DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.026

一种低寄生电感 IGBT 半桥模块*

谷 形,程士东,郭 清,周伟成,盛 况* (浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027)

摘要:针对绝缘栅双极型晶体管(IGBT)半桥模块的寄生电感在实际应用中会引起芯片过电压及较大的关断损耗、电磁干扰等问题, 设计了一种采用新型芯片布局方式的模块结构。设计中考虑了半桥模块在电力电子电路中的工作方式与模块内部各元件的工作状态,分析了通路寄生电感的作用机理,将工作在同一换流回路中的各元件放置在一起,减小了模块内部换流通路的长度,从而减小了 其带来的寄生电感值。为保证功率模块封装的兼容性,制作了具有相同封装尺寸的传统商用型IGBT半桥模块与采用了新型芯片布 局方式的IGBT半桥模块,搭建了电感测试电路对制作完成的两种模块进行公平地测试比较。实验结果表明,在模块和外部电路接 口不变的情况下,新型模块的寄生电感比传统型减少了35%。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管; 半桥模块; 寄生电感; 芯片布局 中图分类号:TM13; TN323⁺.6 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)04-0527-05

IGBT half-bridge module with low parasitic inductance

GU Tong, CHENG Shi-dong, GUO Qing, ZHOU Wei-cheng, SHENG Kuang (College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to reduce the parasitic inductance of insulated gate bipolar transistor (IGBT) half-bridge module and raise the efficiency of the whole practical circuit, a module structure with improved chip layout was proposed. The working behavior of half-bridge module in power electronic circuits and the working condition of every device were taken into account. Those chips that are in the same working circuit loop were placed in close vicinity. Both the conventional and the proposed modules were fabricated in the same package size for package compatibility. Inductance test circuit was built. The experimental results show that, the parasitic inductance of the proposed module decreases by 35%, compared with the conventional one without modifying the module electrodes.

Key words: insulated gate bipolar transistor(IGBT); half-bridge module; parasitic inductance; chip layout

0 引 言

大容量 IGBT 功率模块是电力电子换流装置中重 要的组成部件,在直流换直流、直流换交流、交流换直 流、交流换交流过程中起着核心的作用,广泛应用于 新能源发电、高压直流输电、电动汽车、机电一体化等 领域^[1]。对于高压大容量 IGBT 功率模块,寄生电感是 一项非常重要的性能参数。IGBT 是电压控制型半导 体开关器件,开通和关断速度快,在快速的关断过程 中,开关器件承受的电压和电流迅速变化,通态电流 急速下降,会产生较大的电流变化率^[2]。在该关断暂 态过程中,模块内部各种导电路径的寄生电感不可忽 略,寄生电感与电流变化率共同作用下会产生电压过 冲。电压过冲施加在IGBT芯片上,增加了芯片的电 压应力,增大了对芯片的耐压等级要求。过电压影响 装置EMC性能,增加器件开关损耗,降低换流电路工 作效率^[3]。这种现象在高频和大电流场合尤为明显。

收稿日期: 2013-12-03

基金项目:国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2012AA053601);国家自然科学基金资助项目(61106071)

作者简介: 谷 形(1988-),女,山东菏泽人,主要从事电力电子功率模块的电磁性能、电力电子器件的封装结构方面的研究. E-mail: 21110197@zju.edu.cn

通信联系人: 盛 况,男,教授,博士生导师. E-mail:shengk@zju.edu.cn

因此,着力于减小模块寄生电感是很有必要的。

目前,国内外对寄生电感的研究主要集中在实用 电路拓扑层面,对功率模块内部寄生电感的研究较 少,主要包括两方面:一方面是使用有限元软件对模 块进行三维建模,仿直提取模块的寄生电感值[4-5]:另 一方面是在模块内部增加高频解耦电路,减小过电压 的产生^[6]。对模块内部的芯片进行合理布局是减小寄 生电感的一条重要途径,并且在改善电性能的同时几 乎不影响模块的散热性能及可靠性。功率模块一般采 用芯片层—焊锡层—DBC(direct bonding copper)板层 一焊锡层--基板层--散热器组成的多层堆叠结构。模 块工作时产生热量的散发路径由各层材料的导热系数 决定,热仿真分析说明绝大部分热量通过多层堆叠结 构向下传递到散热器散失到环境中,芯片的间距变化 造成的热耦合对散热影响不大,可以忽略^[7]。模块的 可靠性主要由各层之间的接触面积、各层厚度及各层 材料的热膨胀系数匹配度决定^[8-9]。芯片布局的改变 并未改变模块的多层结构及各层的材料特性,所以可 以保证散热性能和可靠性几乎不受影响。

