光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023120301

一种新型自封焊小型化光电探测模块

王茂旭*，汤振华，于　优，刘　婷，肖永川，瞿鹏飞

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 提出了一种基于 LTCC 陶瓷基板的自封焊小型化光电探测模块，通过 LTCC 内埋电阻发热快速实现器件的密封。该模块不仅可以支持内部集成多种功能的光电芯片，还可与外部单元实现平面化、表贴式贴装，大幅提升模块安装适配性与可靠性。通过测试，模块在 18 GHz 频率范围内具有高响应度与高平坦度，在体积上相较分立器件缩小了一个数量级，同时模块成本预计可降低一半以上，在机载、星载、弹载等平台的宽带相控阵系统中具有广阔的应用前景。

关键词： 光电探测；自封焊；集成化；微波光子

中图分类号： TN15　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0401－05

Self-sealing Integrated Photodetector Module for Broadband Phased Array Systems

WANG Maoxu, TANG Zhenhua, YU You, LIU Ting, XIAO Yongchuan, QU Pengfei

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: In this study, we developed a self-sealing miniaturized photoelectric detection module based on a low-temperature co-fired ceramic (LTCC) substrate. We confirmed that the module facilitates the rapid sealing of devices through the heating of the embedded resistance of the LTCC. It supports the internal integration of multi-functional optoelectronic chips and enabled planar and surface-mount mounting with external units; therefore, the module exhibits enhanced installation adaptability and reliability. Test results showed that the module has high responsiveness and flatness in the 18 GHz frequency range, with its volume reduced by an order of magnitude compared to that of a discrete device. The cost of the module is expected to decrease by more than half, making it suitable for a wide range of applications in broadband phased array systems on airborne, spaceborne, missile-borne, and other platforms.

Key words: photoelectric detection; self-sealing; integration; microwave photonics

0　引言

微波光子学是微波技术和光子技术相互融合，用光子技术解决微波瓶颈问题的交叉学科。由于微波光子系统具备宽带、低损耗、重量轻、接入灵活等优点，已在雷达、电子战、宽带无线接入网等诸多领域展现出巨大的应用潜力[1-5]。

光电探测器是微波光传输、处理、信号产生等系统中必不可少的器件之一，其性能直接决定了输出微波信号的质量以及系统灵敏度等关键指标。近年，光电探测器在提升带宽、响应度、饱和光功率、灵敏度等性能指标和芯片的新材料、新工艺、新结构上取得了大量的成果[6-11]。但这些成果没有解决目前分立光电探测器体积大、难以和系统集成、价格昂贵等问题。

针对目前微波光子系统对高集成微波光子器件的迫切需求，本文提出了一种基于 LTCC 陶瓷的表贴型自封焊光电探测器，该光电探测器通过在 LTCC 陶瓷内部埋置发热电阻的方式实现自发热封焊，较容易地实现了器件的气密封装。同时，通过LTCC

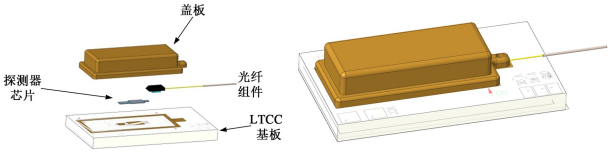
收稿日期：2023－12－03.

* 通信作者：王茂旭

陶瓷多层布线实现射频信号以及直流信号的对外连接，不再需要昂贵的金属管壳和射频连接器。这种方式既能实现良好的可靠性，又能在低成本下实现高集成度，是现阶段微波光子链路中较为理想的器件。通过该方式实现的光电探测器，体积仅为 24 mm×14 mm×5 mm，且内部可方便集成放大器、数控衰减器等射频芯片，平面化、贴片式设计也便于该模块和后端信号处理单元进一步集成。

1 器件设计和仿真

自封焊光电探测模块构成如图 1 所示，主要由陶瓷基板、金属盖板、光电探测芯片、光纤组件等部分构成。其中金属盖板主要用于模块的整体气密，光纤组件用于调制光信号的输入，探测器芯片用于将调制光信号转为电信号，陶瓷基板主要用于实现自发热、宽带射频信号的引出以及电源、控制等信号的输入。



（a）爆炸图 （b）整体图

图 1 模块整体结构图

从模块的构成可以看出，陶瓷基板、光纤组件以及壳体的设计是本模块的关键，下面就各个部分进行详细描述。

1.1 陶瓷基板设计和射频仿真

模块中陶瓷基板主要实现自发热、射频信号引出以及供电等功能。材料需兼顾高频特性、热传导性以及稳定性。综合考虑，本模块陶瓷基板采用综合性能均衡的 Ferrro A6M 材料，基板厚度为 2 mm，共 21 层，各层分布如图 2 所示。



