

基于LCP基板的射频子阵共形一体化制造技术

罗燕 丁蕾 周义 陈桂莲 王立春

(上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109)

文 摘 为解决共形相控阵雷达中组件与共形天线平台不匹配以及线缆插拔带来的系统不稳定等问题,对基于LCP基板的柔性T/R组件封装技术开展研究。分析了基板层压质量控制及有源芯片埋置方法,通过ANSYS软件仿真了基板不同弯曲角度下的应力分布。结果显示叠层压辅材后的优化层压过程可以有效去除层间气泡,MMIC埋置的气密性可达 $7.4 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。仿真结果表明在 $-55 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度循环下,当基板弯曲角度大于 10° 时,弯曲应力随着弯曲角度的增加迅速增长。当基板弯曲角度小于 10° 时,T/R共形组件保持优良性能。

关键词 柔性T/R组件,LCP基板,层压,埋置,弯曲应力

中图分类号:TN454

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.006

Conformal Integrated Manufacturing Technology of RF Subarray Based on LCP Substrate

LUO Yan DING Lei ZHOU Yi CHEN Guilian WANG Lichun

(Shanghai Aerospace Electronic and Communication Equipment Research Institute, Shanghai 201109)

Abstract In the conformal phased array radar, the flexible surface T/R module based on LCP substrate was studied in order to solve the problems such as the mismatching between components and the antenna plane and the system instability caused by the increase of plug and unplug of cable connection. The LCP laminating quality control and the chip embedding was investigated. The assembly stress on LCP multi-layer substrate was analyzed with ANSYS. The results show that optimized lamination process with auxiliary material makes the substrate flat without cavity inside. The air tightness of LCP substrate embedded with MMIC is $7.4 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. The simulation results show that the stress increases rapidly between temperature of -55 and 80 degree centigrade when the LCP substrate's bending angle is greater than 10 degrees. The conformal T/R module remains well performance with LCP substrate bending 10 degrees. The LCP substrate has a good potential in conformal phased array.

Key words Flexible T/R module, LCP substrate, Laminating process, Chip embedding, Stress simulation

0 引言

相对于高烧HTCC、低烧LTCC基板,有机材料基板具有介电常数选择范围宽(2~10)、采用低成本的PCB工艺、可形成复杂的多层结构等优势,是广泛使用的微波电路板技术之一。数十年来,聚四氟乙烯基(PTFE based)材料一直是高性能微波有机基板的主要选择。但最近十年,液晶聚合物(LCP)基板得到了持续的关注,在微波到毫米波(高至110 GHz)频段内展现出可与PTFE材料相比拟的优异介电性能^[1],且兼具优异的热稳定性、高模量、可裁剪热膨胀系数以及低吸湿率等特点^[2],

在射频系统中展现出了广阔的应用前景^[3-5]。

各种以LCP基板开发的微波/毫米波滤波器、

VCO、T/R模块、RF MEMS、SIP、SOP封装等应用研究相继见诸报道^[6-8]。随着射频通讯工作频率的不断提高,天线等无源器件尺寸大大缩小,需实现组件与天线的共形,以满足其小型化、多功能化的发展^[9-11]。

本文结合LCP基板高频低损耗以及可气密封装的特点,制备有源埋置的曲面组件。通过层压工艺优化以及过程控制,制得内部无气泡、平整、无导体漂移的LCP多层板,利用垫块大幅降低MMIC芯片在基板弯曲时的应力,最后弯曲退火获得电性能良好的曲面组件。

1 实验

1.1 有源子阵封装结构设计

基于LCP基板设计了曲面射频组件,如图1所示,共5层LCP基板和4层连接层。LCP基板厚度为 $100 \mu\text{m}$,

收稿日期:2021-08-17

第一作者简介:罗燕,1987年出生,博士,高级工程师,主要研究方向为微电子封装。E-mail:luoyan1120@qq.com

连接层厚度 25 μm , 基板覆铜层厚度 12 μm 。底层为接地层, 接着为 MMIC 埋置层, 通过 LCP 进行气密封装, 基于 LCP 通孔电镀技术实现层间的电气互连及接地。MMIC 贴装在 MoCu 垫块上实现结构支撑与散热, 多层结构及电路通过 HFSS 仿真进行设计。

