

# 激光与光电子学进展

## 激光微纳连接技术研究进展

张丽丽<sup>1,2</sup>, 孙树峰<sup>1,2\*</sup>, 王茜<sup>1,2</sup>, 张丰云<sup>1,2</sup>, 王萍萍<sup>2</sup>, 曹成铭<sup>3,4</sup>, 张子宾<sup>5</sup>

<sup>1</sup>青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520;

<sup>2</sup>山东省激光绿色高效智能制造工程技术研究中心, 山东 青岛 266520;

<sup>3</sup>中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116;

<sup>4</sup>山东能源重装集团恒图科技有限公司, 山东 泰安 271222;

<sup>5</sup>青岛国骐光电科技有限公司, 山东 青岛 266109

**摘要** 激光微纳连接技术是实现微纳米结构、电子元器件批量化生产的基础,是微纳制造领域的关键技术。在简要介绍微纳连接技术的应用需求和主要技术方法的基础上,重点对微纳尺度的激光连接技术进行了分析和论述。首先介绍了激光连接技术的尺寸范围,然后根据其工艺特性的不同选取三种典型的激光微纳连接技术,即激光微焊接,微纳尺度的激光软钎焊和激光植球,分别论述该三种技术的加工原理及特点、工艺参数和应用现状。通过对激光微纳连接技术工艺参数的研究和应用现状的总结,探讨激光微纳连接技术在航空航天、微电子封装、医疗器件等领域的重要应用,并对激光微纳连接技术的发展方向和未来研究工作进行了总结。

**关键词** 激光光学; 激光微纳连接; 激光微焊接; 激光软钎焊; 激光植球

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0300003

## Research Progress of Laser Micro-Nano Connection Technology

Zhang Lili<sup>1,2</sup>, Sun Shufeng<sup>1,2\*</sup>, Wang Xi<sup>1,2</sup>, Zhang Fengyun<sup>1,2</sup>, Wang Pingping<sup>2</sup>,  
Cao Chengming<sup>3,4</sup>, Zhang Zibin<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;*

<sup>2</sup>*Shandong Research Center of Laser Green and High Efficiency Intelligent Manufacturing Engineering Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;*

<sup>3</sup>*School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;*

<sup>4</sup>*Shandong Energy Heavy Industry Group Hengtu Technology Co., Ltd., Taian, Shandong 271222, China;*

<sup>5</sup>*Qingdao Gocci Opto-Electronics Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266109, China*

**Abstract** Laser micro-nano connection technology is the basis for mass production of micro-nano structures and electronic components, and is a key technology in the field of micro-nano manufacturing. Based on a brief introduction to the application requirements and main technical methods of micro-nano connection technology, this paper focuses on the analysis and discussion of the micro-nano-scale laser connection technology. Firstly, the dimension range of laser connection technology is introduced, and then three typical laser micro-nano connection

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-05-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51775289)、山东省自然科学基金重大项目(ZR2018ZB0524)、山东省重点研发计划项目(2019GX104097)

通信作者: \*shufeng2001@163.com

technologies are selected according to the different process characteristics, namely laser micro welding technology, micro-nano-scale laser soldering technology and laser soldering bumping technology, the research on the processing principles and characteristics, process parameters and application status of the three technology are reviewed, respectively. Through the summary of the research and application status of laser micro-nano connection technology, this paper discusses the important role of laser micro-nano connection technology in the field of aerospace, microelectronic packaging, medical device, etc., and summarizes the development direction and future research work of laser micro-nano connection technology.

**Key words** laser optics; laser micro-nano connection; laser micro welding; laser soldering; laser soldering bumping

## 1 引 言

连接,不论在宏观、微观还是纳观尺度都是结构制造、功能器件制备和组装过程的重要部分,目的是获得机械联接和支持、电气连接等功能,其质量决定了产品的可靠性<sup>[1-2]</sup>。随着航空航天、医疗器件、微电子封装等领域的技术进步,产品逐步向多功能、小型化等方向发展,伴随微纳连接器件不断增长的需求,对其性能的要求也更加苛刻,使得微连接和纳连接的制造地位日渐突出,成为当今材料连接的热点之一。微纳连接除了满足结构的完整、良好的力学性能等基本要求外,还要具备光、电、生物等其他特殊性能,例如植入性的医疗器件,在保持基本功能的基础上还要考虑耐腐蚀性、生物相容性以及人体内的稳定性。目前应用于微连接和纳连接的主要方法有钎焊、电子束焊、电阻微焊、超声波焊、激光微焊以及固态扩散焊等<sup>[3-8]</sup>。

由于微纳连接器件的微型化发展趋势,对元器件的连接精度要求日益增高,传统的连接方式正面临着巨大挑战,如微纳领域中电子元器件高密度引线的连接,透明材料之间的连接等难题。传统的连接方式已不能满足现在的连接需求,迫切需要一种新的高精密连接方法。激光连接技术是利用高能量激光束作用在小范围内使工件瞬间熔化、连接和快速冷却的高精密制造技术,它不仅可以实现器件的批量精密化连接,而且能够满足在微纳连接领域的技术需求。

激光微纳连接技术按其工艺特性可以划分为激光微焊接技术、微纳尺度的激光软钎焊技术和激

光植球技术。激光微焊接技术最早追溯到1976年, Hopkins等<sup>[9]</sup>利用激光微点焊技术实现电子枪阴极射线管的制造。随着激光微焊接技术的发展,被广泛应用于汽车传感器组件、航空发动机等领域<sup>[10]</sup>。激光软钎焊技术可以追溯到1974年, Bohman首次将激光技术和软钎焊技术相结合,实现了细间距的电子元器件连接,为电子元器件在微纳领域的连接创造了可能,同时随着激光软钎焊技术的不断发展,被广泛应用于微、纳米尺度的电子封装、航空电缆组件等领域<sup>[11-12]</sup>。激光植球技术是在激光软钎焊设备的基础上发展而来的新型连接技术,可以实现焊球和焊盘一次植球的精准定位,在微、纳米尺度的微电子领域得到广泛应用<sup>[13-14]</sup>。本文简单介绍了三种典型的激光微纳连接技术的加工原理和特点,即激光微焊接、微纳尺度内的激光软钎焊和激光植球,阐述了各工艺参数对焊缝形貌的影响规律,总结了三种技术国内外应用现状和研究进展。

## 2 激光微纳连接技术的尺度分类

激光连接技术的分类有多种形式,按照连接材料尺寸的不同可以划分为激光微纳连接技术和激光常规连接技术,两者的区别在于被连接材料中引入微纳尺度结构。微连接和纳连接是按照广义的概念进行划分,连接类型如表1所示,尺寸大小是指被连接材料在某一维度的尺寸范围。激光微纳连接技术一般是以被连接材料的尺寸作为基准进行分类,如被连接材料的厚度在500 μm以下可以称为激光微连接技术,厚度大于1 mm可以称为激光连接技术。

表1 按照被连接材料尺寸分类的连接类型<sup>[15]</sup>

Table 1 Joining categories based on size of connected materials<sup>[15]</sup>

Connection type	Macro connections	Submilli connection	Micro connection	Submicron connection	Nano connection
Dimension range	≥1 mm	0.5-1 mm	1-500 μm	0.1-1 μm	1-100 nm

由于微连接和纳连接是广义的术语,激光微纳连接技术的定义松散。因此,在实际的工业应用中严格按被连接材料的尺寸定义并不严谨,也会使用其他方式定义激光微纳连接,如工艺特征、使用设备的精度、焊缝的尺寸等。例如半导体激光软钎焊在板厚为 1 mm 的材料上组装器件形成 200  $\mu\text{m}$  焊缝,可以称为激光微连接技术;利用激光焊点技术将两块板厚分别为 1 mm 和 0.1 mm 的铝合金搭接接头,形成的焊点尺寸为 150  $\mu\text{m}$ ,也称为激光微连接技术。

### 3 激光微焊接技术

#### 3.1 激光微焊接原理及特点

激光微焊接技术与常规激光焊接技术区别在于激光光斑、被焊接材料等尺寸在微、纳米尺度。通常,激光微焊接是指至少在某一尺度小于 500  $\mu\text{m}$  的零件通过激光焊接实现连接。激光微焊接是通过聚焦激光束直接辐射焊接材料,材料吸收能量后急剧升温,在小范围内发生熔化、气化等现象,使材料熔化与焊接件连接在一起。根据激光聚焦功率密度的不同<sup>[16-17]</sup>,分为热导焊(功率密度小于  $10^5 \text{ W/cm}^2$ )和深熔焊(功率密度大于或等于  $10^5 \text{ W/cm}^2$ ),如图 1 所示。

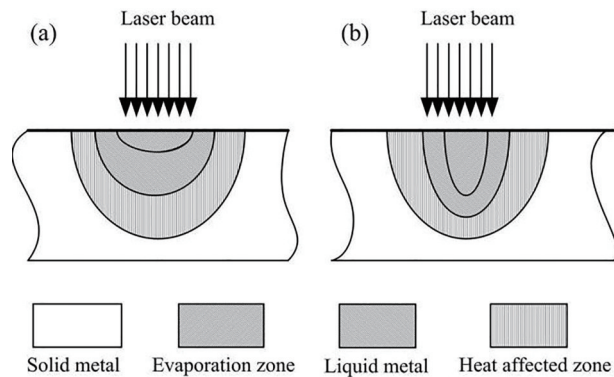


图 1 激光焊接过程中不同的焊接模式<sup>[18]</sup>。(a)热传导焊;  
(b)深熔焊

Fig. 1 Different welding modes in laser micro welding<sup>[18]</sup>.

