

文章编号 1004-924X(2013)06-1447-09

60 GHz 贴片天线用低温共烧陶瓷基板的微机械加工

缪 旻^{1,2*}, 张小青¹, 姚雅婷¹, 沐方清³, 胡独巍²

- (1. 北京信息科技大学 信息微系统研究所, 北京 100101;
2. 北京大学 微米纳米加工技术国家级重点实验室, 北京 100871;
3. 中国电子科技集团公司 第四十三研究所, 安徽 合肥 230088)

摘要:为有效提升 60 GHz 贴片天线及阵列的辐射带宽, 提出利用微机械手段加工天线的低温共烧陶瓷(LTCC)基板。通过微切削方法在特定生瓷层上制作贯通结构, 充填可挥发牺牲材料, 完成基板叠压、烧结, 待牺牲层升华排净后最终构成三维微结构。设计、制备了悬臂梁、围框结构和微管道等工艺样品。对天线设计电性能进行全波分析, 并测试了微流道散热特性。实验结果表明: 提出的方法成功解决了不同轴系各方向收缩率不一致、空腔塌陷等工艺问题, 制作出的悬臂梁与围框尺寸高宽比达 4 : 1, 总长为 12 mm, 总层厚为 1.4 mm; 内嵌微流道横截面为 200 μm \times 200 μm , 长度达 25 cm 以上; 内部光滑, 基板表面贴装发热功率密度达 2 W/cm² 的功率器件时提供 40 K 以上的冷却能力; 基板经过微机械加工后, 天线的辐射带宽可从 2.7 GHz 增加到 5.3 GHz, 而增益的损失甚微。这些结果显示, 用简单、低成本的微机械加工方法可在不显著增加制造成本的情况下有效扩增毫米波贴片天线的辐射带宽, 为贴片天线阵中有源发射功率器件的设计和贴片天线的三维高密度集成提供了有效的技术支持。

关键词:陶瓷微机械加工; 低温共烧陶瓷基板; 毫米波; 贴片天线

中图分类号: TN42; TN828 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1447

Micromachining of LTCC substrate for 60 GHz patch antenna

MIAO Min^{1,2*}, ZHANG Xiao-qing¹, YAO Ya-ting¹, MU Fang-qing³, HU Du-wei²

- (1. *Information Microsystem Institute, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China*; 2. *National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication, Peking University, Beijing 100871, China*; 3. *The 43th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Hefei 230088, China*)

* *Corresponding author, E-mail: miaomin@bisu.edu.cn*

Abstract: To effectively enhance the radiation bandwidth of 60 GHz patch antennas, a micromachining process for the Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC) substrate was proposed. Specific green tape layers of substrate were micromilled to form perforated structures which were then filled with sacrificial materials. Thereafter, the individual layers were stacked up and sintered to form a three-dimensional (3D) microstructure. The cantilevers, enclosing frame structures and embedded microchannels were fabricated to verify the effectiveness of the process. The electrical properties of the antenna

收稿日期: 2013-01-18; **修订日期:** 2013-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60976083, No. 61176102); 北京市自然科学基金资助项目 (No. 3102014); 国家重大科技专项基金资助项目 (No. 2009ZX02038); 北京市属高等学校人才强教计划资助项目 (No. PHR201108257)

designs were validated by a full-wave analysis, and the effectiveness of the cooling channel was experimentally tested. The experiments show that the proposed process solves problems like the variation of contraction rate in various axes and the collapsing of the embedded cavities. The 3D frame, cantilever and the embedded microfluidic structure are fabricated with a maximum aspect ratio as high as 4 : 1, and a total thickness of 1.4 mm (14 layers). The cross section size of the microchannel is as large as $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ and its maximum length is beyond 2.5 cm. With smooth inner walls, the smooth microfluidic flow may provide a cooling effect over 40 K for the integrated power devices with a heating power density of $2\ \text{W}/\text{cm}^2$. The simulated radiation pattern shows a doubled increase of radiation bandwidth from 2.7 GHz to 5.3 GHz and has a little gain loss. These results demonstrate that simple and low-cost micromachining may effectively enhance the radiation bandwidth of patch antennas without additional costs, which is beneficial to the design and implementation of large scale and highly integrated transmitting/receiving arrays with active power devices.

