

# 基于晶圆级封装的W波段微同轴天线 小型化设计与实现

刘博源<sup>1</sup>,江云<sup>1</sup>,黄昭宇<sup>1</sup>,陈嘉贝<sup>1</sup>,叶源<sup>1</sup>,季鹏飞<sup>1</sup>,  
许庆华<sup>2</sup>,吴微微<sup>1</sup>,黄敬健<sup>1</sup>,袁乃昌<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学学院 CEMEE 国家重点实验室, 湖南长沙 410073;  
2. 湖北三江航天峰电子信息技术有限公司, 湖北孝感 432000)

**摘要:** 空气微同轴是一种以空气作为填充介质的波导结构, 波导壁周期性开窗, 内导体由稀疏介质带支撑, 具备频带宽、隔离度高、尺寸小的特点, 可以实现三维高密度系统集成. 本文结合空气微同轴的超宽带特性, 考虑到其天线/电路一体可加工易级联, 利用 CST、HFSS 等软件, 得到了 W 波段微同轴天线模型. 实际加工出对应微同轴天线实物. 测试结果显示, 在中心频率 94 GHz, 实现了反射系数低于 -10 dB 的宽带特性. 在毫米波频段内得到天线单元增益值超过 7 dBi、组阵后增益大于 12 dBi 的工作性能, 后者 E 面 3 dB 波束宽度超过 20°. 此晶圆级封装的毫米波天线相比传统介质波导天线缩小 100 倍, 可以批量高精度加工, 适合在诸多毫米波模块中应用和推广.

**关键词:** 微同轴; 小型化; W 波段; 天线; 阵列; 晶圆级; 辐射特性

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)05-1098-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210563

## Miniaturization Design and Implementation of W-Band Micro-Coaxial Antenna Based on Wafer-Level Packaging

LIU Bo-yuan<sup>1</sup>, JIANG Yun<sup>1</sup>, HUANG Zhao-yu<sup>1</sup>, CHEN Jia-bei<sup>1</sup>, YE Yuan<sup>1</sup>, JI Peng-fei<sup>1</sup>,  
XU Qing-hua<sup>2</sup>, WU Wei-wei<sup>1</sup>, HUANG Jing-jian<sup>1</sup>, YUAN Nai-chang<sup>1</sup>

(1. CEMEE SKL, School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;  
2. Xianfeng Electronic Information Co., Ltd, Sanjiang Aerospace, Xiaogan, Hubei 432000, China)

**Abstract:** The air micro-coax is a kind of structure with air as the filling medium, where its waveguide wall is periodically windowed, and the inner conductor is supported by the sparse medium belt. Its characteristics include wide frequency band, high isolation, small size, and being able to achieve three-dimensional high-density system integration. In connection with air micro-coax's features of ultra wide band(UWB), this paper considered that its antenna/circuit integration was processible and easily cascaded. W-band micro-coaxial antenna models were obtained by modeling and simulation with CST, HFSS. Corresponding micro-coaxial antennas were fabricated. The test results showed that at 94 GHz central frequency, reflection coefficient was lower than -10 dB. Working performance of the gain value of the antenna unit with over 7 dB and that of arrayed antenna over 12 dB were realized in the millimeter wave frequency band, and the 3 dB beam width of the latter one on E-field was beyond 20°. The millimeter wave antenna packaged at the wafer-level is 100 times smaller than the traditional dielectric waveguide antenna, and can be processed in batches with high precision. The design can be applied and popularized in many millimeter wave modules.