(a) Heat conduction welding; (b) deep penetration welding

传统的焊接相比,激光微焊接具有以下优点:

1) 焊接变形和焊接残余应力小。高能量激光束作用在局部小范围,可以在极短的时间内完成加热和冷却,产生的热变形和残余应力小。

2) 易于实现自动化。激光束能够远距离精准定位焊接部位,可以实现大批量的自动化生产。

3) 适用范围广。激光束不受材料的强度、脆性等机械性能的限制,可以对难熔金属(如钨、钼等)、热物理性能相差悬殊的工件、异种材料、磁性材料、透明材料等进行焊接。

激光微焊接技术具有光斑小、焊缝窄等特点,可以实现微米级尺度接头的可靠连接,但是激光微焊接技术在纳米级尺度的连接中存在严重的缺陷。如连接厚度小于 100  $\mu\text{m}$  的材料时,激光微焊接技术受激光光斑、材料厚度、焊接精度等因素的影响,激光束会对焊接区域以外的部位造成热损伤,因此需要借助特殊的夹具来限制被连接材料。借助特殊的夹具可以实现被连接材料的连接,但是在一定程度上会损失激光能量,且焊接的可靠性低。

#### 3.2 激光微焊接工艺参数研究

激光微焊接技术的加工质量主要受焊接速度、焊接时间、激光功率、离焦量、扫描方式及保护气体等工艺参数的影响。

1) 激光功率和焊接速度<sup>[19-23]</sup>。从图 2 可以看出,随着激光功率的增加和焊接速度的降低,熔池深度增加,反之激光功率过低或焊接速度过快产生熔深浅,焊接不充分。这是因为焊接的效果与材料的受热熔化密切相关,增大激光功率或减小焊接速度都会在热累积效应下产生更多的能量,促使工件表面材料熔化形成焊缝,同时工件表面的激光功率

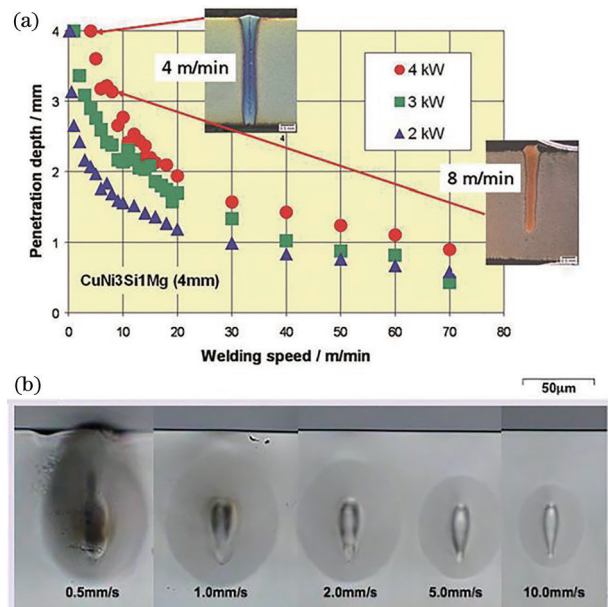


图 2 激光微焊接下熔深随激光功率和扫描速度的变化<sup>[19-20]</sup>

Fig. 2 Variation of penetration depth in laser micro welding with laser power and welding speed<sup>[19-20]</sup>



密度越高产生的熔池深度越深。此外,西安交通大学孙旭等<sup>[21]</sup>采用光纤激光器在 DP590 钢板上研究焊接速度对熔深的影响,通过仿真模拟和试验对比探究在试验中熔深受匙孔吸收能量的影响,焊接速度在 0.055 m/s 和 0.065 m/s 时熔深发生突变,整体趋势随焊接速度的增加熔深呈阶段性上升变化。

2) 保护气体<sup>[24-28]</sup>。从图 3(a)可以看出,在无保护气体的条件下不同的焊接速度对熔深的影响明显,当焊接速度达到 60 mm/s 时焊缝的熔宽均匀一致;在保护气体的作用下无论焊接速度多大得到的焊缝熔宽均匀一致,焊接过程稳定。这是因为在激光微焊接中保护气体不仅可以避免焊缝发生氧化,还可以降低空气电离抑制等离子体,提高焊缝质量。进一步分析在不同气体压强下激光微焊接对焊接接头形貌组织的影响,气体压强在 100 mbar 时焊缝周围产生的热影响区最大,随着气体压强的降低,空气中氧气的含量降低,激光烧蚀减弱使得焊缝逐渐变得干净,如图 3(b)所示。

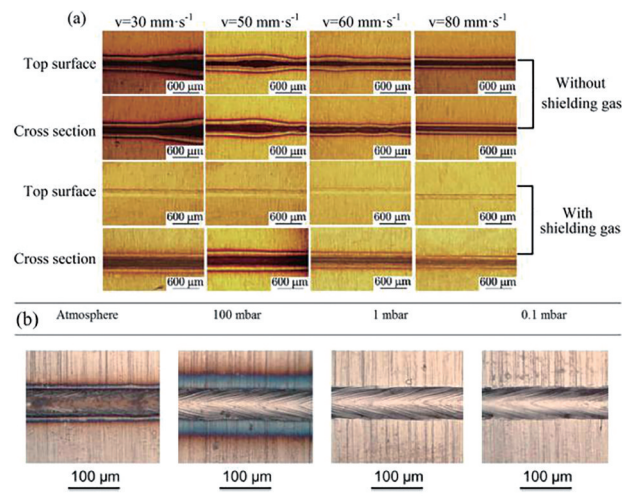


图 3 激光微焊接下不同加工环境对焊缝的形貌影响。(a)有、无保护气体下焊缝的形貌<sup>[27]</sup>; (b)不同压强下焊缝形貌<sup>[28]</sup>

Fig. 3 Influence of different processing environments on weld morphology under laser micro welding. (a) Morphology of weld under with and without shielding gas<sup>[27]</sup>; (b) weld morphology under different pressure<sup>[28]</sup>

3) 扫描方式<sup>[29-32]</sup>。激光扫描方式的改变可以有效地解决焊接中焊缝质量差、接头强度不足等问题,这是因为激光扫描加工不仅可以抑制等离子体的生成,保持熔池稳定,还可以抑制焊缝中凝固裂纹的出现。此外,焊缝的形状与激光扫描的路径相关,在环切扫描方式下得到的焊缝深度随扫描路径

呈锯齿状分布,焊缝外观质量相对较差;直线扫描方式可以抑制大颗粒焊料的飞溅和焊缝表面缺陷的形成,得到质量较好的焊缝,如图 4 所示。

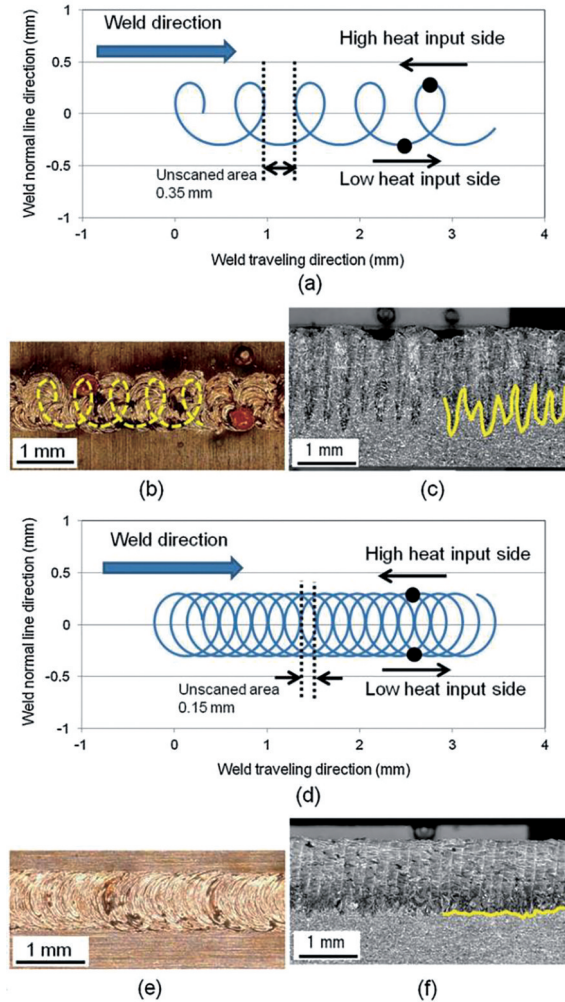


图 4 激光微焊接下不同扫描方式的焊缝形貌<sup>[32]</sup>。

(a)~(c)环切扫描; (d)~(f)直线扫描

Fig. 4 Weld morphology of different scanning methods under laser micro welding<sup>[32]</sup>. (a)~(c) Circumcision scan; (d)~(f) linear scan

4) 离焦量<sup>[33]</sup>。离焦量是指激光焦点与材料表面的距离,位于焦点中心的功率密度最高,远离中心的位置功率密度相对较弱,激光束在焦平面上上下对称分布,因此无论是正离焦还是负离焦都影响激光的功率密度。如图 5 所示,离焦量相同时,正离焦得到的焊缝表面质量好,负离焦得到的表面较为粗糙。这是因为在负离焦状态下激光辐射在材料表面的光斑增大,工件内部的能量密度高于表面,导致材料发生熔化、气化;在正离焦下激光能量以热传导的方式进入材料内部,产生的熔池较小,焊缝表面质量相对较好。离焦量可以调整聚焦在材料



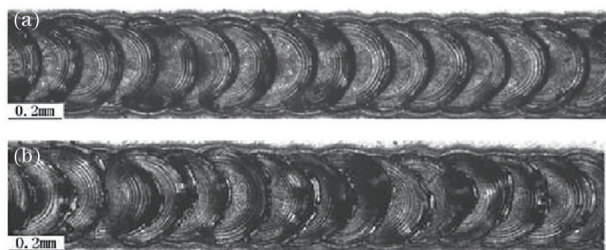


图 5 激光微焊接下在不同离焦量下的焊缝形貌<sup>[33]</sup>。(a)在正离焦状态焊缝形貌;(b)在负离焦状态焊缝形貌

Fig. 5 Weld morphology under different defocusing amount under laser micro welding<sup>[33]</sup>. (a) Weld morphology in positive defocusing state; (b) weld morphology in negative defocus state

表面的光斑大小,影响表面的功率密度改变熔深,因此应根据材料的厚度选择合适的离焦量。一般来说,正离焦时工件表面温度高得到的熔深浅,适合薄板的连接;负离焦时工件内部温度高于表面,适合厚板的连接。

### 3.3 激光微焊接技术的应用现状

激光微焊接技术是将高功率密度的激光束作用在工件上以实现连接的一种高精度连接方法,广泛应用于微、纳米尺寸的生物医药、微型电子、航空航天等领域。

在生物医药方面,Esposito等<sup>[34]</sup>将波长为810 nm的低功率二极管激光器应用于人体脑内微血管缝合手术中,通过红外热成像技术对温度进行实时监控,控制焊接过程中产生的热效应。试验结果表明,激光连接后的血管没有血栓或漏点的显现,有效地缩短了血管阻塞时间,在一定程度上加快了血管缝合进程。NiTi形状记忆合金(NiTi SMA)是一种具有良好形状记忆效应、生物相容性

的新型功能材料,是制造血管支架的理想材料。由于激光束作用在局部范围产生的热变形小,在激光微焊接NiTi合金中发现基体与焊接部位的形状记忆效应相同,对此国内外研究学者做了大量的研究<sup>[35-37]</sup>。太原理工大学Dong等<sup>[38]</sup>采用波长为1064 nm的Nd:YAG激光器连接血管支架,试验发现用激光微焊接技术形成的NiTi SMA焊接接头平滑无缺陷,在手术过程中可以降低对器官和组织的损伤,如图6所示。

