

基于LTCC技术的DC-DC变换器基板设计

戴燕城

广东风华特种新材料股份有限公司 广东 肇庆 526060

摘要: 本文聚焦基于LTCC技术的DC-DC变换器基板设计。先阐述LTCC技术与DC-DC变换器基板的理论基础, 包括二者特性。接着分析设计需求, 涵盖工作特性、陶瓷粉体选型和约束条件。随后介绍基板结构设计, 涉及总体、布线与元件布局、热管理结构。还探讨工艺参数优化、仿真验证、样品制备、性能测试及集成测试, 为设计提供全面指导。

关键词: LTCC技术; DC-DC变换器; 基板设计

1 LTCC技术与DC-DC变换器基板的理论基础

1.1 LTCC技术

低温共烧陶瓷(LTCC)技术1982年由美国休斯公司开发。该技术把低温烧结陶瓷粉制成精确致密的生瓷带, 运用激光打孔等工艺制出电路图形, 嵌入多个无源器件后叠压, 在1000℃以下烧结。其核心优势是实现三维结构布线, 集成无源元件, 表面可贴装IC和有源器件。材料特性上, 在氧化铝粉中混入30%-50%低熔点玻璃料, 降低烧结温度, 能用金、银作电极和布线材料。介电常数可调, 配合高电导率金属能提升品质因数, 增加设计灵活性。陶瓷高导热性使成品散热强, 可应用于恶劣环境。工艺流程涵盖粉体混合、流延切割等多个环节, 烧结工艺是关键, 要精确控制排胶和烧结阶段的升温速率、时间及空气流量, 降低对基板性能的影响。

1.2 DC-DC变换器基板

DC-DC变换器是电子工程实现直流电压转换的核心部件, 其基板对性能至关重要。按拓扑结构, 可分为Buck、Boost等多种类型。以Buck变换器为例, 它通过开关管周期性导通和关断, 经电感器和滤波电容器转换为较低输出电压, 靠调节占空比控制输出电压。基板需满足严格电气性能要求, 转换效率上, 要优化电路设计和元件选型以减少开关损耗等^[1]。电源管理方面, 要有效控制和管理电源电压、电流等参数, 保证稳定供电。电磁兼容性是关键, 基板要减少对外干扰并具备抗干扰能力。基板还需具备良好热性能, 电源转换器工作产生热量, 散热不及时会导致元件性能下降或损坏, 所以基板要采用散热片、风扇或热管等散热措施, 维持设备安全工作温度。

2 基于LTCC技术的DC-DC变换器基板设计需求分析

2.1 DC-DC变换器的工作特性分析

DC-DC变换器工作特性直接影响基板设计。以Buck变换器为例, 其开关管频繁导通关断, 会产生高频开关噪声与电磁干扰, 这些会经基板布线和元件耦合到其他电路, 影响系统稳定性和可靠性。所以, 基板设计要有良好的电磁屏蔽和隔离性能, 通过合理布线规划与地层设计, 减少噪声和干扰传播。效率上, Buck变换器效率受开关损耗、导通损耗和静态损耗影响。开关损耗与开关频率及电压、电流变化率有关, 基板设计要优化开关管布局和布线, 降低开关回路寄生电感和电容以减少损耗; 导通损耗主要取决于开关管和电感器导通电阻, 基板需选低导通电阻元件并优化布局连接; 静态损耗与控制电路功耗有关, 基板要合理设计控制电路降低功耗。另外, DC-DC变换器工作产生热量, 对基板热性能有要求。基板需具备良好导热性能, 将热量迅速传导出去, 避免局部过热, 同时还要考虑散热结构设计, 如增加散热孔、散热片等, 提高散热效率。

2.2 陶瓷粉体选型

陶瓷粉体的选型对LTCC基板的性能至关重要。不同陶瓷粉体具有不同的介电常数、介电损耗、热导率和烧结特性, 需根据DC-DC变换器的具体需求进行选择。对于高频应用的DC-DC变换器, 需选择介电常数低、介电损耗小的陶瓷粉体, 以降低信号传输过程中的损耗和延迟。在热性能方面, 若DC-DC变换器功率较大, 工作时产生的热量较多, 需选择热导率高的陶瓷粉体, 以提高基板的散热能力。一些高导热陶瓷材料如氮化铝(AlN)具有较高的热导率, 能快速将热量传导出去, 保证变换器的稳定工作。陶瓷粉体的烧结特性也会影响基板的制备工艺和性能。需选择烧结温度适中、收缩率稳定的陶瓷粉体, 以确保基板在烧结过程中不易变形和开裂, 提高基板的成品率和可靠性。

