

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802029

# 基于厚薄膜混合基板的超宽带垂直互联设计

翟志明 邢小明 夏侯海

(南京电子技术研究所 南京 210039)

**摘要:** 针对三维集成电路中基板层间信号垂直互联问题, 基于厚薄膜基板的优良特性, 设计了一种超宽带的同轴到带状线再到微带线的过渡结构, 能够工作到 80 GHz。这种垂直结构采用 LTCC 为基板, 旋涂 BCB 膜层, 适用于系统级封装。该结构利用“水滴”匹配的方法, 并嵌入空气腔抑制寄生电容, 有效地改善了互联结构的射频传输性能。仿真结果表明, 其背靠背(同轴-带状线-微带线-带状线-同轴)结构在 0~80 GHz 频段范围内, 回波损耗均低于 -17 dB, 插入损耗均优于 -0.5 dB, 驻波比均低于 1.35, 具有良好的超宽带传输特性。

**关键词:** 垂直互联; 超宽带; 空气腔; 厚薄膜混合基板; LTCC; BCB

中图分类号: TN454 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.3040

## Ultra-wideband vertical interconnect design based on thick film hybrid substrate

Zhai Zhiming Xing Xiaoming Xia Houhai

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of vertical interconnection of inter-layer signals in three-dimensional integrated circuits, based on the excellent characteristics of thick film substrates, an ultra-wideband coaxial to stripline to microstrip transition structure is designed, which can work up to 80 GHz. This vertical structure uses LTCC as the substrate and spin-coats the BCB film for system-in-package. The structure utilizes a “water droplets” matching method and is embedded in the air cavity to suppress parasitic capacitance, which effectively improves the RF transmission performance of the interconnect structure. The simulation results show that the back-to-back (coaxial-stripline-microstrip-stripline-coaxial) structure has a return loss of less than -17 dB in the frequency range of 0~80 GHz, and the insertion loss is better than -0.5 dB, and VSWR are lower than 1.35, which has good ultra-wideband transmission characteristics.

**Keywords:** vertical interconnection; ultra-wideband; air cavity; thick film mixed substrate; LTCC; BCB

## 0 引言

现在的许多电路设计中, 为了便于安装和调试, 节省电路的布线面积, 从而实现小型化设计<sup>[1]</sup>。器件或者芯片等通常埋置在多层基板内部, 而带状传输线由于其自身的结构特点, 具有良好的屏蔽特性, 所以通常被用来作为埋置电路设计传输线的首选。如何实现信号互联传输, 便成为电路设计的关键技术之一<sup>[2-5]</sup>。其互联设计的性能将直接影响电路系统的整体性能, 这就需要深入研究垂直互联电路形式。

近些年来, 国内外已有许多学者对层间信号的垂直互联做了深入研究。国外方面, 2012 年 Huang 等<sup>[6]</sup>提出一种无通孔的垂直微带到微带的转换, 利用微带谐振器和 U 形

谐振槽, 在 4~11 GHz 频段内回波损耗优于 -15 dB。2013 年 Kim 等<sup>[7]</sup>报道了一种基于垂直转换的多层紧凑型混合耦合器, 与传统耦合器相比, 尺寸减小约 50%。2018 年, Nelson 等<sup>[8]</sup>首次提出了一对宽带双面平行带线(DSPSL)到共面波导(CPW)垂直过渡结构, 其背靠背结构在 0~11 GHz 内回波损耗和插入损耗分别优于 -15 和 -4 dB。国内方面, 对垂直过渡结构进行深入研究的机构主要是各大高校和科研院所。2012 年文献[9]中采用了“水滴”匹配结构, 回波损耗有所降低, 但过渡结构整体体积较大。2014 年南京电子技术研究所凌天庆研究了一种工作频率可达 18 GHz 的准同轴结构的垂直过渡, 频带范围内其插入损耗为 0.8 dB<sup>[10]</sup>。2016 年, 刘江洪等<sup>[11]</sup>研究了一种免焊接的毛纽扣垂直互联结构, 工作于 16 GHz 以下, 插损约为 2.5 dB。

