

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0231-04

激光微熔覆法制备空芯薄膜电感的研究

代青龙, 王小宝, 蔡志祥, 曹宇, 李祥友, 曾晓雁

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 采用激光微熔覆方法制备了空芯薄膜电感, 着重研究了激光功率密度对电感线宽影响, 以及薄膜电感的结构参数变化对电感电性能影响。结果表明, 线宽随激光功率密度增大而增大; 电感量随着圈数增多、中心线间距增大、线宽变大而增大。通过优化激光工艺和结构参数, 制备了面积 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 和 $9\text{ mm} \times 9\text{ mm}$, 线宽 $100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $120\text{ }\mu\text{m}$, 线中心间距 $250\text{ }\mu\text{m}$ 和 $500\text{ }\mu\text{m}$, 圈数 8 和 16, 厚度 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的空芯回字型电感, 在测试频率 $100\text{ kHz} \sim 1\text{ MHz}$ 条件下, 电感量为 $240\text{ nH} \pm 3\text{ nH} \sim 1.2\text{ }\mu\text{H} \pm 3\text{ nH}$, 单位面积电感量可达 $14.81\text{ nH}/\text{mm}^2$ 。通过实验证明, 采用激光微熔覆法制备的微电感, 在同样形状和面积下, 可提高电感量。

关键词 激光技术; 激光微熔覆; 空芯薄膜电感; 回字型电感; 微电感; 电感量

中图分类号 TN249; TM551 **文献标识码** A

Study of Thin Film Inductor with Air Core Fabricated by Laser Micro-Cladding Method

DAI Qing-long, WANG Xiao-bao, CAI Zhi-xiang, CAO Yu, LI Xiang-you, ZENG Xiao-yan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The thin film inductors with air core have been fabricated by laser micro-cladding technology. It has been studied systematically that how the change of laser power density affects the line width as well as how the inductive structure affects inductive electronic performance. The experimental results show that increasing the turns, broadening the distance between two center lines and enlarging line width will improve inductance at a different level. With the optimum of the laser processing parameters and the structural parameters, rectangular-spiral inductors are processed with area of $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ and $9\text{ mm} \times 9\text{ mm}$, line width of $100\text{ }\mu\text{m}$ and $120\text{ }\mu\text{m}$, distance between two center lines of $250\text{ }\mu\text{m}$ and $500\text{ }\mu\text{m}$, circle numbers of 8 and 16, and thickness of $1\text{ }\mu\text{m}$. For those inductors, the range of inductance is from $240\text{ nH} \pm 3\text{ nH}$ to $1.2\text{ }\mu\text{H} \pm 3\text{ nH}$, the inductance per unit area was up to $14.81\text{ nH}/\text{mm}^2$ in the frequency range of 100 kHz to 1 MHz . By this technology, the experimental results demonstrate that the thin film inductors fabricated by optimizing structural parameters have the best performances at the same area and structure.

Key words laser technique; laser micro-cladding; thin film inductor with air core; rectangular-spiral inductor; micro inductor; inductance

1 引言

目前主要采用光刻技术、溅射技术、电镀技术和 MEMS 技术、刻蚀技术等来制备空芯或磁芯薄膜电感^[1~4]。Gleason 对薄膜微电感进行了初步研究^[5], Neville 研究了空芯电感用于音频^[6], 苏州科技学院 劭新勋等采用掩膜法研制了空芯栅极型薄膜电感,

$100\text{ MHz} \sim 10\text{ GHz}$ 测试频率下单层薄膜电感量为 $130 \sim 155\text{ nH}$ ^[7]; 电子科技大学唐晓莉等在 PCB 上研制了矩形和圆形空芯螺旋电感, $10\text{ kHz} \sim 10\text{ MHz}$ 测试频率下, 电感量为 $510 \sim 610\text{ nH}$ ^[8]。清华大学陈忠民研制了在氧化多孔硅上空芯 Cu 电感, 采用溅射、光刻、电镀铜、刻蚀种子层的方法完成

基金项目: 国家高技术发展研究计划“863”(2005AA311030)和国家自然科学基金(50575086)资助课题。

作者简介: 代青龙(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光制造微电子器件的研究。E-mail: dragonrening@163.com