2.3 基板设计约束条件

基于LTCC技术的DC-DC变换器基板设计面临多种约束条件。在尺寸方面,随着电子设备向小型化、轻薄化方向发展,基板尺寸需尽可能小,以节省空间。然而,尺寸的减小会带来布线密度增加、元件布局困难等问题,需在保证电气性能的前提下,合理规划基板尺寸和元件布局。成本也是重要的约束条件之一。LTCC基板的制备工艺相对复杂,成本较高^[2]。在设计过程中,需综合考虑材料成本、工艺成本和制造成本等因素,选择合适的材料和工艺,降低基板成本。可靠性是基板设计的关键约束条件。DC-DC变换器通常应用于对可靠性要求较高的场合,如通信、汽车电子等。基板设计需考虑各种环境因素对基板性能的影响,如温度、湿度、振动等,采取相应的措施提高基板的可靠性。

3 基于 LTCC 技术的 DC-DC 变换器基板结构设计

3.1 基板总体结构设计

基于LTCC技术的DC-DC变换器基板总体结构设计需综合考虑电气性能、热性能和机械性能等因素。通常采用多层结构,将电源电路、控制电路和信号电路分层布置,以减少电路之间的干扰。在电源层设计方面,将输入电源和输出电源分别布置在不同的层上,通过通孔实现电气连接。在电源层上合理布置去耦电容,以降低电源噪声。控制层主要用于布置控制电路,如PWM控制器、反馈电路等。将控制电路与电源电路分离,可减少电源噪声对控制电路的干扰。信号层用于传输控制信号和反馈信号,需采用屏蔽措施,减少外界干扰。基板总体结构设计还需考虑散热结构的设计,可在基板上设置散热孔或散热通道,将热量传导到基板外部。对于功率较大的DC-DC变换器,可在基板表面贴装散热片,提高散热效率。

3.2 多层布线与元件布局设计

多层布线是LTCC基板的核心设计内容之一。在设计过程中,需根据电路原理图,合理规划各层布线,确保信号传输的完整性和可靠性。布线时需遵循一定的原则,如避免平行布线、减少交叉布线、控制布线长度等,以降低信号干扰和传输损耗。元件布局设计需考虑元件之间的电气连接和热耦合关系,将相互关联的元件尽量靠近布置,减少布线长度和寄生参数。对于发热量较大的元件,如开关管、电感器等,需合理布局,避免热量集中。同时,需考虑元件的安装方式和焊接工艺,确保元件与基板之间的连接可靠。在多层布线和元件布局设计中,还需考虑通孔的设计,通孔用于实现不同层之间的电气连接,其数量和位置需根据电路需求进行合理规划。过多的通孔会增加基板的制备难度和成本,过

少的通孔则可能影响电气连接的可靠性。

3.3 热管理结构设计

热管理结构设计是确保DC-DC变换器稳定工作的关键。LTCC基板可采用多种热管理结构,如散热孔、散热通道和散热片等。散热孔是在基板上打孔,通过孔内的空气对流将热量散发出去。散热孔的设计需考虑孔径、孔间距和孔的分布等因素。较大的孔径和较小的孔间距可提高散热效率,但会增加基板的制备难度和成本。散热通道是在基板内部设置通道,通过导热材料将热量传导到基板外部。散热通道的设计需考虑通道的形状、尺寸和导热材料的填充等因素。散热片是贴在基板表面的金属片或高热导率陶瓷片,通过增大散热面积提高散热效率。散热片的设计需考虑材料的选择、尺寸和形状等因素。常用的散热片材料有铝、铜、氮化铝等,具有较高的热导率。散热片的尺寸和形状需根据基板的发热量和空间限制进行合理设计。

4 LTCC 基板工艺参数优化与仿真验证

4.1 基板制备工艺参数优化

LTCC基板制备工艺参数影响基板性能。混料时,要精准控制陶瓷粉体、粘合剂和溶剂比例,保证浆料均匀稳定。流延环节,需优化流延速度、刮刀压力和干燥温度,以获取厚度均匀、表面平整的生瓷带^[3]。打孔是关键,可选机械冲压、钻孔或激光打孔,激光打孔精度高、速度快但成本高,打孔时要控制孔径、间距和垂直度。印刷时,优化导体浆料粘度、印刷压力和烘干温度,保证导体图形均匀牢固。叠片与等静压需控制叠片顺序、层间对准精度和压力,确保基板平整致密。烧结是关键因素,要优化排胶和烧结阶段的升温速率、时间和气氛,降低对基板性能的影响,通过实验确定最佳参数。

4.2 基板电气性能仿真验证

基板电气性能仿真验证对确保基板满足设计要求至关重要。可借助电磁仿真软件,如HFSS、ADS等,对基板信号传输特性、电磁兼容性和电源完整性等进行仿真分析。信号传输特性仿真可分析传输损耗、延迟和串扰等参数,通过优化布线设计和元件布局,提升信号完整性。电磁兼容性仿真能分析基板电磁干扰及抗干扰能力,确定电磁屏蔽和隔离措施,如增加屏蔽层、优化接地设计等。电源完整性仿真可分析电源分布和噪声情况,通过优化电源层设计和去耦电容布局,降低电源噪声,提高电源质量。