当前的垂直互联技术主要应用于数字电路或低频电路的高密度集成封装中, 射频方面的应用相对较少, 且主要工作与 Ku 及以下波段<sup>[12]</sup>。

针对目前的三维集成电路中层间信号互联的问题, 基于 LTCC 和 BCB 的厚薄膜混合技术, 本文研究设计了一种嵌入空气腔结构以抑制寄生电容的超宽带垂直互联结构, 其背靠背结构(同轴-带状线-微带线-带状线-同轴)在 0~80 GHz 频段内回波损耗均低于 -17 dB, 插入损耗均优于 -0.5 dB, 驻波比均小于 1.35。该结构的设计, 对 Ka 波段、U 波段乃至更高频段的集成电路过渡结构设计具有借鉴参考意义。

## 1 垂直互联结构合计

在微波器件领域, 在小型化与高功率同时, 应用频率也进一步提高, 这种情况下高频下的损耗问题就显得非常重  
要<sup>[13]</sup>。式(1)适用于 1~100 GHz 损耗计算<sup>[14]</sup>。

$$\begin{aligned}\alpha_d &= 27.3 \frac{\epsilon_r(\epsilon_e - 1)}{\sqrt{\epsilon_e}(\epsilon_r - 1)} \frac{f}{c} \tan\delta \\ \alpha_c &= \frac{8.686}{Z_0 \omega} \sqrt{\pi \rho \mu_0 \sqrt{f}} \\ \alpha_r &= \alpha_c \frac{2}{\pi} \arctan \left[ 1.4 \left( \frac{R_a}{\delta_x} \right)^2 \right]\end{aligned}\quad (1)$$

式中:  $\alpha_d$  为介质损耗;  $\alpha_c$  为导体损耗;  $\alpha_r$  为导体表面粗糙度引起的损耗;  $\epsilon_e$  为等效介电常数;  $\epsilon_r$  为基板的介电常数;  $f$  为工作频率;  $\tan\delta$  为材料的介电损耗;  $R_a$  为表面粗糙度;  $\delta_x$  为工作频率下的趋肤深度。可以看出, 随着工作频率的提高, 趋肤深度  $\delta_x$  越来越小, 表面粗糙度  $R_a$  对损耗的影响越来越大。而 BCB 薄膜工艺相对 LTCC 厚膜工艺而言, 具有微米级线条、金属化孔加工能力, 布线精度高、布线密度大<sup>[15]</sup>, 表面更加平整, 金属化的边缘整齐度更好, 因此损耗更小。

针对目前毫米波波段垂直互联结构设计的需求, 本文尝试对 0~80 GHz 垂直互联过渡结构进行探讨, 并结合 LTCC 厚膜技术以及 BCB 薄膜技术, 提出一种同轴到带状线、带状线到微带线的垂直互联结构, 本文设计的垂直互联结构的射频传输路径的背靠背结构如图 1 所示, 该结构主要包含两个关键部分: 同轴到带状线过渡部分以及带状线到微带线过渡部分。

通常, 由垂直转换造成的不连续性会在垂直转换处产生大量的辐射和反射。严重辐射造成的衰减通常通过在过渡处放置接地过孔或通过减小过渡部分的寄生电容<sup>[16]</sup>等手段来弥补。垂直转换引起的电容效应, 根据电容的物理表达式  $C = \epsilon \times \epsilon_0 \times A/d$ , 可以使用两种不同的方法来降低。1) 通过增加垂直转换处传输线和接地层之间的介质厚度(增加  $d$ )来降低电容效应; 2) 通过减少  $\epsilon$ (即使用气腔)增加基板厚度的方式不利于整体结构的小型化, 所以第 2 种选择是最优选。为了降低电容效应, 如图 1(b)所示, 分别

