

激光刻印阻焊技术在 T/R 组件上的研究与应用

李嘉伟*, 刘迅, 贾海斌, 郑家春, 陈永碧

(北京遥感设备研究所, 北京 100854)

摘要:针对收发(T/R)组件在软钎焊过程中,钎料在产品的镀金层壳体表面铺展的不可控现象,提出了一种激光刻印阻焊技术。该技术使用激光在产品壳体表面特定位置切割形成一条较窄的刻痕,破坏镀金层,从而实现阻断钎料漫溢的作用,同时利用产品材料不易被钎料润湿的特性,提升阻焊效果。首先,通过多次激光刻印实验,得到了T/R组件激光刻印的最佳参数;其次,通过高温和氧化实验,证明了激光刻印技术不会对刻印线边缘造成额外损伤;然后,通过阻焊实验,证明了激光刻印阻焊技术能够有效阻止钎料的漫溢,且不会对壳体的可焊性产生其他影响;最后,通过实际生产验证,证明了激光阻焊刻印技术再配合专门的定位工装,可以满足实际生产的焊料阻焊需求。

关键词:收发组件;焊料漫溢;激光刻印;焊料阻焊技术;微组裝技术

中图分类号: TG454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7859(2025)06-0104-05

引用格式: 李嘉伟, 刘迅, 贾海斌, 等. 激光刻印阻焊技术在 T/R 组件上的研究与应用[J]. 现代雷达, 2025, 47(6): 104-108.

LI Jiawei, LIU Xun, JIA Haibin, et al. Study and validation of solder mask technology by laser marking on T/R module[J]. Modern Radar, 2025, 47(6): 104-108.

Study and Validation of Solder Mask Technology by Laser Marking on T/R Module

LI Jiawei*, LIU Xun, JIA Haibin, ZHENG Jiacun, CHEN Yongbi

(Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: A solder mask technology by laser marking is proposed to solve the uncontrollable phenomenon of solder spreading on the surface of the gold-plated shell of transmitter and receiver (T/R) modules during the soldering process. This technology uses laser to cut a narrow mark at a specific position on the surface of the product shell, destroying the gold plating and thus achieving the effect of blocking the overflow of solder. Furthermore, it utilizes the characteristic of the product material that is not easily wetted by solder to improve the solder mask effect. Firstly, the optimal parameters for laser marking of T/R modules is obtained through multiple laser marking experiments in this paper; Secondly, through high temperature and oxidation experiments, it is proved that the laser marking technology will not cause additional damage to the edge of the marking line; Then, through solder mask experiments, it is proved that the laser marking solder mask technology can effectively prevent the overflow of solder and will not have any other effects on the weldability of the shell; Finally, through the actual production verification, it is proved that the laser solder mask marking technology can meet the actual production of solder mask requirements by using special positioning fixtures.

key words: transmitter and receiver (T/R) module; solder overflow; laser marking; solder mask technology; micro-assembly technology

0 引言

相控阵雷达制导在我国航天和军工领域占据着举足轻重的地位^[1-3]。其中,收发(T/R)组件是相控阵雷达制导中的核心微波模块,具备高可靠性、高集成度、小型化等优点^[4-5]。在T/R组件的生产过程中,大量基板、高频电路板、芯组等物料通过软钎焊工艺被装焊在壳体中^[6]。

软钎焊过程中,产品待钎焊表面镀金层在接触到

液态钎料时,会快速熔解从而产生浸析现象,继而在表面扩散铺展,最终实现物料与壳体的良好连接^[7]。由于T/R组件的集成密度高,因此物料焊接时必须对钎料的漫溢进行严格的控制,避免影响附近的其它功能区域。研制生产中,在不受外界环境约束的情况下,钎料的铺展过程不可控,致使钎料过度漫溢,从而影响T/R组件的整体性能。因此,需要采取必要的阻焊技术控制钎料的漫溢。