Key words: ceramic micromachining; Low Temperature Co-fired Ceramic(LTCC) substrate; millimeter wave; patch antenna

1 引言

60 GHz 频带的无线技术由于频段拥有更大的可用带宽,在雷达中可用窄脉冲和宽带调频技术获得目标的细部特征成像,近 10 年来受到相关领域研究者的高度关注^[1]。此外,与现有微波和毫米波技术相比,该频段的信号和系统还有以下几方面的潜在优点:(1)波束较窄,方向性好,抗干扰能力强;(2)器件和天线体积小;(3)高衰减性,稍远距离或定向范围之外就有极大衰减,因而不易被敌方截获,适用于保密通信。由于其波长在毫米级,故通常采用贴片天线。

低温共烧陶瓷(LTCC)多层基板在高频段的介质损耗低,在宽频带和宽温度/湿度环境范围内具有稳定、优良的物理和化学特性,且支持高密度的元器件组装与灵活的互连设计,可以支撑高集成度、微小型、具有多层复杂结构的射频至毫米波模块集成^[2],其应用日益广泛。采用 LTCC 封装基板技术的紧凑型堆叠贴片式天线已覆盖了微波频段 ISM 2.4 GHz 频段, IEEE 802.11a 5.8 GHz 和 LMDS 28 GHz^[3]。在毫米波频段,通过利用 LTCC 基板上高密度的过孔阵列构建而成的三维金属腔,工作于 40 GHz 的 8×8 阵列式天线获得了高增益性能(24.1 dBi),但带宽不超过 3.35 GHz^[4]。在 60 GHz 短程高速无线通信方面,对制作在 LTCC 多层基板上的贴片天线设计

的全波仿真结果表明,可以取得超过 18% 的带宽和 6.9 dBi 的天线增益,要进一步提升天线增益,应构建天线阵列,其增益可望达到 18 dBi^[5];而由于测量较为困难,该频段的贴片天线实测结果鲜见报道。此外,电容式并联毫米波开关的 S 参数在开关过程器件特性方面也有相关研究^[6]。

国内外研究者在前期研究中发现,通过微机械加工,可以在 LTCC 上实现真正的三维结构,加工出微机械功能结构,用作微力学传感器、微波导等三维微纳器件^[7-8];基于微米尺度的微机械加工实现了陶瓷基板的微热板结构,并成功应用于阵列式可燃气体传感器^[9]。此外,表面损伤检测技术在工程陶瓷表面质量评价方面得到了理论和实例方面的验证支持^[10],为三维 LTCC 结构加工提供了新的工艺监测方法。于是,针对短距宽带无线通信链路和高集成度成像雷达应用需求,提出利用微机械工艺对用于短距宽带通信的贴片天线的 LTCC(低温共烧陶瓷)基板进行加工,一方面可以构成新的阶梯形贴片天线衬底以及基于孔径耦合馈电的结构,另一方面可以在内埋的贴片上方制作微流体管道或腔体。采用阶梯形 LTCC 基板和孔径馈电将在不显著增加成本的情况下有效提升工作于 60 GHz 频率的天线的辐射带宽,确保其天线增益,而在天线基板中制作微流体管道或腔体,将有利于贴片天线与高频发射功率器件在该基板上集成时的散热,从而有利于高密度、三维集成贴片天线阵的开发。

2 结构原理

常规贴片天线工作在 60 GHz 时,相对辐射带宽往往较窄。目前在较低频段增加辐射带宽的方法包括:选择低介电常数的基板和薄型基板、优化天线形状/尺寸、采用空间馈电、阻抗匹配等。其中最常用的方法是改变基板的厚度或介电常数,这种方法简单有效,能在很大程度上增加天线的相对带宽。但该方法会大大减小天线的最大增益,而且随着波长的缩短,低介电常数材料厚度也大大缩减,导致基板强度不够。

用微加工工艺加工梯形基板代替常规的、平整的基板,即让基板的厚度从激励端到与之相对的另一端逐次增厚,构成阶梯形基板。激励端处的厚度较薄,可以支持较宽的天线辐射带宽,当激励电磁波沿着馈线向辐射贴片传播时,天线基板的厚度逐渐变厚,天线带宽相应减小,但同时也使天线的最大增益逐步增大。从等效电路的角度来看,由于两辐射端口处基板厚度不一致,使得两个谐振回路经阶梯电容耦合,产生双回路谐振现象,而双回路的谐振峰相互接近时,总的辐射带宽被展宽,与采用多谐振器结构的带通滤波器类似。总体来看,此种阶梯形基板天线的辐射带宽会增大很多,虽然最大增益会受到一定影响,但要比直接仅用薄基板增加带宽的方法小的多。此外,采用基于小孔耦合的馈电结构可以进一步扩展辐射带宽^[11],为此需要通过三维微机械加工,在天线贴片背面的 LTCC 基板中加工出内埋式的小孔或空腔。

