

# 宽带高集成多级射频互连技术

傅显惠, 刘德喜, 祝大龙, 赵红霞  
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

**摘要:** 针对微波电路三维集成结构的迫切需求, 开展宽带高集成多级射频互连技术研究。主要设计了两种电路结构, 多级水平互连电路与多级垂直互连电路。多级水平互连电路中, 通过优化同轴-微带线的水平过渡以及倒角过渡方式, 得到在 DC~30GHz 内的仿真结果, 回波损耗优于 21dB, 插入损耗优于 0.16dB; 多级垂直互连电路中, 通过优化 BGA 板间互连结构, 得到在 DC~30GHz 内的仿真结果, 信号的回波损耗优于 13dB, 插入损耗优于 0.57dB。在小型化、高集成的需求下, 宽带高集成多级射频互连技术是解决宽带射频信号传输问题的关键技术路径, 可以广泛应用在微波电路三维集成结构中, 具有重大的应用前景。

**关键词:** 射频互连; 多级; 高集成; 宽带

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)04-0055-07

## Broadband and highly integrated multilevel RF interconnection technology

FU Xianhui, LIU Dexi, ZHU Dalong, ZHAO Hongxia

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to meet the urgent need of three dimensional integrated structure of microwave circuit, the research of wideband high integrated multilevel RF interconnection technology is carried out. This paper mainly designs two kinds of circuit structures, multilevel horizontal interconnection design and multilevel vertical interconnection design. In the circuit of multilevel horizontal interconnection, by optimizing the horizontal transition between coaxial and microstrip lines and the chamfered transition mode, the simulation results show that the return loss is better than 21dB, and the insertion loss is better than 0.16dB within the DC~30GHz. In the multilevel vertical interconnection circuit, by optimizing the structure of BGA interplate interconnection, the simulation results show that the signal return loss is better than 13dB and the insertion loss is better than 0.57dB within the DC~30GHz. In the demand of miniaturization and high integration multilevel RF interconnection technology is the key path to solve the problem of wideband RF signal transmission. It can be widely used in the three dimensional integrated structure of microwave circuits and has great application prospect.

**Key words:** RF interconnection; Multistage; High integration; Wideband

## 引 言

随着微波技术发展以及民用电子设备对小型轻量化、高集成、频带宽和低成本的需求, 微波电路的组装互连技术发展过程经历从分立电路、混合集成电路, 到单片集成电路、多芯片模块, 再到三维微波多芯片组件技术<sup>[1,2]</sup>。三维微波组件技术是将芯片和微型化元件高密度组装在微波多层板上, 再通过微波互连技术, 使其在垂直方向与水平方向上将不同功能的模块叠层互连, 实现三维互连结构。本文针对三维立体组装中的难题——宽带多级射频互连技术进行仿真设计, 该设计突破单一结构, 大幅度提高组装密度, 使射频传输具有良好性能, 对于实现设备集成化、轻量化具有重要意义<sup>[3,4]</sup>。

## 1 三维集成微系统结构设计

多层电路设计中, 信号需要在不同传输线之间进行传输, 包括同层与不同层。同时由平面结构向立体结构转变, 会造成信号产生额外的插入损耗和反射损耗, 导致信号传输的不完整, 因此, 对多级

射频互连技术进行仿真设计尤为重要。三维集成微系统结构如图 1 所示, 壳体内包含两块基板, 上层基板与下层基板通过球栅阵列封装 BGA (Ball Grid Array) 方式连接。本文主要仿真设计多级水平互连以及多级垂直互连两种多级射频互连方式, 如图 1 中的红色虚线所示。