当前阶段,主要通过涂覆阻焊剂(胶)的方式来阻止钎料过度漫溢。但是,由于T/R组件内空间狭小、

焊接区域多, 致使阻焊剂(胶)的涂覆难度大、涂覆区域大、阻焊效果达不到预期, 而且经过高温作用后多余的阻焊剂紧紧附着在产品表面难以完全清除^[8], 直接影响 T/R 组件的性能。

本文以 T/R 组件软钎焊的阻焊为研究目标, 通过对激光刻印技术的分析和研究, 提出了一种激光刻印阻焊技术, 并通过工艺验证分析, 证明了该阻焊技术的可行性与可靠性。

1 激光刻印的原理

二十世纪五十年代, 激光作为一种新型光源被人们发现。通过不断的研究, 科研人员利用其聚焦点处的高温高热特点, 研制出了第一台激光刻印机, 随着相关技术的不断进步, 该技术也应用于工业的生产过程中。

激光刻印时, 其内部搭载的激光器会发射出多条水平激光束, 经 45° 全反射镜转为垂直向下的激光束, 经透镜的聚焦作用后, 在焦点处聚集成一个极小的光斑。激光刻印的原理如图 1 所示。

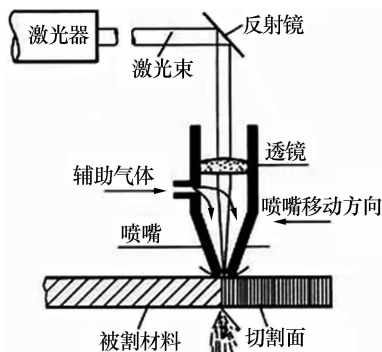


图 1 激光刻印原理
Fig. 1 Principle of laser marking

由于透镜的作用, 激光束的热量此时都被聚集在光斑处(光斑处的温度最高时能达到几千摄氏度, 最低也能达到几百摄氏度), 当光斑接触到刻印材料时, 材料被迅速加热至汽化温度, 并蒸发形成孔洞。随着光斑在材料表面上的往复移动, 孔洞连接在一起形成宽度很窄的刻痕, 从而完成对材料的刻印。在整个过程中, 材料熔化后形成的废渣会通过辅助气体(常用的气体有二氧化碳、氧气、氮气等)被及时吹走, 进而保证刻印效率及刻印质量^[9]。

2 激光刻印参数分析

软钎焊过程中阻焊技术的本质是在特定范围内阻止浸析现象的过度漫溢。为此, 本文在 T/R 组件焊接区域边缘, 利用激光刻印技术在组件表面形成一条较

窄的刻痕(T/R 组件壳体为铝合金材质, 表面依次镀有镍和金, 其中镍层厚度 4.0 μm 、金层厚度 0.5 μm), 通过破坏镀层而阻断浸析现象扩散。同时, 刻印后会露出对钎料润湿性能较差的壳体, 在这两种因素的共同作用下实现阻焊。

本文使用的激光刻印设备为小功率激光设备, 其功率通过电流调节。设备刻印效果主要受电流(功率)、频率、加工数目(一次刻印过程中, 同一位置上激光刻印次数)和扫描速度的影响。

首先, 围绕电流和频率两个参数进行实验(实验加工数目 100 次, 扫描速度 1 250 mm/s), 实验结果如表 1 所示。

表 1 频率与电流对刻印线的影响

Tab. 1 The impacts of frequencies and currents on the engraving lines

频率/Hz	电流/A	刻痕宽度/ μm	刻痕深度/ μm	刻痕状态
50	1	30.05	1.5	金层去除, 镍层大部分残留, 边缘不清晰
50	5	31.57	/	
50	8	33.84	/	
70	1	34.10	/	镍层少量残留, 边缘较清晰
70	5	34.39	/	
70	8	34.62	/	
110	1	35.51	5.9	完全露出壳体材料, 边缘清晰
110	5	37.07	/	
110	8	38.06	/	
160	1	44.34	8.0	壳体材料继续刻蚀, 刻痕边缘发黑
160	5	44.72	/	
160	8	45.02	/	