考虑到IGBT半桥模块的工作方式,本研究对传 统商用型IGBT半桥模块的芯片布局进行优化设计, 搭建测试电路对新旧模块进行测试。

1 IGBT半桥模块的寄生电感模型

IGBT半桥模块的电路拓扑包括上桥臂和下桥臂 两部分,每部分各包含1个IGBT单元及其对应的续流 二极管单元。上桥臂IGBT的发射极与下桥臂IGBT的 集电极连接在一起,上桥臂IGBT的集电极、下桥臂IG-BT的集电极和发射极分别有端子支架引出供外电路 连接。芯片极与极之间的连接路径与模块各端子的 引出路径均存在寄生电感。IGBT半桥模块的寄生电 感模型如图1所示。当有变化的电流通过导电路径 时,变化的电流引起穿过导电路径的磁通发生变化, 由电磁感应定律可知,变化的磁通将在导电路径中感 应出电动势。由基尔霍夫电压定律分析可知,该感应 电动势增加了芯片的电压应力。

2 低寄生电感 IGBT 半桥模块的研究

目前,功率器件与模块的封装普遍采用引线键合的互连方式与平面封装技术¹⁰⁰。功率器件芯片焊接 在导电基底上,通过使用键合技术引出芯片电极引 线,与基底覆铜实现电气连接,基底通过绝缘层连接 到散热器,端子支架从基底引出,起支撑作用,供外部



图1 IGBT半桥模块的寄生电感模型

电路连接使用。传统商用型IGBT半桥模块的三维结构图如图2所示。该结构图以SEMIKRON公司的IGBT 半桥模块SKM100GB128D(1 200 V,100 A)为原型。 其中,上桥臂二极管芯片 D_1 与下桥臂二极管芯片 D_2 焊 接在DBC板的中部位置,上桥臂IGBT芯片 T_1 与下桥 臂IGBT芯片 T_2 焊接在二极管芯片的两侧,上桥臂IG-BT的集电极 C_1 、上桥臂IGBT的发射极 E_1 、下桥臂IG-BT的发射极 E_2 分别有端子支架引出。IGBT芯片发 射极与二极管芯片阳极有邦定线引出,连接到相应 DBC板上铜层。模块的整体尺寸是94 mm×34 mm× 30.5 mm。研究含有支架 C_1 、芯片 D_1 、芯片 T_2 、支架 E_2 的换流通路的寄生电感 L_h 。其计算公式为:

$$L_h = L_A + L_B + L_C \tag{1}$$

式中: $L_A - C_1 \cong D_1$ 的寄生电感, $L_B - D_1 \cong T_2$ 的寄 生电感, $L_c - T_2 \cong E_2$ 的寄生电感。



图2 传统型IGBT半桥模块结构图

IGBT半桥模块工作回路图如图3所示,IGBT半桥 模块在电力电子电路中工作时,上桥臂二极管芯片 D₁ 与下桥臂IGBT芯片 T₂工作在一个换流回路中,如图3 中回路1所示。上桥臂IGBT芯片 T₁与下桥臂二极管 芯片 D₂工作在另一个换流回路中,如图3中回路2所 示。换流回路越长,回路面积越大,线路引起的寄生 电感值越大,IGBT芯片承受的关断过电压越严重。



图3 IGBT半桥模块工作回路图

基于对开关过程及回路的以上理解,为了减小模 块内部引起的寄生电感,本研究提出了一种能够大幅 度减小回路面积的优化方案,4种芯片需重新布局,并 且重新布局可在模块中实现,设计出的新型IGBT 半 桥模块如图4所示。图4中,上桥臂二极管芯片 D_1 与 下桥臂 IGBT 芯片 T_2 相邻放置,减小了回路1中模块 内部换流通路的长度,从而减小了其引起的寄生电 感。同理,上桥臂 IGBT芯片 T_1 与下桥臂二极管芯片 D_2 也可相应放置。为了封装的兼容性,新模块的总体 尺寸及3个支架的位置与传统模块保持一致。





3 模块制作

基于第2节的模块结构设计,笔者进行新型及传 统型IGBT半桥模块的实物制作。第一步制作直接覆 铜板DBC。DBC板是铜层与陶瓷基片通过键合工艺 直接连接形成的超薄复合基板,一般使用上铜层、陶 瓷绝缘层、下铜层3层结构。DBC板具有优良的电绝 缘特性,高导热特性,结合力与机械应力强。DBC板 铜层可以设计各种需要的电路图形,具有良好的载流 能力。DBC板陶瓷层一般使用AL₂O₃或ALN等陶瓷材料,AL₂O₃与ALN绝缘强度高,导热特性好,化学性质稳定,阻断了电路与基板散热器的电气连接,并为芯片工作产生的热量提供良好的散热通道。DBC板广泛应用于大功率电力电子结构互连工艺中,典型IGBT模块使用不同材料构成的DBC板及基板时,各层的典型厚度如表1所示^[11]。大部分商用化模块产品均采用该设计。

