

文章编号: 1000-7032(2024)03-0506-10

三维电镀陶瓷基板激光封焊技术

罗霖¹, 丁勇杰¹, 苏鹏飞¹, 赵九洲², 彭洋^{2*}, 陈明祥^{1*}

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 航空航天学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 气密封装是推动电子器件高可靠发展的一项重要技术,传统气密封装技术存在焊接温度高、热冲击大、应用范围窄等问题,无法满足三维电镀陶瓷基板气密封装要求。本文结合脉冲激光焊接的技术优势,研究了脉冲激光焊接三维电镀陶瓷基板实现气密封装,重点探讨了焊接过程中脉冲激光与材料相互作用模式,分析了焊接样品界面微观形貌、气密性、力学性能等。研究表明,焊接金属区裂纹的出现与基底金属铜向可伐侧的扩散密切相关;焊接过程稳定、焊接熔深小的热传导模式和过渡模式可以避免焊接裂纹出现。通过试验优化了焊接工艺参数,当激光峰值功率为120 W、脉冲宽度为1 ms、重叠率为80%时,三维陶瓷基板腔体结构获得了最佳高气密性,泄漏率为 5.2×10^{-10} Pa·m³/s,接头剪切强度为278.06 MPa,满足第三代半导体器件高可靠气密封装需求。

关键词: 脉冲激光; 焊接模式; 气密封装; 三维电镀铜陶瓷基板(3-D DPC)

中图分类号: TN248.4; TQ174.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230318

Laser Welding and Packaging Technology of Three-dimensional Direct Plated Copper Ceramic Substrate

LUO Lin¹, DING Yongjie¹, SU Pengfei¹, ZHAO Jiuzhou², PENG Yang^{2*}, CEHN Mingxiang^{1*}

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

* Corresponding Authors, E-mail: ypeng@hust.edu.cn; chimish@hust.edu.cn

Abstract: Hermetic sealing is a crucial packaging method that promotes the high reliability development of electronic devices. Traditional hermetic packaging technologies have some problems, such as high welding temperatures and thermal shock and limited application ranges, which cannot meet requirements for hermetic packaging of three-dimensional direct plated copper ceramic substrate (3-D DPC). In this study, combining with the technical advantages of pulsed laser welding, we investigated the achievement of hermetic packaging of 3-D DPC using pulsed laser welding. The interaction mode between pulsed laser and materials during the welding process was discussed, and the interface microstructure, hermeticity, and mechanical properties of the welding samples were analyzed. The research indicates that the formation of cracks in welded metal area is closely related to the diffusion of copper from the base metal to the Kovar side. The heat conduction mode and transition mode with stable welding process and low depth of fusion can avoid the formation of welding cracks. The welding process parameters were optimized through experiments. At a peak laser power of 120 W, a pulse width of 1 ms, and an overlap rate of 80%, the three-dimensional ceramic substrate cavity packaging structure achieved the optimal high hermeticity, with a leakage rate of 5.2×10^{-10} Pa·m³/s and a joint shear strength of 278.06 MPa, meeting the requirements for high-reliability hermetic packaging of third-generation semiconductor devices.

收稿日期: 2023-12-13; 修订日期: 2024-01-01

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3604803); 国家自然科学基金(62274069)

Supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFB3604803); National Natural Science Foundation of China(62274069)

Key words: pulsed laser; welding mode; hermetic packaging; three-dimensional direct plated copper ceramic substrate (3-D DPC)

1 引言

随着物联网(IoT)的普及,为了提高恶劣环境下(如地热井、核反应堆、燃烧室、生产车间等)电子系统的可靠性,实现仪器仪表传感、计算、传输等功能,需要开发出与高温高湿、大温变、强腐蚀、高辐射等环境兼容的电子器件^[1-3]。第三代半导体(如SiC、GaN)技术的发展使制造耐高温、抗辐射、大功率电子器件成为可能^[4]。电子封装是实现器件应用的必要步骤,封装基本工艺包括芯片贴装、电气互连和壳体封装等^[5]。气密封装是杜绝外界因素干扰、提高器件在恶劣环境下可靠性和工作性能的有效手段^[6]。

对于电子封装而言,封装基板起着提供电连接、机械支撑和连接内外散热通道的关键作用^[7]。目前,常用的电子封装基板材料主要有:有机高分子、金属及金属基复合材料和陶瓷三大类^[8]。其中陶瓷基板因具有热导率高、耐高温性好、热膨胀系数低、机械强度高特点,广泛应用于航天航空、探测照明、高温传感等各个领域。现有陶瓷基板制备技术主要包括厚膜陶瓷基板(Thick film printing ceramic substrate, TPC)、直接键合铜陶瓷基板(Direct bonded copper ceramic substrate, DBC)、直接电镀铜陶瓷基板(Direct plated copper ceramic substrate, DPC)等^[9]。其中,DPC陶瓷基板具有导热/耐热性好、图形精度高、可垂直互连等优势^[10]。为防止外界湿气、有害气体或灰尘等对微电子器件的侵蚀和损害,需要对微电子器件进行气密封装。DPC陶瓷基板为平面结构,三维DPC陶瓷基板是在DPC陶瓷基板上采用多次电镀技术直接制备厚铜围坝结构^[11],提供所需的腔体空间。目前,针对不同结构DPC陶瓷基板有两种气密封装形式:(1)平面DPC陶瓷基板+含凹腔金属盖板;(2)三维DPC陶瓷基板+平面金属盖板。其中,前者由于金属盖板边沿较厚(大于0.3 mm),一般采用焊料焊接方式实现气密封装^[3];而后者由于采用的平面金属盖板厚度较薄(0.1 mm),一般采用平行缝焊、激光焊接等方式。随着电子器件朝着微型化、集成化、高可靠性等方向发展,混合集成电路的封装材质、形状、尺寸和应用有较大调整,含异型构件的封装体越来越多,传统

