

• 通信与信息工程 •

基于LTCC技术的DC-DC变换器基板设计

李元勋¹, 叶剑¹, 李杰¹, 陈鑫华¹, 苏桦², 张怀武¹

(1. 电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054; 2. 东莞电子科技大学电子信息工程研究院 广东 东莞 523808)

【摘要】为满足当代电子系统的要求, DC-DC变换器需要具有小型化、轻型化以及高的可靠性的特点。该文在低温共烧陶瓷(LTCC)工艺的基础上, 设计了一款内埋置电感的DC-DC压降变换器的电路基板。利用Ansoft Maxwell对功率电感进行建模和仿真, 对气隙层如何影响电感直流特性进行了研究; 对整个变换器的输入、输出回路以及反馈电路进行设计。最后, 得到了一款尺寸为20 mm×15 mm×1 mm, 饱和电流大于2 A的LTCC电路基板。

关键词 气隙层; DC-DC变换器; LTCC技术; NiZn铁氧体; 功率电感

中图分类号 TM28; TN61 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.03.001

Design of DC-DC Converter Substrate Based on LTCC Technology

LI Yuan-xun¹, YE Jian¹, LI Jie¹, CHEN Xin-hua¹, SU Hua², and ZHANG Huai-wu¹

(1.School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2.Institute of Electronic and Information Engineering, Dongguan University of Electronic Science and Technology of China Dongguan Guangdong 523808)

Abstract In order to meet the requirements of modern electronic systems, the DC-DC converter needs to have such characteristics as small, light and high reliability. In this paper, a DC-DC converter substrate with embedded inductor is designed by using low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology. The embedded power inductor is modeled and simulated, and the DC characteristics are studied with Ansoft Maxwell. The input output circuits and feedback circuit have also been designed. At last, a DC-DC converter with the size 20 mm×15 mm×1 mm and the saturation current more than 2 A has been fabricated.

Key words air gap; DC-DC Converter; LTCC technology; NiZn ferrite; power inductor

DC-DC变换器电路, 其主要功能就是进行输入输出电压的转化^[1-2], 输出能够满足电路其他模块需要的稳定电压^[3]。

利用LTCC三维集成技术, 可以将大量的无源元件嵌入到多层基板内部, 能够实现电源电路的小型化^[4-5]。文献[1-3]将电感集成在了LTCC基板中, 电路印制在基板表面, 减少了整个电路的面积。同时, 日本村田公司也推出了利用LTCC技术集成的DC-DC变换器产品。国内在这方面的研究比较少, 处于相对落后的阶段。本文设计了一款用于DC-DC转换器内埋置电感的电路基板; 从材料、结构和工艺上分析了各个参数对电感特性和性能的影响; 对整个DC-DC变换器电路进行了综合分析和设计。最后得到了一款最大输出电流为2 A的BUCK压降型

DC-DC变换器的电路基板。

1 DC-DC变换器基板设计

DC-DC变换器电路主要分为: 稳压管稳压电路、线性稳压电路、开关电源稳压电路。稳压管稳压电路结构简单, 但是带负载能力差、输出功率小, 一般为提供基准电压使用。线性稳压电源虽然电路结构简单、工作可靠, 但效率低(只有40%~50%)。开关电源稳压电路的效率可达80%以上, 稳压范围宽。除此之外, 还具有稳压精度高, 不使用电源变压器等特点, 是一种较理想的稳压电源。同时, 高频开关电源作为一种比较新颖的直流稳压电源, 具有频率高、体积小、重量轻等特点。正因为如此, 开关式稳压电源已广泛应用于各种电子设备中。

收稿日期: 2015-12-24; 修回日期: 2016-03-25

基金项目: “广东特支计划”科技创新领军人才项目(2014TX01C042)

作者简介: 李元勋(1979-), 男, 教授, 主要从事电子信息材料与元器件方面的研究。

在PCB电路板上,开关电源模块主要采用分立器件制成,分立器件占用大量的面积,不利于开关电源的小型化。电感是开关电源中不可缺少的元件,电感的存在增大了电路的体积,同时电感在工作时会产生电磁辐射,影响电路工作的稳定性。利用LTCC技术,可以将电感内埋在LTCC基板中,同时将电路印制在基板表面,并在电感和表面电路之间加上屏蔽层并且通过通孔连接,使得电感和表面电路处在相对独立的工作环境中,保证电路工作的稳定性,同时减小了电路的面积^[6]。

