

文章编号:1002-2082(2006)05-0423-05

激光微细熔覆快速原型制造 的厚膜电容组织性能

李慧玲, 曾晓雁

(武汉光电国家实验室激光部, 华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘 要: 针对传统工艺制备的厚膜电容尺寸有限、容量低、损耗大, 仅限于一些特定的应用领域, 提出采用激光微细熔覆快速原型制造技术在陶瓷基板上制备电容, 它具有速度快, 不需要掩膜等特点。着重分析电容器的组织性能以及电容、介电常数、品质因数和绝缘电阻等电器性能, 并对电容器的形成机理进行了研究。实验证明, 激光微细熔覆快速原型制造技术比传统烧结工艺制备的厚膜电容容量大、再现性好, 其组织致密、均匀, 不存在界面成分的扩散。

关键词: 厚膜电容; 激光微细熔覆; 快速原型制造; 介质膜

中图分类号: TM534, TN249

文献标志码: A

Structure and properties of thick-film capacitors fabricated by laser micro-cladding rapid prototype

LI Hui-ling, ZENG Xiao-yan

(Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, National Engineering Research Center for Laser
Processing of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of thick-film capacitors (limited size, low capacity and high dissipation) fabricated by traditional thick-film technology, which limit their applications to some specific areas, a technology fabricating the thick-film capacitors on ceramic substrate by laser micro-cladding rapid prototype is put forward. The novel technology does not take the mask as a necessity as in the former capacitor. The structure and properties of the capacitor fabricated by laser micro-cladding and the traditional sintering method, which includes capacity, dielectric crystal, quality factor and insulation resistance, are analyzed. The forming mechanism of the capacitor is studied. The results prove that, compared with those made with traditional sintering techniques, the capacitors fabricated by laser micro-cladding rapid prototype method have better repeatability and higher capacity, it is more compact and also minimizes the composition diffuseness between interfaces.

Key words: thick-film capacitor; laser micro-cladding; rapid prototype fabrication; dielectric layer

引言

随着厚膜电容向小型化、高频化和低损耗方向

的发展, 传统的厚膜技术由于存在自身的缺陷, 制备的厚膜电容尺寸有限, 频率和容量低, 损耗大, 仅

收稿日期: 2006-03-01; 修回日期: 2006-04-20

基金项目: 国家 863 高新技术项目资助 (2001AA421290, 2005AA311030); 国家自然科学基金资助 (50575086)

作者简介: 李慧玲 (1972—), 女, 山西人, 华中科技大学博士研究生, 主要从事激光微细熔覆直接制造厚膜混合微电路关键技术的基础研究。E-mail: scape_lhl@sohu.com; 通信作者: 曾晓雁 (1962—), 男, 华中科技大学激光加工国家工程研究中心教授, 博士生导师, 主要从事激光材料加工理论和应用的研究。E-mail: xyzeng@mail.hust.edu.cn

仅局限于特定的一些应用领域^[1]。为此,要使电容制造由片式化向膜式化转化,必须同时改变材料的成分、制备工艺和技术。本文采用激光微细熔覆快速原型制造技术^[2-10],在陶瓷基板上制备厚膜电容器,不仅精度高,速度快,不需要掩膜,而且由于采用高介电材料和高能激光快速制造技术,使之具有小型化、高频、高容量、低损耗的特性。但是,由于激光和物质的相互作用过程非常复杂,使激光微细熔覆工艺和传统的烧结工艺存在本质的差异,因此二者引起电容器介质的组织以及介质和电极界面行为存在较大差别,最终导致电容器性能不同。基于上述问题,本文主要研究电容器的组织性能,并对电容器的形成机理和附着机理进行了研究。结果表明,激光微细熔覆快速原型制造厚膜电容比传统烧结工艺制备的电容器电容大,性能可靠、稳定,再现性好,其组织致密、均匀,不存在界面成分的扩散。

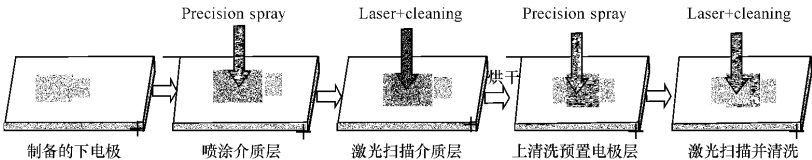


图1 激光微细熔覆快速原型制造厚膜电容工艺流程

Fig. 1 Processing flow of thick-film capacitor fabricated by laser micro-cladding and rapid prototype