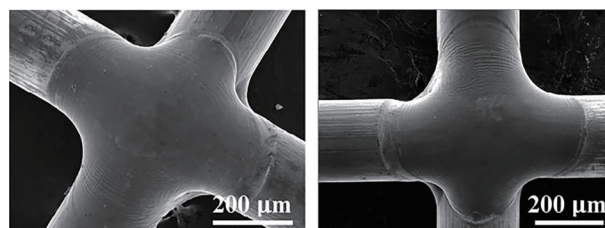


图 6 激光微焊接 NiTi SMA 的焊接形貌<sup>[38]</sup>

Fig. 6 Welding morphology of laser micro-welded NiTi SMA<sup>[38]</sup>

纳米结构方面,纳米线或纳米纤维在广义上是指直径在1~100 nm以内,长度方向没有限制的一维结构<sup>[39]</sup>,激光微焊接技术是利用直径很小的激光束实现纳米连接的关键技术。为实现纳米器件的无损伤连接问题,国内外研究学者提出将激光微焊接技术应用于纳米线连接。Kim等<sup>[40]</sup>采用波长为532 nm、脉宽为30 ps的Nd:YAG激光器实现了金纳米颗粒与铜结合在一起形成单一相,如图7(a)所示。She等<sup>[41]</sup>采用波长为1064 nm、脉宽为1 ms的Nd:YAG激光器实现了W<sub>18</sub>O<sub>49</sub>纳米针尖和微针尖的点焊连接,如图7(b)所示。碳纳米管材料是制备场发射阴极的重要材料,但碳纳米管与金属基体间

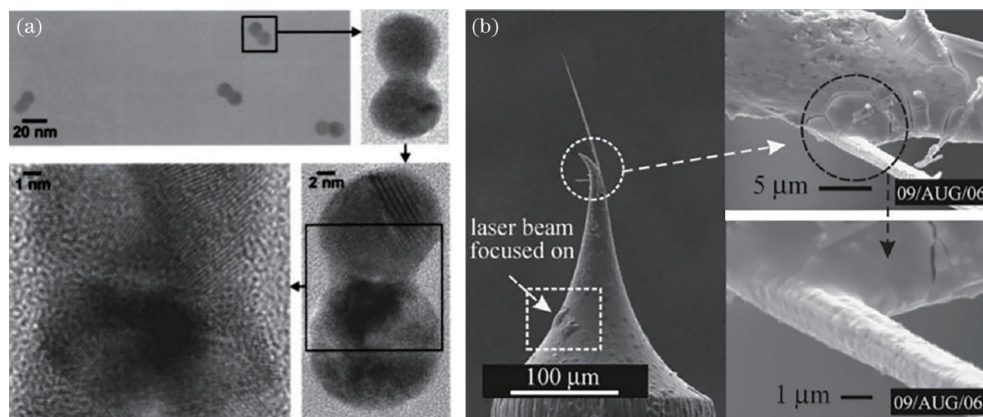


图 7 激光微焊接纳米结构的显微图像<sup>[40-41]</sup>。(a)激光微焊接金纳米粒子;(b)激光微焊接纳米针尖

Fig. 7 Microscopic images of laser micro-welded nanostructures<sup>[40-41]</sup>. (a) Laser micro welding of gold nanoparticles; (b) laser micro welding nano-tip

不易形成可靠的电接触,限制了电子元器件的发展。国内外学者研究发现激光微焊接技术是构筑场发射阴极的有效手段,能够使碳纳米管与金属基底形成稳固的连接<sup>[42]</sup>。Bhat 等<sup>[43]</sup>采用 Nd:YAG 激光器连接多壁碳纳米管(MWCNTs)和 Cu-10Sn 合金复合材料,试验发现焊接后的碳纳米管附着在 Cu-10Sn 合金复合材料的基底上,同时应变硬化、力学性能和热性能增强,推动了超高性能微纳电子器件的规模化生产。激光微焊接技术在纳米结构的应用,有效地解决了纳米级材料的加工尺寸小、连接质量不稳定等缺陷,推动了纳米级元器件的规模化生产。

在透明材料方面,玻璃作为一种硬脆性的透明材料,在长脉冲激光焊接过程中不易吸收激光能量,同时热效应会使其发生膨胀破裂等问题难以实现玻璃连接。随着激光技术的发展,国内外研究学者发现超短脉冲激光的冷加工、加工精度高、不易

产生破裂等特点,提出利用超短脉冲激光连接玻璃<sup>[44-47]</sup>。研究人员先后利用超短脉冲激光连接透明材料,通过控制激光能量、离焦量等工艺参数在无需光学接触的条件下实现了透明玻璃的永久性连接<sup>[48-49]</sup>。Hélie 等<sup>[50]</sup>采用波长为 787 nm、脉宽为 70 fs 的激光器在不损害光纤传输性能的条件下实现了光纤端帽和玻片的连接。意大利的 Volpe 等<sup>[51]</sup>采用波长为 1030 nm、脉宽为 30 fs 的脉冲激光器实现了高分子聚合材料的连接,通过激光微焊接技术对聚合物基微流通道进行封装得到高密封性的微流器件,如图 8 所示。超短脉冲激光在透明介质中发生非线性吸收、多光子吸收、等离子体形成等现象可以实现玻璃、有机聚合物等材料的连接<sup>[52]</sup>,为激光微焊接透明材料的工业化生产提供了新思路,但在无光学接触的玻璃焊接中还存在焊缝较大的情况,不能满足高精密焊缝的要求,因此还需要进一步的研究与完善。

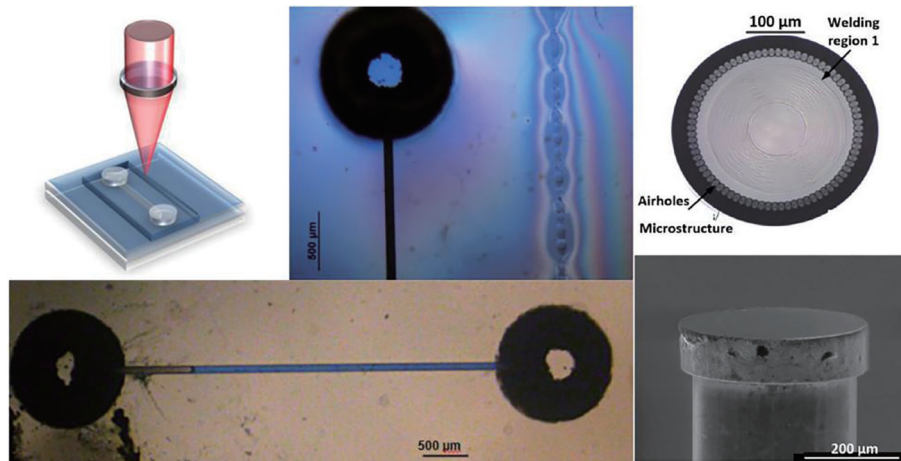


图 8 激光微焊接技术在透明材料方面的应用<sup>[50-51]</sup>

Fig. 8 Applications of laser micro welding technology in transparent materials<sup>[50-51]</sup>

激光微焊接技术利用激光的热影响区小、精度高、速度快等特点可以保证焊接中微型器件的稳定性,其中超短脉冲激光因其独特的加工优势,被认为是纳米材料连接的有力工具,应用前景广泛。然而,激光微焊接技术距离大规模生产应用仍存在一些差距<sup>[53]</sup>。超短脉冲激光可以实现微型器件的高质量连接,但是在实际的工业应用中由于飞秒或皮秒激光器的价格和成本昂贵,且使用长脉冲或短脉冲激光器加工又难以保证微型器件的加工精度,因此超短脉冲激光难以实现批量化的生产应用。另外,对于连接几微米间距的微型器件时,需要设计特殊的夹具限制器件,夹具会使焊接过程变得复杂,且无法控制内部的夹具产生的张力,影响焊接质量。

## 4 微纳尺度的激光软钎焊技术

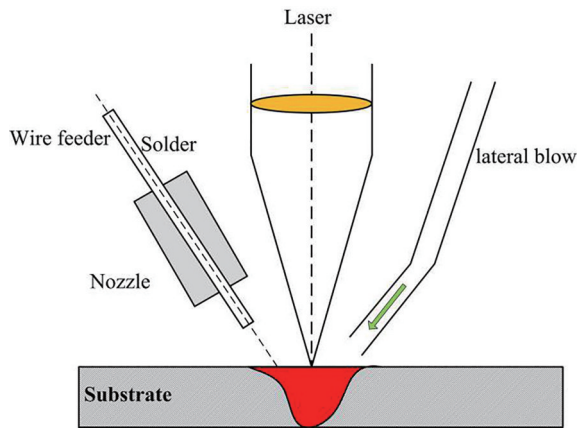
### 4.1 微纳尺度的激光软钎焊原理及特点

微纳尺度的激光软钎焊是在常规激光软钎焊的基础上对被连接材料、焊点等引入微、纳米尺寸界定范围,本质上均是利用激光束直接辐射加热引线(或无引线器件连接的焊盘),通过焊料向基板传热,当焊料的温度达到熔点发生熔化润湿基板与引线形成焊点,是一种局部焊接工艺<sup>[54]</sup>,如图 9 所示。

相比传统的钎焊方法,微纳尺度的激光软钎焊具有如下优点<sup>[2, 55]</sup>:

1) 非接触性的局部加热。利用激光束的高方向性和高功率密度特点,不借助其他辅助工具精确



图 9 激光软钎焊技术原理示意图<sup>[54]</sup>Fig. 9 Schematic of laser soldering technology<sup>[54]</sup>

定位微小焊接的部位,适合连接热敏器件。

2) 可靠的软钎焊焊点。激光束作用在焊接引线部位,热量集中在局部范围,对周围材料不产生热损伤。焊接过程中焊料的快速熔化和冷却可以产生微细的焊点微观组织,有助于提高焊点的可靠性。

3) 精确和可控的工艺参数。利用不同的光学元件对激光束进行分割,可以实现多点焊接,同时根据不同的元器件控制工艺参数获得质量均匀的焊点。

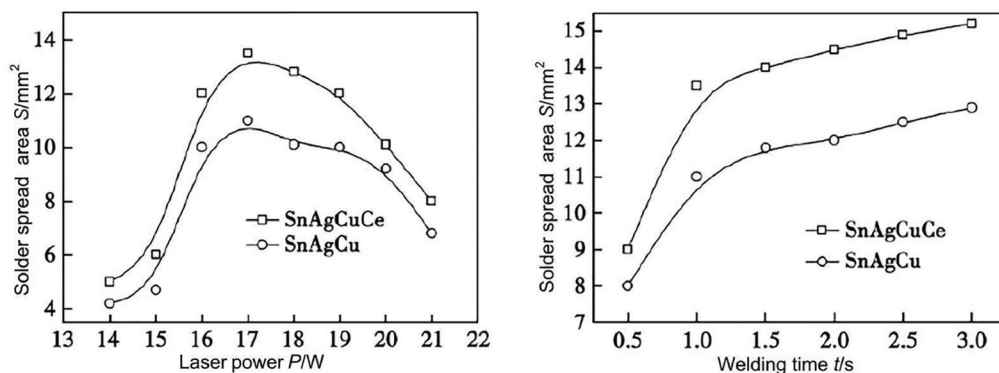
激光软钎焊技术可以实现高功率密度的激光束在极短的时间内对热敏元器件的连接,且元器件的连接质量取决于焊点的可靠性。在激光软钎焊技术中需要足够的焊接时间和激光能量加热焊料

使其润湿,形成高可靠性的焊点。由于元器件的尺寸小、焊接区域复杂,焊接过程中难以保证焊接的温度和焊点的形态,同时焊点可靠性还与元器件的类型相关,因此激光软钎焊技术需要对焊点形态的预测及工艺的优化进行研究。