表1 3种不同DBC板及基板设计对应的 IGBT模块内部各层厚度

	AL ₂ O ₃ 陶瓷	ALN 陶瓷	ALN 陶瓷
	Cu 基板	Cu 基板	ALSiC 基板
	/mm	/mm	/mm
上铜层	0.3	0.3	0.3
陶瓷层	0.381/0.635	0.635/1	1
下铜层	0.3	0.3	0.3
基板	3	5	5

当应用绝缘等级要求高时,可使用击穿场强较高的 ALN 作为陶瓷绝缘层或使用较厚的 AL₂O₃ 绝缘 层。要求模块有高可靠性时,可采用具有较低热膨胀 系数的 ALSiC 材料制作基板,与其他材料更好地配合,改善热循环中的热应力分布。为制作新型及传统型 IGBT 半桥模块,笔者在 DBC 板制作厂家订制上铜层 有电路图形的 DBC 板。其中,DBC 板上铜层、陶瓷层、下铜层的厚度分别为0.3 mm、0.3 mm。陶瓷 层采用 AL₂O₃制作。

制作好的DBC板、IGBT及二极管裸芯片、基板需 要通过钎焊实现电气连接。焊接在实验室加热台完 成,分为放置、加热、冷却3个步骤。本研究首先按照 设计图的布局放置芯片及基板,并在需焊接处放置适 量焊锡,然后利用加热台加热至焊锡完全融化,冷却 即可。在焊接过程中要注意不要损伤裸芯片,焊接后 使用清洗剂清洗助焊剂及芯片表面,保证下一步打邦 定线的质量。

对于焊接在 DBC 板上的 IGBT 芯片及二极管芯 片,需要制作电极引线以完成芯片间互连。目前,大 功率 IGBT 模块普遍采用超声键合法引出电极邦定 线,建立芯片间电连接。超声键合是在常温下利用超 声机械振动使引线与金属面相互接触,摩擦产生的热 量使金属之间分子扩散,从而实现引线与芯片焊盘及 电路的连接^[12]。新型模块与传统型模块邦定线的键 合由模块生产公司代为制作完成。

邦定线键合完成后,本研究将端子支架焊接到相应DBC板上铜层位置。焊接支架时,笔者选用熔点相对较低的焊锡,防止加热时之前的焊接受到破坏。至

此,模块内部所有电气连接均已完成。为了保证模块 工作时的电气绝缘要求,本研究在模块内部存在电压 差的部位之间灌注硅胶。硅胶击穿场强高,绝缘性能 优于空气,并可防止芯片及电路受到机械、化学的危 害。制作完成的传统型与新型IGBT半桥模块如图5、 图6所示。



图5 制作完成的传统型模块照片



图6 制作完成的新型模块照片

4 电感测试与结果对比

模块制作完成后,本研究对模块进行实验测试。 该实验搭建单脉冲测试电路,测量制作好的新型及传 统型IGBT半桥模块的寄生电感值。实验中测量图 3 回路1中模块内部的寄生电感值,包含支架 C_1 、芯片 D_1 、芯片 T_2 和支架 E_2 。笔者将该通路的寄生电感分 为3部分测量,分别为:支架 C_1 到二极管芯片 D_1 的阴 极为 L_4 段;二极管芯片 D_1 的阳极到IGBT芯片 T_2 的集 电极为 L_8 段;IGBT芯片 T_2 的发射极到支架 E_2 为 L_c 段。测试电路如图7所示。



图7 测试电路

笔者设置母线电压 30 V, IGBT 门极施加单脉冲 20 μs, 外加电感为 29 μH。使用 Lecroy 示波器(1 GHz

带宽)获取IGBT关断过程中寄生电感的电压与电流 波形,实验波形如图8所示。



式中: Δv , *i* —寄生电感的电压与电流。

基于该实验测试方法计算得出的各段寄生电感 值已包含了各段之间产生的互感问题,故可将3段寄 生电感值相加得到模块内部的总体寄生电感值。两

(2)

模块寄生电感的计算结果及结果对比如表2所示。由 实验结果可以看出,与传统型IGBT半桥模块相比,新 型IGBT半桥模块的寄生电感减小了35%。其中,*L*₈ 段由于主要分布于DBC板上铜层电路中,芯片在DBC 板上的优化布局可使其大幅度减小。*L*₄与*L*c段由于 接口的限制,含有固定不变的端子支架,芯片的优化 布局使其小幅度减小。若不考虑与传统商用型模块 的封装兼容性问题,寄生电感值有进一步优化的空 间。实验结果显示在封装兼容情况下,新设计已显示 出较好的优化作用。