导师简介: 曾晓雁(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造技术与设备方面的研究。

E-mail: xyzeng@mail.hust.edu.cn

Cu线圈的电镀,10 GHz测试频率下,电感量为1 nH,品质因数达到9,电感的自谐振频率超过20 GHz^[9],但此工艺复杂,流程多。

美国加利福尼亚大学的 Soohoo^[10]提出研制磁性薄膜电感,铝作导体层,加入高磁导率的坡莫磁芯来提高电感量,随后,磁性薄膜电感得到迅猛发展,但是,磁性膜在高频下产生涡流效应,电感损耗增大,截止频率降低。

光刻、溅射、刻蚀、电镀等工艺流程多,成本高,需掩膜,周期长。引入磁芯材料,会降低电感截止频率,增大其损耗。为了获得较高电感量,不加磁芯,通过优化工艺和结构参数,本文提出采用激光微熔覆方法制备空芯薄膜电感。与薄膜工艺相比,此工艺具有成型快速、无需掩模、周期短、工艺流程少等众多优势。

螺旋线型的单位面积(mm^2)电感量最大^[11~13];螺旋线型又分矩型螺旋、圆型螺旋、多边型螺旋,其中矩型螺旋电感的单位面积电感量最大^[8]。早在1974年,Greenhouse就对矩形电感结构设计有了较系统认识^[14]。本文选取矩形螺旋电感结构。

2 材料与方法

2.1 材料

选择96%氧化铝陶瓷作基板,高温银浆作导体层,无水乙醇或丙酮作清洗剂。采用溅射、电镀、光刻工艺获得铜层,成本低,又可达到10 GHz以上使用频率^[15]。但铜在大气下受热易氧化,不适合激光成型用作导体层。而银不易氧化,笔者选银作导体层。参数如表1。

表1 银浆料参数

Table 1 Parameter of silver paste

Granularity / μm	<10
Original viscosity/ ($\text{Pa} \cdot \text{S}$)	350
Peak temperature / $^{\circ}\text{C}$	800
Temperature time / min	8
Sintering atmosphere	Air
Pure Ag conductance / ($\mu\Omega/\text{cm}$)	0.616

2.2 方法

采用自主研发的激光微熔覆设备和控制软件,绘制所需要制备的电感图形。控制X-Y-Z三轴运动,从而控制激光作用涂有膜层的基片。热作用的膜层区域固化成型,未热作用膜层区域用溶剂清洗掉,最后留下所加工图形,此法即为激光微熔覆法。

具有无掩膜、周期短、成本低、加工灵活等优势^[16,17]。

实验工艺流程为设计→配料→旋涂制膜→低温烘干→激光加工→清洗→测试。采用旋涂法制备银膜,选取转速8000 r/min,时间60 s,低温120 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,可获得厚度不超过3 μm 的均匀膜层。激光器参数如表2。

表2 激光器参数

Table 2 Parameter of laser

Name	Wavelength / μm	Power / W	Outway
Nd:YAG	1.07	0~50	PW, CW

2.3 电感器结构

选取矩形螺旋平面电感作为基本结构。表3用来比较电感的线宽、圈数、间距、面积分别对电感量和品质因数的影响情况。

表3 回字型电感结构方案

Table 3 Structural scheme of spiral rectangle inductors

	A	B	C	D
Distance between two center lines / μm	250	250	250	500
Turns	8	16	8	8
Width / μm	100	100	120	100
Thickness / μm	1	1	1	1
Area / mm^2	5×5	9×9	5×5	9×9

3 结果与分析

3.1 激光功率密度对线宽的影响

激光扫描银膜层,扫描速度(V)为0.9 mm/s,焦斑直径40 μm ,功率为20~32 W,功率密度为1.59~2.55 MW/cm^2 。采用Nikon Epiphot300显微镜观测,得到线宽与功率密度的关系如图1所示。