从表 1 中可以观察到, 当频率固定为 50 Hz 时, 刻蚀区域表面金层被完全去除, 随着电流的增加, 刻痕宽度逐渐变大, 但镍层有明显残留, 边缘不清晰; 当频率为 70 Hz 时, 刻蚀现象类似, 仍有镍层残留; 当频率进一步增加为 110 Hz 时, 镍层完全除去, 露出铝合金本体, 并随着电流的增加, 刻痕宽度逐渐变大, 边缘清晰; 当频率提升至 160 Hz 时, 刻蚀区域纵向继续向铝合金本体扩展, 刻痕边缘已经出现发黑现象, 刻痕宽度随着电流增加逐渐变大。

从以上观察可知, 刻痕的深度主要与频率相关。其中, 110 Hz 频率能够完全刻蚀镀层(金层+镍层); 频率过小镀层不能完全破坏(镍层残留); 频率过高对壳体本体有损伤。经多次实验证明, 刻痕的宽度与频率和电流均有正向关系。考虑在实际应用中, 在保证镀层完全刻蚀前提下刻痕宽度越小越好。因此, 110 Hz 左右为较优选择, 电流选择 1 A 即可。

多次实验结果表明, 扫描速度主要影响刻痕深度。结合频率与电流的实验结果, 扫描速度保持设备推荐的 1 250 mm/s 不变, 进一步优化频率和加工数目如表 2 所示, 再验证实际阻焊效果。

表 2 激光刻印参数设置

Tab. 2 Laser marking parameter settings

通道	频率/ Hz	加工数目/ 次	电流/A	扫描速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
通道 1	100	50	1	1 250
通道 2	100	100	1	1 250
通道 3	120	100	1	1 250
通道 4	120	150	1	1 250

激光刻印后,在 90 倍显微镜下对壳体中的刻痕进行观察,得到如图 2 所示的刻印效果图。

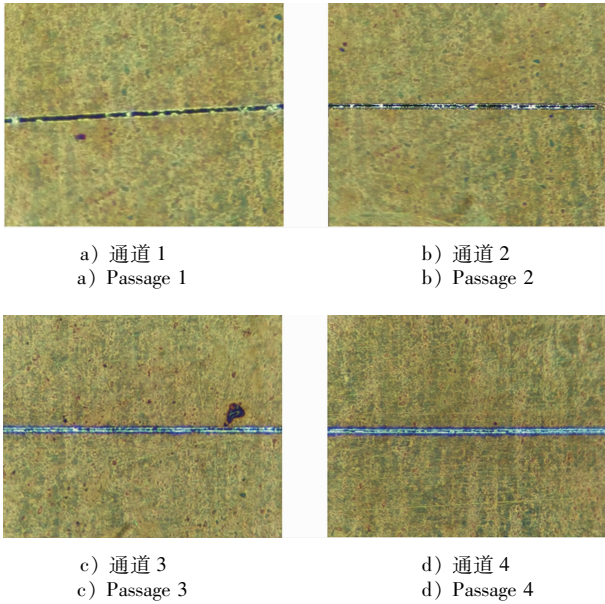


图 2 激光刻印效果
Fig. 2 Effects of laser marking

从图 2 激光刻印效果可以看出,四种条件均可以对镀层进行完全切割。通常,铝合金在一定的高温条件下会发生结晶、偏析等现象^[10]。因此从图中可以观察到,通道 1 在切断镀层后,由于频率相对较低,作用时间较短,激光对刻印区域的铝合金影响不大,通过显微镜仅能观察到一条明显的缝隙(约 $35 \mu\text{m}$),以及少量的晶粒偏析现象。随着频率与加工数目的增加,作用在铝合金表面的温度提高,通道 2、通道 3、通道 4 切割缝隙中发生的晶粒偏析逐渐增加,至通道 4 时,切割缝隙已基本被晶粒覆盖。

