48(5), 333(1999).
- [7] K. Shirakawa, H. Kurata, IEEE, trans., Japan, 8(3), 169 (1993).
- [8] 김민홍, 여환국, 황기현의 3, 한국재료학회, 6(1), 22(1996).
- [9] 김영학, 송재성, 한국자기학회지, 6(3), 174(1996).
- [10] 武田, 白川, 平田, 村上, 電氣學會マグネティックス研究會資料, MAG-89-164, (1989).
- [11] 김현식, 민복기, 송재성, 한국자기학회지, 9(6), 285 (1999).
- [12] 山口, 荒川, 石原, 奥山, 能谷, 電氣學會マグネティックス研究會資料, MAG-92-164, (1992).
- [13] W. A. Roshen, D. E. Turcotte, IEEE Trans. Magn. 24, 3213(1988).
- [14] 이창호, 신동훈, 남승의, 김형준, 한국자기학회지, 8(4), 241(1998).

Characteristics of Thin-Film Inductors Using FeZrBAg Magnetic Thin Films

J. S. Song, B. K. Min and J. S. Heo

Advanced Electrical Devices T.F.T., KERI 28-1, Seongju-Dong, Changwon Kyungnam, Korea

H. S. Kim

R&D Center, Mattron Co., LTD.

Taein Building 3F, 167-26, Minrag-Dong, Suyoung-Gu, Busan, Korea

(Received 22 August 2000, in final form 20 September 2000)

Double rectangular spiral thin-film inductors were fabricated using $\text{Fe}_{86.7}\text{Zr}_{3.3}\text{B}_4\text{Ag}_6$ thin film with high permeability and resistance, in which easy axis of magnetization of the thin-film was perpendicular or parallel to the current direction. The perpendicular geometry inductor revealed higher inductance than the parallel geometry one, because spin aligns of magnetic film were more easily along the field direction due to higher field intensity in the perpendicular geometry. The increase of the inductance, however, resulted in the decrease of resonance frequency. The permeability was monitored by annealing the thin-films at different temperatures. With increasing the permeability, the inductance increased, but total resistance also increased due to the increase in magnetic core loss. As the resonance frequency was higher in air-core inductor than in magnetic thin-film core inductor, it is suggested to increase the resonance frequency that the characteristic of air-core inductor rather than the magnetic properties of the thin-film should be enhanced.