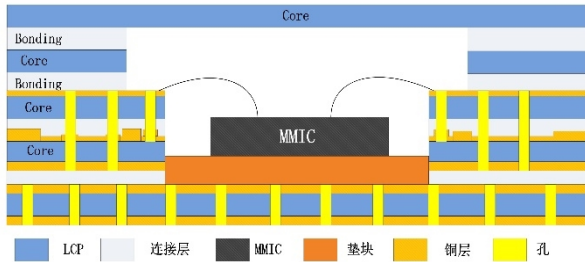


图1 LCP组件结构图

Fig. 1 LCP module structure

1.2 共形子阵封装流程

依据子阵结构, 封装工艺流程如图2所示。首先根据每层LCP的电路图进行光刻, 并将布线镀 Ni/Pd/Au 提高键合强度。然后将连接层与 LCP 基板进行预固化, 加压下 130 $^{\circ}\text{C}$ 停留 20 s 冷却取出。为了实现 MMIC 埋置, 通过激光进行埋置槽加工。底层 LCP 基板通过分布大量接地孔来实现底层 LCP 的接地与散热。采用先键合再通孔加工的方式, 经过多次层压实现埋孔、盲孔、通孔的制备。最后用 LCP 基板封盖实现气密, 完成平面子阵制备。使用弯曲工装进行基板的弯曲成形, 将基板弯曲后进行退火, 去除基板内应力, 然后贴装在共形平台上, 焊接接插件, 获得共形有源子阵。

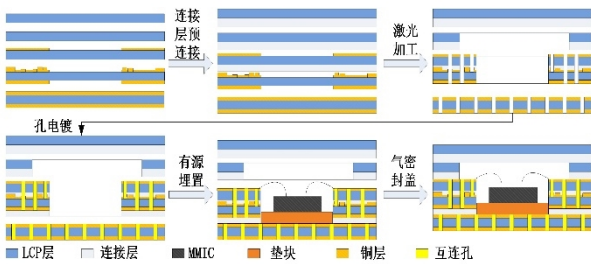


图2 封装工艺流程图

Fig. 2 Flow diagram of package process

1.3 有限元模型建立

基板弯曲时薄膜会产生应力, 严重时可能导致基板分层或薄膜开裂失效。通过 ANSYS 软件建立基板模型, LCP 基板的仿真材料参数如表 1 所示。

仿真设定温度为热冲击条件, $-55\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 材料起始温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$; 为考察弯曲度对 LCP 基板在环境应用中的影响及影响趋势, 这里选择板长 34 mm, 弯曲度设置 5 个值 (5° 、 10° 、 20° 、 43° 、 65°) 进行仿真分析。为剥离底板本身应力对仿真数据精度的干涉, LCP 约束设定为固定。

表1 LCP基板弯曲应力仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of bending stress of LCP substrate

$\rho/$ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$E/$ GPa	ν	$\text{CTE}/10^{-6}\text{K}^{-1}$			$\sigma/$ MPa
			x	y	z	
1.4	4.5	0.3	18	18	209	150

2 结果与讨论

2.1 多层 LCP 基板层压成型技术

由于 LCP 基板的柔性特质和连接层熔融键合的方式, 使得 LCP 在键合过程极易发生形变、翘曲、空洞和漏液等质量问题, 不利于保持后续工艺的精度, 甚至影响最终的共形尺寸。

自研层压设备如图3所示, 由于工艺与设备的限制, 键合机温度不能稳定持续的控制 在熔点温度附近, 为精确控制 LCP 键合质量, 减小热变形, 采用梯度升温模式对层压质量进行控制。由图4可知, 材料推荐温度为预键合温度 T_1 150 $^{\circ}\text{C}$, 保持时间 t_1 20 min, 键合温度 T_2 180 $^{\circ}\text{C}$, 保持时间 t_2 60 min, 然后降温冷却。依据此温度曲线获得的 LCP 基板可剥离, LCP 粘接层可从 LCP 上撕下。分析原因为设备热电偶在平台铝板内, 而 LCP 放在工装里然后连同工装一起放置在铝平台上进行加热, 这中间不仅存在温度传递延迟, 还有热量损耗等, 因此 LCP 基板的实际温度比设备显示温度低。如果温度过高, 出现导体漂移的现象。