3 高温对刻印线边缘的影响

激光高温作用可能会对刻印边缘镀金层产生影响,尤其产品表面经过较长时间的氧化后,刻印边缘金层易发生脱落,从而导致焊接空洞等现象。

为了解激光对 T/R 组件刻印线边缘的影响,将经过激光刻印后的壳体暴露在空气中放置 3 天。之后,将壳体放置在加热台上,在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 下持续烘烤 10 min。待壳体自然冷却后,在 200 倍显微镜下对通道 1 到通道 4 的激光刻印线边缘进行观察,结果如图 3 所示。

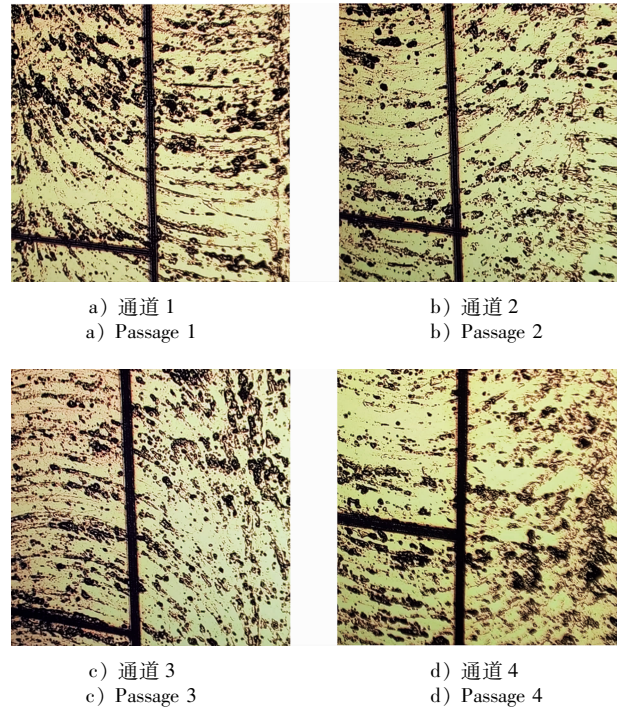


图 3 高温后激光刻印线边缘效果
Fig. 3 Effects of laser marking line edges after high temperature

从图 3 中可以清楚看出,经过高温后,视野范围内表面组织保持均匀,激光刻印形成的刻印线边缘无异常变化,亦无膨胀起包或脱落现象。使用刀片轻触镀金层,也未出现金层脱落。上述实验表明,激光不会对刻印线边缘造成损伤。

4 T/R 组件激光阻焊技术验证

4.1 阻焊剂(胶)的性能分析

随着信息技术的不断进步,T/R 组件的性能不断提高,同时也伴随着其集成密度的不断增加。为了防止电气互联短路现象的发生,当前主要通过涂抹阻焊剂(胶)的方式实现阻焊作用。

阻焊剂(胶)的主要成分包括:树脂、固化剂、溶剂、促进剂等,具有耐酸、碱性、稳定性强、不易挥发等特点^[11]。当前常用的阻焊剂(胶)有白胶、红胶、粉胶和绿油,其阻焊效果均可以达到 90% 以上,但是在经过高温作用后,均存在一定的残留问题(如表 3 所示)。

表 3 不同阻焊剂高温后的状态

Tab. 3 The states of different solder masks after high temperatures

种类	形态	清理难度
白胶	脆性粉末	很大
红胶	硬块	大
粉胶	黑色胶状	一般
绿油	胶状	较小

相比其他三种阻焊胶,绿油稳定性更强,清理难度相对更小,因此绿油成为软钎焊生产过程中使用最多的阻焊剂。绿油的综合性能虽较好,但仍然需要进行

人工清理,且难以保证后续无残余物存留。此外,阻焊剂(胶)涂覆宽度通常超过 0.7 mm,对 T/R 组件等雷达微波组件有限空间内的涂覆操作带来了更多的困难。

4.2 激光阻焊效果分析

为验证激光刻印阻焊技术的可行性,本次实验通过观察钎料在壳体上融化后的铺展情况分析该技术的实际阻焊效果(加工参数见表 2)。钎料选用 Sn5Pb92.5Ag2.5 焊锡丝(熔点 287 ℃)。