#### 4.2 微纳尺度的激光软钎焊工艺参数的研究

微纳尺度的激光软钎焊技术加工质量不仅受激光功率、焊接时间、离焦量、焊接速度、扫描方式等参数影响,还受焊料、助焊剂的影响。

1) 激光功率和焊接时间<sup>[56-58]</sup>。在微纳尺度的激光软钎焊焊接过程中焊接温度难以控制,一般通过调节激光输出功率密度和焊接时间来控制。如图 10 所示,可以看到焊料的铺展面积随激光功率的增加而增加,但在焊料铺展面积达到饱和状态后随激光功率的增大而减小;随焊接时间的延长而趋于平缓。产生这种现象的原因是随着激光能量的增大,焊接区域的温度升高使得焊料得到充分的熔化、铺展;当焊接区域的温度升高到一定值时,焊料剧烈的蒸发并发生氧化导致焊料的铺展面积减小。此外南京航空大学的韩宗杰<sup>[57]</sup>研究了焊接时间与激光功率对焊料组织的影响,试验发现当激光输出功率低时,焊接时间无论怎样延长都不足以使焊料熔化;当激光输出功率高、焊接时间短时,会使接头出现粗大树枝状的金属间化合物。因此要选用适当的激光功率和焊接时间,控制焊料和基板界面的温度,形成组织均匀细小的焊点。

图 10 激光软钎焊下激光功率和焊接时间对焊料铺展面积的影响<sup>[56]</sup>Fig. 10 Influence of laser power and welding time on solder spread area under laser soldering<sup>[56]</sup>

2) 焊接速度<sup>[59-60]</sup>。在微纳尺度的激光软钎焊中焊接速度的快慢对焊点的质量和力学性能的影响很大。如图 11 所示,焊料抗拉强度随焊接速度的增大而增大,但当焊接速度达到一定值时,抗拉强度随速

度的增大而降低。这是因为焊接速度过慢,焊料吸收的能量大,焊料的温度高导致焊点内部的组织粗化,降低焊点的力学性能;而焊接速度过快使得焊接区域的焊点组织发生塑性变形导致焊点韧性断裂。



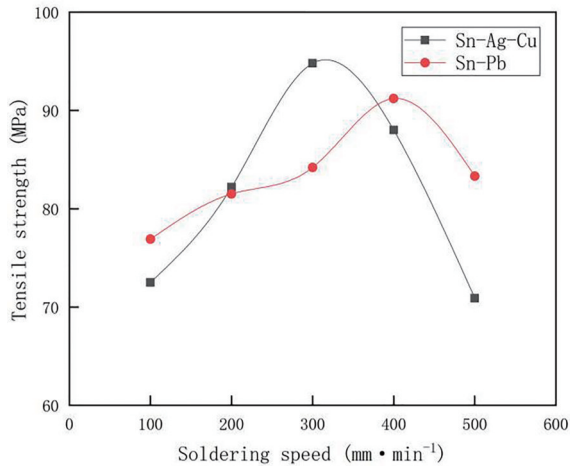


图 11 激光软钎焊下焊接速度对焊接强度的影响<sup>[59]</sup>

Fig. 11 Influence of welding speed on welding strength under laser soldering<sup>[59]</sup>

#### 4.3 微纳尺度的激光软钎焊技术应用现状

在微机电系统中,多引线的微纳连接器件正逐渐向复杂多功能化趋势发展,增加了电子元器件的连接难度,对加工质量可靠性要求更高。在连接多引线的元器件时,激光微焊接技术产生的激光能量高、热影

响区大,焊接过程中会对基体或周围其他引线产生热损伤,造成电子元器件变形。为实现电子元器件多引线的连接问题,研究学者发现激光软钎焊技术利用较低的能量密度使焊料熔化连接引线,焊接过程中可以保证基体和周围引线不受损伤,在一定程度上降低了多引线焊接的难度,提高了焊点的可靠性<sup>[61-62]</sup>。

随着封装密度的增加和尺寸的缩小,常规的软钎焊技术不再可靠,微纳尺度的激光软钎焊技术由于激光的热影响小、效率高等特点可以解决微小型热敏元器件难焊接的问题<sup>[63-64]</sup>。英国赫尔大学的 Beckett 等<sup>[65]</sup>建立四方扁平封装器件(QFP)的焊接温度场有限元模型,并进行激光软钎焊试验实现 QFP 器件的细间距连接,如图 12 所示。美国田纳西州理工大学的 Fidan<sup>[66]</sup>利用计算机辅助 Nd:YAG 激光器实现了间距为 600 μm 的器件之间的可靠连接。微纳尺度的激光软钎焊技术可以解决激光微焊接技术无法实现的连接问题,如单个元件的连接、低温热敏元器件以及高密度引线元器件等,但激光软钎焊技术在实现 300 μm 以下间距的元器件的连接效果差,还需要继续深入研究。

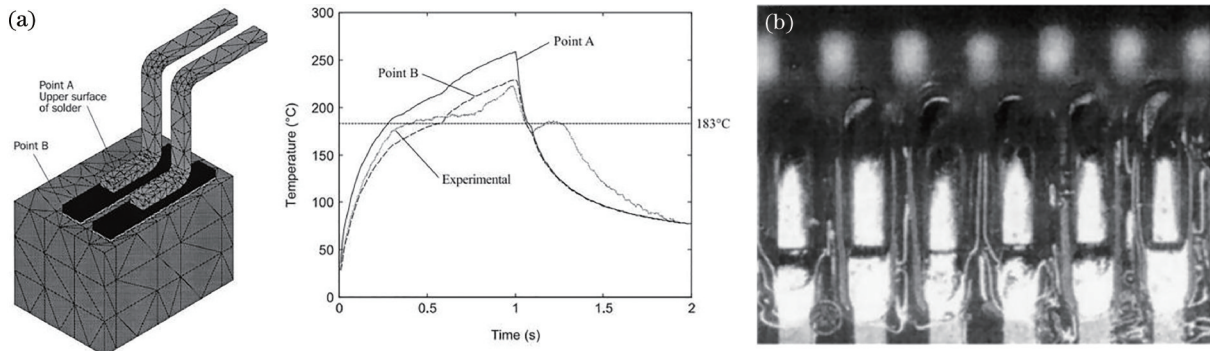


图 12 激光软钎焊焊接 QFP 器件<sup>[65]</sup>。(a)有限元仿真焊接温度场模型;(b)激光软钎焊技术的焊接效果图

Fig. 12 Laser soldering of QFP devices<sup>[65]</sup>. (a) Finite element simulation welding temperature field model; (b) welding effect diagram of laser soldering technology

微纳尺度的激光软钎焊设备的核心是激光器,由于半导体激光器具有转化效率高、体积小、成本低等特点,被广泛应用于印刷电路板表面元器件组装中。国内外研究学者对比研究了半导体激光软钎焊和红外再流焊技术对不同焊料的组织形貌影响<sup>[67-69]</sup>,试验发现在半导体激光软钎焊条件下焊料的微观组织比红外再流焊细腻,如图 13 所示。进一步研究了半导体激光软钎焊技术对焊点强度的影响,日本的 Takahashi 等<sup>[70]</sup>研究了 Nd:YAG 激光器和半导体激光器对 Sn-Ag-Cu 焊点焊接强度的影响,发现半导体激光器焊接的焊点强度更高。对多

引线、细间距的元器件进行半导体激光软钎焊时,元器件不会受到热影响,还可以防止焊接中出现的桥连、热变形等连接问题。并由此推断,半导体激光软钎焊技术有助于提高微、纳米尺寸的电子元器件质量,推动表面组装元器件的发展。

在微、纳米尺寸的电子封装领域中焊料的性能影响着焊接的质量和效率,Sn-Pb 焊料以其自身良好的导电性、抗蠕变性、剪切强度低以及成本低等优点广泛应用于激光软钎焊中。但铅是一种不会降解的有毒物质,不当的处理方式会造成环境污染。为了解决这个问题,国内外研究学者提出了用

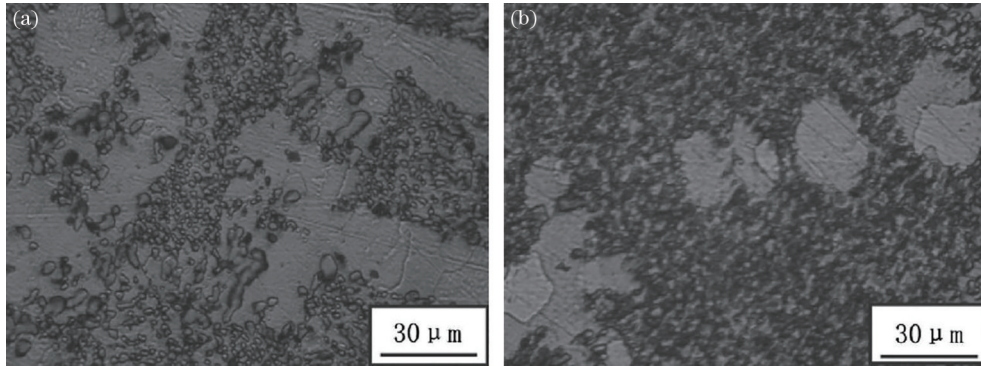


图 13 不同加工方式下焊点的显微组织形貌<sup>[69]</sup>。(a)红外再流焊;(b)半导体激光软钎焊

Fig. 13 Microstructure morphology of solder joints under different processing methods<sup>[69]</sup>. (a) Infrared reflow welding; (b) diode-laser soldering

无铅焊料替代传统的铅锡焊料<sup>[71-73]</sup>。由于无铅焊料的无毒、无污染、抗腐蚀等特性受到国内外研究学者的关注,美国的 Hoult 等<sup>[74]</sup>通过焊接试验对比研究无铅和有铅焊点的可靠性,结果发现两种焊点质量相差不大,但无铅焊点的可靠性更高。南京航空航天大学<sup>[75]</sup>也研究了激光软钎焊技术对 Sn-Pb 和 Sn-Ag-Cu 焊料的焊点强度影响,试验得到 Sn-Ag-Cu 焊点的强度高于 Sn-Pb 焊点,同时在高温下对比发现 Sn-Ag-Cu 焊料的组织稳定性更好。

在微纳尺度的激光软钎焊技术中新型无铅焊料是一项重要的研究,Nishikawa 等<sup>[76]</sup>在激光软钎焊下探究 Sn-Ag-Cu 焊料与 Cu 基板焊接性能的影响,试验发现焊接接头的界面形成了一层金属化合物层(IMC),通过调节激光参数控制 IMC 层的生长,可以提高接头的冲击可靠性,如图 14 所示。国内外研究学者发现在原有无铅焊料的基础上通过添加其他合金元素或纳米颗粒可以增强焊料的整体性能<sup>[77-78]</sup>,如在 Sn-Ag-Cu 焊料中添加 Al、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等纳米颗粒和 Fe、Zn 等合金元素<sup>[79-83]</sup>,试验发现添加的合金元素和纳米颗粒可以抑制焊料中原子的扩散和 IMC 层的生长,提高焊料的润湿性,获得更高质量