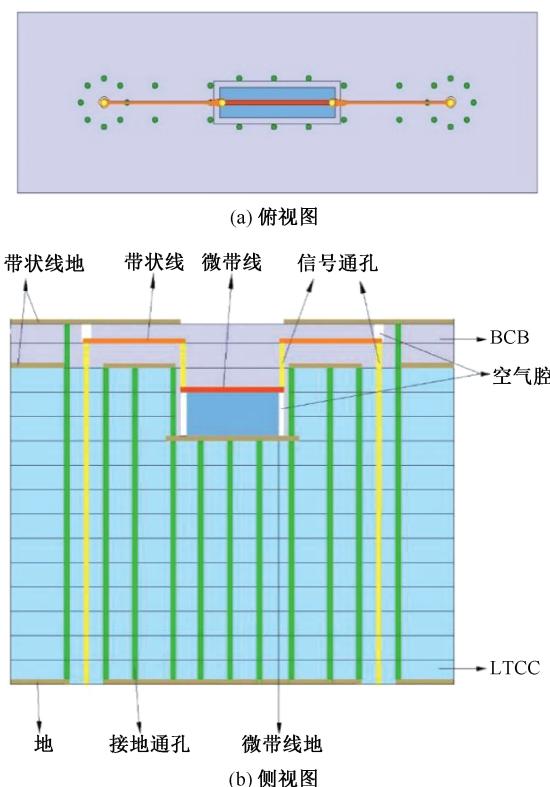


图 1 垂直互联背靠背结构

在同轴到带状线垂直过渡结构的上方和带状线到微带线过渡结构的下方嵌入了一个小空气腔。

## 2 仿真设计及分析

本设计采用三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 建模。LTCC 基板共 13 层, 介质选用美国 Ferro 公司生产的 Ferro A6M 超薄生瓷带, 其相对介电常数为 5.9, 损耗角正切 0.002, 每层生瓷带的厚度为 0.050 mm。

BCB 采用旋涂工艺制作, 单层介质厚度通常小于 15  $\mu\text{m}$ , 较厚的多层 BCB 介质膜层需要多次旋涂, 但多次旋涂易造成膜层表面起伏过大, 不利于后续工艺制作。因此, 根据现有工艺, 本次 BCB 膜层共 4 层, 单层 BCB 膜层厚度为 10  $\mu\text{m}$ , 选用的 BCB 的介电常数为 2.6, 损耗角正切为 0.002。带状线布在 BCB 膜层中间, 带状线上下两层地分别位于 BCB 膜层上、下表面。微带线布在 LTCC 基板内部, 微带线地位于 LTCC 第 10 层生磁带上表面。整个基板的宽度为 3 mm, 长度为 9 mm, 高度为 0.66 mm。

### 2.1 同轴到带状线过渡结构设计与仿真

同轴到带状线过渡结构如图 2 所示, 该结构是将射频信号从垂直传输转换成平面传输。其中, 信号通孔及其周围一圈金属屏蔽孔构成“类同轴结构”, 这种结构类似于同轴线的结构。根据同轴传输线理论, 类同轴垂直转换可以采用同轴线的特性阻抗公式进行计算。

