

Reliability Analysis of IGBT Hybrid Module Based on Finite Element Simulation*

LIU Yan^{1,2}, ZHANG Yunjie^{1,3}, BAO Jie^{1,2*}, XU Wenyi³, FANG Ming⁴, ZHU Jisheng⁴

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Huangshan University, Huangshan Anhui 245041, China; 2. Intelligent Micro-System Engineering Technology Research Center of Anhui, Huangshan Anhui 245041, China; 3. Huangshan Bonnie Two-Dimensional New Material Technology Co., Ltd., Huangshan Anhui 245900, China; 4. Huangshan QiQiQi Electronics Co., Ltd., Huangshan Anhui 245600, China)

Abstract: Integration and miniaturization are the development characteristics of the electronic information industry. Among them, junction temperature and thermal stress of electronic components are important factors affecting their reliability. The hybrid module composed of silicon-based IGBT and SiC-based fly-wheel diode is widely used in urban rail transit and other fields. In this paper, a simulation model of the IGBT hybrid module is established. With the changes of each layer material thickness, solder void size and positions, the temperature and thermal stress variations of the IGBT hybrid module are calculated and analyzed, and the module package structure is optimized. High thermal conductivity graphene is applied to the IGBT hybrid module, and the influence of different application locations on module reliability is analyzed by simulation, so as to further optimize the package structure of the IGBT hybrid module. Through simulation, the optimized IGBT hybrid module can reduce the maximum junction temperature by nearly 3 °C, and the maximum thermal stress can be decreased by more than 30 MPa.

Key words: IGBT module; junction temperature; thermal stress; reliability; simulation

EEACC: 2550; 2560B

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.002

基于有限元仿真的 IGBT 混合模块的可靠性分析*

刘岩^{1,2}, 张运杰^{1,3}, 鲍婕^{1,2*}, 徐文艺³, 方明⁴, 朱计生⁴

(1. 黄山学院机电工程学院, 安徽 黄山 245041; 2. 智能微系统安徽省工程技术研究中心, 安徽 黄山 245041; 3. 黄山宝霓二维新材科技有限公司, 安徽 黄山 245900; 4. 黄山市七七七电子有限公司, 安徽 黄山 245600)

摘要: 集成化与微型化是当今电子信息产业发展的特点, 其中电子元件的结温与热应力是影响其可靠性的重要因素。硅基 IGBT 和 SiC 基续流二极管组成的混合模块广泛应用于城市轨道交通等领域, 其可靠性直接影响轨道交通车辆的运行性能。本文建立 IGBT 混合模块的仿真模型, 随着各层材料厚度、焊料空洞大小和位置的变化, 计算分析 IGBT 混合模块的温度与应变变化规律, 对模块封装结构进行优化设计。将高热导率石墨烯应用在 IGBT 混合模块中, 仿真分析应用位置不同对模块可靠性的影响, 从而进一步优化混合模块的封装结构。通过仿真计算, 优化后的 IGBT 混合模块可将最高结温降低近 3 °C, 最大热应力下降超过 30 MPa。

关键词: IGBT 模块; 结温; 热应力; 可靠性; 仿真

中图分类号: TN305.94

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0007-07

随着 IGBT 模块性能不断提升, 应用领域不断拓宽, 并凭借容量大、驱动功率小及开关速度快等优势广泛应用于工业、国防军工等传统产业领域, 以及新能源、智能电网等战略性新兴产业领域, 同时也对模块可靠性提出了更高的要求^[1-2]。采用硅基

IGBT 与 SiC 基续流二极管组成的混合模块, 有助于实现装置的轻量化、小型化、高效化及节能化^[3], 并广泛应用于轨道交通、安防等众多领域^[4]。伴随着核心电子器件封装密度提高, 以及电气装置功率等级的提高, 器件芯片处的结温也随之升高, 而散热不

项目来源: 安徽省科技重大专项项目(18030901006); 安徽省高校优秀青年骨干人才国内外访问研修项目(gxgwf2019054); 黄山市科技计划项目(2018KG-02); 2019 国家大学生创新创业训练计划项目