实验过程中,将壳体放置在加热台加热,加热台温度设置为 300 ℃(控温精度 5 ℃),并同时使用接触式热电偶检测壳体的表面温度。当壳体表面温度到达 290 ℃左右,用镊子在激光刻印线边缘开始添加焊锡丝,等待焊锡丝完全融化并向周围铺展至刻印线附近,取下壳体冷却至室温后,在 90 倍显微镜下观察,得到如图 4 所示阻焊效果。

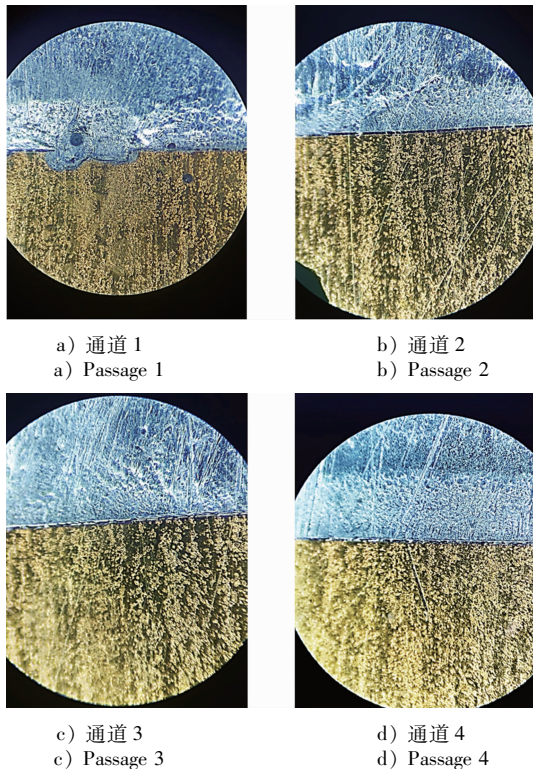


图 4 激光阻焊技术的阻焊效果
Fig. 4 Effects of laser solder mask

从图 4 中的阻焊效果,可以清楚观察到:通道 1 上由于在激光刻印中只切断了镀层,壳体本体组织影响不大,使得少量钎料向镀金层一侧漫溢,但大部分钎料被阻隔在刻印线一侧;通道 2、通道 3、通道 4 在激光刻印中,不仅完全切断了镀层,也使得铝合金壳体出现了明显的晶粒偏析。由于铝合金晶粒偏析,使得壳表面对钎料的润湿性进一步下降,钎料被完全阻隔在激光刻印线的一侧,达到了预期的阻焊效果。

上述实验结果表明,频率在 100 Hz~120 Hz,加工数目在 100 次~150 次(电流 1 A,扫描速度 1 250 mm/s)范围内,即可获得良好的阻焊效果。考虑到不同产品

镀层厚度的差异性以及加工效率,本文推荐面向 T/R 等微波组合(结构件通常采用铝合金,表面镀覆 Ni+Au 层),较优的激光加工参数为频率 120 Hz、加工数目 100 次、电流 1 A、扫描速度 1 250 mm/s。

以下进一步分析激光刻印对壳体镀金层可焊性的影响。在壳体上刻印长方形(如图 5a)、图 5b),并将其放置在加热台上(温度设置为 300 ℃)。对该区域使用焊锡丝进搪锡处理后,将陶瓷基片(背面镀金)放置并按压后完成焊接(如图 5c)。使用 X 射线检验设备得到如图 5d)所示的焊接效果。