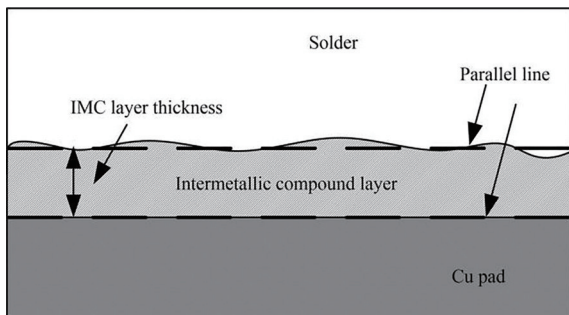


图 14 激光软钎焊在无铅焊料方面的应用<sup>[76]</sup>

Fig. 14 Application of laser soldering in lead-free solder<sup>[76]</sup>

的焊点,如图 15 所示。这是因为在激光软钎焊中添加的合金元素和纳米颗粒可以直接参与冶金反应生成新相,提升无铅焊料的力学性能。但是在无铅焊料中添加的元素含量不宜过高,含量过高也会降低焊料的润湿性<sup>[84]</sup>,如 Sn-Ag-Cu 焊料添加 Ni 合金,当 Ni 含量超过 0.03% 时,会使 Ni 与 Sn 发生反应生成过多的金属间化合物(Ni<sub>3</sub>Sn、Ni<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>、Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>),导致焊料表面的张力增大,使得焊料的润湿性降低。激光软钎焊的成功在于焊料的润湿性,因此为获得高可靠性的焊点,需要提升焊料的润湿性。

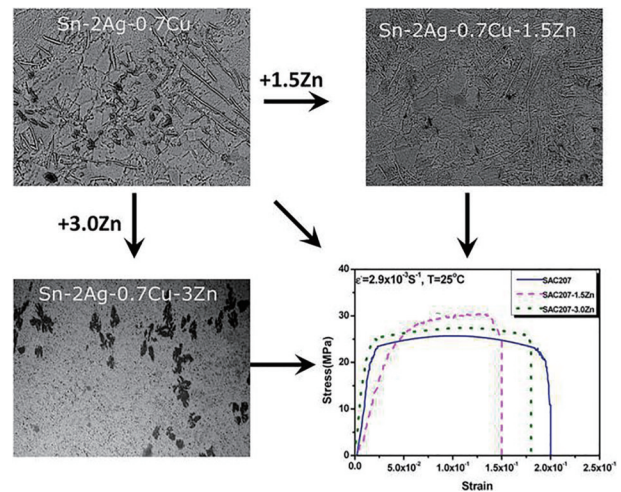


图 15 在 SnAgCu 焊料中不同含量 Zn 对焊接强度的影响<sup>[82]</sup>

Fig. 15 Influence of different content of Zn in SnAgCu solder on soldering strength<sup>[82]</sup>

由于微纳尺度的激光软钎焊升温快,在高引线器件的连接过程中会造成焊料的飞溅进而影响产品的质量,研究学者提出了适合在微纳尺度的激光软钎焊技术中使用的焊膏。焊膏是将焊料粉末与助焊剂均匀混合而成具有黏性和触变性的混合物,焊接过程中具有一定的稳定性。Lima 等<sup>[85]</sup>采用半导体激光软钎



焊技术研究 SnAgCu 焊膏对电缆连接器接头的影响, 试验发现导线与连接器的连接更紧密, 如图 16 所示。对激光软钎焊技术的研究大多集中在焊料的性能和质量上, 对于焊膏的研究相对欠缺, 如焊膏在激光软钎焊中会出现飞溅等情况。因此, 还需要继续开发研究适合微纳尺度的激光软钎焊技术的焊膏。

在微型电子领域中电子产品正向着微型化、多功能等趋势发展, 对产品的可靠性要求提高, 推动了激光软钎焊技术的发展。目前, 微纳尺度的激光软钎焊技术在微机电领域已经取代激光微焊接技

术, 解决了焊接中出现的热损伤等问题, 提高了元器件的焊接质量。随着无铅焊料的发展和环保意识的提高, 激光软钎焊技术逐渐向无铅焊接发展, 并取得了一定的成果。但是微纳尺度的激光软钎焊技术在无铅焊料的应用上还不成熟, 对高密度引线的元器件的连接还存在一些问题。因此, 需要继续开发新型无铅焊料, 提高激光软钎焊的焊接可靠性。同时微纳尺度的激光软钎焊技术还需要对半导体激光软钎焊、无铅激光焊接等技术进行深入研究和讨论。

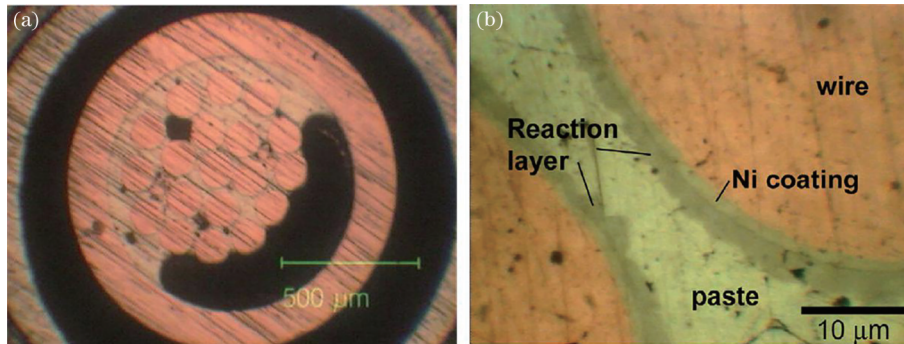


图 16 电缆连接器器件截面图<sup>[85]</sup>。(a) 激光软钎焊电缆器件; (b) 焊膏与金属连接的微观组织图

Fig. 16 Sectional view of cable connection device<sup>[85]</sup>. (a) Laser soldering cable device; (b) microstructure diagram of solder paste and metal connection

## 5 微纳尺度的激光植球技术

### 5.1 微纳尺度的激光植球原理及特点

激光植球技术是利用激光束局部加热代替再流焊批量加热 PCB 基板, 实现焊球-焊盘结合的目的。微纳尺度的激光植球技术一般是指尺寸小于 500  $\mu\text{m}$  的焊球, 通过分球机构将焊球送至喷嘴, 利用气体的压力和激光束的辐射加热焊球, 使焊球吸收能量后熔化喷射到焊盘上形成连接, 如图 17 所示。加热过程中通常使用氮气作为辅助气体, 因为氮气不仅可以加速焊球熔化, 还可以喷射冲击焊盘的氧化膜使其破碎形成喷射连接, 从而防止熔化的焊球再次氧化<sup>[86-87]</sup>。

微纳尺度的激光植球是将激光与植球工艺结合的一种柔性植球技术, 可以实现植球与焊盘的一次结合, 适用于批量自动化球栅阵列封装 (BGA) 器件的生产。激光局部加热产生的热影响区小, 因此可以避免周围元件的损伤, 减少植球过程中金属化合物层的形成, 有利于提高焊点质量。目前微纳尺度的激光植球技术可以实现植球间距最小为 300  $\mu\text{m}$ , 焊点形成时间只需 0.05~0.3 s。

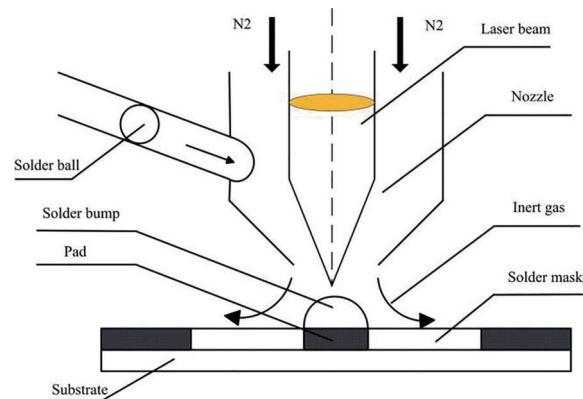


图 17 激光植球技术原理<sup>[86]</sup>

Fig. 17 Principle of laser soldering bumping technology<sup>[86]</sup>

对于处理 BGA 器件中个别失效焊点的修复, 传统的返修过程是将整个 BGA 电路板进行修复不能实现单点修复, 而激光植球技术可以实现单点焊球的修复。微纳尺度的激光植球技术的返修过程是先通过激光软钎焊技术去除失效的焊点避免损伤相邻的器件, 再使用激光植球技术重新植球, 这样可以提高生产效率、节约成本。

激光植球技术可以实现焊球直径为 40~760  $\mu\text{m}$  的可靠性连接, 但是激光植球技术在焊点制备的过



程中也会出现焊球润湿不良、焊球凹陷、局部烧蚀等缺陷,造成焊点可靠性差<sup>[88-90]</sup>。当焊球直径小于 40 μm 时,激光植球技术受激光能量、焊接时间以及喷嘴的尺寸和结构等影响,使得激光植球的焊球质量差,且焊接成功率低。因此,激光植球技术的焊接质量不仅受加工工艺的影响,也受植球设备的影响,需要进一步地优化激光参数和改进激光植球设备。

### 5.2 微纳尺度的激光植球工艺参数的研究

在微纳尺度的激光植球技术中常存在焊球的剪切强度低于标准强度的缺陷。为了解决这个问题,需要用不同的激光参数进行植球试验,测量焊球的剪切强度,寻找最优的激光高度、激光功率、焊接时间的工艺参数。

1) 激光功率和焊接时间<sup>[91-92]</sup>。激光功率密度与激光功率和焊接时间有关,因此可以通过控制激光输出功率和焊接时间来获得高可靠性的焊点。如图 18 所示,不同激光功率和焊接时间对 Sn-Ag-Cu 焊球质量的影响,试验发现激光功率过高会造成焊球凹陷,激光功率过小会造成焊球偏离焊盘,而焊接时间过长造成基板烧蚀。这是因为激光功率过高,加工区域的温度升高,即使焊接时间短也会造成焊球出现局部蒸发形成凹陷;但是当激光功率过低时,焊球不能充分熔化,铺展困难,最终导致焊球

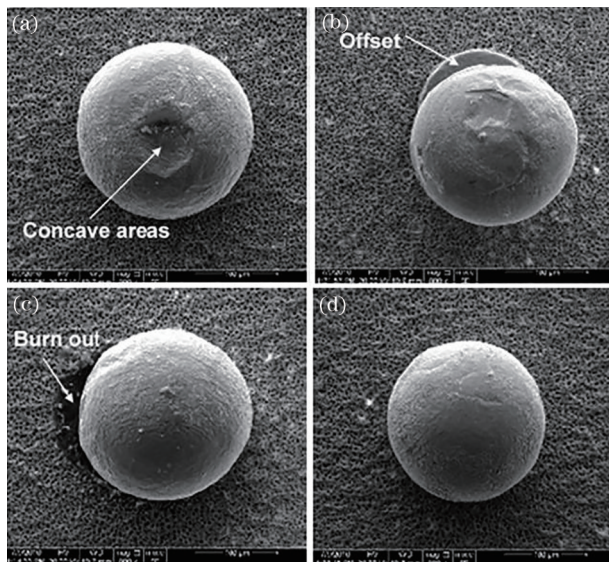


图 18 激光植球过程中不同参数下焊球的形貌变化<sup>[91]</sup>。(a)凹坑缺陷;(b)偏移缺陷;(c)烧蚀缺陷;(d)合格外观

Fig. 18 Changes of solder ball morphology under different parameters during laser soldering bumping<sup>[91]</sup>. (a) Pit defect; (b) offset defect; (c) ablation defect; (d) qualified