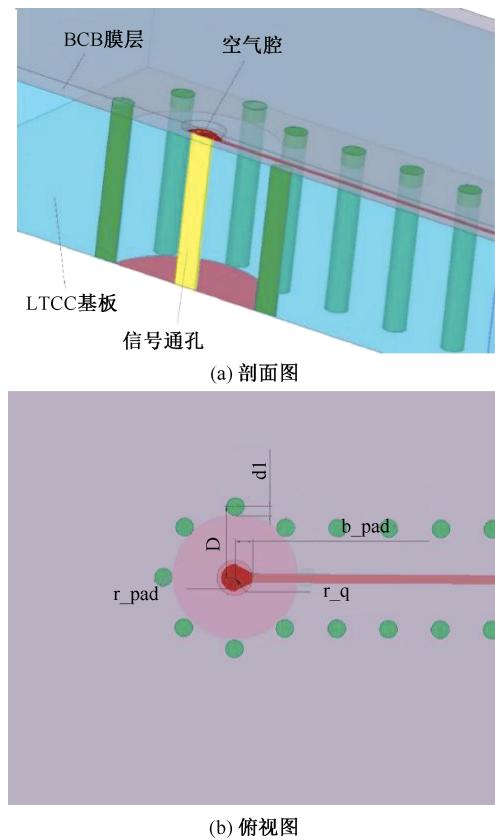


图 2 同轴到带状线过渡结构

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d1} \quad (2)$$

通过调整外围屏蔽通孔圈的半径  $D$  的大小, 可获得  $50 \Omega$  标准阻抗。同轴到带状线过渡结构尺寸参数如表 1 所示, 本文中,  $\epsilon_r = 5.9$ , 通孔半径  $d1 = 0.05 \text{ mm}$ , 所以, 若要获得  $50 \Omega$  标准阻抗, 由式(2)计算可得, 外围屏蔽孔圈的半径  $D = 0.4 \text{ mm}$ 。为保证良好的射频传输结构, 外围屏蔽通孔的数量为 8 个。同时, 在过渡结构中额外增加一些金属屏蔽孔, 这些屏蔽通孔将第一层金属地以及带状线上下层金属地连接在一起。通过在介质基板中增加的这些通孔, 可以限制连接带状线和微带线的信号柱周围的电磁能量, 从而减小不必要的电磁辐射, 提高传输效率。这些通孔还可以避免在频率较高时因为结构尺寸与波长近似而导致寄生模式激励。

表 1 同轴到带状线过渡结构尺寸表 (mm)

参数	数值	参数	数值
$D$	0.4	$r_{\text{pad}}$	0.075
$d1$	0.05	$b_{\text{pad}}$	0.1
$r_q$	0.1		

为了降低驻波, 使信号平稳过渡, 在信号通孔到带状线过渡端需进行阻抗匹配。如图 2 同轴到带状线过渡结构仿

所示, 在过渡结构处引入“水滴”状的匹配焊盘, 通过电磁仿真软件对该结构进行优化, 得到最佳的“水滴”结构尺寸, 即“水滴”半径  $r_{\text{pad}} = 0.075 \text{ mm}$ , 长度  $b_{\text{pad}} = 0.1 \text{ mm}$ 。为了实现射频信号的有效传输, 减小垂直转换引起的电容效应, 如图 2(b)剖面结构所示, 在过渡结构的 BCB 膜层内部, 嵌入一个圆柱形空气腔。加入空气腔, 可以有效地抑制寄生电容效应, 减小不必要的辐射, 改善过渡结构的射频传输性能。通过仿真软件对空气腔进行优化, 得到最佳的空气腔半径  $r_q = 0.1 \text{ mm}$ 。

嵌入空气腔前后同轴转带状线结构回波损耗、插入损耗以及驻波比结果对比如图 3 所示。从图 3 可看出, 在低频频段, 仿真结果较好, 是否嵌入空气腔对仿真结果影响较小, 随着频率上升, 空气腔的嵌入对仿真曲线的影响逐渐变大。嵌入空气腔前后高频段损耗对比如表 2 所示, 在  $60 \sim 80 \text{ GHz}$  频段内, 嵌入空气后, 回波损耗改善了约  $8 \text{ dB}$ , 插损也得到了较大的改善。加入空气腔后, 在  $0 \sim 80 \text{ GHz}$  的频段内, 过渡结构的回波损耗均小于  $-17 \text{ dB}$ , 插入损耗均优于  $-0.3 \text{ dB}$ , 驻波比均小于  $1.4$ , 整个过渡结构的传输性能较加入空气腔前有明显改善。