表2 实验结果

	L_A/nH	$L_{\scriptscriptstyle B}/{ m nH}$	L_c/nH	L _(总) /nH
传统型模块	9.3	8.3	9.5	27.1
新型模块	7.2	2.5	7.8	17.5
比较	减小了23%	减小了70%	减小了18%	减小了35%

5 结束语

本研究结合IGBT半桥模块在电力电子电路开关 过程及回路中的工作原理,优化了模块内部芯片的布 局方式,研制出了具有新型结构的IGBT半桥模块。 为了对新设计的效果进行评价,笔者制作了新型及传 统商用型IGBT半桥模块,并进行公平比较。为了封 装的兼容性,两模块的整体尺寸与支架保持一致。在 此情况下,实验结果显示与传统型IGBT半桥模块相 比,新型IGBT半桥模块的寄生电感减小了35%。

该优化方案使IGBT半桥模块的电性能得到了改善,并且几乎不影响模块的散热性能及可靠性。该优化方案对其他IGBT模块与各种功率模块也有较好的改进意义。

参考文献(References):

- [1] 王兆安,黄 俊.电力电子技术[M].4版.北京:北京工业 出版社,2000.
- [2] 钱照明,盛 况.大功率半导体器件的发展与展望[J].大 功率变流技术,2010(1):1-9.
- [3] BRAMBILLA A, DALLAGO E, ROMANO R. Analysis of an IGBT power module[C]//International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. Bologna: [s.n.], 1994:129-134.
- [4] XING K, LEE F C, BOROYEVICH D. Extraction of parasitics within wire-bond IGBT modules [C]//Applied Power Electronics Conferences and Exposition. Anaheim: [s.n.], 1988:497-503.
- [5] CHEN J Z, PANG Y F, BOROYEVIVH D, et al. Electrical and thermal layout design considerations for integrated power electronics modules [C]//Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh: [s.n.], 2002: 242-246.
- [6] 陈道杰, FRISCH M, TEMESI E. 新型低寄生电感模块的设计[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11): 128-130.
- [7] 梁 昊. IGBT 串联模块化的研究[D]. 杭州:浙江大学电 气工程学院,2012.
- [8] 翟 超,郭 清,盛 况. IGBT模块封装热应力研究[J]. 机电工程,2013,30(9):1153-1158.
- [9] SUHIR E. Analysis of interfacial thermal stresses in a trimaterial assembly [J]. Applied Physics, 2001, 89 (7) : 3685-3694.
- [10] 王建冈. 集成电力电子模块封装技术的研究[D]. 南京:南 京航空航天大学自动化学院,2006.
- [11] LUTZ J, SCHLANGENOTTO H, SCHEUERMANN U, et al. Semiconductor Power Device: Physics, Characteristics, Reliability[M]. Berlin:springer, 2011.
- [12] 覃荣震,张 泉.大功率IGBT模块封装中的超声引线键 合技术[J].大功率变流技术,2011(2):22-25.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

谷 形,程士东,郭 清,等. 一种低寄生电感IGBT半桥模块[J]. 机电工程,2014,31(4):527-531. GU Tong, CHENG Shi-dong, GUO Qing, et al. IGBT half-bridge module with low parasitic inductance[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(4):527-531. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第481页)

- [6] 陈华辉,邓金海,李 明.现代复合材料[M].北京:中国 物质出版社,1998.
- [7] 李 革,贾元武,张建新. 基于模糊神经网络的 PID 张力控 制系统[J]. 纺织学报,2008,29(6):109-112.
- [8] 杨 涛,高殿斌,李开越,等.840D复合材料铺放系统及其 控制策略[J]. 宇航材料工艺,2008,38(3):34-36.
- [9] 李 勇,肖 军.复合材料纤维铺放技术及其应用[J].纤 维复合材料,2002,9(3):39-41.
- [10] 朱 斌,何鹏飞,朱 路,等. 多元高分子复合材料在旋转

接头中的应用研究[J]. 流体机械,2013,41(11):52-55.

- [11] 娄春光,董林玺. 基于 FPGA 的模糊 PID 控制纱线张力的 应用研究[J]. 机电工程,2012,29(3):322-325.
- [12] 邵冠军,游有鹏. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划[J]. 南京航空航天大学学报,2005,37(S1):144-148.
- [13] 肖 军,文立伟. 树脂基复合材料自动铺放技术进展[J]. 中国材料进展,2009,28(6):28-32.

[编辑:洪炜娜]