2 实验结果和分析

图2 是不同工艺条件下得到的介质膜的SEM形貌。从图2 可以看出,采用传统烧结方法得到的介质膜表面不平整,存在大量气孔;而采用激光微细熔覆技术制备的介质膜,孔洞减少,表面平整度提高。图3 是不同工艺下制备的电容器介质膜的EDS 能谱分析曲线。从图3 可以看出,直接烧结工艺得到的介

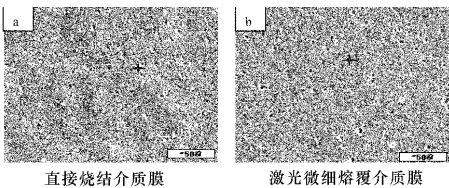


图2 介质膜的SEM 形貌

Fig. 2 SEM morphology of dielectric film

质膜表面存在Ag,而激光微细熔覆工艺制备的介质膜不存在Ag。由此说明,直接烧结工艺下,下电极的导电成分向介质膜扩散;激光微细熔覆工艺下,下电极的导电成分没有向介质膜扩散。

1 实验材料、设备和工艺

采用本课题组自行设计的激光柔性布线系统 LMS II 以及波长为 1. 07 μm , 最小光斑直径为 20 μm , 最大输出功率 50 W 的光纤激光器, 材料主要导电成分为银-钯, 硼硅酸铅玻璃作为粘结相的导体浆料以及析出铁电微晶体的微晶玻璃介质(结晶相 BaZrO_3 和微晶玻璃组成 $\text{BaO-ZnO-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) 作为电容器的介质材料, 基板材料中 Al_2O_3 的质量百分比为 96%, 厚度 1 mm, 面积为 30 mm \times 30 mm。加工后的片子在 Nikon Epiphot 光学显微镜下观察微观组织, 使用 Quanta200 型扫描电子显微镜进行 SEM 形貌观察、截面扫描和 EDS 分析, 用 Dektak IIA 表面轮廓仪测定表面粗糙度, LCR-816 型高精度 LCR 测试仪测定电容和阻抗。

激光微细熔覆快速原型制造厚膜电容的工艺流程如图 1 所示。

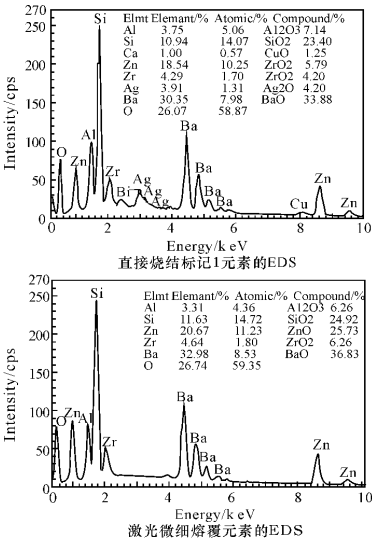


图3 不同工艺下制备的电容器介质膜的EDS 能谱曲线

Fig. 3 EDS curve of thick-film capacitor fabricated by different methods

图4是不同工艺条件下制备的电容器介质膜和上下电极间界面的SEM形貌。从图4可以看出,直接烧结的介质膜与上下电极间没有明显的界面;采用激光微细熔覆快速原型制造的介质膜与上下电极间各层界面清晰。

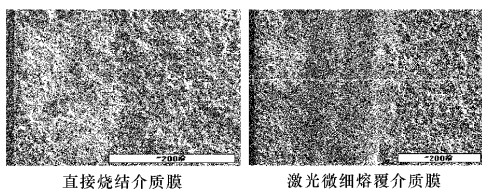


图4 不同工艺下制备的电容器介质膜和电极间界面的SEM

Fig. 4 Interface SEM of dielectric film and electrode of capacitor fabricated by different techniques

图5是不同工艺条件下制备的电容器介质膜和上下电极间界面的线扫描,其中Ag代表电极成分,Ba代表介质成分。从图5可以看出,直接烧结工艺下Ag贯穿整个介质膜,Ba也向上下电极迁移。这说明介质膜和电极发生严重的成分扩散,使电极发生互连现象,介质膜失去了绝缘性;激光微细熔覆快速原型制造工艺下,电极成分Ag仅仅分布在2端,介质膜中不存在Ag,Ba主要集中在介质膜中,微向电极扩散,这说明介质膜和电极没有发生成分扩散,上下电极被介质膜分割,没有发生互连现象。