图 2 陶瓷基板各层分布示意图

陶瓷基板第 1 层、第 2 层，第 21 层为主要功能层。第 1 层布局如图 3 所示，主要包含微带线、隔热空腔、焊料放置区域、直流焊盘区域、芯片贴片区域、探测芯片供电焊盘以及顶层焊盘。

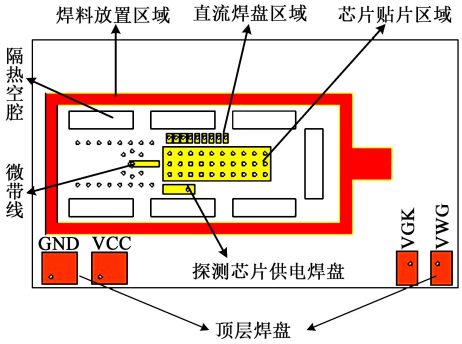


图 3 基板第 1 层布局图

其中，微带线与底层共面波导互连，通过金丝与探测器芯片连接，实现射频信号的对外传输。7 个厚度为 1 mm 的隔热空腔用以改变基板传热路径，防止封焊加热时，芯片贴片区域过热。焊料放置区域与第 2 层内埋电阻对应，此区域用于预镀焊料或放置相应焊料以实现模块的气密；直流焊盘区域与底部直流焊盘相连，可实现各类直流信号的互连；VCC 焊盘与探测器芯片供电焊盘相连，用以探测器芯片的耦合；VGK 和 VWG 分别控制管壳和光纤尾管下方的内埋电阻发热，实现气密。

如图 4 所示，陶瓷基板第 2 层为内埋电阻层。内埋电阻材料选用 FX 87-101B，阻值为 100 Ω/□。考虑到模块的生产和维修便利性，内埋电阻分为两个独立部分，以实现壳体和光纤部分的独立加热。为了加热均匀性，壳体加热网络是由 12 个阻值相同的均匀方阻网络并联成构成，光纤尾管处为单独的方阻，可独立实现尾纤的焊接。

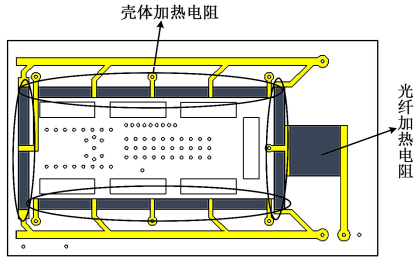


图 4 基板第 2 层布局图

如图 5 所示为基板底层布局，主要包含直流焊盘、接地共面波导以及地。除直流焊盘和共面波导区域外，整体镀金接地处理，只需将模块贴片到相应电路板上，就可实现模块的供电、控制、共地和射频信号的传输。

对于模块的射频性能，主要涉及探测器芯片输

出的射频信号与底面共面波导的信号传输。射频信号传输模型如图 6 所示，传输路径可以分为顶层微带线、中间层带状线 1、中间层带状线 2 以及底层共面波导 4 部分，各部分之间通过信号过孔连接。微带线和共面波导为 2 层 LTCC 介质(厚度 0.2 mm)，带状线 1 和带状线 2 为均匀带状线，上下各 3 层介质(厚度 0.3 mm)。其中，微带线宽 w_1 为 0.29 mm，带状线线宽 w_2 为 0.2 mm，底层共面波导线宽 w_3 为 0.29 mm，缝隙宽 g 为 0.1 mm。