图3 层压设备图

Fig. 3 Diagram of laminating equipment

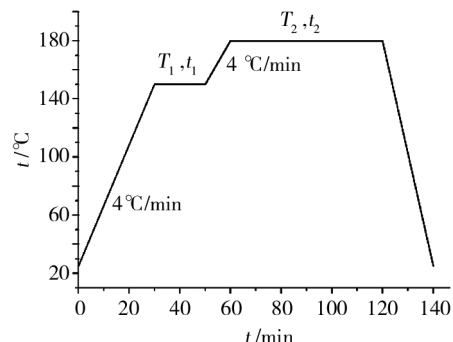


图4 梯度加热曲线

Fig. 4 Gradient heating curve

表2 键合试验结果
Tab. 2 Laminating results

序号	温度 $T_2/^\circ\text{C}$	时间 t_2/min	结果
1	180	60	未键合上
2	200	60	未键合上
3	220	60	部分键合上
4	240	60	键合上
5	260	60	键合上,边缘有LCP材料流出
6	280	60	键合上,铜导体漂移出来

设置不同的加热温度曲线对LCP键合质量进行研究,由于预键合 T_1 对温度精度要求不高,只针对键合温度 T_2 进行研究,曲线温度及结果如表2所示,键合压力设置为1 000 kg。由于Kapton胶带欠缺覆型能力,层压的基板存在微小的褶皱,如图5所示。

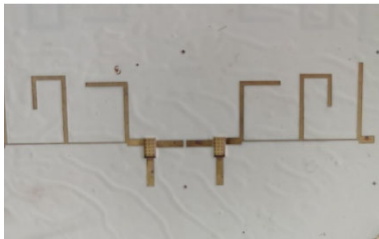
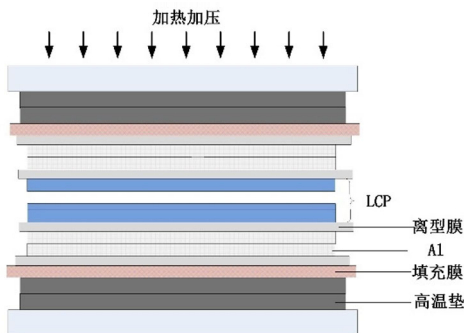


图5 基板层压后褶皱

Fig. 5 Diagram of laminating equipment

褶皱处基板间存在空洞,影响基板电性能,同时基板的褶皱也影响基板上电路图形的对位,因此需对基板压力的均匀性和平整性进行控制。



(a) 层压辅材结构



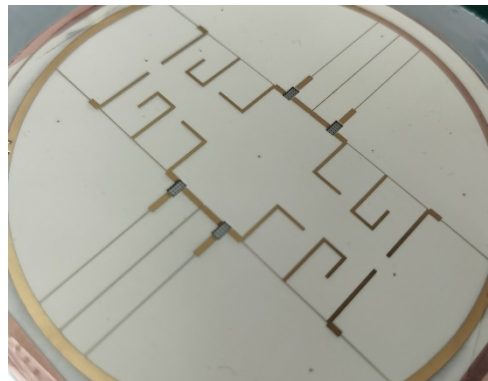
(b) 层压辅材应用

图6 LCP层压辅材结构示意图

Fig. 6 Laminating auxiliary structure

在传统加热加压的基础上,在LCP与工装之间增加层压辅材,如图6所示,层压辅材包括高温垫、离型膜、填充膜和铝箔。高温垫有着导热均匀、均衡压力、耐高温航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 增刊I