气密封装的局限性越来越突出^[12-15]。现有气密封装技术包括焊料焊接法和平行缝焊法等^[16-17]。其中,焊料焊接法成品率高,但高温焊接过程对内部元器件热冲击较大,容易造成芯片失效^[18];平行缝焊法工艺成熟,但由于三维DPC陶瓷基板围坝材料为电镀铜(电阻率低),平行缝焊时电极与围坝的接触电阻小,发热量小,难以满足熔焊需求。激光封焊是通过激光束的高能聚焦对封装材料进行瞬时加热,精准实现局部范围的熔融和固化,减少对芯片和连接结构的热冲击。因其热影响区小,不需要焊料助剂,加工精度和效率高,激光封焊特别适合异型接头和低电阻材料焊接,正逐渐成为器件气密封装的热门选择^[19]。

激光焊接可分为两种工作模式:连续模式和脉冲模式。脉冲模式下的激光具有周期性且能量密度较高,可以使材料单点处加热至熔融状态并形成焊接熔池,配合焊接轨迹方向上合适的进给速率,逐点瞬时熔解,快速冷却后形成焊缝^[20-21]。尽管单个脉冲的峰值能量密度较高,但得益于激光器输出的脉冲间隔较大,脉冲模式下激光的平均输出功率仍小于连续模式^[22-23]。高峰值、低均值的激光功率特点使得脉冲模式兼顾高熔透效率与低热冲击优势。因此,在焊接厚度较薄材料时,脉冲激光受到广泛关注,能够在低热输入条件下保证焊接头质量^[24-27]。目前,激光焊接研究主要集中在大尺寸、大厚度、异质金属焊接接头的微观组织和力学性能分析上,对于三维腔体气密封装的研究相对较少。

本文基于脉冲激光焊接技术,选用含电镀围坝(腔体结构)的直接电镀陶瓷基板(Direct plated ceramic substrate, DPC)与可伐盖板(Kovar)进行叠焊研究,探究焊接过程中脉冲激光与材料的相互作用模式;研究了不同工艺参数对焊缝表面、接头热裂纹形成以及接头气密封性和剪切强度的影响;分析得到了高强度无裂纹叠焊接头的最佳工艺参数,为三维DPC陶瓷基板板级气密封装提供了理论指导。

2 实验

2.1 激光焊接设备与材料

图1(a)为SL-W100脉冲激光焊接装置图,激

光器最大单脉冲能量为 10 J, 激光波长为 1 070 nm, 脉宽工作范围为 0.02~50 ms, 脉冲重复频率范围为 1~10 000 Hz。图 1(b) 为三维 DPC 陶瓷基板侧视图, 陶瓷基片材料为高热导率氮化铝 (AlN), 尺寸为 3.5 mm×3.5 mm×0.5 mm, 铜围坝结构通过电镀制备, 高度为 0.4 mm。图 1(c) 为三维 DPC 陶瓷基板正视图, 试验中选用的金属盖板为 4J29 可伐合金, 采用激光切割划片, 尺寸为 3.5

mm×3.5 mm×0.1 mm。图 2(a) 为三维 DPC 陶瓷基板气密封装示意图, 先将芯片贴装在陶瓷基板围坝内的金属焊盘上, 再通过引线键合实现电互连, 最后采用激光焊接实现金属盖板与基板围坝间键合。图 2(b) 为三维 DPC 陶瓷基板焊接示意图, 采用搭接焊形式, 搭接接头对金属盖板加工尺寸公差要求相对较低, 但需要通过焊接治具实现金属盖板与基板金属围坝间的对齐与定位。

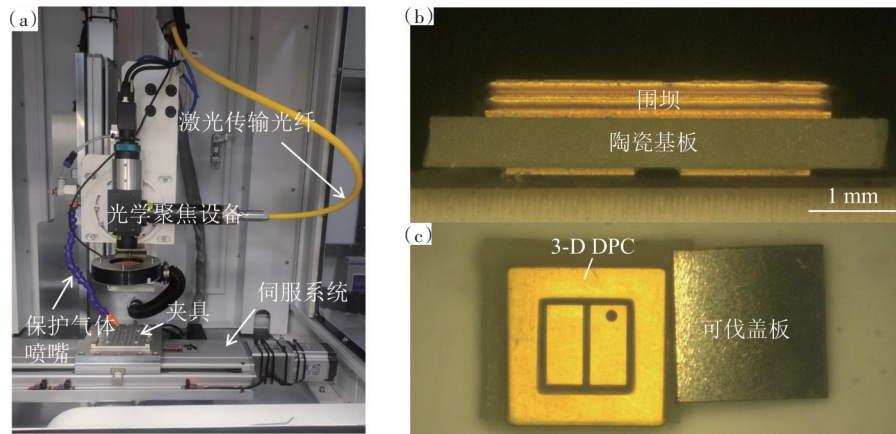


图 1 (a)激光焊接设备;(b)三维 DPC 陶瓷基板侧视图;(c)三维 DPC 陶瓷基板正视图

Fig.1 (a)Laser welding equipment. (b)Side view of 3-D DPC. (c)Front view of 3-D DPC

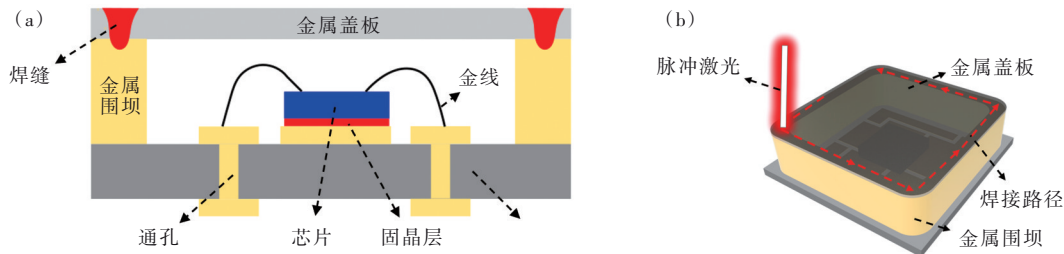


图 2 (a)三维 DPC 陶瓷基板激光封焊结构示意图;(b)三维 DPC 陶瓷基板激光封焊示意图

Fig.2 (a)Schematic diagram of 3-D DPC laser sealing structure. (b)Schematic diagram of laser sealing of 3-D DPC