目前,电子产品的集成度越来越高,单位体积的发热量也越来越大。但随着各元件间和电路板间的距离缩短,对流散热的气流流动受到阻碍,严重影响产品的寿命。在 60 GHz 频段的阵列,为了提高辐射效率和方向性,应尽可能缩小阵元间距,往往需要把发射功率器件贴装到天线基板背面,实现高密度集成,其散热问题取代阵元间的互耦成为阻碍阵列集成度提高的重要因素。近年来,散热微通道被证明是一种在狭小空间内实现高效率散热的方法,其散热效果远远超过常规的风冷散热。与常规的金属过孔相比,基于 LTCC 基板工艺开发的微通道水冷散热系统能以较低的驱动功耗实现极强的散热能力^[12-13],效费

比高,可应用于高功率半导体器件或微小系统模块的散热。本文提出把贴片天线的辐射金属制作到一段微通道底部的腔壁上,该段微通道的横截形状和尺寸与天线辐射金属相同,这样就把贴片天线和微通道结合为一个整体,大大增加了天线及其阵列的集成度。同时其背面空间可以通过微通道加工方法加工出用于孔径馈电的中空的通孔,方便基板背面贴装的有源功率器件对辐射贴片的馈电。目前,国内外尚无类似方法的公开报道。

用有限元全波仿真方法对上述新型基板结构在天线电性能提升的有效性进行了验证,提出了对微加工工艺的具体要求,借助现有的 LTCC 试制线对相应的微加工工艺进行了试制、开发和验证。

3 设计与电性能仿真

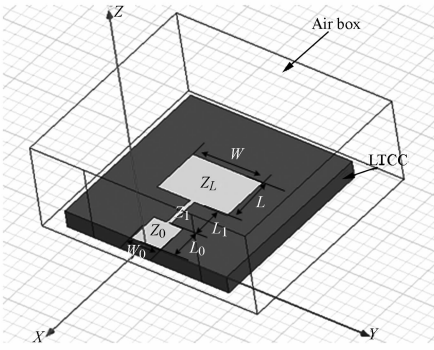
3.1 结构设计

针对基于常规(平整)基板、采用阶梯形基板和采用带微通道基板的天线结构进行了设计。根据试制结果,LTCC 选用微机械加工性能和射频性能较好的 Ferro A6,单层厚度标称值 0.1 mm,介电常数 $\epsilon_r = 5.9$ 。由于辐射波长较短,天线基板的厚度越小越好,但为了保证基板的刚度和结构强度,选用 8 层 LTCC 基片,即厚度 $h = 0.8$ mm。天线的辐射贴片和基板底面镀金层的材质选用金(由浆料烧结而成)。

首先根据微带贴片天线解析公式^[11]求出辐射贴片的长(L)和宽(W)以及 1/4 波长阻抗转换器(Z_1)的长(L_1)等平面结构参数的初始值,并利用 ADS 软件进行了参数优化,以尽可能减小基板厚度变化等因素对回波损耗和天线阻抗的影响,其结果如表 1 所示,相应的结构如图 1 所示。计算阶梯形基板天线时,各阶梯厚度不同,根据工艺试制结果分别取为 0.2、0.4 和 0.6 mm。微通道占 2 层,其厚度为 0.2 mm。

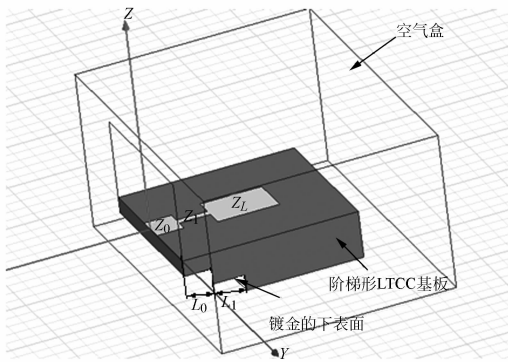
表 1 三种天线的结构优化参数 (mm)

参数优化值	L_0	W_0	L_1	W_1	L	W
常规基板	0.55	0.54	0.56	0.08	0.85	1.3
阶梯形基板	0.35	0.4	0.4	0.1	0.79	0.56
集成微通道的基板	0.48	0.56	0.44	0.94	—	—



