

电感器用 Ni-Cu-Zn 铁氧体薄膜的设计与性能研究

范跃农^{1,2}, 冯则坤¹, 陈中艳¹, 龚荣洲¹

(1. 华中科技大学 电子科学与技术系, 武汉 430074; 2. 景德镇陶瓷学院 机电系, 景德镇 333403)

摘 要: 采用丝网印刷技术制备 Ni-Cu-Zn 铁氧体电感器薄膜, 并对其性能进行了表征. XRD 分析表明, 铁氧体薄膜具有相同的晶格结构. 研究结果表明, 在引入了铁氧体薄膜后, 电感器的电感量相对于空心电感器有 30% 左右的提高, 品质因数依频率不同有所改善, 共振频率有所降低. 经 400℃ 后处理的薄膜电感器在低频时性能最好, 50 MHz 时电感量提高了 27%, 品质因数提高了 39%.

关 键 词: 铁氧体薄膜; 电感量; 品质因数; 丝网印刷

中图分类号: TM277

文献标识码: A

Design and Performance of Ni-Cu-Zn Ferrite Film for Inductor

FAN Yue-Nong^{1,2}, FENG Ze-Kun¹, CHEN Zhong-Yan¹, GONG Rong-Zhou¹

(1. Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Mechanical and Electrical, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China)

Abstract: Ni-Cu-Zn ferrite inductor film was fabricated by screen print technology, and its performances were investigated. XRD results suggest that the as-prepared thin films exhibit the same crystalline structure. The results show that after introducing of ferrite film, the inductance increases by 30%, the quality factor is improved, and the resonance frequency decrease. Ferrite inductor thin films annealed at 400℃ exhibit an optimum performance with high quality at 50 MHz, inductance increased by 27%, the quality factor increased by 39%.

Key words: ferrite film; inductance; quality factor; screen printing

电感器是电子领域的三大无源元件之一, 被广泛用于低噪声放大器、压控振荡器、变压器和匹配网络等. 传统的平面电感器由于磁耦合比较低, 需要占用大量的芯片面积, 并会带来寄生效应, 从而产生大的能耗. 这些缺点是实现高集成电子系统的瓶颈. 为了减小电感器的尺寸并提高其性能, 许多学者做了大量的研究工作. Jha 等^[1]研究了 MEMS 基电感器; 另外几个课题组^[2-5]研究了特殊基板形式和寄生效应小的 3D 电感器, 但是制备技术都过于复杂; Chua^[6]和 Yamaguchi^[7]等研究了 CoNbZr 薄膜电感器, 但是由于电阻率低, 引入了更多损耗.

在这种情况下, 铁氧体薄膜由于其电阻率高, 在平面电感器方面具有优异的应用潜力, 铁氧体电

感器的电感量和品质因数比目前应用的其它体系高^[8-11]. 本工作用丝网印刷技术制备了结构新颖的 Ni-Cu-Zn 铁氧体薄膜电感器.

1 制备

按 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3):w(\text{NiO}):w(\text{CuO}):w(\text{ZnO}):w(\text{V}_2\text{O}_5):w(\text{Co}_2\text{O}_3) = 48:13:12:26:0.6:0.4$ 称取原料, 球磨 2 h 后, 在 775℃ 煅烧 2.5 h 制备 Ni-Cu-Zn 铁氧体粉末, 掺入少量的 V_2O_5 和 Co_2O_3 用来降低烧结温度. 具体的制备工艺如图 1 所示. 制备好的铁氧体粉末与有机溶剂(松油醇: 乙基纤维素=10:1)以 2.6:1.0 的比例混合得到铁氧体浆料. 空心电感器制作在

收稿日期: 2011-07-08; 收到修改稿日期: 2011-10-09

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20090142120003)

Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20090142120003)

作者简介: 范跃农(1964-), 男, 博士研究生. E-mail: fanyuenong@smail.hust.edu.cn

0.4 mm 厚的陶瓷基板上, 如图 2(a)所示. 制备中用丝网印刷技术将银浆料印刷在基板上, 然后经 850℃ 的固化烧结^[12]. 空心电感器的尺寸如表 1 所示, 其中 W 、 S 、 R 、 n 和 d 分别表示线宽、线间隙、外径、圈数和导体厚度.