1.1 变换器原理

DC-DC开关变换器的基本拓扑包括降压型、升压型、升降压型及反激、正激、桥式变化等。由于本文电感主要用于降压型变换器,所以就降压型的拓扑结构进行简要的介绍。

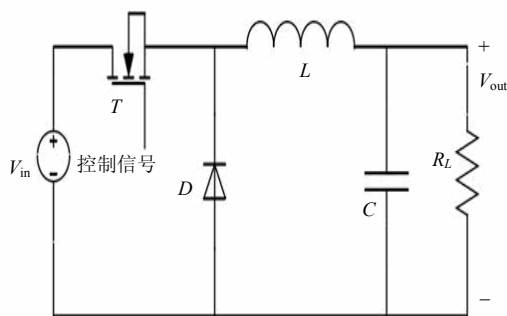


图1 降压型拓扑结构

降压式拓扑结构如图1所示,由开关管 T 、二极管 D 、输出滤波电容 C 和输出滤波电感 L 构成。当开关管 T 导通时,二极管 D 截止。输入电流经开关管 T 和电感 L 向电容 C 充电,这一电流使电感 L 中的储能增加。当开关管 T 截止时,电感 L 感应出左边负右边正的电压,经负载 R_L 和续流二极管 D 释放电感 L 中存储的能量,维持输出直流电压不变。电路输出直流电压的高低由加在 T 基极上的脉冲宽度确定。开关管不间断地开启和断开,保证了输出在一个相对稳定的电压范围内^[7]。

此次设计的LTCC基板,是将电感内埋,其他的芯片和除电感以外的无源器件表贴的结构。

1.2 电感设计

磁性元件是开关电源拓扑中必不可少的元件。磁性元件的设计和选择不但会影响其他相关功率器件的选择和成本,而且能决定变换器的整体性能和尺寸。电感内部的磁场强度超过一定的安全值,电感就会饱和,该值取决于电感实际使用的磁性材料本身。因为电路的限流能力取决于电感,所以磁芯

一旦饱和,就会有几乎不可控制的浪涌电流流过开关管^[8]。根据变换器的电路要求,电感的饱和电流要大于2 A,电感值1.2 μH ,采用叠层片式电感制造工艺。所以,制造电感采用的材料、电感的尺寸以及饱和电流的大小都是电感设计中需要考虑和权衡的因素。

开关电源中的电感主要使用的是软磁铁氧体材料。软磁铁氧体材料磁导率高,在较低的磁场强度下,就可以得到较高的磁感应强度值;矫顽力小,磁滞回线窄;电阻率高,涡流损耗小;饱和磁感应强度高,较小的磁芯截面积就可以产生交大的磁通,磁性元件体积小。MnZn铁氧体的电阻率较高,一般工作频率不大于500 kHz, $B_s < 0.5 \text{ T}$; NiZn铁氧体的电阻率更高,适用于1 MHz及以上的开关频率^[9-10]。用于低温共烧技术的NiCuZn铁氧体,烧结温度在900 $^{\circ}\text{C}$ 左右,被广泛用于制造叠层片式电感(MLCI)^[11]。

要克服传统的叠层片式电感磁芯饱和的问题,提高电感的耐直流特性,可以从以下3个方面改进: 1) 研制适用于叠层片式功率电感的饱和磁感应强度较大的低温共烧铁氧体材料; 2) 在电感工作时,在磁通密度大的地方使用磁导率小的材料,在磁通密度相对较小的地方使用磁导率较大的材料; 3) 在叠层电感中加入气隙层。

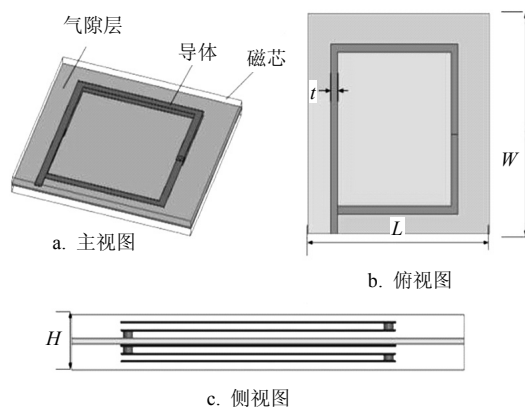


图2 电感结构示意图

本设计中采用第3)种方法,在电感中加入非磁性的气隙层,提高电感的耐直流特性。同时使用较小的磁导率材料制造的电感,因为相同情况下具有较小磁导率的材料制造的电感具有更好的直流特性^[12]。图2为4匝线圈的片式叠层电感的物理结构。电感由3部分组成:磁芯、内部导线和气隙层。基板的长 L 为20 mm,宽 W 为15 mm,高 H 为1 mm;气隙层的厚度为0.03 mm;导线的宽度 t 为0.3 mm。材料采用初始磁导率 $\mu=70$ 的一款用于低温共烧的