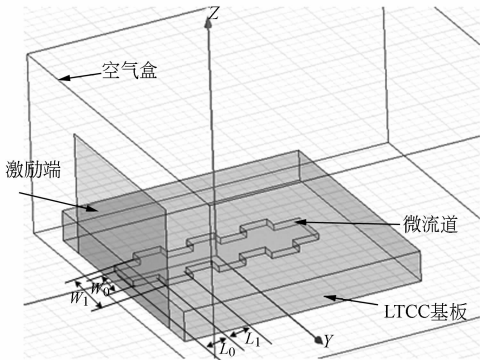
(a) 常规的、平整基板贴片天线结构

(a) Patch antenna based on conventional and flat substrate



(b) 梯形基板贴片天线

(b) Patch antenna based on staircase-like substrate



(c) 基板集成微流道的封装天线的结构图

(c) Patch antenna based on substrate integrated with microchannels

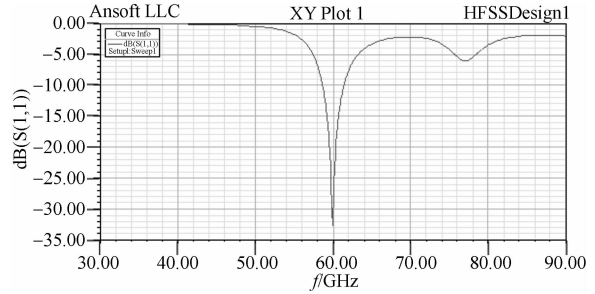
图 1 60 GHz 天线结构设计及仿真模型

Fig. 1 Design and modeling of 60 GHz patch antennas

3.2 仿真结果分析

用有限元全波仿真软件对上述天线的辐射特性进行了分析验证。图 2、图 3 分别为基于常规

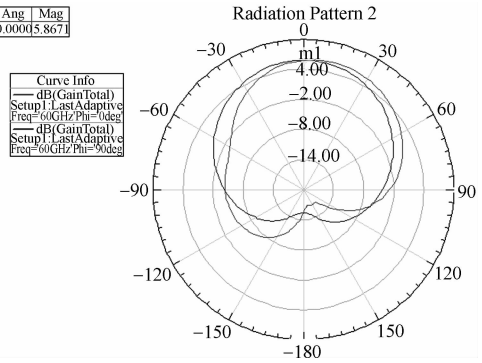
基板的贴片天线、基于梯形基板天线的 S_{11} 参数图和二维增益图。 S_{11} 参数曲线最小值点是天线的辐射中心频率,从图中可以看出天线辐射中心频率为 60 GHz。表 2 分别列出两种天线的辐射带宽($S_{11} < -10$ dB)、带宽外最小 S_{11} 参数值和最大增益值。