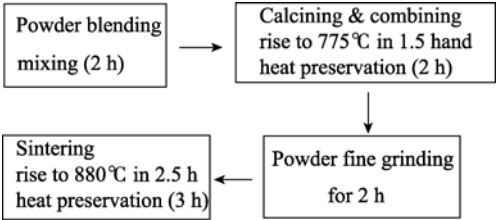


图 1 铁氧体粉末的制备过程
Fig. 1 Preparation process of ferrite powder

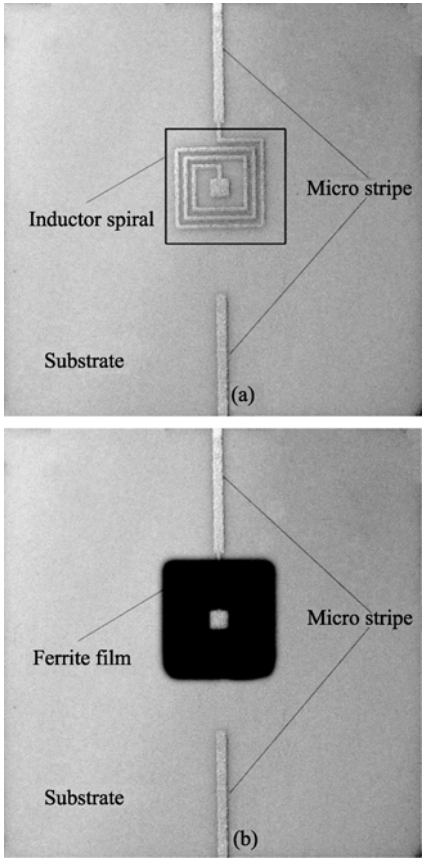


图 2 丝网印刷制备的一种典型铁氧体电感器
Fig. 2 A representative graph of inductor prepared from ferrite thin films
(a) Air core inductor; (b) Ferrite inductor

表 1 空心电感器尺寸参数
Table 1 Size parameters of air core inductor

Parameter	$W/\mu\text{m}$	$S/\mu\text{m}$	R/mm	n	$d/\mu\text{m}$
Air core inductor(L_0)	250	250	4.5	3	3

W , S , R , n and d indicate separately line width, gap between lines, external diameter, number of turns and conductor thickness, respectively

采用丝网印刷把铁氧体浆料印制在空心电感器上, 得到如图 2(b)所示的薄膜电感器, 热处理过程见表 2, 对应的电感器样品分别标示为 L1~L3, 铁氧体膜的厚度都是 5 μm .

2 结果与讨论

2.1 铁氧体薄膜分析

为了深入分析薄膜电感器, 单独制备了相应的铁氧体薄膜, 对应 L1~L3, 铁氧体薄膜标示为 f1~f3 薄膜样品. 由于制备工艺的相似性, 各样品的 SEM 形貌与 f3 的基本相似, 而且各样品的测量结果也基本相似, 以 f3 样品的测量结果来加以说明. f3 薄膜的 SEM 形貌如图 3 所示, 从图 3(a)中可以看到, 铁氧体膜是磁性颗粒的堆积, 并且疏松多孔, 表明磁性颗粒不够致密, 这可能是由于退火时有机溶剂挥发引起的, 但从图 3(b)中可以看出, 制备的薄膜的表面还是比较平整.

铁氧体薄膜的 XRD 分析如图 4 所示, 只经历 100℃ 烘干过程的 f1 薄膜的谱线与 86-0507 卡匹配良好, 这说明铁氧体的尖晶石结构在浆料阶段已经形成, 所有样品中的铁氧体薄膜晶格结构相同.