2.2 脉冲激光焊接模式及接头质量影响分析

为实现气密性焊接的目的,有以下工艺要点:(1)选用合适的焊接模式。图 3 表示了脉冲激光束与焊接材料相互作用的三种模式:热传导模式,过渡模式和深熔焊模式。(2)连续脉冲叠加。焊接过程中,相邻两个激光脉冲中心点的距离需小于表层熔化直径,以实现熔融区域内裂纹消除及晶粒细化。(3)根据焊接材料种类和厚度,对焊缝重叠率进行调整实现气密焊接。李娜等^[28]对微波模块激光气密封焊研究表明,焊缝重叠率在 80% 以上时,微波模块焊接效果和封焊气密性较为理想。针对本研究可伐合金与三维 DPC 陶瓷基板激光封焊要求,我们设定了 3 组不同焊缝重叠率:35%、80% 和 95%,在

不同焊缝重叠率下封焊 10 个样品,成品率分别为 30%、100% 和 20%。从中可以看出,焊缝重叠率过低时,接头处存在孔隙,接头非气密;适当增加焊缝重叠率能够提高封焊样品成品率,但焊缝重叠率过高导致焊缝处温度过高,产生金属飞溅和贯穿裂纹等缺陷。本试验设定焊缝重叠率为 80%,此时焊缝组织均匀性好,接头气密性高。为提高实验效率,前期进行单脉冲点焊试验,对焊点横截面形貌进行磨样分析,确定热传导焊、过渡焊和深熔焊三种模式的峰值功率密度阈值,分别为 1.6, 2.4, 4 GW/m²。实验使用的光纤激光器光斑直径为 0.25 mm,根据三种模式的功率密度阈值和激光器光斑直径可以计算出每种模式下的激光峰值功率阈值(激光峰值

功率=峰值功率密度×光斑面积)分别为78.5, 117.8, 196.3 W。为了探究不同焊接模式对接头性能影响,设置了三个水平激光峰值功率:80, 120, 200 W。脉冲宽度对焊缝表面热影响区宽度有显著影响,通过点焊方法确定实现有效焊接的脉冲宽度阈值,从而设定激光峰值功率为80 W,在金属盖板焊接路径上均匀点焊,焊点相对于金属盖板中心轴对称分布。试验发现脉

冲宽度大于0.8 ms点焊后的金属盖板在外力作用下没有发生位置偏移,能够实现与铜围坝的预固定。为了分析不同脉冲宽度对焊缝表面形貌及氧化程度的影响,设置三个水平脉冲宽度:1, 2, 3 ms。根据上文分析计算得到激光峰值功率、脉冲宽度的理论值,然后设计全因子试验,分析上述参数因子对焊缝表面形貌、接头熔深、气密性以及剪切强度等影响。

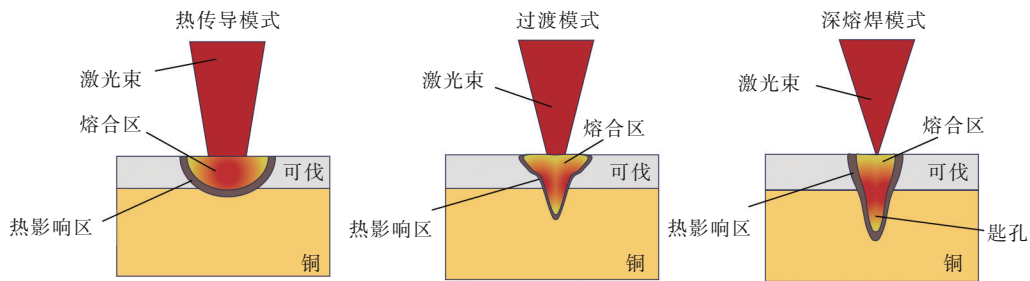


图3 脉冲激光与材料相互作用模式

Fig.3 Different modes of interaction of pulsed laser with materials

2.3 性能表征

采用超景深三维显微镜(VHX-600, KEYENCE, Japan)观察焊缝表面形貌及接头截面熔深;通过键合力测试机(MFM1200, TRY-Precision Co., Ltd., China)分析焊接组件剪切强度;采用氟油检测仪(MODEL 6000, Aetrium, USA)对封焊器件进行粗检漏;使用氦质谱仪(SFJ-231D, Wanyi Science and Technology Co., Ltd., China)进行细检漏。当焊接样品通过粗检且氦漏率值 $\leq 3.0 \times 10^{-9}$ Pa·cm³/s时,认为组件气密性检测合格(未发生漏气现象)。采用扫描电子显微镜(NovaNano-SEM450, FEI, USA)能量色散谱仪(EDS)对激光封焊区域进行成分分析。

3 结果与讨论

3.1 焊接接头微观形貌分析

图4为实施全因子试验后的焊缝表面形貌,焊接过程采用氮气进行保护,氮气喷嘴与试样夹角为30°,氮气流量为15 L/min。焊前使用酒精对试样进行超声清洗以去除表面油污。在低峰值功率和短脉冲宽度参数组合下,焊缝表面光亮,成形好,未出现裂纹等焊接缺陷。激光峰值功率恒定,脉冲宽度增大时,焊接熔池与空气混合加剧,导致焊缝表面氧化程度和金属飞溅物增加。此外,随着脉冲宽度增大,焊缝表面热影响区宽度也会随之扩大。激光峰值功率设定为200 W(图4(g)~

(i)),脉冲宽度从1 ms增加至2 ms,焊缝表面热影响区宽度由288 μm 扩大至366 μm ,且裂纹数量增多;当脉冲宽度增加至3 ms时,焊缝表面热影响区宽度已扩大至410 μm 。脉冲宽度恒定,激光峰值功率从80 W增大至120 W,焊缝表面出现少量金属飞溅物凝固;激光峰值功率进一步增大至200 W时,激光束与材料相互作用转变为深熔焊模式,焊缝表面出现大量金属飞溅物以及贯穿裂纹。

图5为焊接样品经过镶嵌、磨片和抛光处理后得到的接头截面形貌。图5(a)~(f)为采用热传导和过渡模式焊接的六组样品,可伐-铜接头处结合紧密,没有间隙;图5(g)~(i)为采用深熔焊模式焊接的三组样品,随着脉冲宽度增大,可伐-铜接头处结合间隙变大,焊接金属可伐在基底金属铜一侧的穿透深度增加,可伐合金侧均有微观裂纹产生。样品(c)、(e)、(f)平均输入功率分别为2.4, 2.4, 3.6 W,均高于样品(g)平均输入功率2 W,但只有样品(g)可伐合金侧有微观裂纹产生,说明平均输入功率的增加并不会直接引起接头处产生微观裂纹。