偏离焊盘。因此只有激光输出功率和焊接时间相互配合才能形成高质量焊球。

2) 激光高度和焊接时间<sup>[93-94]</sup>。激光高度是指聚焦透镜水平面与夹具平面的垂直距离,激光束焦平面是激光能量密度最大的区域,偏离焦平面会产生一定的能量损失。张浩等<sup>[93]</sup>使用 SB<sup>2</sup>-Jet 激光植球设备研究了不同激光高度对 Sn-Pb 焊点的影响,从剪切力角度分析可以得到激光高度在 55 mm、焊接时间 425 ms 时对应的剪切强度最大,但焊点存在烧蚀现象;从焊球质量角度分析发现当激光高度在 60 mm、焊接时间在 750 ms 时可以得到无烧蚀现象的焊点。这是因为激光高度在 55 mm 时激光束焦平面作用在焊球中心,产生的高能量密度集中在焊球,使得焊球的能量高于焊盘造成烧蚀;而激光高度在 60 mm 时激光焦平面覆盖整个焊盘,使得焊盘和焊球得到的能量均匀,形成较好质量的焊点。

3) 扫描方式<sup>[95]</sup>。在微纳尺度的激光植球中合适的扫描方式不仅能提高植球的质量,而且也能实现大面积焊球的连接,有利于提高植球效率。如图 19 所示,对比两种激光扫描方式对焊球的影响,发现十字交叉扫描方式得到的焊点周围存在大量的飞溅物,直线扫描的方式可以得到组织均匀、质量较好的焊点。这是由于十字交叉扫描方式使得光斑重叠率高,导致交叉区域的能量过高,因此焊料飞溅不利于焊点的形成;而直线扫描方式下,焊

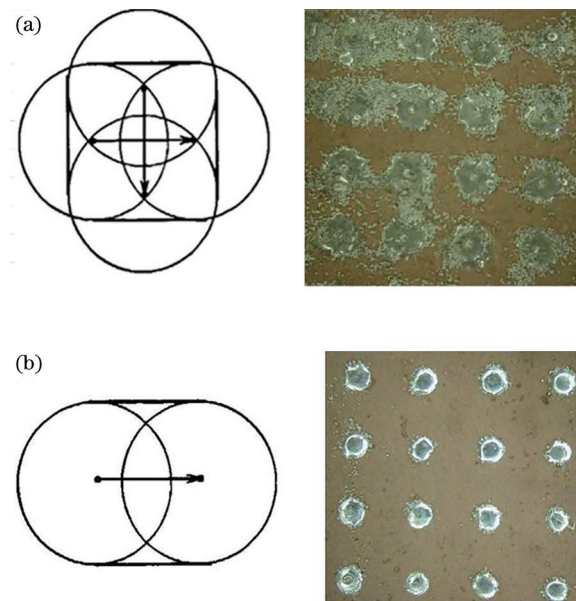


图 19 两种不同的扫描方式<sup>[95]</sup>。(a)十字交叉线扫描方式;(b)直线扫描方式

Fig. 19 Two different scanning methods<sup>[95]</sup>. (a) Cross scan method; (b) linear scanning method

接区域的能量均匀可以使焊料和焊点更好地结合在一起形成高质量焊点。

### 5.3 微纳尺度的激光植球技术应用现状

随着微电子封装技术的发展,集成电路板的面积不断减小,而 I/O 接口数目不断增多。为满足电子元器件的微型化和 I/O 接口增长的趋势,缩小电路板的引线间距。当引线间距很小时,微纳尺度的激光软钎焊技术在焊接中会对引脚造成变形、烧蚀等损伤。激光植球技术是在激光软钎焊技术上发展的新型连接技术,以激光为热源,以焊球代替引线作为电路板的连接点,在电路板底部呈阵列排布的方式。与微纳尺度的激光软钎焊技术相比,微纳尺度的激光植球技术可以实现更小区域的焊接,在焊接中只需熔化焊球,不会对基体或其他引脚造成损伤,提高了焊点的强度,在微电子封装中具有潜在的优势。

作为一种柔性微加工技术,微纳米尺度的激光植球技术被广泛应用于多引脚的球栅阵列封装技术中。传统的 BGA 技术存在不稳定因素,会直接导致植球失败。1995 年 Panasonic 公司的 Laferriere 等<sup>[13]</sup>开发出基于方形扁平式封装的激光软钎焊系统,在此基础上国内外研究学者提出基于 BGA 封装的激光植球技术。哈尔滨工业大学的 Tian 等<sup>[96-98]</sup>对比研究了激光植球、红外再流焊和激光加热三种工艺对 SnPb 焊球质量的影响,发现激光植球技术加工的效率最高,获得的焊球质量好,同时也不会对其他构件造成损伤。香港大学的 Lee 等<sup>[99-100]</sup>发现激光植球技术的机理是利用辅助气体碰碎焊盘的氧化膜使焊料润湿形成焊点,随后又研究了激光功率、焊接时间等工艺参数对焊球/焊盘界面的微观组织和强度的影响,试验发现随激光功率和焊接时间的增大金属化合物层的厚度变厚,焊点的强度受焊球/焊盘间金属化合物层厚度的影响大,因此需要在合适的激光参数下加工形成高强度的焊点。

随着微纳尺度的激光植球技术的应用,激光植球后焊点的可靠性已成为一个重要的问题,其中润湿性是影响焊球和焊盘连接的重要因素。为提高焊球的润湿性,研究学者进行了大量的研究,发现在批量化的生产中,焊球和焊盘的成分、焊球表面氧化、焊盘表面污染等因素都会造成润湿性差<sup>[101-103]</sup>。在激光植球过程中焊球表面氧化和焊盘表面污染是润湿性差的主要原因,这是因为焊料的氧化会产生氧化层,氧化层越厚、表面污染物越多,

都会焊球和焊盘间的连接存在虚焊或焊接不良等缺陷。此外,还发现焊球中钎剂的挥发和焊盘表面冲击也会造成焊接缺陷。因此,为提高激光植球技术的可靠性,在焊接中采取清理焊盘表面污染物、提高定位精度、优化激光植球工艺等措施,有助于提高焊点的性能。

微纳尺度的激光植球技术在一定程度上解决了电子元器件间距缩小的连接需求,使激光植球技术成为封装技术的主流。但如何将数百个焊点定位于基板上成为关注的焦点,对此国内外研究学者研发出基于 BGA 封装技术的设备,其中 BGA 植球机的性能对 BGA 封装生产线具有很大的意义。德国 Pac Tech 公司率先开发出激光植球设备迅速占领封装行业的主要市场,型号为 SB<sup>2</sup>-Jet 的激光植球设备,在 0.1 s 内就可以实现对 50~150 μm 的焊球的植入,同时该设备还具有质量检测 and 返修功能。随着自动检测和图像处理等技术的发展,在微纳尺度的激光植球技术引进了机器视觉代替人工视觉的显微视觉技术,研究学者对视觉系统进行了大量的研究<sup>[104]</sup>。上海交通大学丁汉教授团队利用机器视觉模块进行定位搭建了激光植球设备,通过摄像机收集获取芯片图像中焊盘的位置信息<sup>[94]</sup>。哈尔滨工业大学的荣伟彬团队在显微视觉技术激光植球设备的基础上又开发出了软件控制系统,通过软件中各种检测算法最终实现植球的目的。综上,显微视觉系统和软件控制系统大大提高了工业生产的效率和自动化程度。然而对微纳尺度的激光植球技术鲜有应用报道,目前激光植球设备主要应用于中小批量的植球,相对完整的激光植球设备还处于试验研发阶段。

微电子封装不仅影响集成电路的机械性能、光电性能,在一定程度上决定了微电子系统的多功能小型化。微纳尺度的激光植球技术不仅可以进行细间距焊球的放置,也可以实现凸点制作和连接的一步完成,提高封装的质量。但微纳尺度的激光植球技术的发展仍有许多问题需要解决,如激光植球设备的缺陷检测、激光植球过程中参数的选择和定位等,可用于实际生产的激光植球设备还需要进一步开发。

## 6 结束语

综上,激光微纳连接技术是近年来蓬勃发展的新兴技术,它是利用激光的热效应将尺寸在微、纳



米级的材料与其他材料连接的一种非接触性局部加热的工艺技术。按照其工艺特性可以划分为激光微焊接技术、微纳尺度的激光软钎焊技术和激光植球技术,这三种典型的激光微纳连接技术都是以激光作为热源,区别在于激光辐射的对象。激光微焊接技术是通过激光直接辐射焊接材料,使材料本身熔化形成焊缝;激光软钎焊技术是通过激光束辐射引线,使焊料熔化形成焊点;激光植球技术是通过激光束辐射焊球,以焊球代替引线形成焊点。随着连接器件的微型化发展,激光微纳连接技术实现了微、纳米级尺度的器件的连接,其中激光微焊接技术在生物医疗、纳米结构、透明玻璃等领域的应用最广,而微纳尺度的激光软钎焊技术和激光植球技术更适合于微电子封装领域。

相对比传统的连接方式展现出更优的特性,激光微纳连接技术可以满足传统的连接方式无法满足的连接需求,加工质量比传统连接技术更好,实现了高效率、高性能的微型产品制造。虽然激光微纳连接技术研究已取得一系列进展,但在实际的生产加工中还面临着诸多挑战。

1) 激光微焊接技术面临的挑战:激光微焊接技术在微米级领域的应用广泛,但在纳米尺度受到激光光斑等因素的限制,如激光纳米焊接中激光对焊接点以外的区域造成影响,造成器件的变形。此外,激光微焊接技术涉及多个能量场,激光与材料之间的作用的机理复杂,其中工艺参数对焊接质量的影响很大,因此需要深入研究不同材料和设备间的相互作用机制,优化工艺参数,提高焊接质量。

2) 微纳尺度的激光软钎焊技术面临的挑战:激光软钎焊技术已经取代传统的钎焊形式,但是微纳尺度的激光软钎焊技术仍存在温度和焊点形态预测的难题,需要对激光软钎焊过程进行数值仿真,通过理论和试验结合优化工艺参数得到高可靠性的焊点。此外,激光软钎焊技术虽然在有铅焊料的应用较为成熟,但无铅焊料的特性与有铅焊料不同,无法直接借鉴有铅焊料的成果。而半导体激光软钎焊技术作为一种群焊工艺,实现了电子元件的高密度引线的连接,因此半导体激光软钎焊技术为无铅焊接的研究提供了新的研究方向。