**Key words:** micro-coax; miniaturization; W-band; antenna; array; wafer-level; radiation characteristics

### 1 引言

装备的信息化水平直接决定了战争各方的力量对

比,因此,得益于高分辨、强定向、大宽带等特性,毫米波  
高端/太赫兹电子系统在大容量通信、高性能雷达、高精

度制导等领域具有非常广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。目前基于传统的平面混合电路或基于机械加工波导的集成技术,在体积、集成度、损耗等多方面具有的缺陷难以克服,严重制约了高性能毫米波高端/太赫兹装备的发展。

微同轴由悬空的中心导体和将其包围的接地外导体组成<sup>[2]</sup>,属于 RF MEMS(Radio Frequency Micro-Electro-Mechanical System)范畴。它具有超大带宽、超低损耗等高频电路关键特性,大幅提升了毫米波/太赫兹电路性能和系统集成能力,并且其传递电磁波的模式是 TEM(Transverse Electromagnetic Wave)波,具有零截止频率,因而较于同轴线结构,微同轴可以实现无色散<sup>[3,4]</sup>。

随着研究深入,将 3D(3-Dimension)微同轴结构由传输线向毫米波天线单元方向设计,可以在继续发挥体积小优势下,通过集成幅相多功能芯片、功放芯片等器件,实现高密度有源相控阵天线。如果系统中大部分无源器件和天线都采用微同轴工艺集成,就可以构建低成本的动态自适应天线<sup>[5]</sup>、共形天线阵列、多波段相控阵天线、轻型相控阵雷达等,同时具备微型化、可重构、轻量化等特点。

微同轴相对于其他微波毫米波传输结构具有体积小的显著优势,但同时也为实际加工制备带来了新的挑战<sup>[6]</sup>。当今射频芯片的普及和广泛应用,也为生成微同轴结构指明了一条全新的道路。晶圆级封装过程是指在半导体的晶体材料如 Si 和 GaAs 的圆片上,采用一系列精细工艺,在垂直方向逐层或渐变式生成具有特定功能的器件或者电路,再经过切割工艺,将每一个生成的器件或者电路组成部分从圆片上分离并实际应用<sup>[7]</sup>。因为晶圆级封装可以保证所需的器件或者电路在每一批次都可以达到很好的一致性,这样对于 W 波段在体积方面求小求轻,性能方面求可靠免调试的要求上是至关重要的<sup>[8,9]</sup>。采用微细加工技术逐层累加的加工方法使得晶圆级微同轴的生成技术可以满足高效、稳定、可批产的关键需求。

铜基空气微同轴作为新兴的信号传输和系统集成技术,表现出高频低损耗、高功率、高密度等优异能力,在太赫兹频段应用中显示出广阔前景,因此,非常适合毫米波高端/太赫兹器件和系统集成应用<sup>[10]</sup>。本文实际设计并加工了空气微同轴天线和微同轴阵列天线,基于 3D 空气微同轴结构的微系统制备工艺,可在 W 频段实现超小型化的电路设计和系统结构设计。与传统波导结构比较,产品体积可缩减至 1/100 以内,满足未来射频微波系统的更高需求,同时具备半导体工艺可批产特性,在系统级电路集成、相控阵雷达、太赫兹功率合成、高性能 T/R 微系统、相控阵天线、太赫兹收发微系统、5G 收发链路等方面具有广阔的应用前景。因其高可靠、高集成特性,在弹载、星际通信、空间探测等领域将发挥重大作用<sup>[11]</sup>。

## 2 W 波段空气微同轴天线的设计

多层微带天线在 0~40 GHz 可以实现宽带、宽波束等多种高性能指标,但在毫米波高端/太赫兹频段,介质损耗严重降低了多层微带天线的辐射效率,微带天线往往在性能上难以满足需求<sup>[12]</sup>。利用微同轴加工工艺制作以空气为介质的多层平面天线,可以克服介质微带天线的上述多种弊端。微同轴结构分层加工的特点,可以满足进一步实现以空气为主要介质的多层天线的条件。空气介质所具备的低介电常数、低损耗的特点,非常有利于实现天线宽波束宽度、高辐射效率等特性<sup>[13]</sup>。这也为微同轴天线的加工制作提供了理论支持,指引了优化性能设计加工的目标。