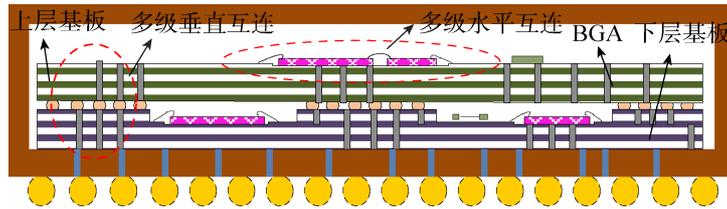


图 1 三维集成微系统结构

Fig. 1 Three dimensional integrated microsystem structure

结构设计中的基板选择高温共烧陶瓷 HTCC (High Temperature Co-fired Ceramics), 其中最常用的基材类型是氧化铝。氧化铝具有高热导率以及高化学稳定性, 其热膨胀系数小<sup>[5]</sup>, 以氧化铝为介质基板, 设计更加灵活, 具有较好的机械强度, 表 1 为氧化铝的材料参数。

表 1 氧化铝材料参数

Table 1 The material parameters of alumina

| 参数      | 氧化铝                    |
|---------|------------------------|
| 介电常数    | 9.7                    |
| 热导率     | 16.8 W/(m·K)           |
| 抗弯强度    | 375 MPa                |
| 杨氏弹性模量  | 314 GPa                |
| 线性热膨胀系数 | $7.3 \times 10^{-6}/K$ |

## 2 多级水平互连仿真设计

多级水平互连电路模型如图 2 所示。射频信号首先从同轴输入并且通过同轴-微带线的水平过渡; 再通过金丝键合与微带线连接, 射频信号从 5880 基板传输至 HTCC 基板, 实现了不同基板间的水平互连; 然后, 经过微带线-带状线的水平过渡; 最后, 利用倒角过渡, 使射频信号从侧面输出。本节首先仿真设计了同轴-微带线的水平过渡以及倒角过渡等电路结构, 然后对整体的多级水平互连模型进行仿真优化。

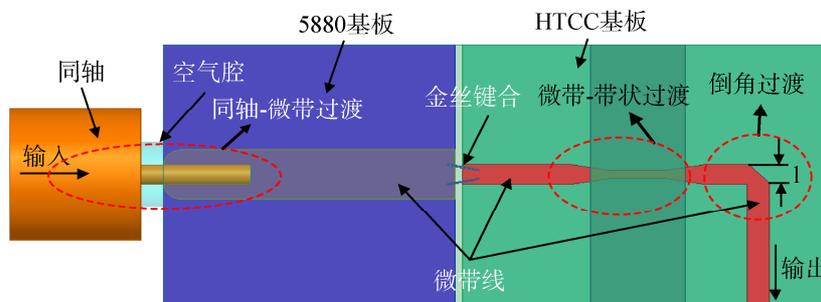


图 2 多级水平互连电路模型

Fig. 2 Circuit model of multilevel horizontal interconnection

### 2.1 同轴-微带线水平过渡优化仿真

在设计结构时, 通常采用接插件与外界传输信号, 其外径为 2mm, 内径为 0.3mm, 建立的水平过渡模型如图 3 中的左图所示, 同轴与微带线直接相连。仿真结果如图 3 中右图所示, 在 DC~30GHz 内,

回波损耗优于 17dB,插入损耗优于 0.2dB。在高频时性能不是很理想,是由于同轴线中传输的场为 TEM 模式,而微带线中传输的场为准 TEM 模式,两种不同模式传输线相连会产生模式失配,激励出较多的高次模<sup>[6]</sup>,因此需要进行优化设计。