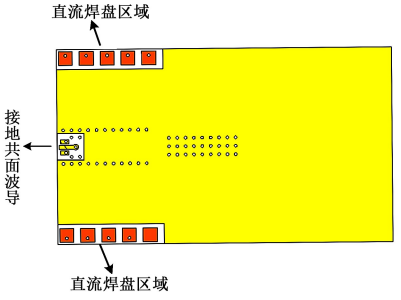


图 5　基板底层布局图

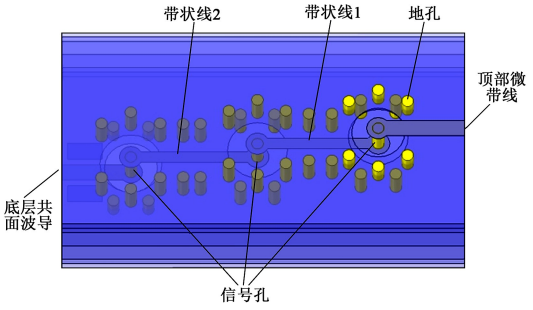


图 6　射频信号传输模型

为了获得良好的射频性能，本模块采用类同轴设计，在信号孔四周通过接地过孔建立类同轴结构，对信号传输质量影响较大的信号过孔半径 r_1 和接地过孔半径 r_2，类同轴结构半径 r_3 以及反焊盘半径 f_1，f_2，f_3 进行多次优化，当 r_1 和 r_2 为 0.1 mm，r_3 为 0.76 mm，f_1 为 0.46 mm，f_2 和 f_3 为 0.52 mm 时，射频信号传输性能最佳，S 参数仿真结果如图 7 所示。

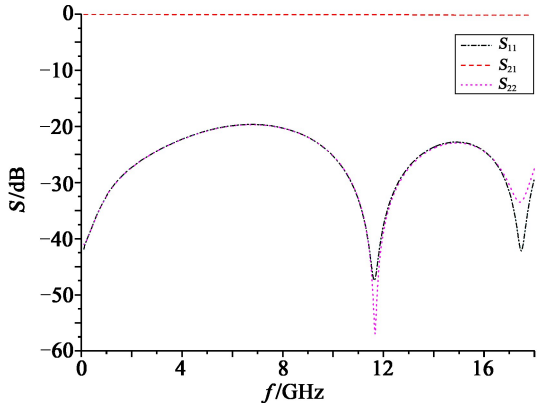


图 7　射频信号 S 参数仿真结果

从仿真结果可以看出，在 0.1～18 GHz 范围内，该结构输入输出驻波均小于－20 dB，S_{21} 小于 0.35 dB，可以实现信号的高质量传输。

1.2　光纤组件设计和光学仿真

对于探测器芯片耦合，一般来说，有垂直耦合和平面耦合两种方式。垂直耦合需将光电探测器芯片垂直放置，不利于芯片高频性能的实现和模块集成化，故本模块采用平面化 45 度光纤的方式进行耦合，采用这种方式，光电探测器芯片可水平放置，光纤组件结构如图 8 所示，主要由 45 度光纤、V 型槽玻璃片、固定玻璃片以及镀金区域构成。其中，45 度光纤将光信号从水平传输转换为垂直向下传输，以实现调制光信号与光电探测器芯片的耦合；V 型槽玻璃片和固定玻璃片用于 45 度光纤的固定；镀金区域用于与焊料结合，实现模块的整体气密。使用 ZEMAX 19.4 软件对上述光纤组件和光敏面为 20 μm 的光电探测芯片进行仿真建模，如图 9 所示。其中，光纤采用康宁 SMF-28e，光纤与探测器芯片垂直距离固定为 0.07 mm，由于光斑呈椭圆形，经过仿真发现 z 方向在光斑中心偏移光敏面中心距离在±10 μm 以内对耦合效率几乎无影响，y 方向中心偏移距离与耦合效率变化的关系如图 10 所示。

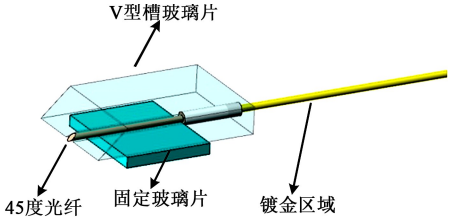


图 8　光纤组件示意图

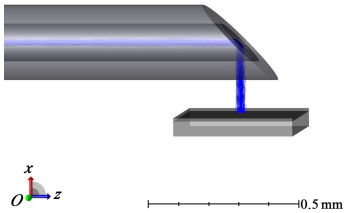


图 9　光学仿真模型

得到的耦合效率分布曲线如图 10 所示，从仿真结果可以看出，耦合精度在±4 μm 以内，可达到最佳耦合效率 90%，而本团队采用的耦合设备精度在 0.5 μm，采用此种耦合方式可以实现较为理想的耦合效率。