### 2.1 微同轴天线的参数指标

考虑所设计的微同轴天线单元及阵列天线的重点性能,设置的参数指标如表 1 所示。

表 1 微同轴天线参数指标列表

参数名称	指标
中心频率	94 GHz
带宽	8 GHz
天线单元增益	不小于 7 dBi
天线单元增益平坦度	不大于 0.4 dB
阵列天线增益	不小于 12 dBi
降到天线增益平坦度	不大于 1.0 dB
阵列天线远场 3 dB 波束宽度(E 面)	不小于 20°
阵列天线远场 3 dB 波束宽度(H 面)	不小于 80°
阵列天线端口反射系数	不大于 -10 dB
天线单元电阻面特性阻抗	50 Ω
微同轴传输线插入损耗	不大于 0.5 dB/cm
微同轴传输线截面尺寸	不大于 0.75 mm×0.6 mm
阵列天线面尺寸	不大于 8 mm×2 mm

### 2.2 微同轴天线单元的设计

本文涉及的天线为空气填充铜基微同轴天线。因为工作频率位于 W 波段,器件的相对带宽较小,工作波长很短,因此,在客观上缩减了器件和系统的体积及重量,在一定程度上缩短了传输路径长度。同时,电磁波传输受传输结构的物理尺寸限制也会减弱。空气微同轴的铜壳经过周期性开窗后,可以在晶圆级加工过程中更加方便地去除光刻胶,降低了残留的光刻胶对毫米波传输特性的负面影响。空气填充微同轴传输线除了稀疏介质带对铜芯起到支撑作用外,是没有其他介质存在的,因此,最大限度降低了衬底损耗对传输性能的影响,使得微同轴天线下方的介质厚度可以等效为无穷大,介电常数无限趋近于 1,由此,可以进一步减小其传输损耗。如图 1 所示,该图显示了微同轴铜壳和铜芯的空间位置关系,毫米波可以在此结构上超低损耗地传输,并且端口具有很好的反射系数,这对于微同轴天线优良的馈电性能和高集成度是极其重要的。

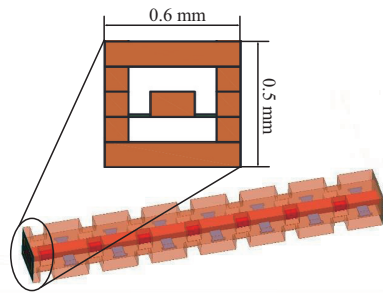


图1 空气填充微同轴传输线仿真模型及横截面尺寸

微同轴传输结构主要由铜和填充在其中的空气组成,因此容性的损耗被最小化,导体和介质损耗极低.基于上述传输结构,微同轴天线可以很好地与系统进行集成.为了实现宽带特性,天线增益会被削弱,这两者之间是相互矛盾的关系,因此在设计过程中需要综合考虑.为了实现在中心频率94 GHz,带宽8 GHz的范围内的毫米波宽带天线单元匹配和辐射性能,考虑到天线设计中理想导体背板加载提高的增益不宜过高的情况,最终确定了天线的辐射面与背板之间的距离为中心频点波长的四分之一,这样可以实现同一时刻的入射波和反射波在波峰处形成叠加.

$$f = \frac{c}{2h_{\text{sub}}} \quad (1)$$

式(1)中的 $h_{\text{sub}}$ 为辐射面和背板之间的间距.当频率增高,天线和背板导体间距为半波长时,正向辐射的电磁波恰好和经过背板导体反射后的电磁波发生干涉叠加的现象,虽然此时两者幅度近似,然而相位差相差 $\pi/2$ ,使得入射波和反射波相互抵消,表现在天线方向图时,会在该处出现一个传输零点,也就是带宽的频率上限.从等效电路的角度看,在添加背板对电磁波进行反射时,天线端口的等效电抗为 $jX^{\text{H}}$ ( $X^{\text{H}}$ 为高频端等效电抗).当 $h_{\text{sub}}$ 达到 $\lambda/2$ 时,输入端口电抗值为零,电路可以看作短路,对应点即驻波为无穷大值的谐振点.因此,抑制这种短路效应,提高天线的工作带宽,实现等效阻抗的匹配,对于毫米波天线的设计来说至关重要.通过对天线通带性能和增益等指标参数的综合分析,在CST仿真软件中设计出了一款空气填充微同轴天线单元,如图2、图3所示.