温的特点,在层压中有着均衡压力、热缓冲的作用,有效控制白角白边、褶皱气泡等问题。填充膜有着厚度均匀、填充覆型效果好、板面涨缩控制能力强的特点,其尺寸稳定性高,xy变形小,z方向又能满足填充覆型的需求,填充高度大于18 μm 。离型膜具有良好的剥离性能、耐高温特性、尺寸稳定性,在LCP层压时提供了超级光滑的表面,起着离型、轻微覆型的作用。铝箔也有一定的覆型性能,具有一定的防褶皱效果,在LCP层压中起着降低型变的作用。通过辅材覆型后的基板较平整,将层压所得的基板拍摄超声扫描显微镜,结果如图7所示,可见此方法可提升基板的平整度。



(a) 优化后LCP基板



(b) 超声扫描结果

图7 LCP加辅材层压图片

Fig. 7 LCP substrate with auxiliary materials

2.2 LCP基板MMIC埋置技术

在高频芯片工作过程中,必定大量放热,而作为系统体材料的LCP为高分子聚合物,导热能力差,无法及时导出热量,使得芯片在长时间、满负荷的工作情况下极易发生烧毁、脱落等情况。在芯片下方埋置铜结构垫层,利用铜的高导热能力形成一体化散热系统。由于高频多功能芯片多为砷化镓材料,其CTE(热膨胀系数)为 $5.8 \times 10^{-6}/\text{K}$,而铜的CTE数值为 $17.6 \times 10^{-6}/\text{K}$,所以在高温情况下,若不对系统整体CTE进行调整,系统运作过程中容易发生热应力失调等问题。针对此类问题,提出在铜垫片中间添加

金属钼层,利用钼 $5.1 \times 10^{-6}/K$ 的CTE对垫片的整体热膨胀系数进行调整,和砷化镓芯片CTE进行匹配,形成铜-钼-铜一体化散热结构。

初始方案将铜钼铜垫块装配在最下层LCP基板的铜层上,LCP铜层厚度为 $12 \mu m$,然后铜电镀加厚。在试验基板转移清洗等过程中由于铜层太薄极易出现破损,因此改进的在下方加一层LCP基板作为地,加上连接层,相比初始方案7层,系统一共9层,如图8所示。

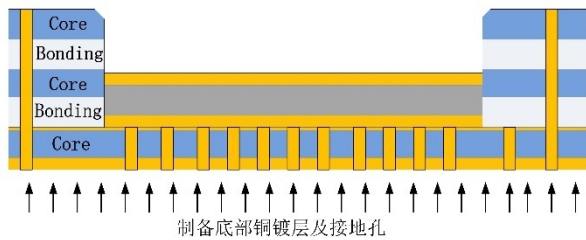


图8 铜-钼-铜一体化散热结构

Fig. 8 Structure of Cu-Mo-Cu integrated heat dissipation

通过Cu-Mo-Cu垫块提升芯片的散热能力,同时在基板弯曲时减少弯曲应力对芯片的影响。LCP基板通过栅格地的设计一方面提升接地性,另一方面保证LCP层间的键合强度,如图9所示。底层LCP基板通过接地孔提升散热能力。

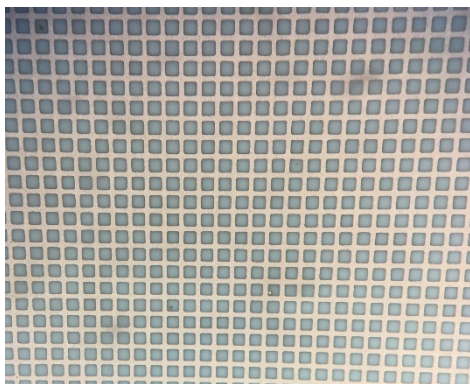


图9 栅格地图形

Fig. 9 The grid grounding

由于LCP基板的柔性特点,在真空吸附时出现翘曲、变形等问题,这会引起基板定位坐标系的偏移,从而严重影响COB贴装精度。为实现高精度、低漂移的芯片贴装,需要对LCP基板进行平坦化处理。通过高密度微通孔使局部吸附压力均匀化。