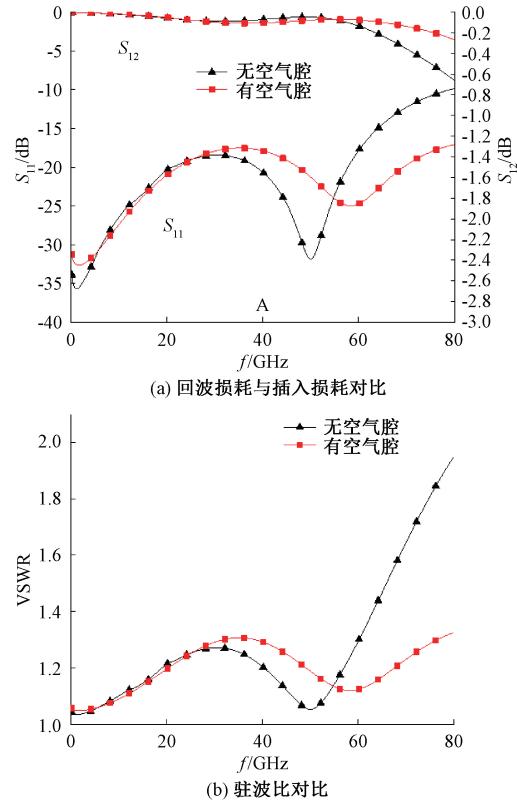


图 3 嵌入空气腔前后仿真结果对比

## 2.2 带状线到微带线过渡结构设计与仿真

带状线到微带线过渡结构如图 4 所示, 不同于同轴到带状线过渡结构中的圆柱形空气腔, 在带状线到微带线过渡结构中, 空气腔为长方体形, 位于信号通孔下侧和微带线

表 2 嵌入空气腔前后高频段损耗对比

频率/ GHz	回波损耗/dB		插入损耗/dB	
	嵌入前	嵌入后	嵌入前	嵌入后
60	-17.8	-24.8	-0.14	-0.07
65	-14.4	-22.3	-0.24	-0.1
70	-12.2	-19.8	-0.36	-0.13
75	-10.8	-18.1	-0.51	-0.19
80	-9.7	-17.2	-0.67	-0.25

金属地上侧之间。带状线到微带线过渡结构尺寸参数如表 3 所示,通过仿真软件对结构进行优化,确定空气腔宽度  $a_q=0.15 \text{ mm}$ ,长度  $b_q=0.05 \text{ mm}$ 。同时,“水滴”匹配焊盘半径  $r_{\text{pad}2}=0.065 \text{ mm}$ ,长度  $b_{\text{pad}2}=0.35 \text{ mm}$ 。

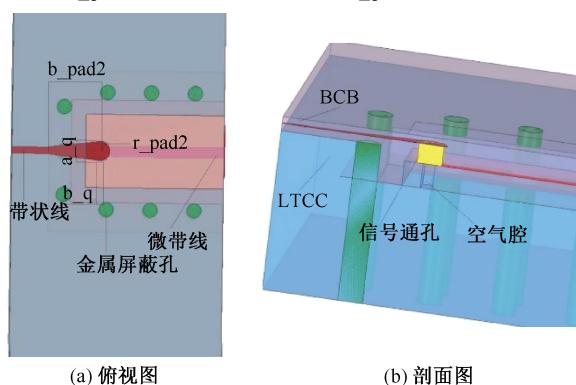
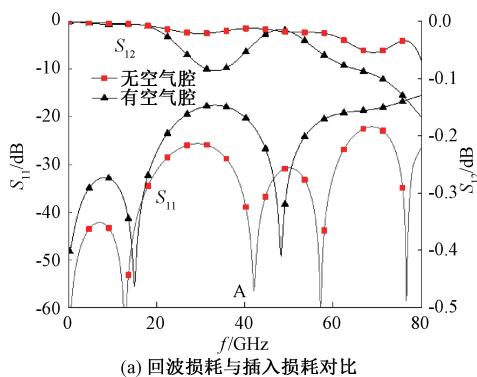