可见,随激光功率密度增加,线宽逐渐增大。主

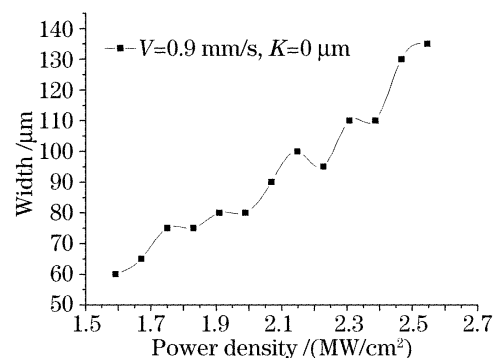


图1 线宽随激光功率密度的变化

Fig. 1 Line width in relation to laser power density

要选取线宽 80~140 μm 的加工参数。

为使导体层电阻较小,微电感选择能获得线宽较大的工艺参数。

3.2 电感结构参数对其电学性能影响

3.2.1 结构参数变化对电感量的影响

图 2 的四种电感(L)结构,采用同惠数字电桥 TH2828 测试,结果如图 3 所示。A 型电感量 242 nH左右,B 型电感量达 1.2 μH 左右,C 型电感量 262 nH 左右, D 型电感量 367 nH 左右。

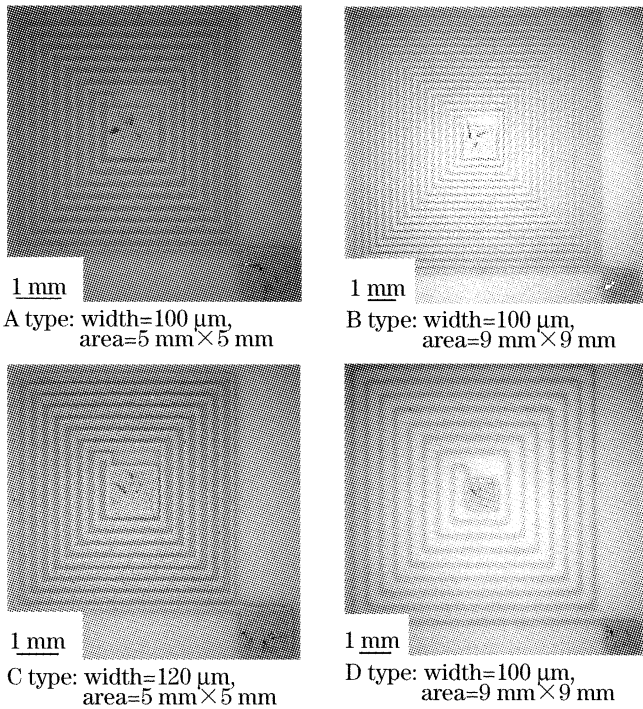


图 2 激光加工的电感图

Fig.2 Picture of inductors fabricated by laser

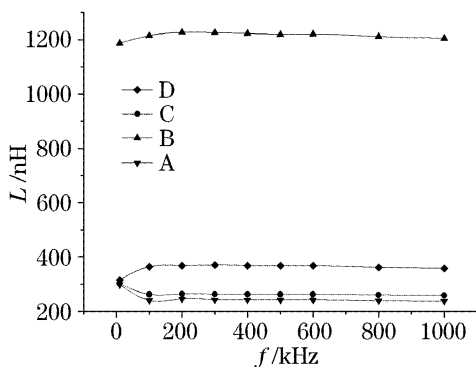


图 3 不同结构的电感量对比

Fig.3 Inductance comparison of different inductors

当测试频率 f 小于 100 Hz 时,电感量波动较大;高于该测试频率,电感量基本稳定。以 A 型电感为参考,C 型线宽变大,C 型电感量比 A 型大。以 D 型电感为参考, B 型圈数是 D 型两倍,B 型电感量是 D 型电感值 3 倍左右。可知,在同样形状和面积下,可提高电感量。

以 A 型电感为参考,B 型圈数是 A 型折 2 倍,B 型电感量是 A 型电感值 5 倍左右;D 型中心线间距增大两倍,电感线长大大增加,电感面积变大,D 型电感量比 A 型大,但 D 型单位面积电感量相比 A 型减少;C 型线宽变大,但两线边缘空间间距变小,互感效应增强,故 C 型电感量比 A 型大。