收稿日期: 2020-04-10 修改日期: 2020-07-31

及时会造成模块过热失效,同时,因结温波动而产生的热应力也是造成其失效的重要因素^[5-6]。热应力的产生是由于各层间材料不同,造成层与层之间的热膨胀系数(CTE)不能较好地匹配。IGBT 功率模块运行产生焦耳热,会引发温度波动进而造成模块内部产生循环热应力,其中在焊料层处作用效果最明显。热应力的影响可造成焊料处出现裂纹,并进一步影响模块散热,即可导致高温区域集中^[7-9]。因此,研究 IGBT 混合模块的结温和热应力情况并分析焊料层中空洞的影响,对改善模块的可靠性及降低模块的老化失效有重要意义。

新型的石墨烯材料是由碳原子经 sp^2 杂化方式形成,其独特的平面六元环结构为石墨烯带来了优异的热传导性质^[10],再加上石墨烯薄膜密度低、热膨胀系数小、电子迁移率高以及化学稳定性好等优点,使其成为新一代最具潜力的高导热材料,尤其在电子元器件等领域具有广泛应用^[11]。本文将高导热石墨烯材料应用于 IGBT 混合模块的封装结构中,发挥其面内热导率高的优势,将局部热点的热量

横向传开,改变整个封装结构的热传导路径,从而降低模块结温,改善热应力带来的失效问题,提升模块的可靠性^[12-15]。

1 IGBT 混合模块的封装结构

本文的基础模型是参考硅基 IGBT 模块的封装结构,延伸出的由硅基 IGBT 与 SiC 基 JBS 芯片组成的混合模块,与传统 IGBT 模块相比,SiC 的存在将会使混合模块具备更高耐高温性、耐压性并降低反向电流、提高关断电压以及反向恢复速度,提高器件的转换效率^[16-17]。实验证明,1 700 V/1 600 A 传统的 IGBT 模块的反向恢复损耗为 400 mJ,开关能量损耗为 3.42 J,而加入了 SiC 的 IGBT 混合模块的反向恢复损耗降至 19 mJ,开关能量损耗降至 2.56 J,验证了 IGBT 混合模块具备更优异的性能^[18]。

模型的封装结构是由芯片、焊料层、DBC、基板、热界面材料以及散热装置组成。利用有限元分析软件构建 IGBT 混合模块的物理模型,如图 1 所示,并为各层附上相应的材料,结构尺寸和材料参数见表 1 和表 2。

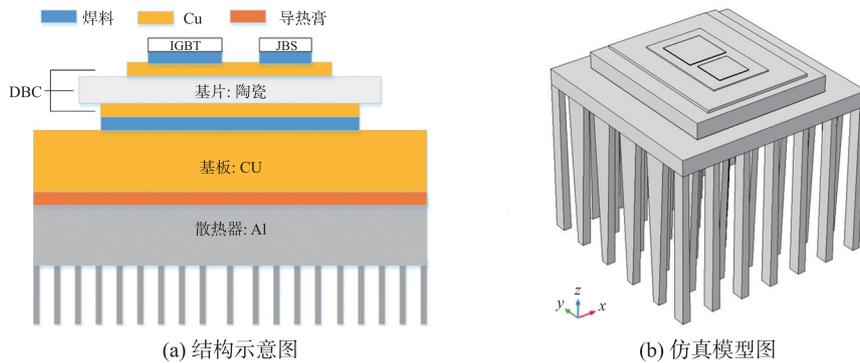


图 1 IGBT 混合模块

表 1 IGBT 混合模块的几何尺寸参数

单位:mm

Name	Length×Width	Thickness	Name	Length×Width	Thickness
IGBT chip	10×10	0.1	Cu plate under DBC	25×35	0.3
JBS chip	8×8	0.1	Solder(on the base)	25×35	0.1
Solder(under IGBT)	10×10	0.1	Substrate	35×40	4
Solder(under JBS)	8×8	0.1	Thermal interface materials	35×40	0.06
Cu plate on DBC	15×25	0.3	Radiator cold plate	50×50	4
DBC ceramic layer	27×37	0.68			

表 2 IGBT 混合模块的材料参数

Corresponding parameter	Silicon	Silicon Carbide	Solder	Copper	Ceramic	Aluminum
Coefficient of thermal expansion/(1/K)	2.60E-06	2.60E-06	2.10E-05	1.70E-05	8.00E-06	2.30E-05
Constant pressure heat capacity/(J/(kg·K))	700	670	150	385	900	900
Density (kg/m ³)	2329	3210	9000	8960	3900	2700
Thermal conductivity/(W/(m·K))	130	283	50	400	27	238
Young's modulus/Pa	1.70E+11	1.70E+11	1.00E+08	1.10E+11	3.00E+11	7.00E+10
Poisson's ratio	0.28	0.28	0.4	0.35	0.222	0.33