空气微同轴天线单元仿真优化后对应结构尺寸如表2所示.

通过将微同轴天线的馈电端口相对于水平微同轴传输路径调整到沿 $z$ 轴的辐射方向,信号经过一段由突出的铜芯构成的阻抗变换过渡结构后,传输至辐射面上进行辐射.辐射面利用两个独立的铜柱进行支撑,以确保该结构的稳定可靠性.整个结构被铜组成的电壁环绕,可以将信号沿 $z$ 轴方向辐射,同时将经过背板反射回来的波限制在沿辐射方向传播,可以保证天线方向图的稳定和低副瓣性.

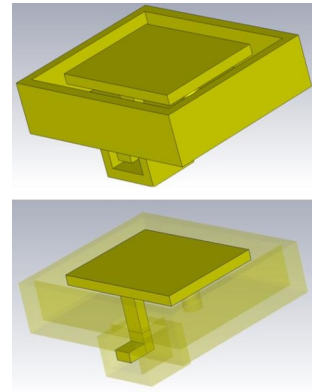


图2 空气填充微同轴天线单元仿真模型及透视图

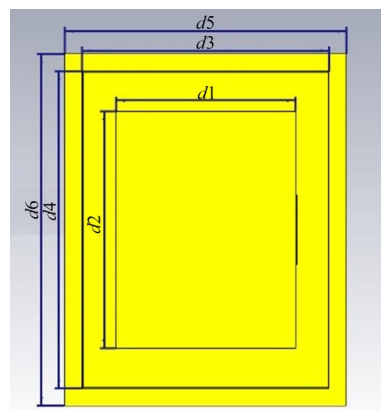
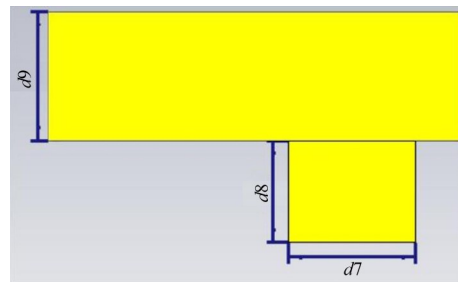
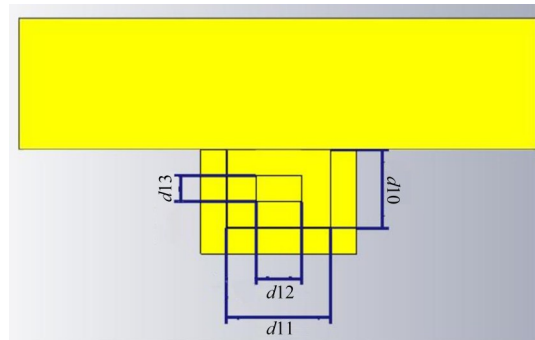
(a) 天线单元俯视图(沿 $-z$ 方向)(b) 天线单元侧视图(沿 $+y$ 方向)(c) 天线单元主视图(沿 $-x$ 方向)

图3 天线单元模型各向视图

表 2 空气填充微同轴天线的对应结构尺寸(单位: mm)

图 3(a)	$d1=1.02$	$d2=1.35$	$d3=1.40$
	$d4=1.80$	$d5=1.60$	$d6=2.00$
图 3(b)	$d7=0.50$	$d8=0.40$	$d9=0.50$
图 3(c)	$d10=0.30$	$d11=0.40$	
	$d12=0.18$	$d13=0.10$	

天线结构均用高频仿真软件 CST 和 HFSS 进行建模和关键参数的仿真优化。为缩短每一次的仿真时间,在建模时,端口接  $50 \Omega$  的匹配负载,馈电端口处增加一段 PEC 材料,以保证该处入射电磁波阻抗不受频率影响。整个结构全部放置在被空气填充的腔体内,以确保空气微同轴天线单元是完全工作在非介质存在的情况下。 $\pm z$ 轴处的边界条件被设置为“open(add space)”,就可实现对该结构单元的快速仿真。入射波在  $+z$  轴的边界面上,沿  $-z$  轴方向照射到结构对称中心与直角坐标系原点重合的结构单元上。微同轴天线单元是非介质传播,因此不受极化现象的影响,无论入射波电场的极化方向沿  $x$  轴还是沿  $y$  轴方向,结果均一致。