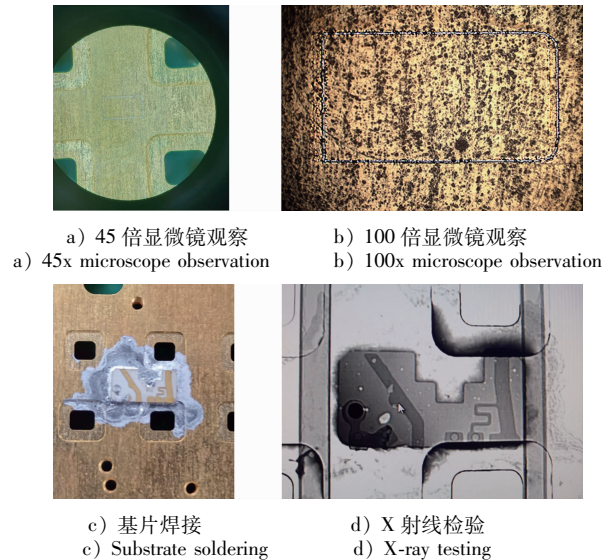


图 5 刻印线处可焊性效果
Fig. 5 Solderability effect at the marking line

从 X 射线检测中可以清楚观察到,钎焊后刻印线附近无异常,焊接效果良好,因此激光刻印技术不会对壳体镀金层可焊性造成影响。而且,该技术相比于涂抹阻焊剂(胶)的传统阻焊方式,在高温加热前后均不会在壳体上产生残留,降低了焊接后续清理难度。同时,形成的极窄刻痕更适用于 T/R 组件等高密度微波组件的设计要求。

4.3 激光阻焊技术的生产应用验证

通过某型号 T/R 的实际生产,对激光阻焊技术进行应用验证。为便于生产,通过在刻印平台上加装自研定位工装(如图 6),保证了刻印的重复精度。

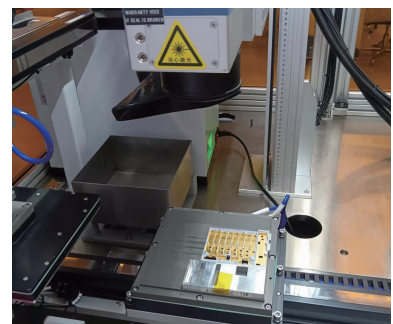


图 6 定位工装装配效果
Fig. 6 Positioning tooling assembly effect

通过实际的生产焊接后,在 45 倍显微镜和 20 倍显微镜下观察到单一通道和多通道的阻焊效果分别如图 7a)和图 8a)所示。

从图 7、图 8 中可以清楚观察到,激光刻印阻焊技术对钎料的阻焊效果明显,钎料在刻印线处浸析中断,无继续漫溢现象,表明该技术能够满足实际生产过程中的阻焊需求。

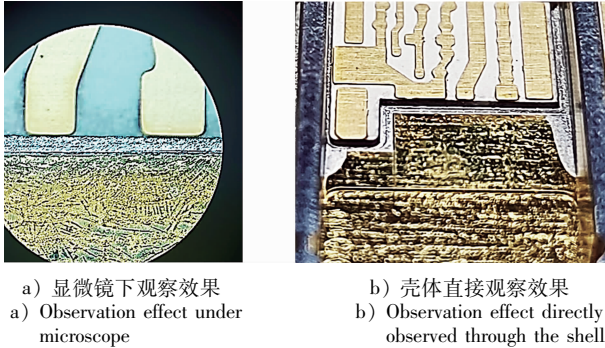


图 7 单通道阻焊效果
Fig.7 Single-pass solder mask effect

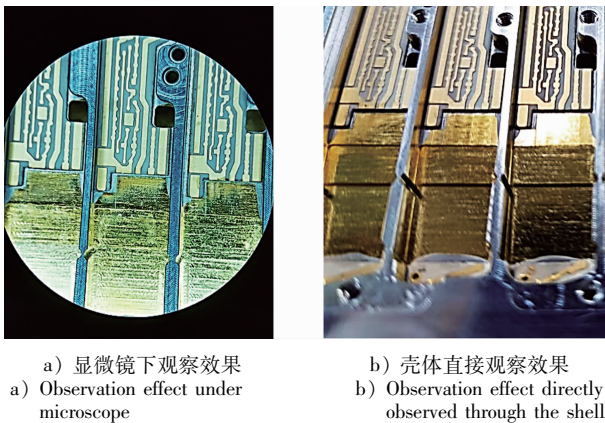


图 8 多通道阻焊效果
Fig.8 Multi-pass solder mask effect

5 结束语

本文通过对阻焊原理的分析,提出了一种利用激光刻印对待焊接区域进行刻印的阻焊技术。该技术通过破坏产品表面镀层阻断浸析现象的扩散,并利用产品材料不易被钎料润湿的特性提升阻焊的效果。实践证明,该技术可以满足实际生产的需求。