4.3 基板热性能仿真验证

基板热性能仿真验证是保证基板散热效果的关键。可运用热仿真软件,如Flotherm、Icepak等,对基板温

度分布和散热效率进行仿真分析。热仿真需建立基板热模型,考虑元件发热功率、基板热导率和散热结构等因素,以此获取不同工况下基板温度分布,评估散热效果。依据仿真结果,优化基板热管理结构设计,如调整散热孔位置和数量、优化散热通道形状和尺寸、选择合适的散热片材料和尺寸等,提高散热效率,确保DC-DC变换器在安全温度范围内稳定运行。

5 LTCC 基板样品制备与性能测试

5.1 样品制备流程

LTCC基板样品制备流程包括混料、流延、打孔、填孔、印刷电路、叠片与等静压、排胶烧结等主要工序。混料环节将陶瓷粉体、粘合剂和溶剂按一定比例混合,通过球磨等工艺制成均匀的浆料。流延工艺将浆料通过流延机流延成厚度均匀的生瓷带,然后进行干燥处理。打孔工序采用激光打孔技术在生瓷带上打出通孔和模具孔,用于电气连接和叠片对准。填孔工序将导体浆料填充到通孔中,实现不同层之间的电气连接。印刷电路工序利用丝网印刷技术将导体浆料印刷到生瓷带上,形成所需的电路图形。叠片与等静压工序将印刷好的生瓷带按一定顺序叠放,然后在等静压机中进行等静压处理,使生瓷带紧密结合。排胶烧结工序将叠压后的生瓷带在高温炉中进行排胶和烧结处理,去除有机物,使陶瓷粉体致密化,形成最终的LTCC基板。

5.2 基板性能测试

基板性能测试涵盖电气、热和机械性能测试。电气性能测试包含绝缘电阻、介质损耗和特性阻抗测试。绝缘电阻测试检测基板不同层间绝缘性,防止正常工作电压下漏电;介质损耗测试评估材料介电损耗特性,损耗小则信号传输能量损失少;特性阻抗测试检测传输线特性阻抗,保证信号传输匹配。热性能测试有热导率、热膨胀系数和温度循环测试。热导率测试评估材料导热性能,热导率高散热效果好;热膨胀系数测试检测材料在不同温度下的膨胀特性,确保与元件热匹配;温度循环测试模拟不同温度环境,评估热可靠性与稳定性。机械性能测试包括弯曲强度、拉伸强度和剪切强度测试。弯曲强度测试检测抗弯曲能力,避免安装使用中弯曲变形;拉伸强度测试评估抗拉伸性能,强度高机械性能

佳;剪切强度测试检测焊球与基板结合面抗剪切能力,确保焊球连接可靠。

5.3 基板与DC-DC变换器集成测试

基板与DC-DC变换器集成测试是将制备好的LTCC基板与DC-DC变换器的其他元件进行组装和调试,然后进行整体性能测试^[4]。在集成过程中,需严格按照装配工艺要求进行操作,确保元件与基板之间的连接可靠。组装完成后,对DC-DC变换器进行功能测试,包括输入输出电压测试、转换效率测试、负载调整率测试等。输入输出电压测试用于检测变换器的输入输出电压是否符合设计要求。转换效率测试可评估变换器的能量转换效率,转换效率越高,变换器的性能越好。负载调整率测试用于检测变换器在不同负载条件下的输出电压稳定性,负载调整率越小,变换器的性能越稳定。同时,还需对集成后的DC-DC变换器进行可靠性测试,如高温老化测试、低温测试、振动测试等,以评估变换器在不同环境条件下的可靠性和稳定性。通过集成测试,可验证LTCC基板在DC-DC变换器中的实际应用效果,为产品的进一步优化和改进提供依据。

结束语

基于LTCC技术的DC-DC变换器基板设计是一个复杂且系统的工程,涉及多方面理论、技术与实践。通过对其理论基础、设计需求、结构设计、工艺参数优化、仿真验证及样品测试等环节的深入研究,可实现高性能基板设计。未来,随着电子技术发展,需持续优化设计,提升基板性能,满足日益增长的应用需求,推动相关领域进步。

参考文献

- [1]李元勋,叶剑,李颖,等.基于LTCC技术的DC-DC变换器基板设计[J].电子科技大学学报,2017,46(3):481-484,536.
- [2]贺彪,高鹏,张辉.基于LTCC技术的TR组件失效分析[J].科技创新与应用,2024,14(16):159-162.
- [3]尚阳阳,李小珍,邢孟江.基于LTCC技术的差分滤波器设计[J].电子元件与材料,2022,41(7):736-739.
- [4]叶剑,李元勋,陈鑫华,等.基于LTCC工艺的DC-DC变换器设计与制作[J].实验科学与技术,2017,15(5):42-45.