图 4 带状线到微带线过渡结构

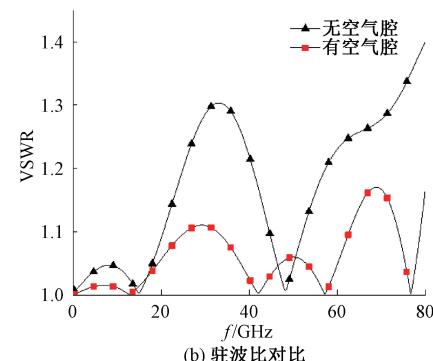
表 3 带状线到微带线过渡结构尺寸表 (mm)

参数	数值	参数	数值
$a_q$	0.15	$r_{\text{pad}2}$	0.065
$b_q$	0.05	$b_{\text{pad}2}$	0.35

背靠背带状线到微带线垂直过渡结构加入空气腔前后回波损耗、插入损耗以及驻波比结果对比如图 5 所示。从图 5 可以看出,嵌入空气腔后,在 0~80 GHz 整个频段内,仿真曲线较未嵌入空气腔时有明显改善。加入空气腔后,该过渡结构的回波损耗均小于 -22 dB, 插入损耗均优于 -0.7 dB, 驻波比均小于 1.2, 传输性能改善显著。



(a) 回波损耗与插入损耗对比



(b) 驻波比对比

图 5 嵌入空气腔前后仿真结果对比

### 2.3 背靠背结构设计与仿真

在实际工程应用过程中,为便于封装,一般采用背靠背结构。如图 6 所示,制作了背靠背(同轴-带状线-微带线-带状线-同轴)射频传输垂直过渡结构的仿真模型。背靠背射频传输垂直过渡结构的仿真结果如图 7 所示,在 0~80 GHz 频段内,该结构的回波损耗均低于 -17 dB, 插入损耗均优于 -0.5 dB, 驻波比均低于 1.35, 射频传输性能良好。

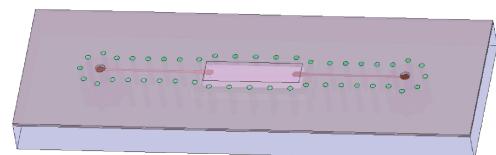
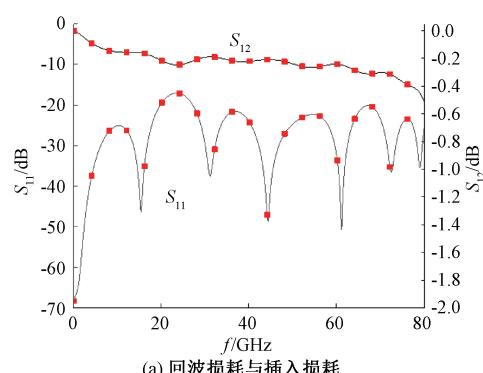
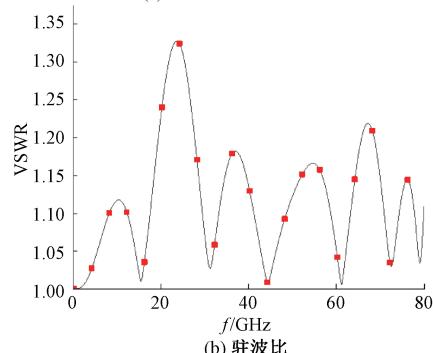