2 IGBT 模块的热仿真研究

IGBT 功率模块的可靠性主要受到高功率带来的高热流密度的影响,因此研究其最高结温以及最大热应力可以反映功率模块的可靠性对外界温度变化的抵抗能力,是极为重要的可靠性标准。在进行仿真计算时,将 IGBT 和 JBS 的芯片均设为体热源,对 IGBT 芯片加载 80 W 的功率,对 JBS 芯片加载 20 W 的功率,热通量设为常温常压下的外部强制对流,空气流速设置为 5 m/s。仿真结果如图 2 所示。

2.1 各层材料厚度对模型可靠性的影响

模型中,结温最高处位于 IGBT 芯片,温度为 135.2 °C;热应力最大处位于 IGBT 焊料层与 DBC 上铜层贴合处,应力为 128 MPa。自上而下依次调整芯片、焊料层、DBC 上铜层、DBC 陶瓷层、DBC 下铜层及下焊料层的厚度。得到结温变化情况如图 3 所示。增加芯片的厚度,模型中结温先降低后上升,当

芯片厚度为 0.4 mm 时,结温最低,但总体变化幅度较小;增加焊料的厚度,结温线性上升,当焊料厚度为 0.1 mm 时,结温最低;增加 DBC 上铜层的厚度,结温线性下降;增加 DBC 陶瓷层的厚度,结温线性上升,当陶瓷层厚度为 0.3 mm 时,结温最低为 128 °C;增加 DBC 下铜层的厚度,结温线性下降;增加基板焊料层的厚度,结温线性上升,当厚度为 0.05 mm 时,结温最低。

热应力变化情况如图 4 所示,增加芯片、焊料、DBC 上铜层的厚度,模型中热应力先下降后趋于平稳,当芯片厚度达到 0.6 mm 时,热应力稳定在 121 MPa;当焊料厚度达到 0.7 mm 时,应力稳定在 80 MPa;当 DBC 上铜层的厚度达到 0.4 mm 时,热应力稳定在 105 MPa~125 MPa 之间;增加 DBC 陶瓷层与 DBC 下铜层的厚度,热应力线性上升;增加基板焊料层的厚度,热应力对数上升,当焊料厚度为 0.05 mm 时,热应力最小为 111 MPa。