(a) S_{11} 参数

(a) S_{11} parameter

Name	Theta	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	5.8671

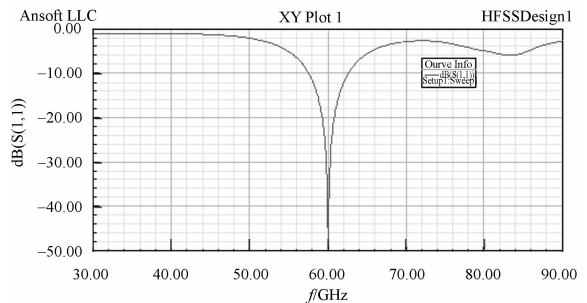


(b) 二维增益图

(b) Two dimensional pattern

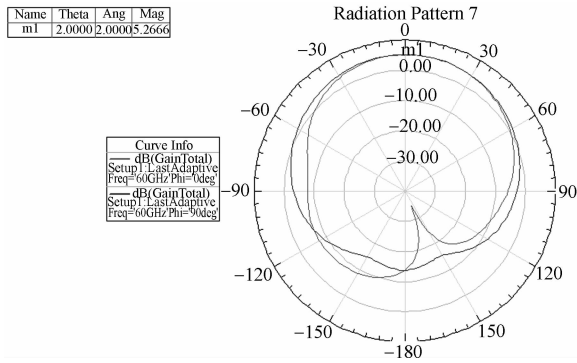
图 2 常规基板贴片天线特性验证结果

Fig. 2 Validation results of patch antenna based on conventional substrate



(a) S_{11} 参数

(a) S_{11} parameter



(b) 二维增益图

(b) Two dimensional pattern

图 3 梯形基板贴片天线特性验证结果

Fig. 3 Validation results of patch antenna based on st substrate

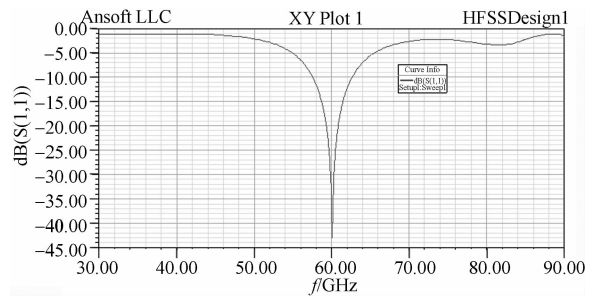
表 2 常规基板天线和梯形基板天线指标对比

Tab. 2 Comparison of performance of patch antenna based on conventional substrate and that based on staircase substrate

	辐射带宽 /GHz	带宽外最小 S_{11} 参数值/dB	最大增 益值/dB
平整基板天线	2.7	-6.1	5.9
梯形基板天线	5.1	-6.1	5.3

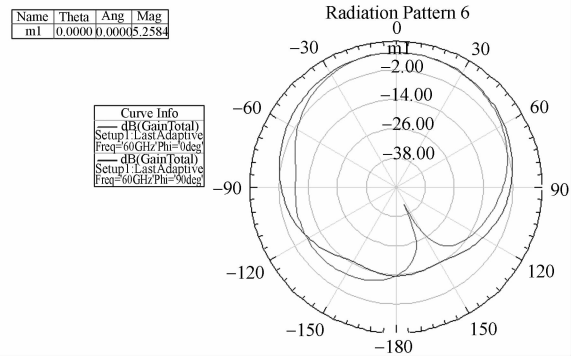
从表 2 可知, 两种天线的带宽外最小 S_{11} 参数值相等, 为 -6.1 dB, 都可保证天线的利用效率, S_{11} 曲线形状也大致相同。常规的平整基板贴片天线的辐射带宽为 2.7 GHz, 而梯形基板贴片天线的辐射带宽为 5.1 GHz, 因此采用微机械加工后可以把辐射带宽扩大近一倍, 而增益只是由 5.8 变为 5.3 dB, 降幅很小。所以, 在保证天线增益的情况下, 利用微机械方法加工出阶梯形基板是扩增贴片天线的辐射带宽的有效方法。而且上述结果还仅是采用侧向馈电时的带宽, 如果采用寄生微带和孔径耦合馈电技术^[14], 其带宽还可以进一步扩展。

由图 4 可知, 带微流体的基板上天线的 S_{11} 参数最小值在工作频率 60 GHz 上, 最小值低于 -25 dB, S_{11} 参数值在 -10 dB 的频段在 59~61 GHz 间。天线增益方面, 最大增益值为 5.3 dB, 方向性较好, 副瓣较小, 完全可以满足所针对的通信等应用对天线的电学方面的设计要求。本设计也存在一些不足, 如天线辐射带宽较窄、未考虑微流体腔体内加入散热液体对天线性能的影响等, 前者可以通过在辐射贴片背面采用小孔耦合馈电



(a) S_{11} 参数

(a) S_{11} parameter



(b) 二维增益图

(b) Two dimensional pattern

图 4 集成微流道的天线的仿真图

Fig. 4 Validation results of patch antenna based on substrate with micromachined embedded channels

来解决, 后者为下一步研究工作的重点。

4 面向阶梯形 LTCC 基板、馈电孔径和基板内嵌微流道的微机械工艺开发

由上述分析可知, 阶梯形基板、三维化的馈电孔径(长方形中空过孔结构)等可以有效提升 60 GHz 贴片天线的辐射带宽。另外鉴于目前 60 GHz 天线多采用高密度的天线阵列且阵列各单元的贴片背面都制作馈电孔径, 由相应的、贴装于背面的发射功率元件为其馈电, 为了有效地为该天线阵提供冷却手段, 可以改用基板内嵌的微流体来进行散热, 从而可以节省常规应在基板后附加的冷板, 大大简化天线阵列结构, 降低其加工和工程应用方面的成本。