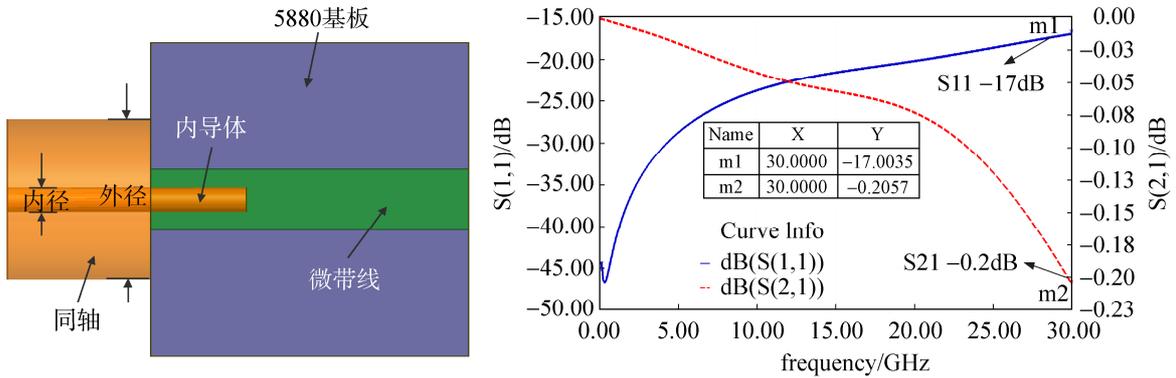


图3 同轴-微带线水平过渡  
Fig. 3 Horizontal transition of coaxial-microstrip

如图 4 所示,建立优化的同轴-微带线的水平过渡模型,在同轴线和微带线之间增加空气腔,利用腔体的阶梯变换实现同轴-微带线过渡的良好性能,通过优化空气腔的内径 r1 以及厚度 s1,最终得到当 r1=0.5mm、s1=0.3mm 时,性能最佳。其仿真结果如右图所示,在 DC~30GHz 内,回波损耗优于 31dB,插入损耗小于 0.1dB。与无空气腔互连结构相比较,回波损耗改善了 14dB,插入损耗改善了 0.1dB。

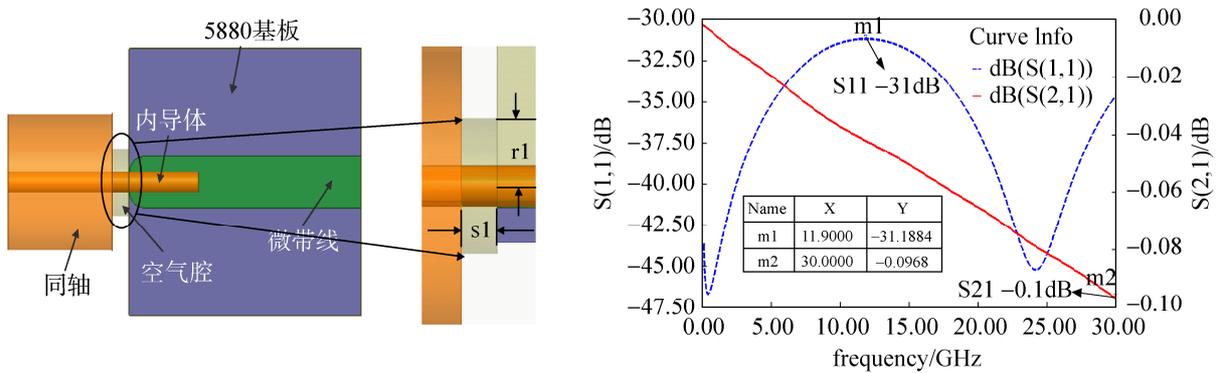


图4 优化后同轴-微带线水平过渡  
Fig. 4 Optimized horizontal transition of coaxial-microstrip

### 2.2 倒角过渡优化设计

在图 2 所示的多级水平互连电路中,利用倒角过渡,使射频信号从侧面输出。拐角导致不连续性的出现,而不连续性会在电路中形成电抗,引起寄生耦合,通常采用倒角过渡的方式补偿其不连续性。由于倒角的形状与大小会影响射频传输性能,因此,仿真分析了四种不同形状的倒角,其模型与仿真结果如图 5 所示。

如图 5 所示,建立了四种倒角模型,倒角形状分别为直角、圆角、45°外斜角以及 45°内外斜角,右侧为四种倒角模型的仿真结果。如图 5 中右图所示,在高频部分,直角过渡模型的回波损耗性能最差,然后是圆角过渡,45°内外斜角过渡与 45°外斜角过渡性能相当;伴随频率增加,45°外斜角性能更优异,仿真结果在 DC~30GHz 内回波损耗均优于 20dB。因此,最终采用 45°外斜角的倒角过渡方式进行设计。