参考文献 (References)

- [1] 王从思,于蓉,王艳,等.有源相控阵天线服役性能调控技术进展与挑战[J].电子机械工程,2023,39(1):12-20.
WANG Congsi, YU Rong, WANG Yan, et al. Progress and challenge of operating performance regulation technology for active phased array antennas[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2023, 39(1): 12-20.
- [2] 李涛,徐太栋,李艳龙,等.一种星载相控阵天线的热设计研究[J].电子机械工程,2023,39(6):34-37.
LI Tao, XU Taidong, LI Yanlong, et al. Research on thermal design of a spaceborne phased array antenna[J]. Elec-

- tro-Mechanical Engineering, 2023, 39(6): 34-37.
- [3] 洪伟,陈喆,周培根,等.毫米波太赫兹集成电路与工艺[J].微波学报,2023,39(5):1-18.
HONG Wei, CHEN Zhe, ZHOU Peigen, et al. Millimeter wave and terahertz integrated circuits and processes [J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(5): 1-18.
- [4] 吴毓颖. T/R 组件关键制造技术研究[D].上海:上海交通大学,2020.
WU Yuying. Research on key manufacturing technologies of T/R components [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [5] 凌清岚,姚常飞,张炎.330 GHz 集成化 T/R 组件的设计与实现[J].微波学报,2024,40(3):79-84.
LING Qinglan, YAO Changfei, ZHANG Yan. Design and implementation of 330 GHz integrated T/R module [J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(3): 79-84.
- [6] 吕慎刚,江守利.星载微组装 T/R 组件的封装设计[J].电子机械工程,2023,39(3):44-48.
LÜ Shengang, JIANG Shouli. Packaging design of micro-assembly T/R module of space-borne radar [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2023, 39(3): 44-48.
- [7] 吴旻,胡贺南,王子航,等.三维立体电路自动化组装焊接加工研究[J].电子机械工程,2024,40(1):39-44.
WU Min, HU Henan, WANG Zihang, et al. Research on automatic assembly and welding of three-dimensional circuit [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2024, 40(1): 39-44.
- [8] 吴昱昆,王禾,潘旷,等.微波组件高可靠阻焊研究[J].电子工艺技术,2019,40(3):151-152.
WU Yukun, WANG He, PAN Kuang, et al. Research on highly reliable welding resistant technology for microwave module [J]. Electronics Process Technology, 2019, 40(3): 151-152.
- [9] 陈胜,黄辉宇,董雄炜,等.激光切割技术的研究现状[J].有色金属加工,2022,51(5):1-6.
CHEN Sheng, HUANG Huiyu, DONG Xiongwei, et al. Research status of laser cutting technology [J]. Nonferrous Metals Processing, 2022, 51(5): 1-6.
- [10] ENGLER O, LÜCKE K. Influence of the precipitation state on the cold rolling texture in 8090 Al Li material [J]. Materials Science and Engineering, 1991, 148(1): 15-23.
- [11] 汤俊,刘刚,王听岳.大面积软钎焊中的阻焊技术[J].电子机械工程,2000(2):59-62.
TANG Jun, LIU Gang, WANG Tingyue. Solder mask technology in large-area soldering [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2000(2): 59-62.

作者简介:

李嘉伟 男,1997年生,硕士,工程师,研究方向为微组装钎焊焊接工艺技术;

刘迅 男,1979年生,博士,研究员,研究方向为材料及工艺研究;

贾海斌 男,1987年生,硕士,高级工程师,研究方向为微组装及高频组件封装工艺;

郑家春 男,1986年生,硕士,高级工程师,研究方向为微组装高频组件工艺;

陈永碧 女,1989年生,大学本科,工程师,研究方向为微组装钎焊焊接工艺。