2.3 曲面装配基板应力分析

基板弯曲时薄膜会产生应力,严重时可能导致基板分层或薄膜开裂失效。根据薄膜应力Stoney公式:

$$\sigma_f = \left(\frac{E_s}{1 - \nu_s} \right) \frac{t_s^2}{6Rt_f} \quad (1)$$

式中, σ_f 为薄膜应力, E_s 、 ν_s 分别为基板的弹性模量和泊松比, t_s 和 t_f 是基板和薄膜的厚度, R 是基板的曲率

半径。可知,基板的层数越多,曲率半径越大,薄膜应力越大,需对基板的弯曲应力进行仿真。

采用受热冲击应力分析基板在应用环境中是否可靠,建立5个弯曲角度(5° 、 10° 、 20° 、 43° 、 65°)的基板并划分网格,如图10所示,分析在 $-55 \sim 80^\circ C$ 温循下的应力变化,应力最大值结果如表3所示,应力分布如图11所示。可见最大应力集中在边缘处,5组应力皆小于极限应力150 MPa,且各角度LCP基板安全系数最小值 $5.3 \geq 1$,满足力学可靠性要求。

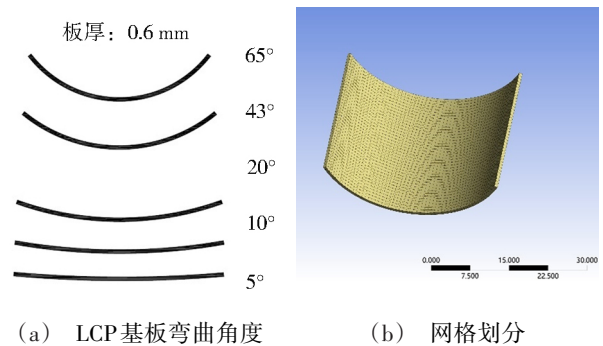


图10 LCP基板建模

Fig. 10 LCP substrate modeling

由表3可知,根据不同弯曲角度下温度冲击条件下的最大应力仿真结果,当角度 $< 10^\circ$ 时,应力处于低位且远小于极限应力;但当角度 $> 10^\circ$ 应力伴随角度的增大,急剧恶化。

表3 各弯曲度应力数据
Tab. 3 Stress data of each bending degree

角度 / (°)	最大应力值(-55 °C) / MPa	最大应力值(80 °C) / MPa
5	11.033	8.055
10	11.432	8.083
20	18.758	12.95
43	50.987	39.70
65	82.337	62.02

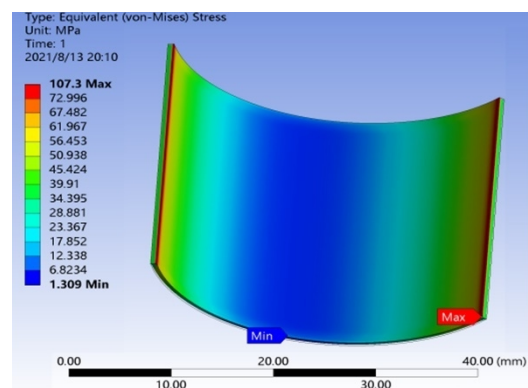


图11 应力分布

Fig. 11 The stress distribution

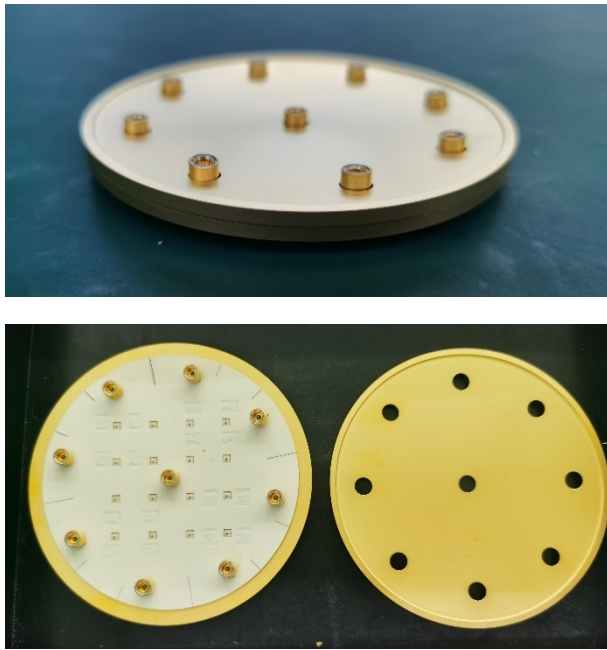


图12 8联装16通道曲面LCP子阵
Fig. 12 16-channel curved LCP sub-array

将弯曲的LCP基板装配于壳体上,设计多点涂胶的方式来完成LCP柔性阵元的可弯曲贴装,将4通道LCP曲面子阵根据工装进行装配,弯曲角度为 10° ,获得有源子阵样品,如图12所示。样品完成了典型模拟环境验证,包括温度冲击、正弦振动及随机振动试验,电性能测试结果满足指标要求。