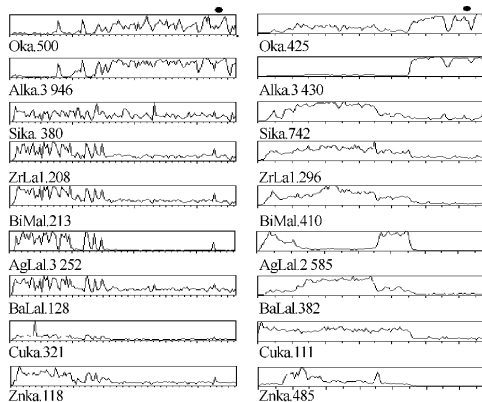


图5 不同工艺下制备的介质膜和电极结合的界面线扫描

Fig. 5 Interface EDS of dielectric film and electrode of capacitor fabricated by different methods

综上所述,采用激光微细熔覆快速原型技术制备的电容器的上下电极和介质层没有成分扩散,直接烧结工艺得到的电容器则发生了严重的成分扩

散。因此,前者制备的电容器性能较高。

3 不同工艺下电容器的性能

3.1 电气性能研究

3.1.1 电容的测定和介电常数的计算

电容的形成原理可用在2块导电电极之间夹有电介质的平行板型电容结构来说明。电极间的电容为

$$C = \epsilon S / \delta \quad (1)$$

式中, ϵ 为绝缘介质的介电常数; S 为极板面积; δ 为绝缘介质的厚度。

影响电容器电容的主要因素有介电常数、介质和电极重叠的面积以及介质厚度。图6给出在测试温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和测试频率1 kHz条件下不同介质膜的厚度与电容的变化关系。从图6可以看出,随着介质膜厚度的逐渐减薄,电容呈抛物线形增长。图7是介质膜和电极重叠面积与电容之间的关系。

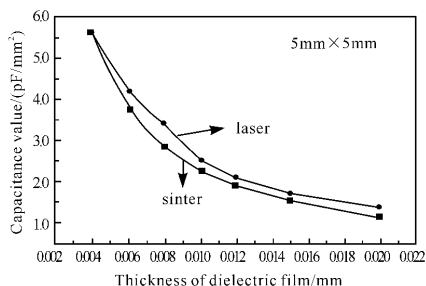


图6 容量和介质膜厚度的关系

Fig. 6 Capacitance value versus thickness of dielectric film

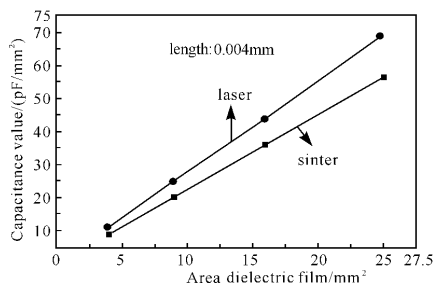


图7 容量和介质膜面积的关系

Fig. 7 Capacitance value versus area of dielectric film

从图7可以看出,随着面积的增加,电容呈线性增加,这与公式(1)是一致的;另外,图6表明激光微细熔覆制备的电容比采用传统烧结得到的电容值大,这是由于电极层和介质层没有发生导电金属的扩散,介质膜致密,孔洞少,界面没有孔洞。通过公

式(1)计算图6和7给出的电容值以及介质膜厚度和电极重叠面积的数值,得出对应的介电常数如表1所示。由表1可进一步得到烧结介质膜的介电常数平均值为9,激光微细熔覆的介质膜的介电常数平均值为10.3。

表1 电容器的介电常数

试样	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϵ (烧结)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
ϵ (激光微细熔覆)	9	10	11	10	10	9	11	11	11	11