可见圈数、中心线间距和面积因素较大程度地影响电感量,而线宽和两线空间间距因素影响电感量的程度较小。在 10 kHz~1 MHz 频率范围内,圈数越多,电感量越大;中心线间距越大,电感量越大;线宽越大,电感量越大。

3.2.2 结构参数变化对品质因数的影响

采用同惠数字电桥测得品质因数(Q)随测试频率的变化情况。10 kHz~1 MHz 测试范围内,品质因数均随频率增大,但都很小,说明损耗较大,由于陶瓷基板分布电容很大,导致损耗较大。

10 kHz~1 MHz 的某个测试频率下,以 A 型 Q 值为参考,B 型 Q 值比 A 型大,增加圈数有利增加 Q;D 型 Q 值最小,增加中心线间距,也即增大面积,不利于 Q 值增大;C 型 Q 值比 A 型大,增大线宽,实际降低电阻值,增大 Q 值,如图 4 所示。

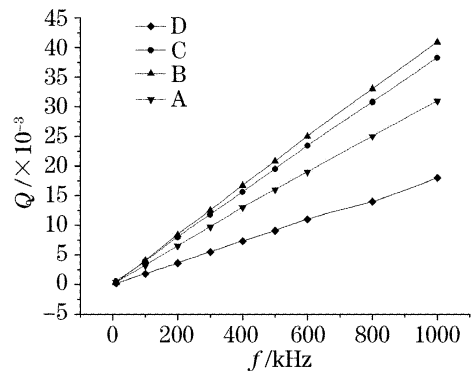


图 4 不同结构的品质因数对比

Fig.4 Quality factor comparison of different inductors

可知,在 10 kHz~1 MHz 频率范围内,圈数越多,品质因数越大;中心线间距越大,品质因数越小;线宽越大,品质因数越大。

3.3 影响电感电性能的关键因素

电感的电性能主要由电感量和品质因数决定,一定频率下,L 越大越好,Q 越大越好。从材料、工艺及结构方面考虑提高 L 和 Q。片式电感要求电阻小,电感量大,导体层材料电阻率要小。

实验的主要工艺是旋涂工艺和激光加工工艺。旋涂工艺中,电感的膜厚主要受浆料粘度、匀胶速度、匀胶时间、基板粗糙度等因素影响。激光加工工艺中,电感的线宽主要受扫描速度、激光功率、激光

波长、离焦量等因素的影响。矩形螺旋电感的 L 大小主要由线宽、线厚、面积、线边缘间距和圈数决定。

品质因数要求 Q 值较大, 损耗小, 导体层电阻应该较小, 另外, 基板会增大电感的旁边电容, 增大损耗, 图 4 中的品质因数较小主要是因为陶瓷附加电容过大, 增大了电感的损耗, Q 值降低了。

4 结 论

通过优化结构参数, 制备了面积 $9\text{ mm} \times 9\text{ mm}$, 线宽 $100\text{ }\mu\text{m}$, 中心线间距 $250\text{ }\mu\text{m}$, 圈数 16, 厚度 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的无芯回字型电感, 测试频率 $f = 100\text{ kHz} \sim 1\text{ MHz}$, 电感量为 $1.2\text{ }\mu\text{H} \pm 3\text{ nH}$, 单位面积电感量达 14.81 nH/mm^2 , 品质因数为 $0.002 \sim 0.0409$ 。

获得影响电感量随结构参数的变化规律, 即圈数越多, 电感量越大; 中心线间距越大, 电感量越大; 线宽越大, 电感量越大。

现有实验室条件已成功采用激光熔覆法制备出空芯电感, 为了适用高频和高性能电感发展, 必须选择相应优质磁性薄膜材料, 改进基板, 提高 L/S 值和 Q 值。后续实验优化工艺可在单晶硅上制备滤波器, DC/DC 变换器, 微型变压器, 微马达等实用集成微器件。