NiCuZn铁氧体。

根据电感理论, 电感值近似为^[13]:

$$L = \mu_c W^2 A_c / l_c \quad (1)$$

式中, μ_c 是磁芯导率; W 是线圈的匝数; A_c 是磁芯的有效截面积; l_c 为有效磁链的长度。加入气隙后, 电感值估算为:

$$L = \frac{w^2}{R_c + R_\delta} \quad (2)$$

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad (3)$$

$$R_\delta = \frac{l_c}{\mu_0 A_c} \quad (4)$$

式中, R_c 是磁芯磁阻; R_δ 是气隙磁阻; μ_0 是真空中磁导率。当气隙的磁阻远大于磁芯磁阻时, 式(4)可简化为:

$$L = \frac{\mu_0 W^2 A_c}{\delta} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 加入气隙后, 电感值会小于同样情况下没有加气隙的电感值。LTCC叠层片式电感的内部结构比较复杂, 准确理论计算电感值比较困难和不切实际。设计的时候, 可以在上述公式的指导下, 与有限元分析相结合, 从理论和实际仿真两个方面对电感进行优化。

本文利用Ansoft Maxwell对电感进行建模, 将磁性材料的B-H曲线带入, 计算了非线性材料在不同的直流偏置下, 电感值的变化趋势。分析气隙层对电感值和直流特性的影响。设计并仿真了3款初始电感值1.2 μH 的电感, 电感结构采用图2所示的结构。磁芯采用相同的大小, 3款电感唯一不同的是有无内部气隙层。为了得到相同初始值的电感, 每个模型的绕线匝数是不一样的。利用EDA软件, 仿真了初始电感相同, 匝数不同的叠层片式功率电感, 仿真结果如图3所示。

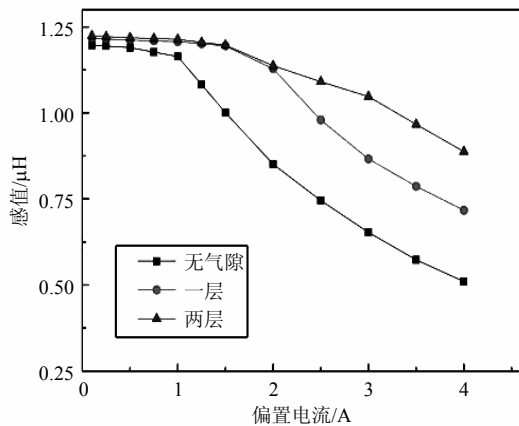


图3 电感仿真结果

从仿真结果可以看到, 同样对于一个1.2 μH 的电感, 有气隙层的电感的耐直流特性明显好于没有气隙层的电感。在1 A、2 A、3 A和4 A的电流偏置下, 没有气隙层的电感值为1.16 μH 、0.85 μH 、0.65 μH 和0.51 μH , 与初始电感值比较分别下降了4%、20%、46%和58%; 而有一层气隙层的电感值分别为1.19 μH 、1.12 μH 、0.86 μH 和0.71 μH , 分别下降了1%、7%、29%和41%。同时气隙层的厚度越大, 电感的直流特性越好。从仿真图中可以看出, 使用一层气隙层的电感已经满足变换器的需求, 为了简化工艺的复杂度, 采用一层气隙层来设计变换器的电感。

2 基板的结构设计与布局

在DC-DC变换器中, 有进行输入输出的功率回路, 也有进行频率补偿和输出电压反馈的控制回路。所以, 在设计表面电路时, 要进行综合考虑。

如图4所示, 基板的设计采用3层结构, 各层之间采用匹配共烧技术^[14]。底层是磁性材料, 中间是金层, 上面是陶瓷层。磁性材料层用来制作叠层功率电感; 中间的金层将下面的磁性层和上面的陶瓷层隔离在两个相对独立的环境中; 上层的陶瓷层用来印制整个变换器的工作电路, 开关电源芯片和无源器件可以表贴在陶瓷层上^[15]。电感在工作时会产生磁场, 可能会对周围的器件或敏感线路产生干扰。金属层可以屏蔽磁性器件工作时产生的电磁场。