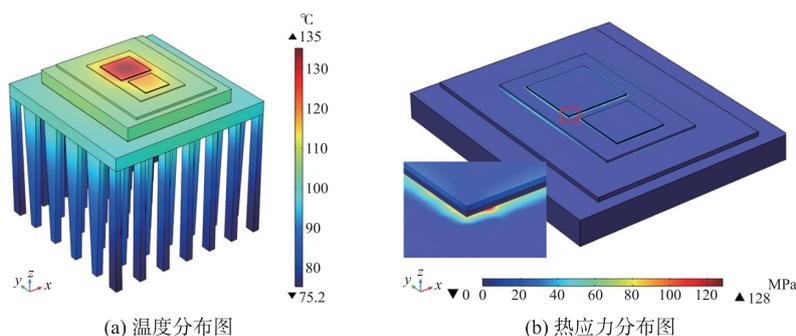


图 2 IGBT 混合模块的仿真结果

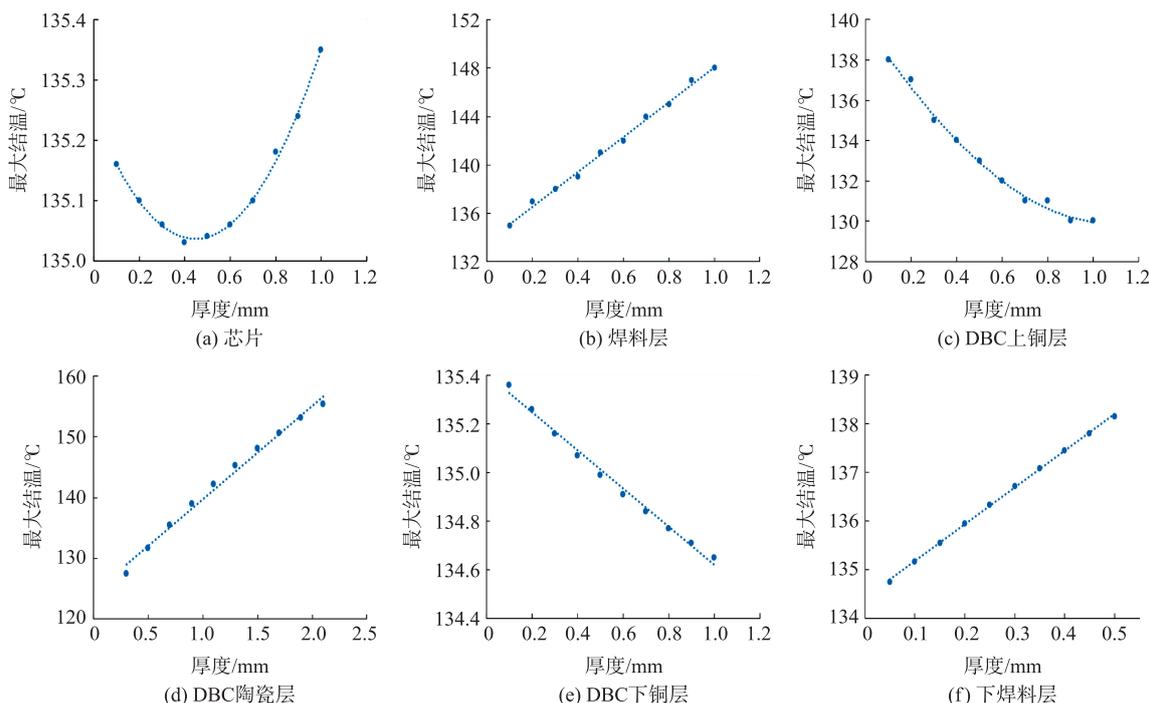


图 3 模型各层厚度与结温的关系

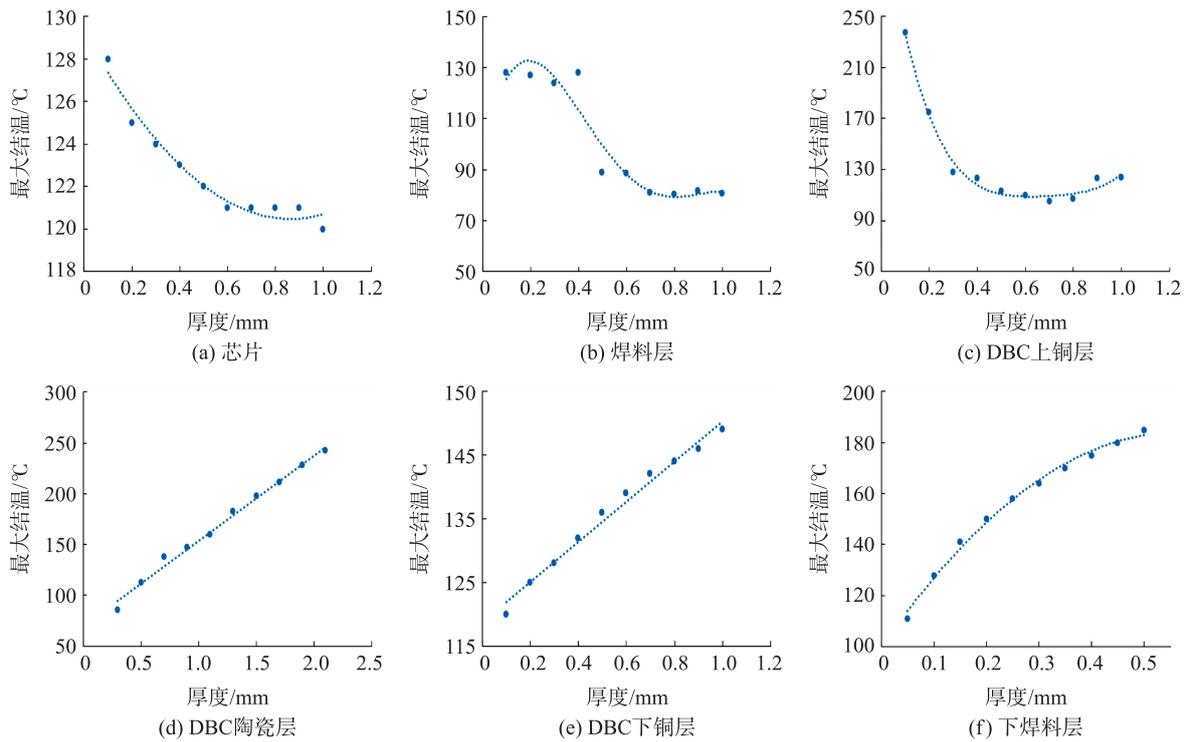


图 4 模型各层厚度与热应力的关系

综上所述,以市售功率模块封装材料尺寸为参考,各部分封装材料的厚度变化要考虑工艺可行性以及模块生产成本问题,因此在遵循实际工艺参数可调范围的前提下,将 IGBT 与 JBS 芯片厚度从 0.1 mm 调整至 0.2 mm,两个芯片下部焊料厚度从 0.1 mm 调整至 0.15 mm,DBC 上铜层的厚度从 0.3 mm 调整至 0.4 mm。调整后模型最高温度与最大热应力所处的位置未发生改变,结温从 135.2 °C 降至 134.7 °C,最大热应力从 128 MPa 降至 108 MPa,模块可靠性通过优化各层材料厚度可以得到略微改善。

2.2 焊料层空洞对模型可靠性的影响

空洞是在焊料层焊接的步骤中,由未完全挥发的成分在焊料冷却的过程中形成^[19],即不可避免空洞的产生。空洞会出现在芯片的垂直方向,有不完全贯穿和贯穿两种形式,前者对元件的可靠性影响较大^[20]。空洞的存在使得热传导的有效焊料截面积大幅降低,进而导致芯片温度及应力升高,并对元件的可靠性造成影响。