参 考 文 献

- 1 Hongrui Jiang, Jer-Liang, Andrew Yen *et al.*. New fabrication method for high- Q on-chip spiral inductor [C]. *SPIE*, 1999, **3876**: 153~159
- 2 M. Yamaguichi, M. Matsumoto, H. Ohzeki. Fabrication and basic characteristics of dry-etched micro inductors [J]. *IEEE Trans. Magn.*, 1990, **26**: 2014~2016
- 3 Gh. Troussier, J. P. Laur, J. L. Sanchez. Fabrication of integrated inductors on silicon for fully integrated DC-DC microconverters [C]. *SPIE*, 2004, **5342**: 86~93
- 4 Renato P. Ribas, Jerome Lescot, Jean-Louis Lelercq. Thermal and mechanical evaluation of micromachined planar spiral inductors [C]. *SPIE*, 2001, **4408**: 438~444
- 5 F. R. Gleason. Thin-film microelectronic inductors [C].

- National Electronics Conference*, Chicago, 1964, **20**: 197~198
- 6 Thiele A. Neville. Air cored inductors for audio [J]. *Proceedings of the IREE Australia (Institution of Radio and Electronics Engineers)*, 1975, **36**: 329~333
- 7 Shao Xinxun. Preparation of meander-type film inductors [J]. *J. University of Science and Technology of Suzhou*, 2003, **20**(1): 37~41
 劭新勋. 栅极型薄膜电感的制备 [J]. 苏州科技学院学报, 2003, **20**(1): 37~41
- 8 Tang Xiaoli, Su Hua, Zhang Huaiwu *et al.*. Researches of a new coreless printed circuit board planar inductor [J]. *Chin. J. Electron Devices*, 2002, **25**(4): 319~323
 唐晓莉, 苏桦, 张怀武等. 一种新型无芯 PCB 平面电感器研究 [J]. 电子器件, 2002, **25**(4): 319~323
- 9 Chen Zhongmin, Liu Zewen, Liu Litian *et al.*. Process research of copper inductors on OPS insulating layer [J]. *Microfabrication Technology*, 2004, (4): 50~54
 陈忠民, 刘泽文, 刘理天等. 氧化多孔硅上制作 Cu 电感的研 究 [J]. 微加工技术, 2004, (4): 50~54
- 10 R. F. Soohoo. Magnetic thin film inductors for integrated circuit application [J]. *IEEE Trans Magn.*, 1979, **15**(6): 1803~1805
- 11 Tang Xiaoli, Su Hua, Zhang Huaiwu. Research and application of thin film inductor [J]. *J. Magn. Mater Devices*, 2005, **36**(3): 9~12
 唐晓莉, 苏桦, 张怀武. 薄膜电感器的研究与应用 [J]. 磁性材料及器件, 2005, **36**(3): 9~12
- 12 Chong H. Ahn, Mark G. Allen. Micromachined planar inductors on silicon wafers for MEMS applications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, **45**(6): 866~876
- 13 Gao Xiaoyu, Chen Ji'an, Zhou Yong *et al.*. Development of the magnetic thin film microinductor [J]. *Electronic Components and Materials*, 2005, **24**(4): 68~71
 高孝裕, 陈吉安, 周勇等. 磁性薄膜微电感器件的研究进展 [J]. 电子元件与材料, 2005, **24**(4): 68~71
- 14 H. M. Greenhouse. Design of planar rectangular microelectronic inductors [J]. *IEEE Transactions on Parts*, 1974, **10**(2): 101~109
- 15 Bok-Ki Min, In-Sung Kim, Jae-Sung Song. Frequency dependency of the characteristics in the spiral type thin film inductors [C]. *SPIE*, 2005, **5650**: 400~407
- 16 Qi Xiaojing, Liu Jingwei, Li Xiangyou *et al.*. A new technology of conductive line preparation by laser micro-cladding metal organic pastes on PCB board [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 883~887
 祁小敬, 刘敬伟, 李祥友等. 一种激光微熔覆直写布线的新技术 [J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 883~887
- 17 Li Xiangyou, Li Yaobing, Liu Dongsheng *et al.*. Study of laser micro-cladding system to circuit boards fabrication [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(5): 258~260
 李祥友, 李耀兵, 刘冬生等. 激光微熔覆柔性布线系统研究及应用 [J]. 应用激光, 2004, **24**(5): 258~260