用振动样品磁强计(VSM)分析了铁氧体薄膜的磁特性, 如图 5 所示. 从 $M-H$ 曲线中可以看出, f3 的饱和磁化强度、剩余磁化强度最大, 矫顽力最小, 这可能是 910℃ 烧结过程使得磁性颗粒更加致密, 同时晶粒有所长大引起的. 前者可以增加饱和磁化强度, 后者可以降低矫顽力^[13], f3 高的剩余磁化强度不利于电感器应用. f2 的饱和磁化强度和剩余磁化强度都很小, 这可能是磁性颗粒之间孔隙度大引

表 2 铁氧体薄膜电感器的后处理
Table 2 Post-treatment of ferrite inductor film

$T/^\circ\text{C}$	100	0-400	400	400-910	910
L1/min	240	—	—	—	—
L2/min	240	200	600	—	—
L3/min	240	200	360	160	10

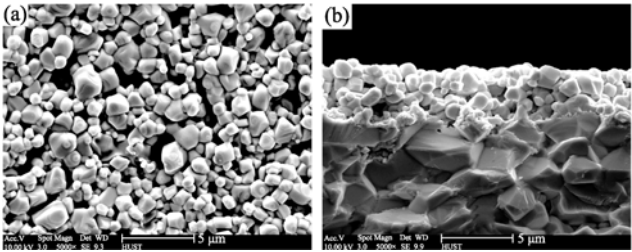


图 3 f3 样品的 SEM 照片
Fig. 3 SEM images of ferrite film sample f3
(a) Top view; (b) Cross-sectional view

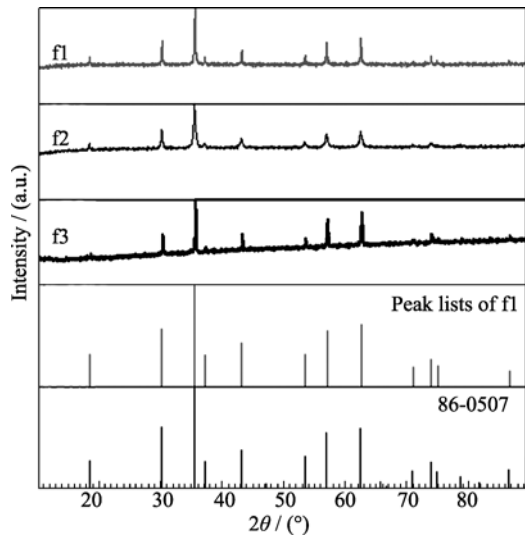


图 4 铁氧体薄膜的 XRD 图谱
Fig. 4 XRD patterns of ferrite films

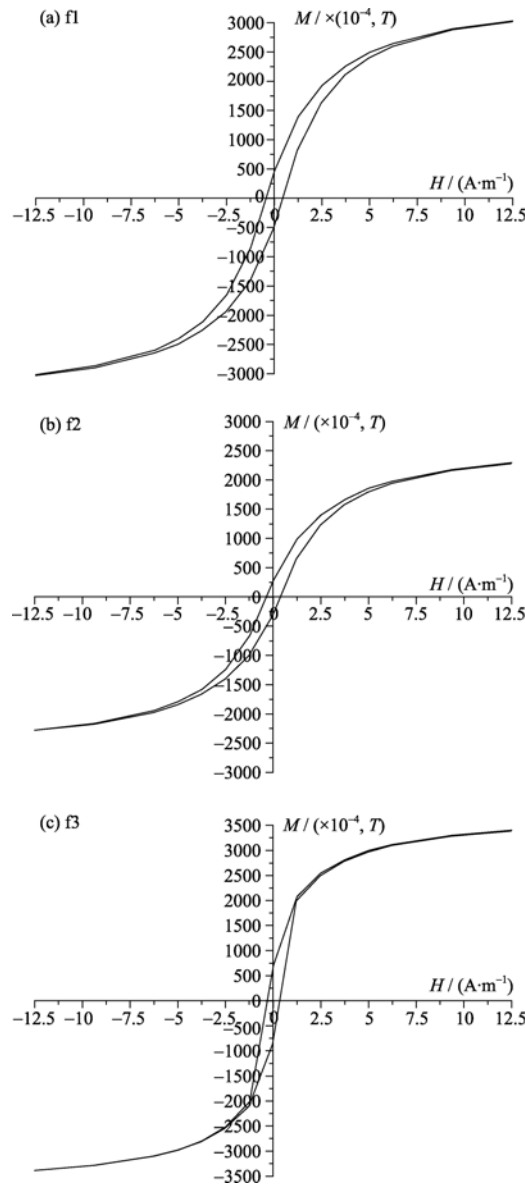


图 5 不同样品的铁氧体薄膜磁滞回线
Fig. 5 Ferromagnetic hysteresis loops of different ferrite films

起的. f1 薄膜的饱和磁化强度和剩余磁化强度都居中, 但是矫顽力较高. 铁氧体薄膜的磁性能如表 3 所示, H_c , M_s 和 M_r 分别表示矫顽力、饱和磁化强度和剩余磁化强度.