$$\Delta T = \frac{Q}{\lambda A} \quad (1)$$

式中: ΔT 为温度梯度; Q 为传导的热量; λ 为导热系数; A 为垂直于热流的截面积,选取温度增大方向为正。假定空洞位于 IGBT 芯片下部焊料层中心,固定高度为 0.02 mm,空洞半径从 0 mm 至 0.7 mm 转变且步进为 0.1 mm 的圆柱体。传导的热量 Q 恒定,随着空洞半径的增大,热量通过的给定截面面

积减小,芯片的温度梯度变大,模块中的结温升高。出现空洞后,模型中应力最大位置从焊料边缘处转移至空洞边缘,且随着空洞增大,应力基本呈线性增长。

如图 5 所示,在无空洞时模型结温及热应力均处于较低水平,结温为 135 °C,热应力为 128 MPa;当空洞半径增加到 0.5 mm 时,结温升高至 140 °C,热应力升高至 161 MPa,即空洞的存在使得 IGBT 混

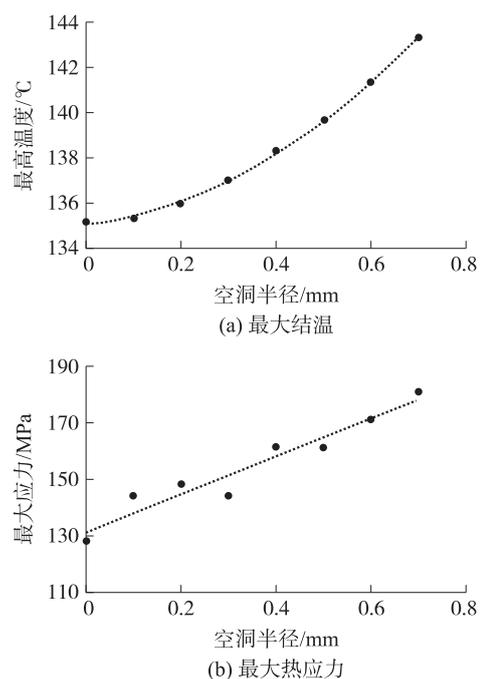


图 5 结温及热应力随单个空洞半径的变化关系

合模块的温度及热应力急剧上升,降低了模块的可靠性,且空洞越大,造成的影响越大。焊料层中的空洞在 IGBT 混合模块运行过程中并不是一成不变的,在工作过程中受模块温度变化而产生的热应力会使得空洞进一步扩大,长期的循环工作甚至会造成相邻小空洞复合形成大空洞的情况。