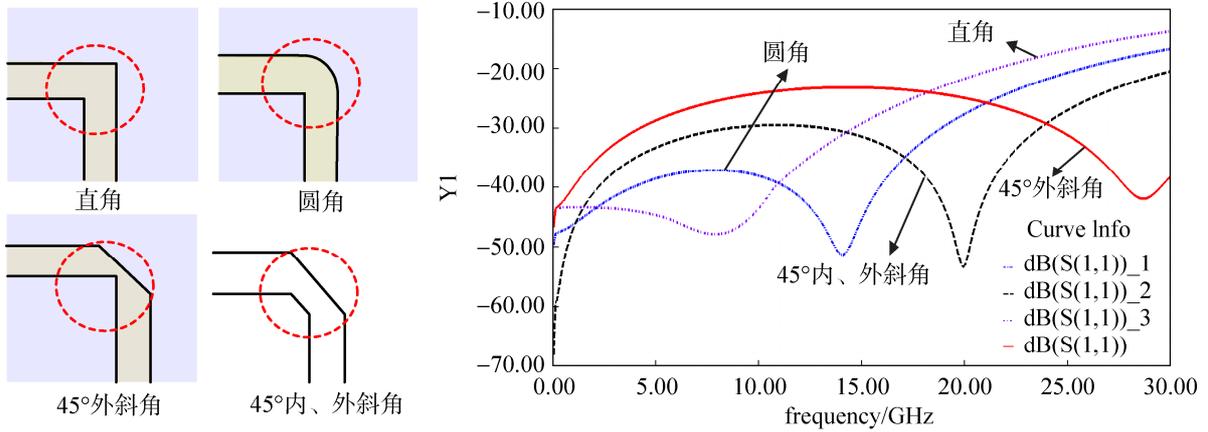


图 5 四种倒角模型及仿真结果

Fig. 5 Four corner cutting models and simulation results

### 2.3 多级水平互连仿真结果

在上文优化后的基础上, 通过优化金丝键合的金丝直径、金丝数量以及倒角尺寸, 获得最佳传输性能。最终结果采用两根金丝, 当金丝直径为 0.025mm, 倒角尺寸  $l$  为 0.28mm (采用上文所述的 45°外斜角过渡) 时, 性能最佳, 多级水平互连的仿真结果如图 6 所示。仿真后得到, 在 DC~30GHz 内, 回波损耗优于 21dB, 插入损耗优于 0.16dB, 信号传输性能良好。