为确定接头处微观裂纹产生原因,通过能量色散谱仪(EDS)对接头选定区域进行扫描,分析不同工艺模式下的元素分布差异。图6(a)~(c)为热传导模式下可伐-铜接头截面EDS能谱图,可以看出可伐与铜间界面清晰,没有发生混溶;图6(d)线扫

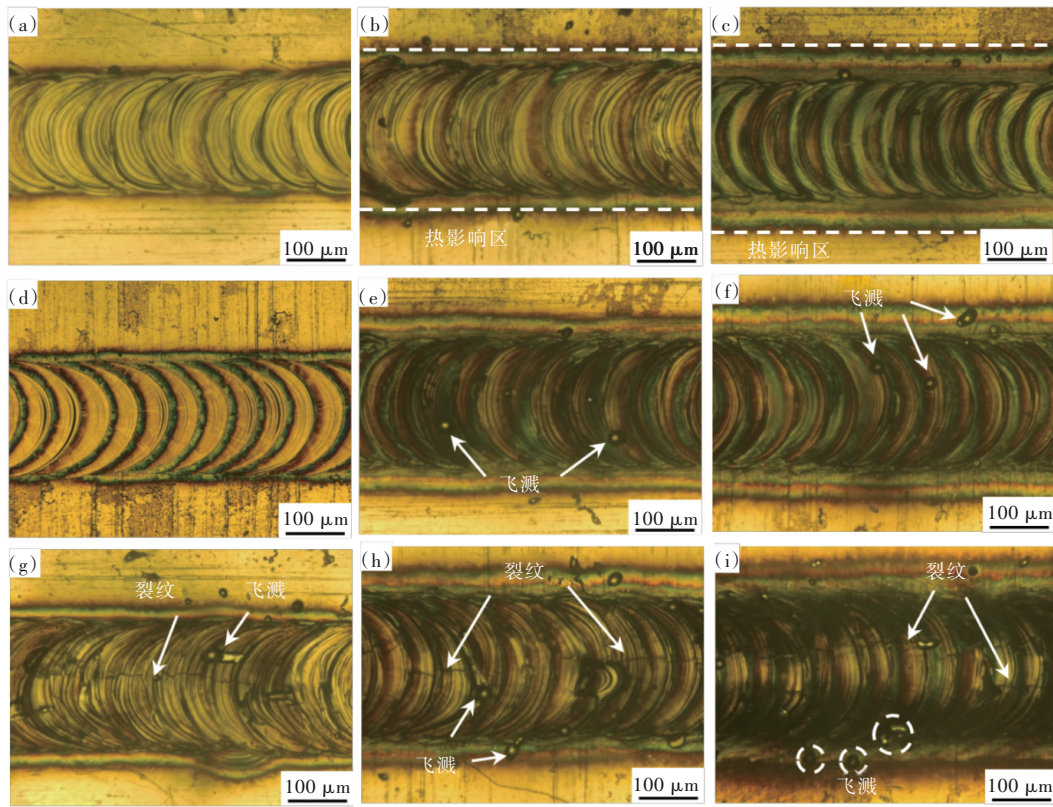


图 4 激光封焊表面形貌。(a)~(c)80 W@1~3 ms;(d)~(f)120 W@1~3 ms;(g)~(i)200 W@1~3 ms
 Fig.4 Laser sealing surface morphology. (a)~(c)80 W@1~3 ms. (d)~(f)120 W@1~3 ms. (g)~(i)200 W@1~3 ms

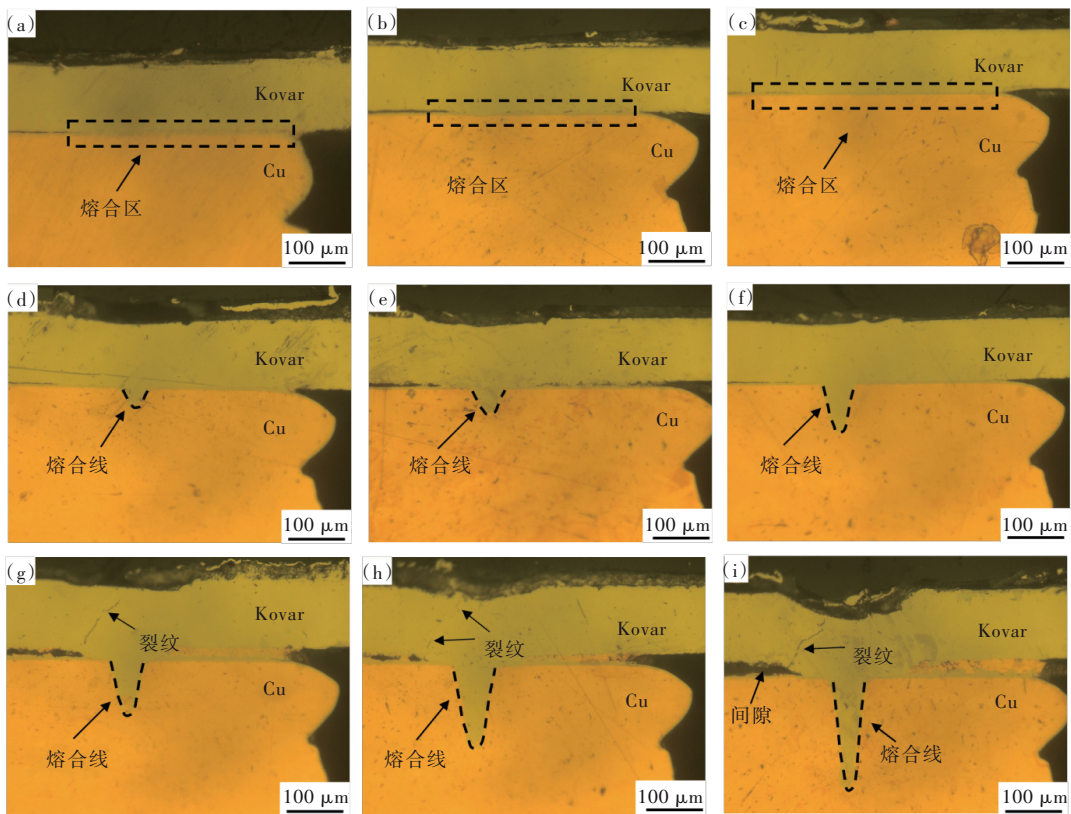


图 5 激光封焊接头截面形貌。(a)~(c)80 W@1~3 ms;(d)~(f)120 W@1~3 ms;(g)~(i)200 W@1~3 ms
 Fig.5 Cross-section morphology of laser sealing joint. (a)~(c)80 W@1~3 ms. (d)~(f)120 W@1~3 ms. (g)~(i)200 W@1~3 ms