本文模拟了随着多个小空洞逐渐变大,进而连成片形成大空洞的过程。在模型的焊料层中埋入代表空洞的球体,以空气作为填充材料,在空洞之间未接触时,随着空洞的增大,模型结温与热应力随之增大,其中结温增长较缓慢。当空洞半径达到 0.25 mm 时,模型中相邻的球体结构出现交叉,即为小空洞之间彼此接触,形成了半径更大的球体空洞。随着空洞半径的增大,结温增长较快,热应力得到缓解,呈现下降趋势,但热应力的数值仍处于较高水平,仿真计算结果如图 6 所示。相比于小空洞,连成片后形成大空洞对模块造成的影响更大,即在实际应用中应避免大空洞的产生。

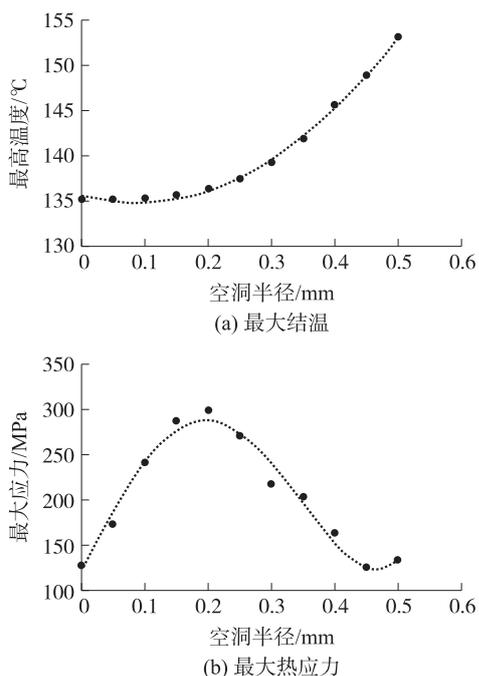


图 6 结温及热应力随多个空洞半径的变化关系

本文选取 3 种具有代表性的空洞位置进行比较,其中圆柱体空洞高度及半径固定为 0.2 mm。由仿真结果可知,焊料层中的空洞距离芯片垂直方向的中心位置越近,模块的结温与热应力就越大,最高结温为 136 °C,最大热应力为 299 MPa。而当空洞位于边角位置时,结温降至 135 °C,热应力降至 172 MPa。即在实际应用中,控制出现在焊料层中芯片垂直方向的中心位置的空洞数量,将会极大地提高模型可靠性。

2.3 石墨烯薄膜对模型可靠性的影响

近年来,随着电子信息技术与科技向高度集成化的发展,电子元件的可靠性也日益成为了不容回避的话题。石墨烯以其卓越的热传导性能受到越来越来的关注,在理想情况下,单层石墨烯的导热系数甚至高达 $5\,300\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[21-24]。石墨烯薄膜凭借其优良的导热性能,被认为是一种非常有前途的散热材料。为研究热耗散及热应力对 IGBT 模块的影响,选用厚度为 50 μm、导热系数为横向 $1\,700\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、纵向 $10\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的石墨烯薄膜。

仿真在理想情况下进行,即不考虑焊料层中空洞的存在,且选用上文中各层材料厚度已调至最佳的模型。共有 4 组仿真对比,分别是不放置石墨烯薄膜、在芯片上部放置石墨烯薄膜、在 DBC 上铜层放置石墨烯薄膜及在 DBC 陶瓷层放置石墨烯薄膜,如图 7 所示。仿真结果由表 3 可知,就改善效果而言,石墨烯薄膜放在芯片上的效果最好,DBC 上铜层的效果次之,DBC 陶瓷层的效果最差。

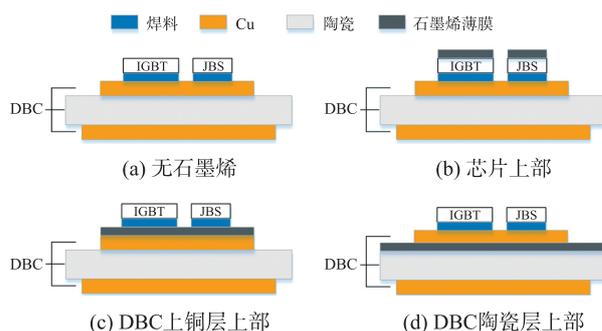


图 7 石墨烯薄膜的四种放置方式

表 3 四种放置方式的最高结温与最大热应力

Graphene film placement	(a)	(b)	(c)	(d)
Junction temperature/°C	134.7	132.5	133.3	134.2
Thermal stress/MPa	108	97	99	109