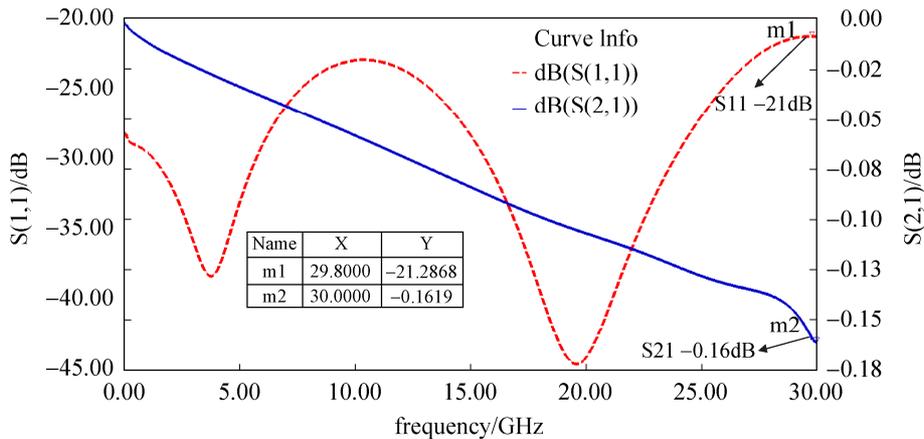


图 6 多级水平互连电路仿真结果

Fig. 6 Simulation results of multilevel horizontal interconnection

## 3 多级垂直互连仿真设计

在三维集成结构设计中, 不同功能的元器件在 Z 轴方向上堆叠, 因此, 多级垂直互连的设计尤为重要<sup>[7]</sup>。建立的多级垂直互连电路仿真模型如图 7 所示。该设计包括板间垂直互连与板内垂直互连两种电路结构, 信号从上层微带线输入, 经过阻抗匹配后, 通过 BGA 板间垂直互连电路结构将信号从微带线板间过渡至带状线; 再利用板内垂直互连电路结构将信号从中间层带状线传输至底层的带状线, 整个电路结构包括 12 层 HTCC 基板。本节首先仿真了 BGA 板间互连设计, 然后通过优化最终得到仿真结果。

### 3.1 BGA 板间互连优化设计

建立 BGA 板间互连的模型, 如图 8 所示。上层微带线传输的射频信号通过 BGA 板间互连传递至底层的带状线中, 这种方式可广泛应用到三维电路的集成设计中, 提高信号传输的可靠性。通过优化

BGA焊球半径  $r$ ，以及信号焊盘与接地焊盘的距离  $d$ ，使性能达到最优。BGA球的高度  $h=0.2\text{mm}$ ，球的半径  $r$ 与同轴外半径  $R$ 满足类同轴公式，如式(1)所示<sup>[8]</sup>。

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{R}{r} \tag{1}$$

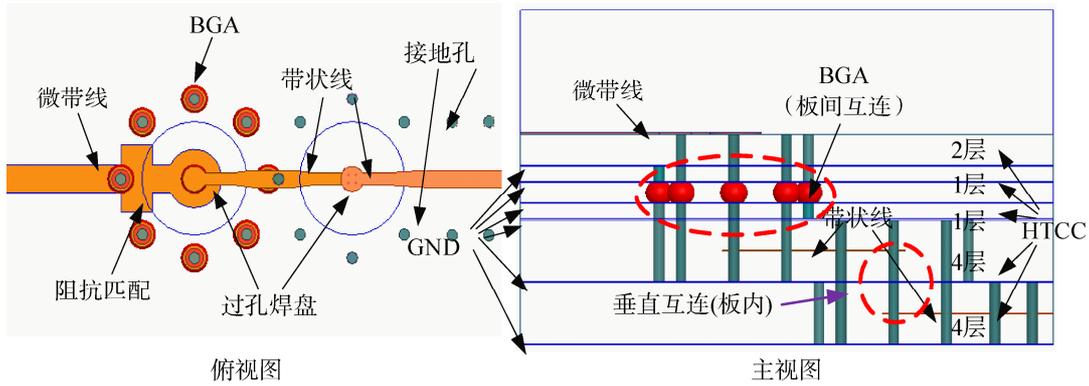


图7 多级垂直互连电路仿真模型

Fig. 7 Simulation model of multilevel vertical interconnection

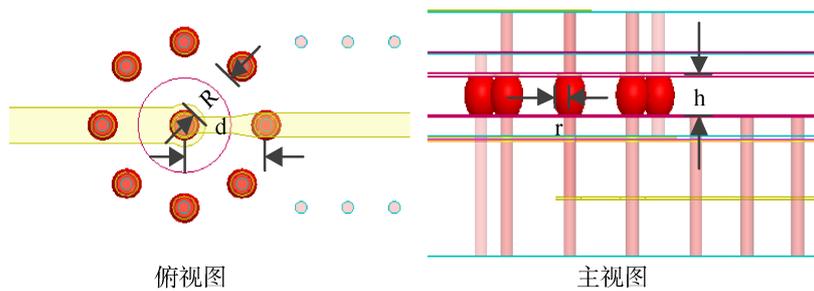


图8 BGA板间互连模型

Fig. 8 BGA interconnect model between substrates

采用  $h=0.2\text{mm}$ 、 $r=0.13\text{mm}$  的 BGA 仿真模型， $d=r+R$ ，仿真优化信号焊盘与接地焊盘的距离  $d=0.7\text{mm}\sim 0.8\text{mm}$ ，步进为  $0.05\text{mm}$ ，得到如图9所示的仿真结果。结果显示：在  $\text{DC}\sim 30\text{GHz}$  内，伴随信号焊盘与接地焊盘距离  $d$  的增加，性能会有所下降，当  $d=0.7\text{mm}$  时，信号的插入损耗最小，性能最佳。