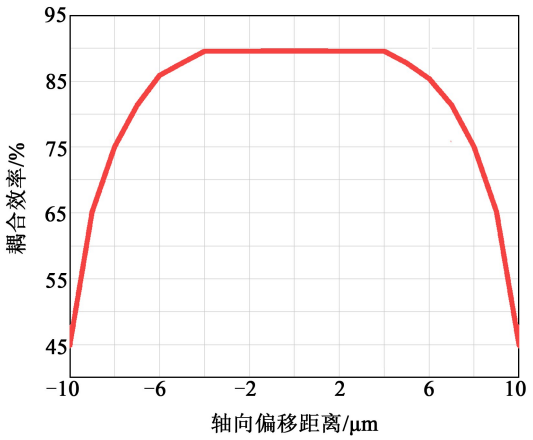


图 10 y 方向偏移对耦合效率的影响

1.3 金属盖板设计和热仿真

模块盖板如图 11 所示，包含焊接区域、光纤让槽和焊料注入口。其中，焊接区域与基板加热区域对应，结合焊料即可实现模块的密封，光纤让槽主要实现光纤穿过壳体的功能。结合焊料注入孔，在光纤镀金部分注入焊料即可实现光纤和壳体的密封。

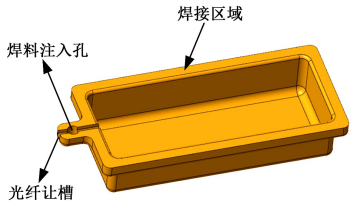


图 11 模块盖板示意图

按照上述设计，在 25 ℃常温且为开放空气自然对流的环境下，底面放置一个与陶瓷基板对应芯片贴片区域相接触的 6061 铝合金热沉。以 10 W 功率加热 11 s 时，得到 LTCC 基板的温度云图如图 12 所示。

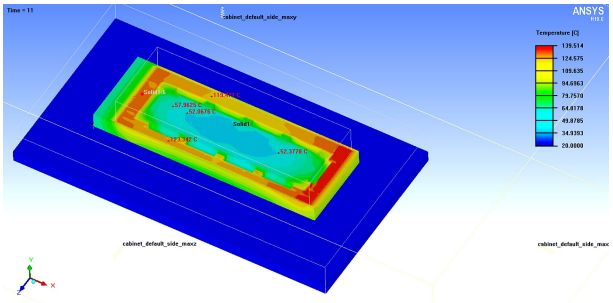


图 12 基板加热时温度分布云图

从温度云图可见，在此条件下，发热区域的平均温度为 120 ℃，芯片贴片区域最高温度为 57 ℃，两者温差可达 60 ℃以上。对于密封焊料，本模块采用的是熔点为 112 ℃的铟锡焊料，而本模块对温度最敏感的为耦合时采用的的紫外胶（Norland NOA81），其可在 85 ℃环境中稳定工作，因此，密封加热过程不会对模块造成不良影响。

2 模块封装与表征

根据上述方案，我们对模块进行了加工制造，加工后的陶瓷基板发热电阻网络阻实测值为 93 Ω（壳体加热网络）和 86 Ω（光纤加热电阻）。为了验证陶瓷基板的发热能力和加热区域与芯片区域的温差。对 VGK 焊盘施加 32 V 的电压，电流为 0.34 A。采用 NNI-T UT320D 接触式测温仪对陶瓷基板的温度分布进行测量，通电 15 s 后，发热区域平均温度为 116 ℃，芯片贴片区域平均温度为 62 ℃，验证了基板的发热能力，温差与仿真结果吻合，可以满足本模块的使用要求。

基于此基板，按照图 13 所示的工艺流程，采用本所自研的 20 GHz 光电探测器芯片进行贴片、耦合验证，耦合完成后的基板如图 14(a)所示，经过自发热封焊后的模块如图 14(b)所示。

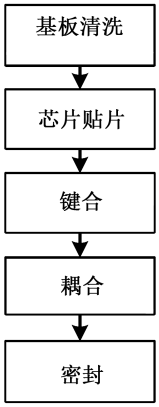
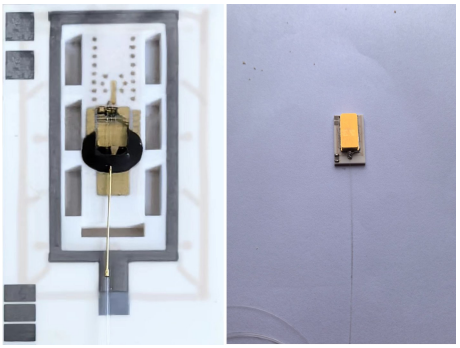


图 13 模块工艺流程

对于模块的射频性能，采用板载式探针连接器（Talent Microwave 2.92-KFDEL25）将模块射频信号引出，采用 Keysight N4373e 光波元件分析对模块进行测试，得到如图 15 所示的 S 参数。