基于上述考虑, 作者用微机械体型加工工艺方法在 LTCC 基板生瓷带中加工出三维围框、悬

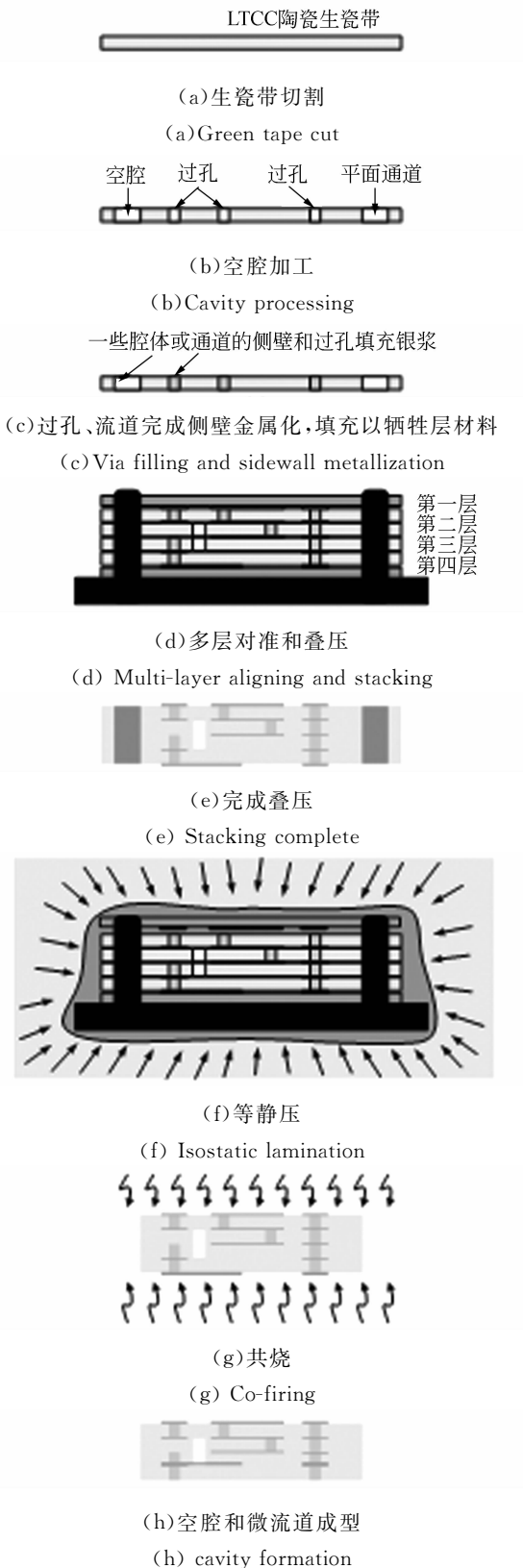
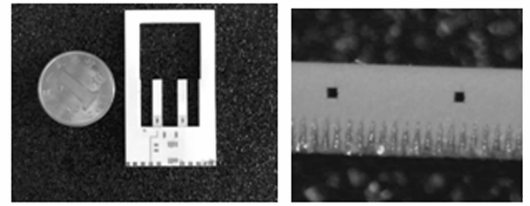


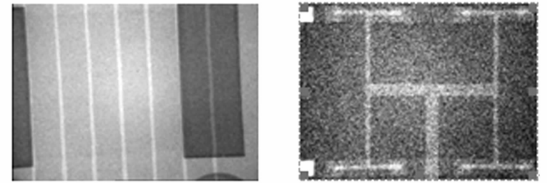
图 5 LTCC 基板的微机械加工流程

Fig. 5 3D micromachining of embedded functional structures in LTCC substrate



(a)三维悬臂梁(12 mm×2.5 mm ×0.8 mm)和空腔(26 mm×15 mm×1.5 mm)截面(200 μm×200 μm)光学显微照片,

(a) Three-dimensional cantilever beam(12 mm×2.5 mm×0.8 mm)and cavity (26 mm×15 mm×1.5 mm) of cross section size of the microchannel (200 μm×200 μm)

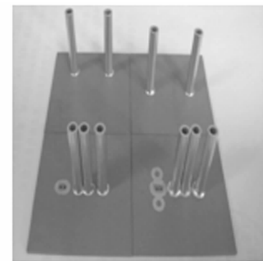


(c)内嵌并排直槽的 LTCC 的 X 透视照片

(c) X-ray photograph of parallel straight slot embedded in LTCC

(d)内嵌工字形分形微管道的 LTCC 微流道的 X 透视照片

(d) X-ray photograph of I-shaped fractal microchannel of embedded in LTCC



(e)借助 LTCC 基板上的焊环图形与基板连接,用于孔径馈电功率输入的圆形铜波导管;该波导管连接也可以用作冷却水驱动泵输入/输出塑料软管与基板内嵌微流道连接的方式

(e) Circular copper waveguide by connection of LTCC substrate and welding ring for inputting aperture feed power; the waveguide connection can be used as connection between input / output plastic hose of drive pump and micro channel embedded in substrate.