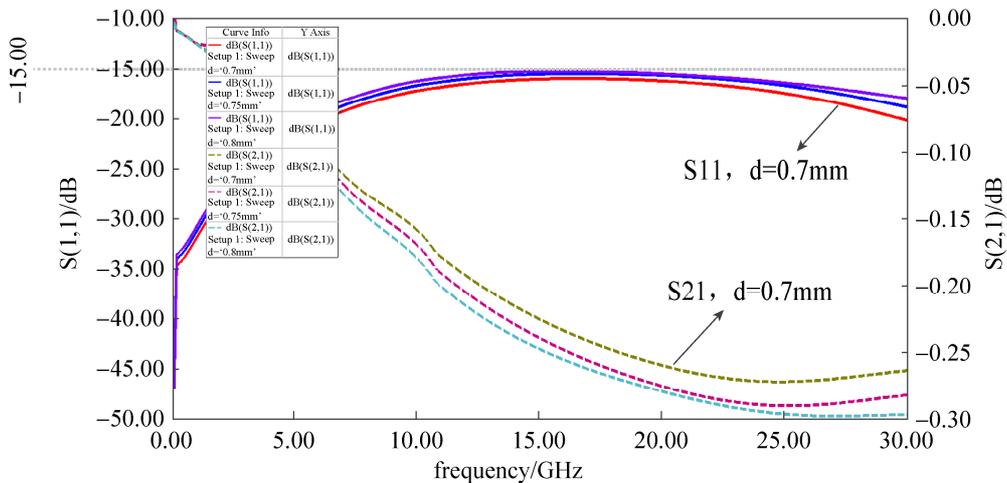


图9 BGA板间互连仿真结果

Fig. 9 Simulation results of BGA interplate interconnection

### 3.2 多级垂直互连仿真结果

以前文所述 BGA 板间互连设计为基础, 通过优化过孔焊盘内径以及带状线两侧接地孔的距离, 最终得到如图 10 所示的多级垂直互连电路仿真结果。在 DC~30GHz 内, 回波损耗优于 13dB, 插入损耗优于 0.57dB, 信号传输性能良好。