从测试结果可以看出，在 0.1～18 GHz 范围内，模块 S_{21} 在 2 dB 以内，S_{22} 在 1.6 dB 以下，模块性能良好。

最后，为了验证模块的气密性能，将封焊完成的模块按 GJB128A 方法进行气密试验，试验表明，在 517 KPa，85 ℃的氟油中，通过 2 h 试验模块均能保持良好气密性、无气泡冒出，满足光电探测器一般使用场景。



（a）内部视图　　（b）成品图

图 14　自封焊集成光电探测器实物图

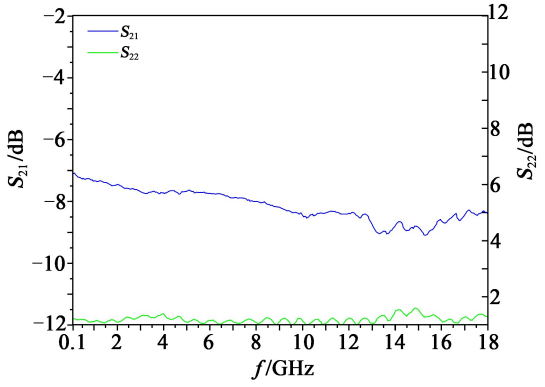


图 15　模块 S 参数实测曲线

3　结论

本文基于 LTCC 陶瓷基板内埋电阻技术和多层布线技术，实现了一种贴片式自封焊小型化光电探测器件。结果表明该模块可以不依赖于传统气密封焊设备，灵活实现密封。而且采用集成化贴片式设计，既可方便与后端应用系统集成，也可方便与放大器、数控衰减器等常用射频芯片集成，其可靠性高、成本低、体积小，可广泛应用于雷达、电子战、通信等领域。

参考文献：

[1] Yao J P, Capmany J. Microwave photonics[J]. Sci. China Inf. Sci., 2022, 65(12): 221401.

[2] Berceli T, Herczfeld P R. Microwave photonics a historical perspective[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2010, 58(11): 2992-3000.

[3] 何　刚，瞿鹏飞，孙力军. 微波光子技术应用现状及趋势[J]. 半导体光电，2017，38(5)：627-632.
He Gang, Qu Pengfei, Sun Lijun. Application status and trend of microwave photonic technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(5): 627-632.

[4] 李佳琛，杨四刚，陈宏伟，等. 集成微波光子射频前端技术（特邀）[J]. 半导体光电，2022，43(1)：1-11.
Li Jiachen, Yang Sigang, Chen Hongwei, et al. Integrated microwave photonic RF frontend technologies (Invited)[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(1): 1-11.

[5] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nat. Photonics, 2007, 1(6): 319-330.

[6] 刘　宇，林志诚，王鹏飞，等. 超宽带光电探测器研究进展[J]. 红外与毫米波学报，2023，42(2)：169-187.
Liu Yu, Lin Zhicheng, Wang Pengfei, et al. Research progress of ultra-broadband photodetectors [J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2023, 42(2): 169-187.

[7] 熊　兵，晁恩飞，罗　毅，等. 超宽带高饱和单行载流子光探测器研究（特邀）[J]. 红外与激光工程，2021，50(7)：64-69.
Xiong Bing, Chao Enfei, Luo Yi, et al. Research on ultra-wideband and high saturation power uni-traveling carrier photodetectors (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 64-69.

[8] Wang J, Xie Z, Zhu L, et al. InP-based broadband photodetectors with InGaAs/GaAsSb type-Ⅱ superlattice[J]. IEEE Electron Device Lett., 2022, 43(5): 757-760.

[9] 程碑彤，代　千，谢修敏，等. 单光子探测器的研究进展[J]. 激光技术，2022，46(5)：601-609.
Cheng Beitong, Dai Qian, Xie Xiumin, et al. Research progress of single-photon detectors[J]. Laser Technology, 2022, 46(5): 601-609.

[10] 刘　宇，林志诚，王鹏飞，等. 超宽带光电探测器研究进展[J]. 红外与毫米波学报，2023，42(2)：169-187.
Liu Yu, Lin Zhicheng, Wang Pengfei, et al. Research progress of ultra-broadband photodetectors [J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2023, 42(2): 169-187.

[11] Chen H T, Verheyen P, Heyn P D, et al. High-responsivity low-voltage 28-Gb/s Ge p-i-n photodetector with silicon contacts[J]. J. Lightwave Technol., 2015, 33(4): 820-824.

作者简介：

王茂旭（1992—），男，重庆市合川区人，硕士，工程师，主要研究方向为微波光子技术与光电混合集成技术。