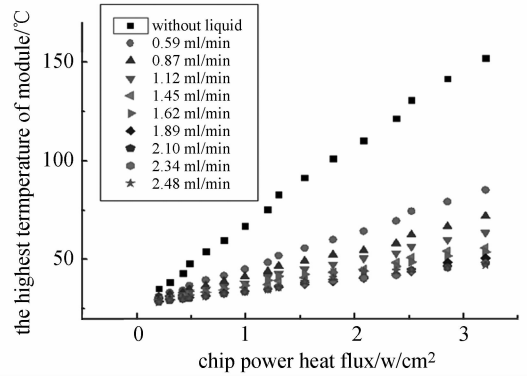
图 6 LTCC 基板微机械加工工艺样品

Fig. 6 Micromachined samples based on LTCC substrate

臂梁结构以验证其对阶梯形基板结构、馈电孔径、微流道/微波导腔的加工的有效性,其工艺流程如图 5 所示。

工艺开发解决了各方向收缩率不一致问题和空腔塌陷问题。制作出了三维围框、微悬臂梁结构和内嵌微流道结构,其中悬臂梁与围框尺寸高宽比最大达到了 4:1,悬臂梁总长达 12 mm,总层厚达到 1 mm。相应加工出的围框、微悬臂梁、微流道等微结构样品如图 6 所示,其验证了针对 60 GHz 贴片天线开发的微机械加工工艺的有效性,可以看出,随着上述工艺问题的解决,目前集成微流道和孔径耦合馈电孔的阶梯形基板的工艺难题已经突破,相应的天线样品正在加工中。目前项目组已经解决了微管道侧壁金属化的问题^[8]。分形流道的制备成功为相应天线馈电分配结构的加工与优化提供了新的技术可能。

运用在基板上通过浆料印刷制作的发热电阻模拟发热功率器件,对微流道的散热性能进行了测试,其结果如图 7 所示。结果表明,与无流道的基板相比,具备微流道的基板在集成发热功率密度达 2 W/cm² 的功率器件时可以提供 40 K 以上的冷却能力。



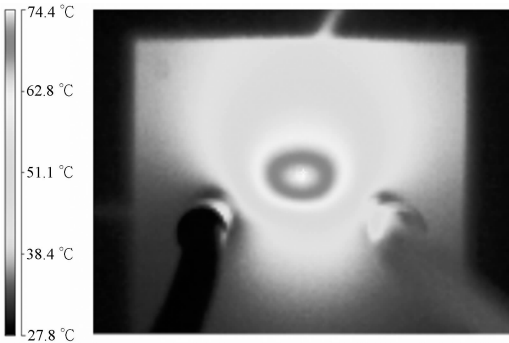
(b) 不同冷却水流量下的基板的最高温升
(b) Highest temperature rise curves vs. flow rates through microchannels in substrate

图 7 常规、无微流道的基板与具备微流道的基板在集成发热功率密度达 2 W/cm² 的功率器件(以印刷的厚膜电阻来模拟)时的最高温升测试结果

Fig. 7 The highest temperature test results of conventional, no microchannel substrate and substrate with micro channel, assuming the printed thick film resistor as an emulated power device that integrated heating power density is 2 W/cm².

5 结 论

60 GHz 频率段具有极高的工程价值和广阔的应用空间,但基于常规基板的贴片天线的带宽相对较窄。本文提出基于微机械加工手段为贴片天线结构制作阶梯形基板,在取代平整 LTCC 基板后,辐射带宽由原来的 2.7 增加到 5.3 GHz,而增益只是由 5.8 降为 5.3 dB,即辐射带宽扩大了近一倍,而增益衰减甚微,其它性能指标几乎不受损失,而通过微机械手段加工馈电孔径后,其性能还可以进一步提升。微流道结合的介质封装天线巧妙的把天线和微流道结合起来,使得天线辐射信号的同时起到散热功能,在集成发热功率密度达 2 W/cm² 的功率器件时的冷却能力达到 40 K 以上,为高密度贴片天线阵中有源发射功率器件和贴片天线的三维高密度集成提供了有效的技术途径。



(a) 基板温度分布红外图像(分辨率 1 °C)

(a) Infrared image of substrate temperature (with a resolution of 1 °C)

参考文献:

[1] DANIELS R C, HEATH R W. 60 GHz wireless

communications: emerging requirements and design recommendations [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2007,2(3):41-50.