3) 微纳尺度的激光植球技术面临的挑战:微纳尺度的激光植球技术主要是实现BGA器件的凸点制作和焊球返修,因此在激光植球的试验研究中通过对激光定位和工艺参数优化控制焊点的质量。

此外,为实现大批量的工业化生产,需要将激光植球设备开发成高度集成的专用化植球设备,通过对植球设备的软件和硬件的双向改进实现一体化生产,这是未来激光植球设备厂商所关注的重点方向。

## 参 考 文 献

- [1] Hu A, Panda S K, Khan M I, et al. Laser welding, microwelding, nanowelding and nanoprocessing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3149-3159.
- [2] Zhou Y. Microjoining and nanojoining[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.
- [3] Mukhopadhyay P, Ghosh A. High vacuum brazing of synthetic diamond grits with steel using micro/nano  $Al_2O_3$  reinforced Ag-Cu-Ti alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 198-207.
- [4] Sang S, Li D, Wang C R, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints of tantalum and GH3128[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 768: 138431.
- [5] Ren D X, Zhao D W, Li C B, et al. Resistance ceramic-filled annular welding of thin steel sheets[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 588-594.
- [6] Hu Y Y, Liu H J, Fujii H, et al. Vacancy-induced  $\theta'$  precipitation during ultrasonic-affected friction stir welding of Al-Cu alloy[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(29): 14626-14641.
- [7] Zhao X K, Xing D S, Liu D Y. Research and application development on laser micro joining technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(12): 28-34.  
赵兴科, 邢德胜, 刘大勇. 激光微连接技术研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2017, 60(12): 28-34.
- [8] Xue Z, Yang Q, Gu L, et al. Diffusion bonding of TiAl based alloy to Ti-6Al-4V alloy using amorphous interlayer [J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2015, 46(1): 40-46.
- [9] Hopkins R E, Buzawa M J. Optics for laser scanning [J]. Optical Engineering, 1976, 15(2): 150290.
- [10] Wang L, Gao M, Zeng X Y. Experiment and prediction of weld morphology for laser oscillating welding of AA6061 aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(4): 334-341.
- [11] Hoult A P, McLenaghan A J, Rathod J. Advances in laser soldering using high power diode lasers[J].



- Proceedings of SPIE, 2003, 4831: 71-76.
- [12] Tao W, Yang Z B, Chen Y B, et al. Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 52: 1-9.
- [13] Laferrriere P, Fukumoto A. Laser-diode based soldering system with vision capabilities[C]//Seventeenth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. 'Manufacturing Technologies—Present and Future', October 2-4, 1995, Austin, TX, USA. New York: IEEE Press, 1995: 324-328.
- [14] Pudas M, Hagberg J, Leppävuori S. Roller-type gravure offset printing of conductive inks for high-resolution printing on ceramic substrates[J]. *International Journal of Electronics*, 2005, 92(5): 251-269.
- [15] Zou G S, Yan J F, Mu F W, et al. Recent progress in microjoining and nanojoining[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(4): 107-112, 118.  
邹贵生, 闫剑锋, 母凤文, 等. 微连接和纳连接的研究新进展[J]. *焊接学报*, 2011, 32(4): 107-112, 118.
- [16] Mazumder J. Overview of melt dynamics in laser processing[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(8): 1208-1219.
- [17] Duley W W. *Laser welding*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [18] Song Y G. Numerical simulation and experimental study on laser brazing film CBN gear-honing-tool[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.  
宋永刚. 激光钎焊镀膜 CBN 外珩轮数值模拟与实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [19] Miyamoto I, Horn A, Gottmann J, et al. Fusion welding of glass using femtosecond laser pulses with high-repetition rates[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2007, 2(1): 57-63.
- [20] Petring D, Goneghany V N. Parameter dependencies of copper welding with multi-kW lasers at 1 micron wavelength[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 95-104.
- [21] Sun X, Zhang L J, Suckjoo N. Effect of power density on penetration depth and microstructure in laser welding joint of DP590 steel[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2020, 12(1): 111-116.  
孙旭, 张林杰, Na Suck-Joo. 功率密度对 DP590 钢激光焊缝熔深及组织的影响[J]. *精密成形工程*, 2020, 12(1): 111-116.
- [22] Volpe A, di Niso F, Gaudio C, et al. Femtosecond fiber laser welding of PMMA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9531: 935106.
- [23] Miranda R M, Quintino L, Williams S, et al. Welding with high power fiber laser API5L-X100 pipeline steel[J]. *Materials Science Forum*, 2010, 636/637: 592-596.
- [24] Ismail M I S, Okamoto Y, Uno Y. Numerical simulation on micro-welding of thin stainless steel sheet by fiber laser[J]. *International Journal of Electrical Machining*, 2011, 16: 9-14.
- [25] Liebl S, Wiedenmann R, Ganser A, et al. Laser welding of copper using multi mode fiber lasers at near infrared wavelength[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 591-600.
- [26] Sathiyar P, Panneerselvam K, Soundararajan R. Optimal design for laser beam butt welding process parameter using artificial neural networks and genetic algorithm for super austenitic stainless steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1905-1914.
- [27] Du W Z, Huang T, Cao Z, et al. Galvanometer scanning laser-micro-welding of AISI304 stainless-steel foil[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102006.  
杜伟哲, 黄婷, 曹政, 等. AISI304 不锈钢箔振镜扫描激光微焊接工艺[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102006.
- [28] Petrich M, Stambke M, Bergmann J P. Examinations on laser remote welding of ultra-thin metal foils under vacuum conditions[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 768-775.
- [29] Kim C, Kang M, Kang N. Solidification crack and morphology for laser weave welding of Al 5J32 alloy [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 18(1): 57-61.
- [30] Hao K D, Li G, Gao M, et al. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 77-83.
- [31] Huang R S, Zou J P, Meng S H, et al. Process characteristics of laser scanning welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(4): 61-66, 163.  
黄瑞生, 邹吉鹏, 孟圣昊, 等. 铝合金激光扫描焊接工艺特性[J]. *焊接学报*, 2019, 40(4): 61-66, 163.
- [32] Miyagi M, Zhang X D, Kawahito Y, et al. Surface void suppression for pure copper by high-speed laser

- scanner welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 52-59.
- [33] Huang D L, Yang Y Q. Precise laser seam welding of ultra thin stainless steel sheet[J]. *Welding Technology*, 2009, 38(8): 7, 34-36.  
黄冬林, 杨永强. 超薄不锈钢激光精密缝焊工艺[J]. *焊接技术*, 2009, 38(8): 7, 34-36.
- [34] Esposito G, Rossi F, Puca A, et al. An experimental study on minimally occlusive laser-assisted vascular anastomosis in bypass surgery: the importance of temperature monitoring during laser welding procedures [J]. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*, 2010, 24: 307-315.
- [35] Oliveira J P, Fernandes F M B, Schell N, et al. Shape memory effect of laser welded NiTi plates[J]. *Functional Materials Letters*, 2015, 8(6): 1550069.
- [36] Yao R H, Dong P, Liaw P K, et al. Microstructure and shape memory effect of laser welded Nitinol wires [J]. *Materials Letters*, 2019, 238: 1-5.
- [37] Chan C W, Man H C, Yue T M. Susceptibility to stress corrosion cracking of NiTi laser weldment in Hanks' solution[J]. *Corrosion Science*, 2012, 57: 260-269.
- [38] Dong P, Yao R H, Yan Z, et al. Microstructure and corrosion resistance of laser-welded crossed nitinol wires[J]. *Materials*, 2018, 11(5): 842.
- [39] Long J, Jiao B Z, Fan X H, et al. Femtosecond laser assembly of one-dimensional nanomaterials and their application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202017.  
龙婧, 焦玢璋, 范旭浩, 等. 飞秒激光组装一维纳米材料及其应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202017.
- [40] Kim S J, Jang D J. Laser-induced nanowelding of gold nanoparticles[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(3): 033112.
- [41] She J C, An S, Deng S Z, et al. Laser welding of a single tungsten oxide nanotip on a handleable tungsten wire: a demonstration of laser-weld nanoassembly[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(7): 073103.
- [42] Qian M, Goh C S, Sun Y H, et al. Effects of CNTs on microstructure and hardness of laser welds of the CNT-reinforced magnesium composite[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 48: 67-72.
- [43] Bhat A, Balla V K, Bysakh S, et al. Carbon nanotube reinforced Cu-10Sn alloy composites: mechanical and thermal properties[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(22/23): 6727-6732.
- [44] Fan W Z, Zhao Q Z. Recent progress in ultrashort pulsed laser microwelding of glasses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080001.  
范文中, 赵全忠. 超短脉冲激光微焊接玻璃进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080001.
- [45] Alexeev I, Cvecek K, Schmidt C, et al. Characterization of shear strength and bonding energy of laser produced welding seams in glass[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2012, 7(3): 279-283.
- [46] Chen J, Carter R M, Thomson R R, et al. Avoiding the requirement for pre-existing optical contact during picosecond laser glass-to-glass welding[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18645-18657.
- [47] Zhang G D, Bai J, Zhao W, et al. Interface modification based ultrashort laser microwelding between SiC and fused silica[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1702-1709.
- [48] Chen H, Deng L M, Duan J, et al. Picosecond laser welding of glasses with a large gap by a rapid oscillating scan[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2570-2573.
- [49] Richter S, Zimmermann F, Tünnermann A, et al. Laser welding of glasses at high repetition rates – Fundamentals and prospects[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 83: 59-66.
- [50] Hélie D, Gouin S, Vallée R. Assembling an endcap to optical fibers by femtosecond laser welding and milling[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(10): 1742-1754.
- [51] Volpe A, di Niso F, Gaudio C, et al. Welding of PMMA by a femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4114-4124.
- [52] Li J Q, Yan J F, Li X, et al. Research advancement on ultrafast laser microprocessing of transparent dielectrics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202019.  
李佳群, 闫剑锋, 李欣, 等. 透明介质材料的超快激光微纳加工研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202019.
- [53] Sun K, Sun S Z, Qiu J R. Research progress on ultrashort pulsed laser welding of non-metallic materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111422.  
孙轲, 孙盛芝, 邱建荣. 超短脉冲激光焊接非金属材料研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111422.