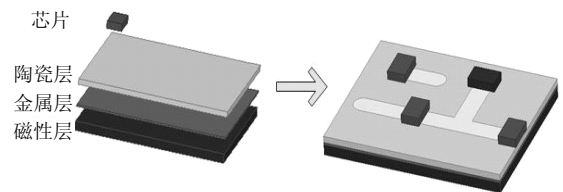


图4 变换器基板示意图

基板采用LTCC工艺制造, 磁性材料采用的是自己开发的一款相对磁导率 $\mu_r=70$ 的铁氧体, 导体采用的是银。根据前期的设计, 在LTCC生产线上依次进行流延、打孔、导体印刷、层叠、切片、等静压, 最后放入烧结炉烧结, 得到了最后的变换器基板。图5为最后烧结好的成品基板。正面是陶瓷材料, 上面印制有工作电路; 背面是有内埋电感的磁性材料层。

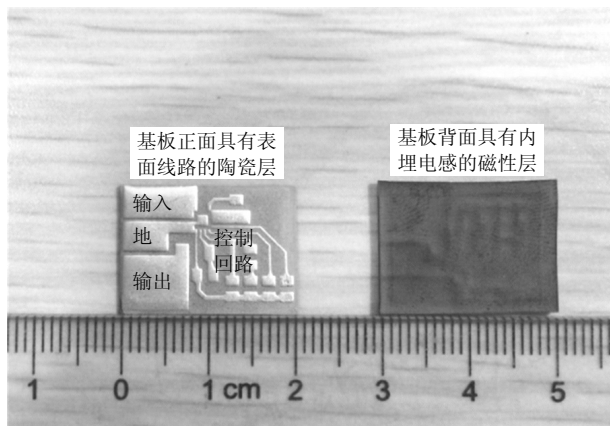


图5 基板实物图

3 实物测试结果

运用TH2828精密LCR测试仪,测试加工好的1.2 μH 含有一层气隙层的内埋电感基板样品的电感值,得到电感值随偏置电流变化如表1所示。

表1 电感实际测试值

偏置电流/A	样品一感值/ μH	样品二感/ μH	样品三感/ μH
0	1.197 68	1.964 02	1.205 82
0.5	1.125 97	1.101 74	1.132 79
1.0	1.022 54	1.020 74	1.037 65
1.5	0.999 88	0.991 35	1.002 65
2.0	0.894 63	0.881 66	0.870 94
2.5	0.815 12	0.794 47	0.810 07
3.0	0.760 24	0.746 21	0.763 37
4.0	0.691 10	0.675 08	0.703 68

从测试的结果可以看到,最后的测试结果基本与设计仿真相符合。感值上微小的差异和波动(与设计值1.2 μH 相差不到0.1 μH)符合业界允许电感标称值偏差在 $\pm 20\%$ 内的标准,这些偏差可能是由于材料在烧结过程中受热不均匀或是工艺误差造成的。在偏置电流为2 A时,电感值变为0.88 μH ,较1.2 μH 的初始值下降了25%,根据电感饱和电流的定义,可以得到本次设计基板的内埋电感的饱和电流大于2 A。

4 结束语

本文在已有研究的基础上,结合LTCC工艺的特点,运用有限元仿真与设计等手段。将DC-DC变换器中使用的电感,用LTCC片式层叠电感代替。同时对电感的直流偏置特性进行研究,探究了气隙层对电感直流特性的影响。设计了一款满足DC-DC变换器内埋电感的LTCC电路基板。整个基板的三层结构保证了电路和电感的正常工作,达到了DC-DC变换器的小型化目的。