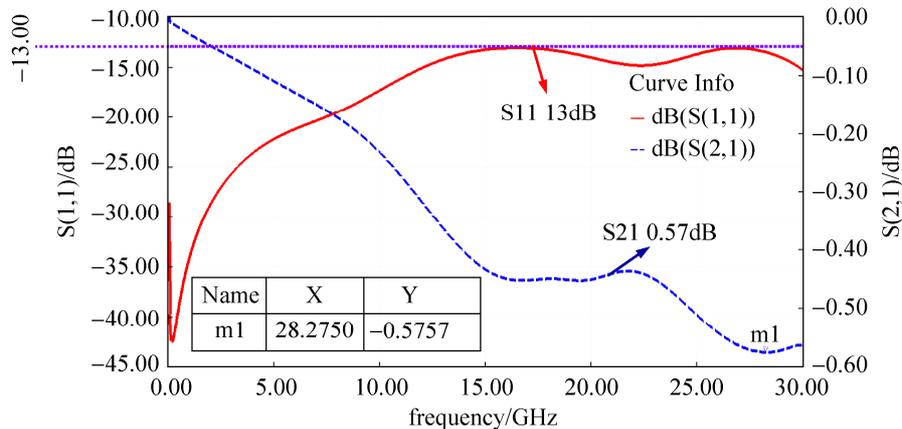


图 10 多级垂直互连电路仿真结果

Fig. 10 Simulation results of multilevel vertical interconnection

## 4 结束语

本文对三维立体组装中的关键技术——宽带多级射频互连结构进行优化仿真设计, 以 HTCC 为介质基板, 设计了两种多级互连电路结构。在多级水平互连电路中, 通过优化同轴-微带线的水平过渡以及倒角过渡, 得到在 DC~30GHz 内信号的回波损耗优于 21dB, 插入损耗优于 0.16dB; 多级垂直互连电路中, 通过优化 BGA 板间互连结构, 得到在 DC~30GHz 内信号的插入损耗优于 13dB, 插入损耗优于 0.57dB。本文所设计的两种电路结构工作频率可达到 30GHz, 频带宽, 可以广泛应用在三维堆叠结构设计中, 对设备实现小型化、集成化、轻量化有重大意义。

### 参考文献

- [1] 严伟, 吴金财, 郑伟. 三维微波多芯片组件垂直微波互联技术[J]. 微波学报, 2012, 28(5): 1-6.  
YAN Wei, WU Jincan, ZHENG Wei. Vertical microwave interconnection techniques for 3D microwave multi-chip modules[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(5): 1-6.
- [2] 蔡茂. 基于三维集成的 X 波段接收模块设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
CAI Mao. The research on X-band receiver module design based on 3D integration technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2008.
- [3] 吴喆. 基于 SIP 的射频宽带收发前端关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
WU Zhe. Research on technology of RF wideband transceiver front end based on SIP[D]. Chengdu: School of Electronic Science and Engineering, 2018.
- [4] 郭旭光. 3D 组装面阵垂直互连技术及可靠性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
GUO Xuguang. Plane array vertical interconnection technology and reliability in three dimensional assembly[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [5] 余芬芬. 高温共烧陶瓷 (HTCC) 用丝网印刷浆料的制备工艺与特性研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.  
YU Fenfen. Study on preparation and characterization of high temperature co-fired ceramic (HTCC) screen printing paste[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014.
- [6] 汪繁星, 张浩, 刘海涛. 三维系统级封装中垂直互连结构的设计[J]. 微处理机, 2018, 39(4): 10-13.  
WANG Canxing, ZHANG Hao, LIU Haitao. Design of a vertical interconnection structure used in 3D

- system-in-package[J]. Microprocessors, 2018, 39(4): 10-13.
- [7] 王辉. Ka 波段微带到带状线垂直互联技术研究[C]. 全国天线年会论文集, 2017.  
Wang Hui. Research on Ka-band vertical interconnection of micro-strip to strip[C]. Proceedings of the National Antenna Conference, 2017.
- [8] 吕鑫, 赵明, 王慧玲等. 基于氮化铝材料的 DC~40GHz 低损耗垂直过渡结构设计[C]. 全国微波毫米波论文集, 2019.  
LV Xin, ZHAO Ming, WANG Huiling, et al . Design of DC-40GHz low loss vertical-transition structure based on AlN[C]. National Microwave and Millimeter Wave Proceedings, 2019.

#### [作者简介]

- 傅显惠 1995 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路设计。  
刘德喜 1973 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路设计。  
祝大龙 1980 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路设计。  
赵红霞 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路设计。

---

(上接第 39 页)

#### [作者简介]

- 张宇露 1989 年生, 硕士, 工程师, 主要从事宽调谐及高功率量子级联激光器研究。  
黄彦 1990 年生, 博士, 工程师, 主要从事宽调谐及高功率量子级联激光器研究。  
高志强 1990 年生, 硕士, 助理工程师, 主要从事宽调谐及高功率量子级联激光器研究。  
周建发 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事光谱特种传感器研究。  
刘蓓 1991 年生, 硕士, 工程师, 主要从事嵌入式编程开发研究。  
钟亮 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事硬件电路开发研究。  
徐焜 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要从事上位机软件开发研究。  
陈旭 1985 年生, 大专, 技师, 主要从事特种光学器件装配工作。  
史青 通信作者, 1982 年生, 博士, 研究员, 主要从事光纤传感系统技术研究。  
彭泳卿 1980 年生, 博士, 研究员, 主要从事航天特种传感器与传感系统技术研究。