描结果显示, Cu 元素含量在经过接头分界线后快速下降, 可伐侧几乎检测不到 Cu 元素; 图 6(e)~(g) 为过渡模式下可伐-铜接头截面 EDS 能谱图, 此时可伐合金在铜围坝侧的穿透深度有所增加, 两者发生轻微混溶; 图 6(h) 为线扫描结果, 表明在接头处出现长度为 50 μm 的熔合区域, 但在经过熔合区后 Cu 元素含量快速下降; 图 6(i)~(k) 为深熔焊模式下可伐-铜接头截面 EDS 能谱图, 此时在可伐合金侧已经能明显检测到 Cu 元素分布。图 6(l) 线扫描结果也证实了这一点, 经过熔合区后 Cu 元素含量未

出现明显下降, 含量与 Ni、Cr 元素相当。焊接金属可伐中铁元素占主导地位, 由于金属铜和铁的熔点不同(铜熔点为 1 083 $^{\circ}\text{C}$, 铁熔点为 1 535 $^{\circ}\text{C}$), 在冷却时, 富铜相处于液态的时间较长, 无法对焊接金属在凝固过程中产生的热应力进行补偿, 导致焊接金属侧出现裂纹; 深熔焊模式下, 在热毛细对流和马兰戈尼对流的共同作用下, 基底金属铜上浮进入焊接金属可伐合金侧熔池, 可伐合金侧 Cu 元素含量升高增加了其对于热裂纹的敏感性, 导致焊接区或热影响区裂纹产生。

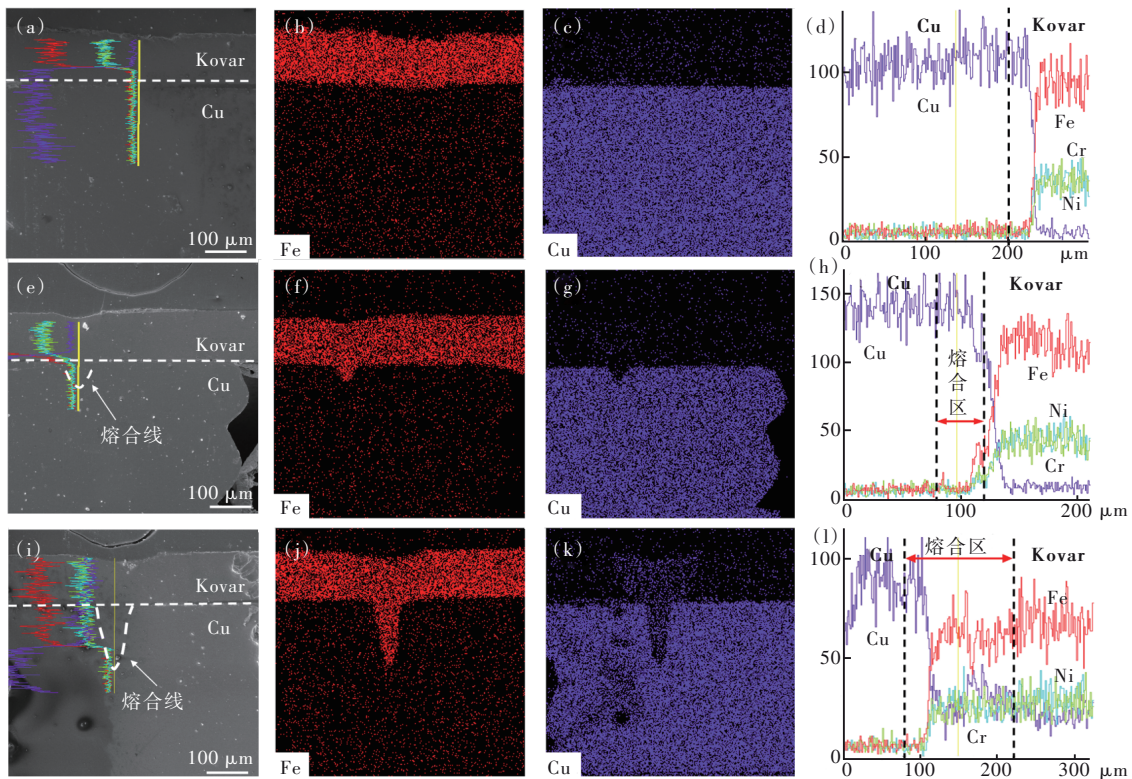


图 6 激光封焊接头元素分析。(a)~(d)热传导模式封焊样品;(e)~(h)过渡模式封焊样品;(i)~(l)深熔焊模式样品
Fig.6 Elemental scanning results of laser sealing joints. (a)~(d) Sealing samples in heat conduction mode. (e)~(h) Sealing samples in transition mode. (i)~(l) Sealing samples in keyhole mode

3.2 脉冲激光封焊气密性与力学性能分析

为评估焊接件性能, 对九组全试验样品进行了气密性和剪切强度测试, 每组包含三个子样品(样品组 1~9 分别对应图 4(a)~(i) 采用的工艺参数)。图 7(a)、(b) 为不同工艺参数下, 脉冲激光封焊样品泄漏率和接头剪切强度。热传导、过渡和深熔焊三种模式下封焊样品平均泄漏率分别为 1.63×10^{-9} , 7.84×10^{-10} , $3.89 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。其中热传导和过渡模式下焊接的样品满足 GJB 548C-2021《微电子器件试验方法和程序》中方法 1014.3 气密封装要求 ($3 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$); 而采用深