- [2] HUNT B, DEVLIN L. LTCC for RF modules [C]. *Packaging and interconnects at microwave and mm-wave frequencies*, IEEE Seminar, 2000; 511-515.
- [3] LI R L, DEJEAN G, MAENG M, *et al.*. Design of compact stacked-patch antennas in LTCC multi-layer packaging modules for wireless applications [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2004, 27(4): 581-589.
- [4] BYUN W, EUN K CH, KIM K S, *et al.*. Design of 8×8 stacked patch array antenna on LTCC substrate operating at 40GHz band [C]. *Microwave Conference Proceedings*, 2005. APMC 2005. *Asia-Pacific Conference Proceedings*, 2005; 1-4.
- [5] BONDARIK A, JUN D S, KIM J M, *et al.*. Investigation of microstrip antenna array stacked structure realized on LTCC for 60 GHz band [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 52(3):648-652.
- [6] 廖小平,肖建斌. 毫米波 MEMS 开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化[J]. *光学精密工程*, 2012, 19(3):593-597.
- LIAO X P, XIAO J B. Transient S-parameters of millimeter-wave MEMS switch [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 19(3):593-597. (in Chinese)
- [7] KHOONG L E, TAN Y M, LAMA Y C. Overview on fabrication of three-dimensional structures in multi-layer ceramic substrate [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, 30: 1973 - 1987.
- [8] MIAO M, JIN Y F, GAN H, *et al.*. Investigation of a Unified LTCC-based Micromachining and Packaging Platform for High Density/Multifunctional Microsystem Integration[C]. *The 62nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, San Diego, California, USA, 2012 : 377-384.
- [9] 薛严冰,唐祯安. 陶瓷微热板阵列式可燃气体传感器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10):2200-2206.
- XUE Y B, TANG ZH A. Gas sensor array based on ceramic micro-hotplate for flammable gas detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2200-2206. (in Chinese)
- [10] 林滨,张彦斌,陈善功. 基于非负矩阵分解算法的工程陶瓷磨削表面损伤检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11):2459-2464.
- LIN B, ZHANG Y B, CHEN SH G. Damage detection of engineering ceramics ground surface based on NMF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2459-2464. (in Chinese)
- [11] GODARA L C. *Handbook of Antennas in Wireless Communication* [M]. Boca Raton, London, New York Washington: CRC Press, 2002;34-49.
- [12] THELEMANN T, THUST H, BISCHOFF G, *et al.*. Liquid cooled LTCC-substrates for high power applications [J]. *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, 2000, 23(2):209-214.
- [13] ZHANG Y F, CHEN J Q, BAI SH L, *et al.*. Microchannel water cooling for LTCC based microsystems [C]. *11th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 2009; 626-629.
- [14] KUMAR G, RAY K P. *Broadband Microstrip Antennas* [M]. USA: Artech House, 2003:7-9.

作者简介:



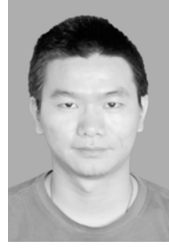
缪 旻(1973—),男,博士,副教授,2005 年于北京大学获博士学位。主要从事信息与通信工程、微米/纳米加工、微电子学与固体电子学、高等教育学等方面的研究。E-mail: miaomin@bistu.edu.cn



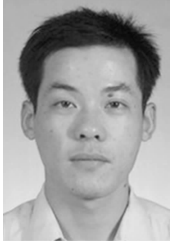
张小青(1986—),男,山东济宁人,硕士,2006 年于德州学院学获得学士学位,2013 年于北京信息科技大学获得硕士学位,主要从事微波导及行波管的研发。E-mail: zhangxiaoqing58@163.com



姚雅婷(1988—),女,辽宁丹东人,硕士研究生,2011年于沈阳建筑大学获得学士学位,主要从事真空微电子、返波振荡器等方面的研究。E-mail: yao0706400131@163.com



胡独巍(1990—),男,云南玉溪人,主要从事基于低温共烧陶瓷的微流体散热方面的研究。E-mail: huduwei@pku.edu.cn



沐方清(1982—),男,安徽巢湖人,硕士,工程师,2004年于安徽工程科技学院获学士学位,2006年于南京理工大学获硕士学位,主要从事微组装、LTCC工艺技术等方面的研究。E-mail:mfq310@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)