2.2 铁氧体薄膜电感器性能

薄膜电感器的分析基于如图 6 所示的电感器模型, 参数提取参见文献^[14]. S 参数由网络分析仪 (Agilent 8722ES) 测试获得, L 和 Q 分别表示电感量和品质因数, 薄膜电感器的性能如图 7 所示, 图中 L_0 是作为参考比较用的空心电感器.

从图 7 (a) 可以看出, 相比于空心电感器 L_0 , 所有薄膜电感器的电感量在 50~300 MHz 频段内都有效提升. 50 MHz 时, L_1 、 L_2 和 L_3 的电感量分别为 52、52 和 53 nH, 相对空心电感器分别增长了 27%、27% 和 30%, 在 300 MHz 时相应的增长为 35%、52% 和 23%. 这些增长源于铁氧体薄膜的引入, 其本质是铁氧体薄膜的磁化储能的增加. 从图 7(a) 中也可以看出, 虽然 f1、f2 和 f3 的饱和磁化强度不同, 但是 L_1 、 L_2 和 L_3 的电感量在低频时基本相等, 但是在高频时, 高饱和磁化强度样品的电感量具有更加稳定的频率特性.

图 7(b) 显示了铁氧体薄膜电感器的品质因数的频率特性. 50 MHz 时, L_2 的品质因数(Q)是 5.3, 与空心电感器 L_0 相比提高了 39%, 并且品质因数峰值是 8.2, 增长了 15%. L_1 和 L_3 的品质因数比 L_0 低, 这可能是由于磁性薄膜中的剩余磁化强度高引起的, 它代表能量的损耗. 从图 8(b) 中还可以看出, 所有铁氧体薄膜电感器的品质因数峰值对应的频率都低于空心电感器的相应频率值, 这意味着铁氧体薄膜电感器的共振频率有所降低.

综合考虑电感量和品质因数, 可以发现, 在经

表 3 各铁氧体薄膜样品的磁性能

Table 3 Magnetic property of different ferrite films			
Magnetic property	$H_c/(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$	M_s/T	M_r/T
f 1	2800	0.3490	0.0464
f 2	2400	0.2607	0.0285
f 3	2080	0.3637	0.0732

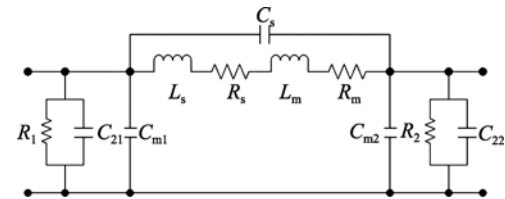


图 6 用于铁氧体薄膜电感器性能分析的 π 等效电路模型
Fig. 6 Equivalent circuit model for performance analysis of ferrite thin film inductor