3 结论

(1)通过优化层压温度和压力,在 $220\sim 230^\circ\text{C}$ 温度下以及 1MPa 压力下获得结合力较好的基板。使用铝箔等层压辅材消除了基板的褶皱,实现了基板的平整无气泡。

(2)使用激光进行基板挖槽,通过CuMoCu垫块进行散热和缓解芯片在基板弯曲时所受应力。

(3)在 $-55\sim 80^\circ\text{C}$ 的温度循环下,当基板弯曲角度 $<10^\circ$ 时,应力处于低位且远小于极限应力;但在角度 $>10^\circ$ 应力伴随角度的增大,急剧恶化。

(4)基板弯曲 10° 的16通道T/R组件在环境应用验证后性能完好,论证了柔性基板在共形相控阵雷达中的潜力。

参考文献

[1] COOK B, MARIOTTIC S, RCOOPER J, et al. Inkjet-printed, vertically-integrated, high-performance inductors and transformers on flexible LCP substrate [C]. 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), 2014, Tampa,

FL, USA.

[2] ZHANG Y, MARTIN R, SHI S, et al. 95-GHz front-end receiving multichip module on multilayer LCP substrate for passive millimeter-wave imaging [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(12):2180-2189.

[3] 邹嘉佳 程明生. LCP基板在系统封装中应用的研究进展 [J]. 科技展望, 2015, 35:124-125.

ZOU Jiajia, CHENG Mingsheng. Research progress of LCP substrate application in system packaging [J]. Science and Technology Outlook, 2015, 35:124-125.

[4] 孙兆鹏,严伟,王列松. LCP基板制作工艺及其在微波无源电路中的应用[J]. 电子机械工程,2011,27(4):46-52.

SUN Zhaopeng, YAN Wei, WANG Liesong. Manufacturing process of LCP substrates and its applicaiton in microwave passive circuits [J]. Electro-Mechanical Engineering,2011,27(4):46-52.

[5] 杨维生. LCP基板现状及多层化技术研究 [J]. 覆铜板资讯, 2018(5):13-21.

YANG Weisheng. Discussion on the liquid crystalline polymer resin base copper clad laminate and the manufacturing technology of multilayer [J]. Copper Clad Plate Information, 2018(5):13-21.

[6] SEMSEM L TAIYUN C, JONG S P, et al. A fully packaged D-band MIMO transmitter using high-density flip-chip interconnects on LCP substrate [J]. IEEE, 2016, 0698: 346-352.

[7] CHUNG H, JOHN P, CHAD E, et al. Packaging effects of multiple X-Band SiGe LNAs embedded in an organic LCP substrate [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012, 2(8):1351-1360.

[8] 刘维红,李晓品. 基于柔性LCP基板接地共面波导的设计与制作 [J]. 固体电子学研究进展, 2018, 38(6): 429-433.

LIU Weihong, LI Xiaopin. Design and fabrication of grounded coplanar waveguide based on flexible LCP substrate [J]. Research and Progress of SSE, 2018, 38(6):429-433.

[9] KUTAY C, NURSEL A. LCP substrate based crescent shaped microstrip patch array antenna design for 5G applications [C]. 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) 2019, Ankara, Turkey.

[10] YANG L, XIA L, QIU Y. Broadband transition structures using LCP packaging technology [C]. IEEE International Conference on Communication Problem-Solving (ICCP) 2015, Guilin, China.

[11] MULLER J, WELKER T, SCHMITT K. LTCC-like multilayer LCP-technology for flexible RF-circuits [C]. 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), Dresden, Germany, 2018.