参 考 文 献

- [1] SU Yi-peng, LI Qiang, LEE F C. Design and evaluation of a high-frequency LTCC inductor substrate for a three-dimensional integrated DC/DC converter[J]. IEEE Trans Power Electron, 2013, 28(9): 4354-4364.
- [2] MIKURA T, NAKAHARA K, IKEDA K, et al. New substrate for micro DC-DC converter[C]//Proc. 56th Electronic Components and Technology Conference. San Diego, CA: IEEE, 2006: 1326-1330.
- [3] LIM M H F, VAN WYK J D, LIANG Zhen-xian. Internal geometry variation of LTCC inductors to improve light-load efficiency of DC-DC converters[J]. IEEE Trans Compon Packag Technol, 2009, 32(1): 3-11.
- [4] 杨邦朝, 付贤民, 胡永达. 低温共烧陶瓷(LTCC)技术新进展[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(6): 1-3.
YANG Bang-chao, FU Xian-min, HU Yong-da. Recent progress on low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(6): 1-3.
- [5] DALANEY K, BARRETT J, IKEDA K, et al. Characterization and performance prediction for integral resistors in low temperature co-fired ceramic technology[J]. IEEE Trans Adv Packag, 1999, 22(1): 78-85.
- [6] LIM M H F, VAN WYK J D, LEE F C. Hybrid integration of a low-voltage, high-current power supply buck converter with an LTCC substrate inductor[J]. IEEE Trans Power Electron, 2010, 25(9): 2287-2297.
- [7] 比利斯, 莫里. 开关电源手册[M]. 张占松, 译. 第三版. 北京: 人民邮电出版社, 2012: 270-278.
BILLINGS K, MOREY T. Switchmode power supply handbook[M]. Translated by ZHANG Zhan-song. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2012: 270-278.
- [8] 马尼克塔拉. 精通开关电源设计[M]. 王键强, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 40-50.
MANIKTALA S. Switching power supplies A to Z[M]. Translated by WANG Jian-qiang. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2012: 270-278.
- [9] 任利, 张怀武, 苏桦. 应用于高频变压器NiZn铁氧体材料性能分析[J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(4): 38-40.
REN Li, ZHANG Huai-wu, SU Hua. Properties and application of NiZn soft ferrite materials[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2005, 36(4): 38-40.
- [10] 李建辉, 阳皓, 范启兵. 基于LTCC工艺的DC-DC电源模块中电感的改进[J]. 电子元件与材料, 2011, 30(11): 61-64.
LI Jian-hui, YANG Hao, FAN Qi-bing. Design of an improved inductor in DC/DC power modules based on LTCC technology[J]. Electronic Components and Materials, 2011, 30(11): 61-64.
- [11] SUJATHA C, REDDY KV, BABU K S, et al. Effect of MoO₃ addition on sintering behaviors and magnetic properties of NiCuZn ferrite for multilayer chip inductor[J]. IEEE Trans Magn, 1999, 35(5): 3142-3143.

(下转第536页)

- Evolutionary Computing (ICGEC). Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010.
- [20] O'RUANAIDH J, PUN T. Rotation, scale, and translation invariant digital image watermarking[J]. *Signal Processing*, 1998, 66(3): 303-317.
- [21] LIN C, WU M, BLOOM J, et al. Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(5): 767-782.
- [22] ZHENG D, LIU Y, ZHAO J, et al. A survey of RST invariant image watermarking algorithms[J]. *ACM Computing Surveys*, 2007, 35(2): 5.
- [23] RENTZEPERIS I, ALEXANDER D M, KIPER D C, et al. Orientation perception anisotropies indicate functional segregation within the color system[J]. *Journal of Vision*, 2015, 15(9): 10.1167/15.9.13.
- [24] KAUR B, KAUR A, SINGH J. Steganographic approach for hiding image in DCT domain[J]. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2011, 1(3): 72-78.
- [25] 白伟. DCT水印算法在抗剪切攻击方面的研究[J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2014, 13(3): 63-66.
BAI Wei. Shearing attack research based on DCT watermarking algorithm[J]. *Journal of Taiyuan Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 13(3): 63-66.
- [26] PEREIRA S, VOLOSHYNOVSKIY S, MADUENO M, et al. Second generation benchmarking and application oriented evaluation[C]//*Information Hiding*. Berlin Heidelberg: Springer, 2001.
- [27] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

编辑 叶芳

(上接第484页)

- [12] 王旭, 李元勋, 李颖. 含有非磁性气隙层层叠电感直流特性的研究[J]. *压电与声光*, 2014, 36(6): 1010-1012.
WANG Xu, LI Yuan-xun, LI Jie. Research on DC bias current characteristics of multilayer chip inductors with non-magnetic air gap[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(6): 1010-1012.
- [13] 刘凤君. 开关电源设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 288-289.
LIU Feng-jun. Design and apply of switching power supply[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 288-289.
- [14] LI Yuan-xun, LIU Ying-li, ZHANG Huai-wu, et al. The sintering properties and interfacial investigation of barium ferrite and ceramic cofiring system for the application of LTCC technology[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 07A745.
- [15] WANG Lai-li, HU Zhi-yuan, LIU Yan-fei, et al. A horizontal-winding multipermeability LTCC inductor for a low-profile hybrid DC/DC converter[J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2013, 28(9): 4365-4375.

编辑 叶芳