综上所述,在本文的模型中芯片及 DBC 上铜层放置石墨烯薄膜能最大程度降低结温,同时能缓解焊料层中的热应力,其中结温降至 132.5 °C,热应力降至 97 MPa,模型的热仿真结果得到优化,如图 8 所示。相比于未优化之前的模块(图 2)最高结温可降低近 3 °C,最大热应力下降超过 30 MPa。最高结温和最大热应力的降低代表了 IGBT 模块工作在同样的功率条件下,芯片以及封装材料所承受的热冲击影响得以改善,即在同等热流密度下,模块热可靠性得以提高。

改变模块中的热耗散功率,对比优化前后 IGBT 混合模块中结温及热应力的变化,仿真结果如图 9 所示。随着热耗散功率增大,模块的最高结温及最

大热应力随之增大,优化后的 IGBT 混合模块性能的改善效果更加明显。

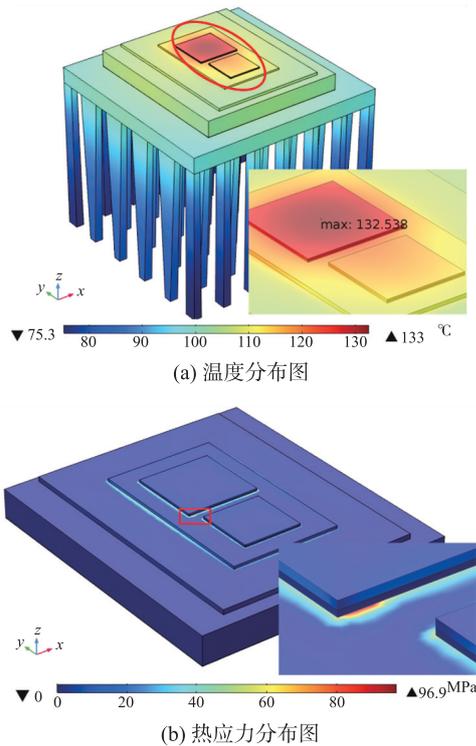


图 8 石墨烯基薄膜应用于芯片表面的情况下 IGBT 混合模块的热仿真结果

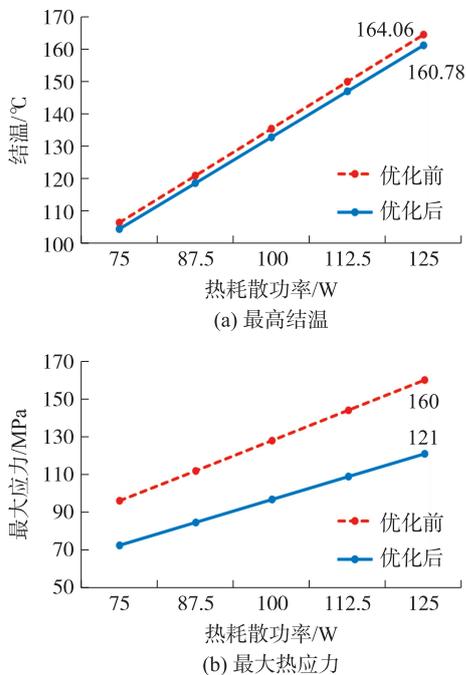


图 9 优化前后模块的最高结温及最大热应力对比

3 结论

本文从模块封装结构中各层材料厚度、焊料层空洞和石墨烯材料的应用三个方面对 IGBT 混合模块的封装结构进行优化。根据仿真结果,适当增加

芯片、焊料层以及 DBC 上铜层的厚度可略微提高模块可靠性;焊料层中空洞半径越小,空洞间聚集程度越低,空洞距离芯片垂直方向的中心位置越远,模块的可靠性越高。石墨烯薄膜的使用可降低模块最高温度,减小焊料层中最大热应力,其中放置的最佳位置为芯片上表面。IGBT 混合模块的热耗散功率越大,优化设计的封装结构对模块可靠性的改善越明显。本文的仿真研究工作为解决实际模块中结温过高、热应力过大引发模块失效的问题,以及提高电子元件的可靠性提供了新的方法和思路。

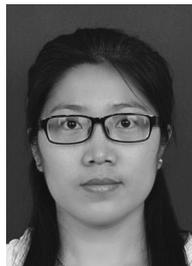
参考文献:

- [1] 边少聪,王宇. 基于 PSO-BP 神经网络模型的 IGBT 老化预测[J]. 浙江电力,2019(11):58-64.
- [2] 罗广孝,齐磊,张卫东. 大功率沟槽栅场终止 IGBT 器件物理模型参数提取的新方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(20):6062-6070.
- [3] 徐文辉,刘凯. 1 200 V 200 A Si/SiC 混合模块性能对比研究[J]. 固体电子学研究与发展,2016,36(3):191-194.
- [4] 郑昌伟,常桂钦,李诚瞻. 1 700 V/1 600 A 高性能 SiC 混合 IGBT 功率模块的研制[J]. 大功率变流技术,2015(5):47-52.
- [5] 常桂钦,窦泽春,彭勇殿,等. 基板拱度类型对 IGBT 模块应力的影响[J]. 大功率变流技术,2017(1):45-49.
- [6] 王春雷,郑利兵,方化潮,等. 键合线失效对于 IGBT 模块性能的影响分析[J]. 电工技术学报,2014(S1):184-191.
- [7] 肖飞,罗毅飞,刘宾礼,等. 焊料层空洞对 IGBT 器件热稳定性的影响[J]. 高压技术,2018,44(5):1499-1506.
- [8] 路鹏程,陈栋. CFRP 层板电热作用下温度场及内应力变化[J]. 工程塑料应用,2019(5):115-121.
- [9] 孙海峰,杨舒曼. 焊料层空洞对绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块温度分布的影响[J]. 科学技术与工程,2018,18(32):189-194.
- [10] 白坤. 石墨烯界面材料在 LED 灯具散热系统中的应用研究[J]. 光源与照明,2019(3):31-35.
- [11] 周赞磊,张为中,韩瑞华,等. 石墨烯微通道散热器的传热特性[J]. 传感器与微系统,2019(11):4-7.
- [12] Bao J, Xu Y, Jing N, et al. Thermal Management Technology of IGBT Modules Based on Two-Dimensional Materials [C]//International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Shanghai, China. 2018:585-588.
- [13] Xu Y, Bao J, Ning R X, et al. Heat Dissipation Study of Graphene-Based Film in Single Tube IGBT Devices [J]. AIP Advances, 2019,9:035103.
- [14] Bao J, Xu Y, Ning R X, et al. Thermal Design and Analysis of Power LED Packaging Based on Graphene [C]//International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Hongkong, China. 2019:245106.
- [15] Xu Y, Bao J, Ning R X, et al. Heat Dissipation Simulation of Double-Sided Liquid-Cooled IGBT Module Package [C]//International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Hongkong, China. 2019:245119.

- [16] Schuegraf K, Abraham M C, Brand A, et al. Semiconductor Logic Technology Innovation to Achieve Sub-10 nm Manufacturing[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2013, 1(3):66-75.
- [17] 曹琳,王曦,蒲红斌,等. 3.3 kV/50 A SiC JBS 二极管及混合功率模块研制[J]. 电力电子技术, 2019(7):134-136.
- [18] 杨涛,唐威. 1 700 V/1 600 A SiC 混合 IGBT 应用研究[J]. 机车电传动, 2018, 262(3):51-53.
- [19] 徐玲,周洋,张泽峰,等. IGBT 模块焊料层空洞对模块温度影响的研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(2):125-129.
- [20] 吴昊,陈铭,高立明,等. 粘结层空洞对功率器件封装热阻的影响[J]. 半导体光电, 2013, 34(2):226-230.
- [21] 殷浩洋,尹忠东. 石墨烯复合材料对功率器件散热性能影响的仿真与实验研究[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(7):49-54.
- [22] 龚美,陈益民. 应用石墨烯材料的大功率 LED 散热仿真[J]. 机电工程技术, 2018(5):22-24.
- [23] 陈小华,石道,冯先强,等. 碳纤维骨架石墨烯导电导热薄膜的制备及表征[J]. 湖南大学学报, 2019, 46(6):31-36.
- [24] Saiz-Bretín M, Malyshev A V, Domínguez-Adame F, et al. Lattice Thermal Conductivity of Graphene Nanostructures [J]. Carbon, 2018, 127:64-69.



刘 岩(1999—),男,黄山学院本科生,研究方向为 IGBT 模块的热应力研究;



鲍 婕(1982—),女,教授,研究方向为半导体封装技术, baojiehsu@hsu.edu.cn。