3.1.2 品质因数(Q)测定

任何电容器在电场下都会消耗能量。电容器把所存储或传递的一部分电能转化为热能,还有一部分使电容器发热,温度升高,另一部分则消耗在周围环境中。这种单位时间内因发热而消耗的能量称为损耗。电容器的损耗是衡量电容器品质的一个重要指标,损耗越大发热越严重,电容传递能量的效率越差,在极限情况下可导致电容器损坏。当电容器在直流电路工作时,由于没有外电场变化的周期性极化,因此不存在介质的极化损耗,仅仅表现为介质的漏流损耗。在交流电路中,损耗不仅与漏流有关,而且与极化也有关,该损耗可以用品质因数来考虑。品质因数是电容器在电场中的无功功率与损失的有功功率的比值,其表达式为

$$Q=1/\tan\delta \tag{2}$$

其中 δ 是损失角。 $\tan\delta$ 的测量和规定频率有关,加之它是低损耗,因此可在1 kHz 下进行测量。 $\tan\delta$ 是电极损耗和介质损耗的综合结果,与频率和温度有关。当电容器的频率不高时,电容器的频率特性与介质的损耗角频率特性相似,即主要取决于介质的损耗。在频率比较高时,电容器的频率特性与电极的损耗角频率特性相似,温度越高,电容器的漏流越严重,损耗越大。图8是测试温度为25℃时电容器在高频下的损耗特性。从图8可以看出,随着

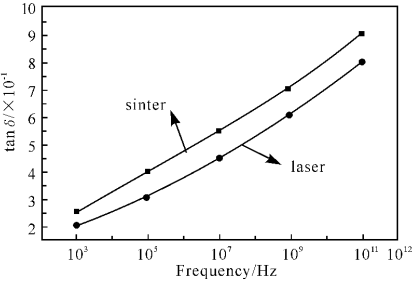


图8 $\tan\delta$ 和频率的关系

Fig. 8 Curve of $\tan\delta$ versus frequency

频率的增加,损耗角增加,品质因数降低,损耗增加。另外,烧结的电容器比激光微细熔覆的损耗大,与前面微观分析的结果一致。

3.1.3 绝缘电阻测定

在电容器的质量指标中,绝缘电阻也是一个重要参数。当电容器加直流电压时,由于绝缘不完善会产生漏流现象,形成电阻。绝缘阻值降低,意味着漏流增加,温度升高,绝缘破坏,使电子元件性能恶化。本试验在测试条件为A,试验电压为 $100\pm 10\%$ /VDC,分别对上述电容器进行绝缘电压的测试,结果如图9所示。从图9可以看出,激光微细熔覆电容器的绝缘电阻比传统烧结方法得到的电容器的绝缘电阻高很多,不容易被击穿,且随着介质膜的减薄,绝缘电阻增高。由于激光微细熔覆技术是一层一层进行制备的,气体很快散发到周围环境中,不在膜内滞留,产生气孔的几率降低。并且层层

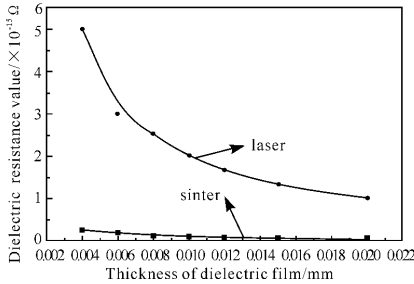


图9 绝缘电阻和介质膜厚度的关系

Fig. 9 Dielectric resistance value versus thickness of dielectric film

单独制备消除了层间的扩散,使电极材料中的导电金属没有充足的时间扩散到介质膜中。传统技术制备工艺存在如下缺陷,下电极和介质膜中有机物燃烧成气体后必须经过2层或1层其它膜层才能释放出来,很容易在介质膜或界面处残留气孔,使电极材料中的导电金属进入介质膜中。另外,常规烧结工艺中,介质膜和电极同时进行烧结,2者的疏松结构使膜层间物质相互扩散程度增加,电极中的导电金属容易通过气孔进入介质膜中,从而导致介质膜绝缘性下降,绝缘性能转变成半导体特性,表现为绝缘电阻下降。

3.2 电容器表面性能的测定

制备电容器时先做下电极,再在下电极上制备介质膜,最后在介质膜上制备上电极,它是多层材料的叠加,每一层膜的性能直接关系到最终电容器的工作特性。其中,表面粗糙度直接影响着电容器的质