熔焊模式焊接的三组样品置入氟油检测仪后, 可伐盖板表面能明显观察到连续气泡产生。采用键合力测试仪对焊接件进行测试, 如图 8(a), 焊接件可伐盖板与铜围坝在接头处发生分离, 样品断裂面形貌如图 8(b)。热传导、过渡和深熔焊三种模式下封焊样品接头的平均剪切强度分别为 231.19, 296.42, 207.15 MPa。结合接头表面和截面形貌分析结果可知, 微观裂纹是引起深熔焊模式下封装结构气密性和力学性能下降的主要因素。激光峰值功率恒定时, 接头剪切强度随着脉冲宽度的增大而提高, 这是因为增加脉冲宽

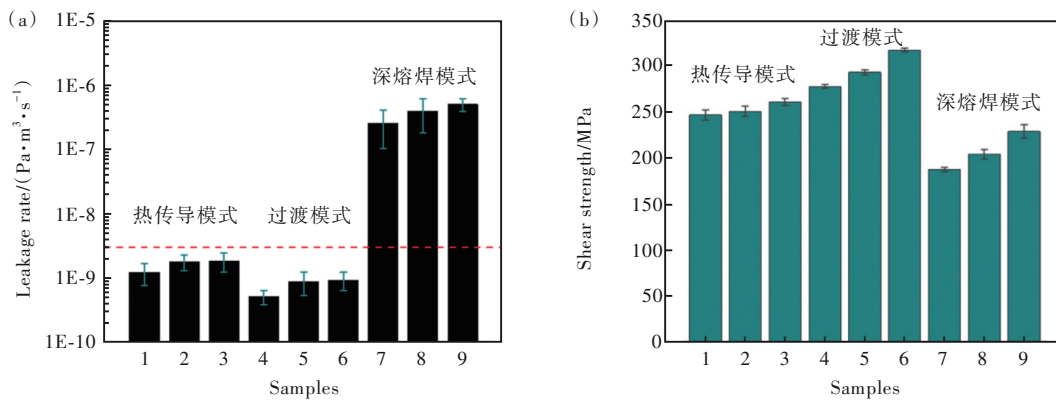


图7 激光封焊样品泄漏率(a)和剪切强度(b)

Fig.7 Air leakage rate(a) and shear strength(b) of laser sealing samples

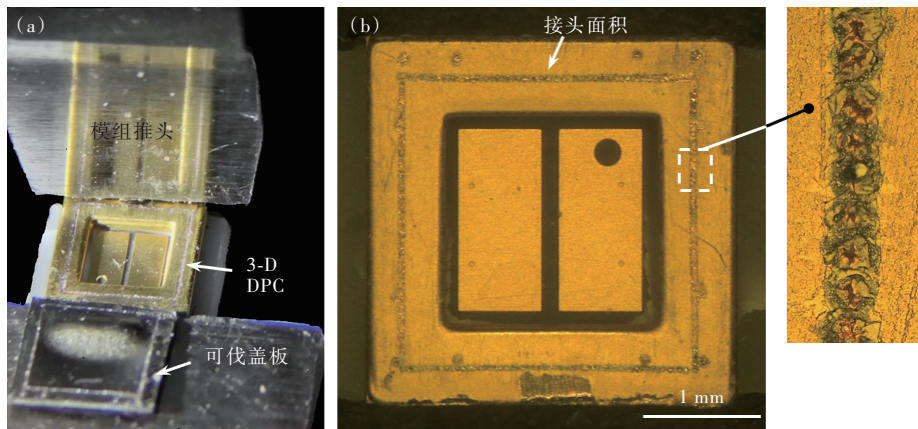


图8 (a)激光封焊样品剪切强度测试图;(b)剪切强度测试后封焊样品断裂面

Fig.8 (a)Shear force measurement of laser sealing samples. (b)Fracture surface of the sealing sample after shear strength testing

度使可伐合金与铜围坝接头处熔合区域更宽,熔深更深,结合面积有所增加。相比于脉冲宽度,激光峰值功率对于焊接接头处剪切强度的影响更显著。综合考虑焊件气密性、接头剪切强度以及脉冲宽度对焊缝表面热影响区的影响,对于厚度为0.1 mm的可伐合金盖板而言,最佳工艺参数为激光峰值功率120 W、脉宽1 ms,在该工艺参数下,可以得到泄漏率为 $5.2 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。接头剪切强度为278.06 MPa,焊缝成形好,热影响区小且没有裂纹、气孔等焊接缺陷的焊接接头。

3.3 三维DPC陶瓷基板板级封装

为了进一步提升封焊效率、焊接质量以及成品率,设计了采用磁吸夹紧的板级封焊夹具,预留出点焊空间,在预点焊时提供夹紧力,金属盖板实现对准且预焊结束后再进行完整路径焊接。板级三维DPC陶瓷基板激光封焊流程如图9所示,采用的工艺参数为激光峰值功率120 W,脉宽1 ms,焊缝重叠率80%。首先将可伐合金片进行切割和整形,在

本研究中通过激光切割得到尺寸为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 、切口平整光滑、无毛刺的可伐盖板;然后将预切好的可伐盖板和板级三维DPC陶瓷基板先后置于铜质仿形治具凹槽中,实现可伐盖板与基板围坝中心对齐;再将预置好可伐盖板和陶瓷基板的仿形治具放入铝合金夹具的定位槽中,铝合金夹具分为上板和下板两个部分,两者通过磁极吸引方式实现对准夹紧;接着采用脉冲激光进行预点焊,将可伐盖板固定在陶瓷基板电镀铜围坝上;最后采用脉冲激光配合焊接轨迹方向上合适的进给速率实现板级焊接。相比于单片手动激光封焊,板级封焊(一次封装单元为169片)效率大大提高(避免重复对准和定位)。对板级封焊样品切片后进行抽样检测,以确定焊接工艺的稳定性 and 可靠性。图10为25份抽检样品的泄露率和接头剪切强度测试结果,泄露率均能达到 $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级,平均泄露率为 $5.4 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;接头剪切强度平均值为280.59 MPa,满足半导体器件高可靠封装需求。