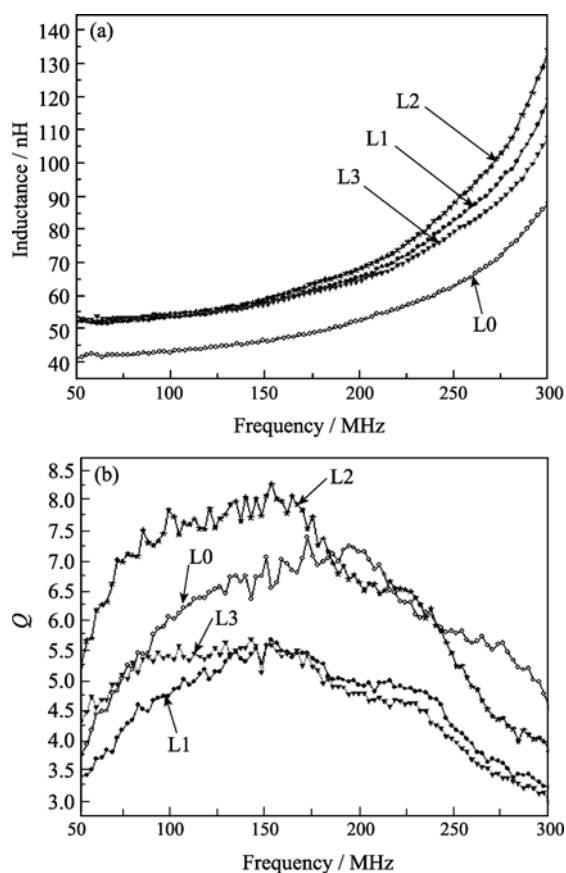


图 7 不同薄膜电感器的性能

Fig. 7 Performance of different ferrite film inductors

(a) Inductance; (b) Quality factor

历了高于 400℃ 的热处理后的电感器样品 L2 在低频时具有更加优越的性能。

3 结论

采用丝网印刷技术制备了 Ni-Cu-Zn 铁氧体薄膜电感器, 研究了材料的电感性能。结果表明, 经历了 400℃ 退火处理的薄膜电感器在低频时性能最优, 50 MHz 时电感量提高了 27%, 品质因数提高了 39%, 有望应用于薄膜电感器领域。

参考文献:

[1] Jha Gopal C, Bhattacharya Swapan K, Tummala Rao R. Nanogranular Magnetic Core Inductors: Design, Fabrication, and Packaging. Nanopackaging. Springer Science and Business Media,

2009: 1–26.

- [2] Park Jung-Hwan, Choi Seong-O, Kamath Rachna, *et al.* Polymer particle-based micromolding to fabricate novel microstructures. *Biomed Microdevices*, 2007, **9**: 223–234.
- [3] Yue C, Patrick, Wong Simon, On-chip spiral inductors with patterned ground shields for Si-based RF IC's. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998, **33**(5): 743–752.
- [4] HUO Xiao, CHEN J, Philip C H. Silicon-based high-*Q* inductors incorporating electroplated copper and low-KBCB dielectric. *Electron Device Letters, IEEE*, 2002, **23**(9): 513–516.
- [5] Yoon Jun-Bo, Choi Yun-Seok, Eo Yunseong, *et al.* CMOS-compatible surface-micromachined suspended-spiral inductors for multi-GHz silicon RF ICs. *Electron Device Letters, IEEE*, 2002, **23**(10): 591–593.
- [6] Chua Christopher L, Fork David K, Van Schuylenbergh Koenraad, *et al.* Out of plane high-*Q* inductors on low-resistance silicon. *Journal of Micro-Electromechanical Systems*, 2003, **12**(6): 989–995.
- [7] Yamaguchi M, Suezawa K, Baba M, *et al.* Application of Bi-directional thin-film micro wire array to RF integrated spiral inductors. *IEEE Transaction on Magnetics*, 2000, **36**(5): 3514–3517.
- [8] Yamaguchi Masahiro, Baba Makoto, Arai Ken-Ichi. Sandwich-type ferromagnetic RF integrated inductor. *IEEE Transaction on Microwave Theory & Techniques*, 2001, **49**(12): 2331–2335.
- [9] Bae S, Jung H M, Moon J S, *et al.* Embedded Inductor Using Ni-Zn Ferrite Film in Polymer Substrate. *Magnetics Conference, Asia*, 2005: 1767–1768.
- [10] YANG Chen, REN Tian-Ling, LIU Feng, *et al.* On-chip Integrated Inductors with Ferrite Thin-films for RF IC. *Electro Devices Meeting, Beijing*, 2006: 1–4.
- [11] YANG Chen, LIU Feng, REN Tian-Ling, *et al.* Ferrite-integrated on-chip inductors for RF ICs. *Electron Device Letters, IEEE*, 2007, **28**(7): 652–655.
- [12] YANG Chen, LIU Feng, REN Tian-Ling, *et al.* Ni-Zn Ferrite Film Coated On-chip RF Inductor Fabricated by a Novel Power-mixed Photoresist Coating Technique. *IEEE/MIT-S International, Microwave Symposium, Beijing*, 2007: 465–468.
- [13] Herzer G. Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline perromagnets. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1990, **26**(5): 1397–1402.
- [14] Kuribara T, Yamaguchi M, Arai K I, *et al.* Equivalent circuit analysis of an RF integrated ferromagnetic inductor. *IEEE Transactions Magnetic*, 2002, **38**(5): 3159–3161.