量,当下电极表面粗糙时,上面的介质膜就会厚度不一致,电容在各种膜上产生波动,电容器的稳定性变差;另外,这种不平整性还会造成电容器的绝缘膜没有被覆电极膜,电极材料彼此间贯穿,通电后发生短路,易造成大的事故。因此,研究介质膜平整性对电容器至关重要。实际中,表面的平整度一般采用表面粗糙度来衡量,表面粗糙度越大,越不平整,性能越差。图10是直接烧结和激光微细熔覆制备的介质膜的表面粗糙度。从图10可以看出,直接烧结的介质膜表面粗糙度为224.9 nm,激光微细熔覆制备的介质膜表面粗糙度是185.4 nm。这说明激光微细熔覆制备的介质膜比直接烧结的要平整,与前面表面微观形貌SEM分析是一致的。

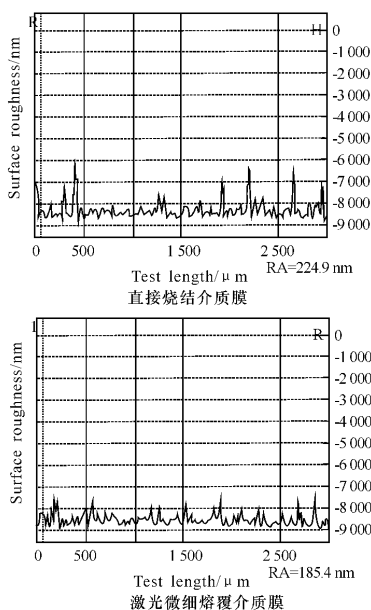


图10 不同工艺下介质膜的表面粗糙度

Fig. 10 Surface roughness of dielectric film fabricated the different methods

4 结论

采用激光微细熔覆快速原型制造技术可以在陶瓷基板上分层制备厚膜电容器。和传统的烧结工艺相比,激光微细熔覆时各层不同材料的膜层是逐步进行快速扫描成型,不需要高温烧结,不存在层间的成分扩散,上下电极中的导电成分没有扩散到介质膜中,介质膜致密性提高,孔洞减少,因此电容器可靠性和稳定性高,再现性好。

参考文献:

- [1] 向勇,谢道华,张昊. 片式元器件与SMT技术新进展[J]. 电子工艺技术, 2001,22(3):93-95.
XIANG Yong, XIE Dao-hua, ZHANG Hao. The advance in chip components and SMT [J]. Electronics Process Technology, 2001,22(3):93-95. (in Chinese)
- [2] 李慧玲,曾晓雁,李祥友. 玻璃基板上激光微细熔覆直写电阻技术的研究[J]. 中国激光, 2005,32(2):281-286.
LI Hui-ling, ZENG Xiao-yan, LI Xiang-you. Research on technology of laser micro-fine cladding and flexibly direct writing resistor on glass structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005,32(2):281-286. (in Chinese)
- [3] LI Hui-ling, ZENG Xiao-yan, LI Hui-fen, et al. Research on film thickness of conductive line from the laser micro-fine cladding and flexibly direct writing technique[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(11):654-657.
- [4] 李慧玲,曾晓雁,李惠芬. 激光微细熔覆柔性直写厚膜电阻和电极结合行为的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(2):48-51.
LI Hui-ling, ZENG Xiao-yan, LI Hui-fen. Interfacial behavior research on thick-film resistor and electrode by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing [J]. Advance of Laser & Optical Electronics, 2004,42(2):48-51. (in Chinese)
- [5] 李慧玲,曾晓雁,李祥友,等. 激光微细熔覆柔性直写厚膜导电带组织性能的研究[J]. 中国激光, 2005,32(7):1001-1005.
LI Hui-ling, ZENG Xiao-yan, LI Xiang-you, et al. Research on structure property of thick-film conductive lines fabricated by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing. Chinese Journal of Lasers, 2005,32(11):1001-1005. (in Chinese)
- [6] 李慧玲,曾晓雁. 搭接量对激光微细熔覆柔性直写厚膜电阻组织性能的影响[J]. 中国激光, 2005,32(11):1554-1560.
LI Hui-ling, ZENG Xiao-yan. Effect of overlapped spaces on structure property of thick-film resistor fabricated by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing [J]. 2005, 32(11):1554-1560. (in Chinese)
- [7] LI Xiang-you, LI Hui-ling, LIU Jing-wei, et al. Conductive line preparation on resin surfaces by laser micro-cladding conductive pastes[J]. Applied Surface Science, 2004, 233(1-4):51-57.