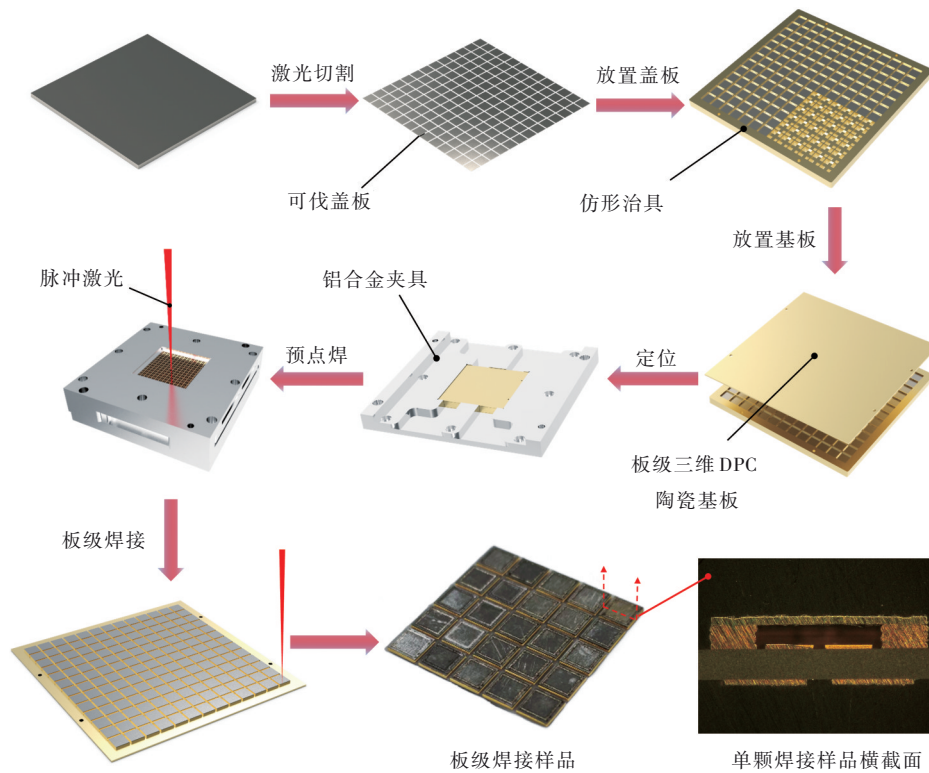


图 9 板级三维 DPC 陶瓷基板激光封焊流程图

Fig.9 Process flow of board-level 3-D DPC by laser sealing

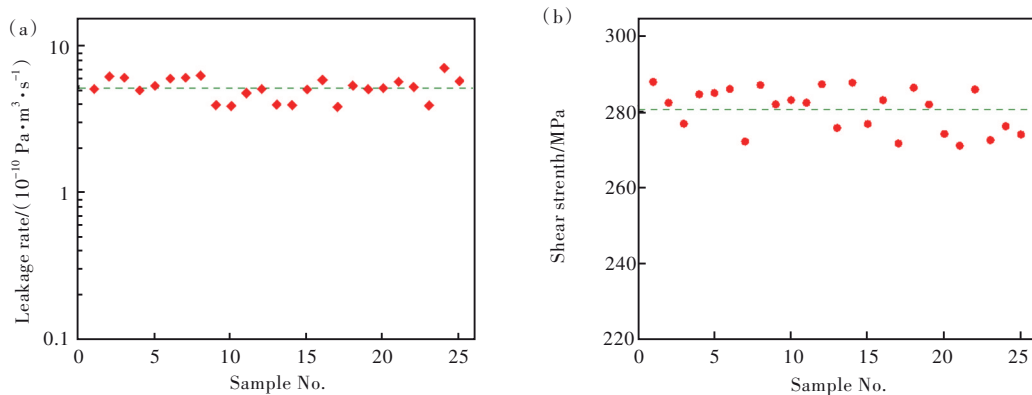


图 10 板级激光封焊样品泄漏率(a)和剪切强度(b)

Fig.10 Air leakage rate(a) and shear strength(b) of board-level sealing samples

4 结 论

本文提出采用脉冲激光焊接技术实现三维 DPC 陶瓷基板气密封装的方法,研究了焊接过程中脉冲激光与材料相互作用模式,分析了焊接件气密性及力学性能。通过点焊试验确定了三种焊接模式下的激光峰值功率阈值。优化试验得到厚度为 0.1 mm 可伐合金盖板与铜围坝最佳封焊工艺为:激光峰值功率 120 W、脉宽 1 ms、重叠率 80%。在该焊接工艺参数下,可以得到泄漏率为 $5.2 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,剪切强度为 278.06 MPa,焊缝

成形好,热影响区小且没有裂纹、气孔等焊接缺陷的焊接接头。激光封焊过程中需要控制焊接熔深,减少基板金属铜向可伐合金侧扩散。为了提高封焊效率和焊接质量,设计了三维陶瓷基板板级激光封焊夹具,采用该夹具实现了平均泄漏率为 $5.4 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、平均剪切强度为 280.59 MPa 的板级封装。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230318>.

参 考 文 献:

- [1] HAGLER P, HENSON P, JOHNSON R W. Packaging technology for electronic applications in harsh high-temperature environments [J]. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011, 58(7): 2673-2682.
- [2] HASSAN A, SAVARIA Y, SAWAN M. Electronics and packaging intended for emerging harsh environment applications: a review [J]. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.*, 2018, 26(10): 2085-2098.
- [3] 刘佳欣, 彭洋, 胡剑雄, 等. 耐高温微系统气密封装技术及高温可靠性研究 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2023, 53(4): 803-814.
LIU J X, PENG Y, HU J X, *et al.* High-temperature microsystem packaging technology and high-temperature reliability [J]. *Sci. Sinica Inform.*, 2023, 53(4): 803-814. (in Chinese)
- [4] PUSHPAKARAN B N, SUBBURAJ A S, BAYNE S B. Commercial GaN-based power electronic systems: a review [J]. *J. Electron. Mater.*, 2020, 49(11): 6247-6262.
- [5] LAU J H. Recent advances and trends in advanced packaging [J]. *IEEE Trans. Compon. Packaging Manuf. Technol.*, 2022, 12(2): 228-252.
- [6] 万垂铭, 曾照明, 肖国伟, 等. 高气密性的深紫外 LED 半无机封装技术 [J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1842-1848.
WANG C M, ZENG Z M, XIAO G W, *et al.* Semi-inorganic packaging technology of DUV-LEDs with high-vapor tightness [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1842-1848. (in Chinese)
- [7] 张学斌. 镀铜陶瓷基板制备与 LED 封装应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
ZHANG X B. *Research on the Development and Applications of Direct Plated Copper Substrate for LED Packaging* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [8] 李婷婷, 彭超群, 王日初, 等. 电子封装陶瓷基板材料的研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(7): 1365-1374.
LI T T, PENG C Q, WANG R C, *et al.* Research progress in ceramic substrate material for electronic packaging [J]. *Chin. J. Nonferrous Met.*, 2010, 20(7): 1365-1374. (in Chinese)
- [9] 王哲, 王永通, 刘佳欣, 等. 内嵌陶瓷电路板的 PCB 基板制备及其 LED 封装性能 [J]. *发光学报*, 2022, 43(7): 1139-1146.
WANG Z, WANG Y T, LIU J X, *et al.* Preparation of PCB substrate embedded with ceramic circuit board and performance of LED packaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(7): 1139-1146. (in Chinese)
- [10] 程浩, 陈明祥, 罗小兵, 等. 电子封装陶瓷基板 [J]. *现代技术陶瓷*, 2019, 40(4): 265-292.
CHENG H, CHEN M X, LUO X B, *et al.* Ceramic substrate for electronic packaging [J]. *Adv. Ceram.*, 2019, 40(4): 265-292. (in Chinese)
- [11] CHENG H, MOU Y, PENG Y, *et al.* White LEDs with high optical consistency packaged using 3D ceramic substrate [J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2019, 31(22): 1818-1821.
- [12] 柴伟伟, 陈清华, 李琳红, 等. 大功率 LED 灯珠与散热器直焊结构散热效果分析 [J]. *发光学报*, 2011, 32(11): 1171-1175.
CHAI W W, CHEN Q H, LI L H, *et al.* Heat dissipation analysis of high power LED connected to copper coated heat sink by soldering [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(11): 1171-1175. (in Chinese)
- [13] 朱雨生, 施静, 陈承. 混合集成技术代际及发展研究 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2021, 16(5): 438-450.
ZHU Y S, SHI J, CHEN C, *et al.* Research on intergenerational and development of hybrid integration technology [J]. *J. China Acad. Electron. Inf. Technol.*, 2021, 16(5): 438-450. (in Chinese)
- [14] GUO X G, XUE Z G, ZHANG Y H. Manufacturing of 3D multifunctional microelectronic devices: challenges and opportunities [J]. *NPG Asia Mater.*, 2019, 11(1): 29.
- [15] 彭洋, 陈明祥, 罗小兵. 深紫外 LED 封装技术现状与展望 [J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 542-559.
PENG Y, CHEN M X, LUO X B. Status and perspectives of deep ultraviolet LED packaging technology [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(4): 542-559. (in Chinese)
- [16] ZENG G, MCDONALD S, NOGITA K. Development of high-temperature solders: review [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2012, 52(7): 1306-1322.

- [17] PENG Y, LIANG R L, MOU Y, *et al.* Progress and perspective of near-ultraviolet and deep-ultraviolet light-emitting diode packaging technologies [J]. *J. Electron. Packag.*, 2019, 141(4): 040804.
- [18] 杨呈祥, 李欣, 孔亚飞, 等. 纳米银焊膏封装大功率 COB LED 模块的性能研究 [J]. *发光学报*, 2016, 37(1): 94-99.
YANG C X, LI X, KONG Y F. High power COB LED modules attached by nanosilver paste [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(1): 94-99. (in Chinese)
- [19] MARTINS J, EMAMI S, MADUREIRA R, *et al.* Novel laser-assisted glass frit encapsulation for long-lifetime perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2020, 8(38): 20037-20046.
- [20] KUMAR N, MUKHERJEE M, BANDYOPADHYAY A. Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2017, 88: 24-39.
- [21] YAAKOB K I, ISHAK M, QUAZI M M, *et al.* Optimizing the pulse wave mode low power fibre laser welding parameters of 22Mn5 boron steel using response surface methodology [J]. *Measurement*, 2019, 135: 452-466.
- [22] INDHU R, DIVYA S, TAK M, *et al.* Microstructure development in pulsed laser welding of dual phase steel to aluminium alloy [J]. *Procedia Manuf.*, 2018, 26: 495-502.
- [23] CHLUDZINSKI M, DOS SANTOS R E, CHURIAQUE C, *et al.* Pulsed laser butt welding of AISI 1005 steel thin plates [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2021, 134: 106583.
- [24] QUAZI M M, ISHAK M, FAZAL M A, *et al.* Current research and development status of dissimilar materials laser welding of titanium and its alloys [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 126: 106090.
- [25] SÁNCHEZ-AMAYA J M, DELGADO T, GONZÁLEZ-ROVIRA L, *et al.* Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, 255(23): 9512-9521.
- [26] XUE X, PEREIRA A B, AMORIM J, *et al.* Effects of pulsed Nd:YAG laser welding parameters on penetration and microstructure characterization of a DP1000 steel butt joint [J]. *Metals*, 2017, 7(8): 292.
- [27] ABIOYE T E, ZUHAILAWATI H, AIZAD S, *et al.* Geometrical, microstructural and mechanical characterization of pulse laser welded thin sheet 5052-H32 aluminium alloy for aerospace applications [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2019, 29(4): 667-679.
- [28] 李娜, 吴洪江. 常用封装材料的激光封焊工艺研究 [J]. *半导体技术*, 2013, 38(3): 216-221.
LI N, WU H J. Research on laser seal welding technology of the common package materials [J]. *Semicond. Technol.*, 2013, 38(3): 216-221. (in Chinese)



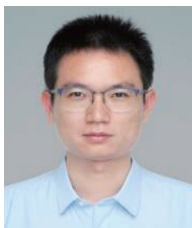
罗霖(2000-),男,湖南郴州人,硕士研究生,2022年于华中农业大学获得学士学位,主要从事先进电子封装技术研究。

E-mail: luo_lin@hust.edu.cn



陈明祥(1970-),男,湖北应城人,博士,教授,博士生导师,2006年于华中科技大学获得博士学位,主要从事先进电子封装技术与产业化研究。

E-mail: chimish@hust.edu.cn



彭洋(1989-),男,安徽六安人,博士,副教授,硕士生导师,2017年于华中科技大学获得博士学位,主要从事微纳制造与电子封装技术研究。

E-mail: ypeng@hust.edu.cn