- [54] Li Y X, Chen C, Yi R X, et al. Review: special brazing and soldering[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60: 608-635.
- [55] Klocke F, Castell-Codesal A, Donst D. Process characteristics of laser brazing aluminium alloys[J]. *Advanced Materials Research*, 2005, 6/7/8: 135-142.
- [56] Lai Z M, Zhang L, Wang J X. Effects of different solders on mechanical properties of micro-joints soldered with diode-laser soldering system[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(12): 85-88, 117.  
赖忠民, 张亮, 王俭辛. 不同钎料对激光钎焊焊点力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2011, 32(12): 85-88, 117.
- [57] Han Z J. Diode laser soldering to electronic mounting components/devices with lead-free solder[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.  
韩宗杰. 电子组装元器件半导体激光无铅软钎焊技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [58] Kim J O, Jung J P, Lee J H, et al. Effects of laser parameters on the characteristics of a Sn-3.5 wt.% Ag solder joint[J]. *Metals and Materials International*, 2009, 15(1): 119-123.
- [59] Xue S B, Huang X, Wu Y X, et al. Effects of laser soldering speed on mechanical properties of SOP micro-joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(5): 21-24, 114.  
薛松柏, 黄翔, 吴玉秀, 等. 激光再流焊焊接速度对 SOP 器件焊点力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2007, 28(5): 21-24, 114.
- [60] Kim T W, Park Y W. Parameter optimization using a regression model and fitness function in laser welding of aluminum alloys for car bodies[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(2): 313-320.
- [61] Yu Z H, Hu Y L, Dong Q Y, et al. Laser soldering technology and its application exploration in high precision inertial instruments[J]. *Navigation and Control*, 2019, 18(5): 7-8, 67-74.  
余正海, 胡玉龙, 董清宇, 等. 激光软钎焊技术及其在高精度惯性仪表中的应用探索[J]. *导航与控制*, 2019, 18(5): 7-8, 67-74.
- [62] Tan Z D, Zhou X, Wang H Y. Features and advantages of laser soldering[C]//China High-level SMT Technology Conference 2020 Proceedings, October 30, 2020, Xian, Shanxi Province, China. Chengdu: Sichuan Institute of Electronics, 2020: 135-138.  
檀正东, 周旋, 王海英. 激光软钎焊的特点及优势[C]//2020中国高端SMT学术会议论文集. 西安. 成都: 四川省电子学会, 2020: 135-138.
- [63] Flanagan A, Conneely A, Glynn T J, et al. Laser soldering and inspection of fine pitch electronic components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 56(1/2/3/4): 531-541.
- [64] Bath J, Handwerker C, Bradely E. Research update: lead-free solder alternatives[J]. *Circuits Assembly*, 2000, 5(11): 30-34.
- [65] Beckett P M, Fleming A R, Gilbert J M, et al. Numerical modelling of scanned beam laser soldering of fine pitch packages[J]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2002, 14(1): 24-29.
- [66] Fidan I. CAPP for electronics manufacturing case study: fine pitch SMT laser soldering[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2004, 126(1): 173-176.
- [67] Han Z J, Xue S B, Wang J X, et al. Laser soldering of fine pitch QFP devices using lead-free solders[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2009, 131(2): 021004.
- [68] Han Z J, Xue S B, Wang J X, et al. Mechanical properties of QFP micro-joints soldered with lead-free solders using diode laser soldering technology[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(4): 814-818.
- [69] Zhang L, Han J G, Guo Y H, et al. Microstructures and properties of SnAgCuCe solder joints with diode-laser soldering[J]. *Chinese Rare Earths*, 2015, 36(6): 91-95.  
张亮, 韩继光, 郭永环, 等. 半导体激光钎焊 SnAg-CuCe 无铅焊点组织与性能[J]. *稀土*, 2015, 36(6): 91-95.
- [70] Takahashi J, Nakahara S, Hisada S, et al. Laser soldering of Sn-Ag-Cu and Sn-Zn-Bi lead-free solder pastes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5662: 355-360.
- [71] Jiang N, Zhang L, Xiong M Y, et al. Research progress on lead-free soldering technology for electronic packaging[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(23): 3862-3875.  
姜楠, 张亮, 熊明月, 等. 电子封装无铅软钎焊技术研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(23): 3862-3875.
- [72] Suganuma K. Advances in lead-free electronics soldering[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2001, 5(1): 55-64.
- [73] Fukuda Y, Casey P, Pecht M. Evaluation of selected Japanese lead-free consumer electronics[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging*



- Manufacturing, 2003, 26(4): 305-312.
- [74] Hoult A P, Ong R S, Malshe A P, et al. A direct comparison of diode laser soldering of lead-tin and lead-free solders[J]. ICALEO, 2001: 1160-1168.
- [75] Sheng C. Prediction on thermal fatigue life & study on the reliability of QFP soldered joint[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.  
盛重. QFP 焊点可靠性研究及其热循环疲劳寿命预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [76] Nishikawa H, Iwata N. Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn-Ag-Cu solder on a Cu Pad [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 6-11.
- [77] Zhao M, Zhang L, Xiong M Y. Research status and development trend of Sn-Cu lead-free solders[J]. Materials Reports, 2019, 33(15): 2467-2478.  
赵猛, 张亮, 熊明月. Sn-Cu 系无铅钎料的研究进展及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(15): 2467-2478.
- [78] Wang J H, Xue S B, Lü Z P, et al. Present research status of lead-free solder reinforced by nanoparticles [J]. Materials Reports, 2019, 33(13): 2133-2145.  
王剑豪, 薛松柏, 吕兆萍, 等. 纳米颗粒增强无铅钎料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2133-2145.
- [79] Tsao L C, Chang S Y. Effects of nano-TiO<sub>2</sub> additions on thermal analysis, microstructure and tensile properties of Sn<sub>3.5</sub>Ag<sub>0.25</sub>Cu solder[J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 990-993.
- [80] Yang L M, Zhang Z F. Effects of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on growth behaviors of Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> grains in soldering reaction[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(12): 3552-3558.
- [81] Gain A K, Fouzder T, Chan Y C, et al. The influence of addition of Al nano-particles on the microstructure and shear strength of eutectic Sn-Ag-Cu solder on Au/Ni metallized Cu pads[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 506(1): 216-223.
- [82] El-Daly A A, El-Hosainy H, Elmosalami T A, et al. Microstructural modifications and properties of low-Ag-content Sn-Ag-Cu solder joints induced by Zn alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 653: 402-410.
- [83] Li M L, Zhang L, Jiang N, et al. Research progress of using nano-particles to improve properties of lead-free solders[J]. Materials Reports, 2021, 35(5): 5130-5139.  
李木兰, 张亮, 姜楠, 等. 纳米颗粒对无铅钎料改性的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(5): 5130-5139.
- [84] Gan Y W, Chen D D, Teng Y, et al. Wettability of SnAgCu lead-free solder with trace elements[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(8): 846-853.  
甘有为, 陈东东, 滕媛, 等. 微量元素对 SnAgCu 无铅焊料润湿性的影响[J]. 稀有金属, 2019, 43(8): 846-853.
- [85] Lima M S F, Riva R, Destro M G, et al. Characterization of a laser-soldered avionic component using lead-free paste[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(2): 159-164.
- [86] Amin R. Soldering with diode lasers[J]. Surface Mount Technology, 2000, 14(5): 78-80.
- [87] Wei G Q, Yang Y Q, Wen Z J. Investigation on fluxless laser jet bumping technology[J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 575-577.  
卫国强, 杨永强, 温增璟. 无钎剂激光喷射植球工艺的研究[J]. 激光技术, 2007, 31(6): 575-577.
- [88] Ji H J, Ma Y Y, Li M Y, et al. Effect of the silver content of SnAgCu solder on the interfacial reaction and on the reliability of angle joints fabricated by laser-jet soldering[J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(2): 733-743.
- [89] Yue W, Zhou M B, Zhang X P. Reliability and failure analysis of electronic components induced by the reflection of laser beam in the laser jet solder ball bonding process[C]//2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), August 16-19, 2017, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2017: 1658-1662.
- [90] Yue W, Gong C G, Zhang J X, et al. Analysis on tin spattering of a micro solder joint during laser jet solder ball bonding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802010.  
岳武, 龚成功, 张俊喜, 等. 激光喷射锡球键合微焊点溅射缺陷分析[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802010.
- [91] Yang L. Self-assembly of MEMS microcomponents and laser-induced actuation behaviors of molten droplets based on solder ball reflow[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.  
杨磊. 基于钎料球重熔的 MEMS 微部件自组装及熔滴激光驱动行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [92] Lai R F. Design and experimental research of laser solder bumping system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

- 赖日飞. 激光植球系统设计及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [93] Zhang H, Yang J, Li Y. Effects of laser ball planting parameters on shear force of welded ball[J]. *Electronics & Packaging*, 2019, 19(8): 5-7, 12.
- 张浩, 杨晶, 李耀. 激光植球工艺参数对焊球剪切强度的影响[J]. *电子与封装*, 2019, 19(8): 5-7, 12.
- [94] Zou X J. The research and development of laser-soldering system based on BGA chips[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- 邹欣珏. 基于 BGA 芯片的激光植球系统的设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [95] Shi W Q, Yang Y Q, Guo W, et al. Effects of laser pulse frequency and scanning mode on welding quality in soldering by fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 494-497.
- 师文庆, 杨永强, 郭炜, 等. 脉冲频率及扫描方式对光纤激光软钎焊的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 494-497.
- [96] Tian Y H, Wang C Q, Liu D M. Thermalmechanical behavior of PBGA package during laser and hot air reflow soldering[C]//*Proceedings of the 4th International Symposium on Electronic Materials and Packaging*, 2002, December 4-6, 2002, Kaohsiung, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2002: 293-299.
- [97] Tian Y H, Wang C Q. Effects of laser and infrared secondary reflow on microstructure of 63Sn37Pb/pad interface[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(3): 471-475.
- 田艳红, 王春青. 激光与红外重熔对 63Sn37Pb/焊盘界面微观组织的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(3): 471-475.
- [98] Tian Y H, Wang C Q, Zhang X D. Reaction kinetics between SnPb eutectic solder and Au/Ni/Cu pad during laser reflow[J]. *Material Science and Technology*, 2002, 10(2): 136-139.
- 田艳红, 王春青, 张晓东. 激光加热条件下 SnPb 共晶钎料与 Au/Ni/Cu 焊盘界面反应动力学[J]. *材料科学与工艺*, 2002, 10(2): 136-139.
- [99] Lee J H, Lee Y H, Kim Y S. Fluxless laser reflow bumping of Sn-Pb eutectic solder[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 42(8): 789-793.
- [100] Lee J H, Park D, Moon J T, et al. Characteristics of the Sn-Pb eutectic solder bump formed via fluxless laser reflow soldering[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, 29(10): 1153-1159.
- [101] Yue W, Zhang X P. Essential factors influencing the wettability of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder balls on Au pad of the right-angle solder interconnect in laser jet solder ball bonding[C]//*2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, August 11-14, 2015, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2015: 930-934.
- [102] Yue W, Zhou M B, Zhang X P. Effect of the Au bonding pad contamination on the wettability of Au/Sn-3.0Ag-0.5Cu/Au solder joints in flux-free laser jet solder ball bonding process[C]//*2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, August 16-19, 2016, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2016: 1201-1205.
- [103] Mehdizadeh N Z, Raessi M, Chandra S, et al. Effect of substrate temperature on splashing of molten tin droplets[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, 126(3): 445-452.
- [104] Wang L D, Mills J K, Cleghorn W L. Automatic microassembly using visual servo control[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2008, 31(4): 316-325.