图 6 背靠同轴到带状线到微带线背结构



(a) 回波损耗与插入损耗



(b) 驻波比

图 7 背靠同轴到带状线到微带线仿真结果

### 3 结 论

随着电子器件越来越小型化、集成化,以及5G移动通信乃至6G移动通信时代的到来,使用频率越来越高,这就需要对Ka波段、U波段乃至更高频段的集成电路中层间信号互联问题进行深入探讨。本文基于厚薄膜基板的优良特性,通过在垂直过渡处嵌入空气腔的方式,设计了一种可工作于0~80 GHz频段内的超宽带垂直互联结构。经过三维电磁仿真软件优化调整,其背靠背(同轴-带状线-微带线-带状线-同轴)结构在0~80 GHz频段内回波损耗均低于-17 dB,插入损耗均优于-0.5 dB,驻波比均低于1.35,具有良好的传输特性。在优化设计过程中,根据现有工艺条件,敏感参数在设计中留有余量,参数敏感度较好。本文提出的超宽带垂直互联结构,具有良好的传输性能,体积小,连接可靠,低损耗,工作频带宽,可适用于系统级模块封装,对未来雷达、通信等领域中对毫米波集成电路设计具有重要的借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 金雁冰,刘建勇.KU波段LTCC基板微带到带状线垂直互联设计[J].信息通信,2016(2):43-45.
- [2] CHANCHANI R, BETHKE D T, WEBB D B, et al. Development and RF characterization of high density integrated substrate technology[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(3): 478-485.
- [3] STRANDJORD A, GARROU P E, IDA Y, et al. MCM-D fabrication with photosensitive benzocyclobutene: Processing solder bumping, systems assembly, and testing[C]. Microelectronics 1995, 1995(2946): 402.
- [4] ALIMENTI F, MEZZANOTTE P, TASSELLI G, et al. Development of low-cost 24-GHz circuits exploiting system-in-package(SiP) approach and commercial PCB technology[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012, 2(8): 1265-1274.
- [5] KORIYAMA S, KITAZAWA K, SHINO N, et al. Millimeter-wave ceramic package for a surface mount [C]. Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2000: 61-64.
- [6] HUANG X, WU K L. A broadband and vialess vertical microstrip-to-microstrip transition[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(4): 938-944.
- [7] KIM Y, SIM S H, YOON Y C. Multilayer compact hybrid coupler based on vertical microstrip transition[C]. Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), IEEE, 2013: 914-916.
- [8] NELSON K J, LINDO A O, AANANDAN C K, et al. Broadband vertical transitions between double-sided parallel-strip line and coplanar waveguide[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2018(75): 119-124.
- [9] 王正伟. 基于LTCC技术的微波毫米波收发组件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [10] 凌天庆. 无背钻孔的微波板间垂直互连研究[J]. 现代雷达, 2014, 36(6): 65-68.
- [11] 刘江洪, 刘长江, 罗明, 等. 基于毛纽扣的板级垂直互连技术[J]. 电子工艺技术, 2016, 37(3): 135-137, 186.
- [12] 张先荣. 一种低损耗毫米波垂直互联设计[J]. 电讯技术, 2017, 57(7): 825-829.
- [13] 陈寰贝, 梁秋实, 刘玉根, 等. 厚薄膜混合氮化铝多层基板技术研究[J]. 真空电子技术, 2015(4): 9-10, 20.
- [14] CHAI L, SHAIKH A, STYGAR V. LTCC for wireless and photonic packaging applications[C]. 4th International Symposium on Electronic Materials and Packaging, IEEE, 2002: 381-385.
- [15] 张兆华, 崔鲁婧, 李浩, 等. 基于BCB的薄膜多层基板在毫米波T/R组件中的应用[J]. 微波学报, 2017, 33(1): 63-66.
- [16] SCHMUCKLE F J, JENTZSCH A, HEINRICH W, et al. LTCC as MCM substrate: Design of strip-line structures and flip-chip interconnects[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2001: 1903-1906.

### 作者简介

翟志明,硕士研究生,主要研究方向为射频电路设计。

E-mail: zhaizhiming1993@163.com

邢小明,研究员级高级工程师,主要研究方向为雷达频率综合器、接收机分系统设计。

夏侯海,高级工程师,主要研究方向为雷达收/发组件技术。