为了进一步提升微同轴天线的方向性,将上述微同轴天线单元进行四元并馈组阵。根据天线理论,多个微同轴天线单元同时存在于空间时,它们之间会发生电磁耦合。其中任一个微同轴天线单元的阻抗由于受到周围其他微同轴天线单元的影响,将不同于它单独存在时的阻抗值。互耦和频率的关系表现在阵元之间的距离和对应频率的波长的关系,因此,在 HFSS 中,通过对不同阵元间距的优化仿真,同时设置主从边界条件,最后使用方向图乘法,确定了优化仿真模型,并得到了考虑过互耦影响的阵列方向图仿真结果。优化仿真模型如图 4 所示。

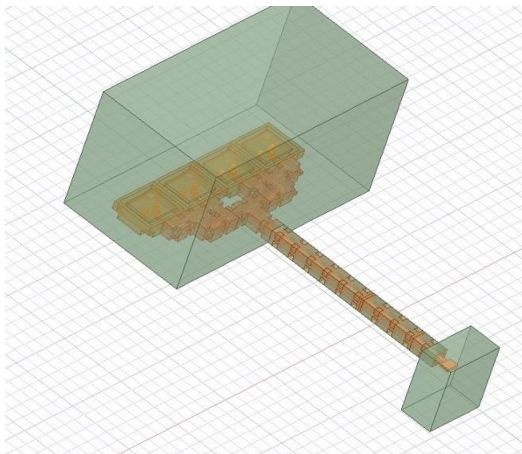


图 4 微同轴天线单元并馈组阵仿真示意图

### 3 晶圆级空气微同轴加工工艺研究与分析

铜基 3D 微同轴工艺是基于光刻技术,在此基础上

引入平坦化工艺和支撑介质材料,能够实现多层、悬空的复杂同轴结构。微同轴结构采用 5 层金属结构组成,利用分层增材式的加工方式,代替金属波导结构逐个焊接组装的机加工方式,使得加工精度和一致性得到数量级提升。图 5 所示为微同轴晶圆级加工工艺流程。

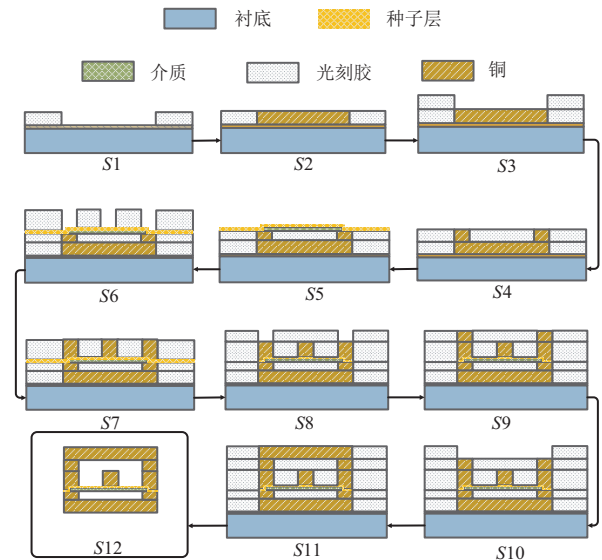


图 5 晶圆级微同轴结构工艺总体方案

图 5 可以将晶圆级单层微同轴结构工艺总体方案过程表示如下:

- (1) 载体涂覆光刻胶、光刻和显影(S1);
- (2) 电镀铜导体层,导体/光刻胶平坦化,完成外导体底层(S2);
- (3) 重复步骤(1)、(2),制作微同轴外导体下层外壁(S3、S4);
- (4) 微同轴中心导体支撑介质制作(S5);
- (5) 重复光刻、电镀及平坦化,形成中心导体和外导体中层外壁(S6、S7);
- (6) 重复光刻、电镀及平坦化,完成完整的单层立体微同轴传输线导体结构(S8、S9、S10);
- (7) 释放光刻胶,形成微同轴器件结构(S11);
- (8) 衬底剥离,将微同轴器件从衬底晶圆释放(S12)。

考虑到 W 波段加工工艺误差,在晶圆加工过程中采用激光直写曝光替代传统接触式曝光,解决了光刻粘版和曝光衍射问题,配合间歇悬浮式显影,最终获得高精度和高侧壁垂直度的光刻线宽。同时,利用高精度化学机械抛光技术的铜抛光工艺处理镀铜凸出胶层部分,实现了快速平坦化。最后,选取 SU-8 作为介质支撑材料,利用旋涂法进行材料沉积,采用光刻显影经过图形化处理,实现了微同轴对支撑结构尺寸的精度需求。线宽精度可提高至  $50 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$  以内。

在毫米波/太赫兹频段,平面电路通过过孔方式实

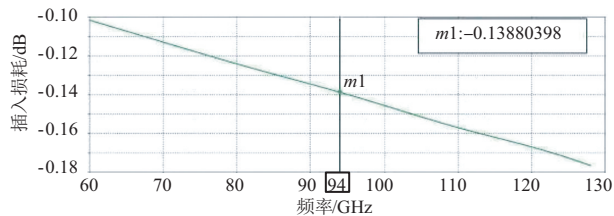
现的上下层电路互联会引入较大的损耗,而微同轴的上下层互联与水平互联在损耗上没有区别,非常有利于电路的纵向扩展.虽然金属波导也可以实现很低的纵向互联插损,但是对于更复杂的三维互联,机械加工往往难以完成,而微同轴结构加工难度并不随电路的复杂程度而增加.微同轴结构低介电常数、低损耗的特点,非常有利于实现天线宽频带、高辐射效率等特性.

#### 4 仿真与测试

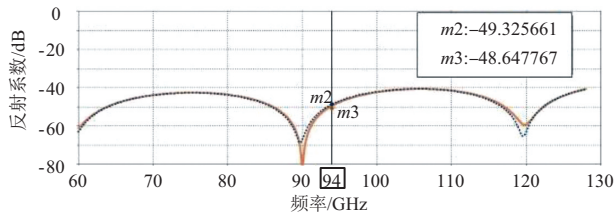
通过电磁场仿真软件 CST 和 HFSS,对图 1 的微同轴传输结构和图 2 的微同轴天线单元结构进行优化仿真设计,分别验证微同轴传输线的低损耗性和微同轴天线的优良辐射特性.

##### 4.1 微同轴传输线的性能仿真

对图 1 所示结构进行仿真,验证了其在毫米波段传输线插入损耗及反射系数情况,如图 6 所示.



(a) 微同轴传输线插入损耗仿真结果



(b) 微同轴传输线反射系数仿真结果

图 6 微同轴传输线散射系数仿真结果

由图 6 可知,在 90 GHz~98 GHz 的通带范围内,微同轴传输线两端口反射系数均小于 -40 dB,插入损耗控制在 -0.093 dB/cm.仿真结果显示,微同轴传输线的阻抗匹配达到了很好的效果,并且低损耗的传输特性使得其非常适用于传输功率和传输效率均要求苛刻的场合,并且可以在极小空间内实现高密度集成,是兼顾电性能和小型化双重需求的选择.同时,散射系数的优良,使得其用于微同轴天线单元馈电时,保证了信号的完整性和屏蔽性.

##### 4.2 W 波段微同轴天线单元、阵列的性能仿真

根据图 2 所示的微同轴天线单元结构,通过对尺寸的优化,得到了表 2 尺寸数值,并在此基础上,利用 CST、HFSS 仿真软件对该天线单元进行了优化仿真,仿真对象主要有端口反射系数、匹配情况、增益和方向图.

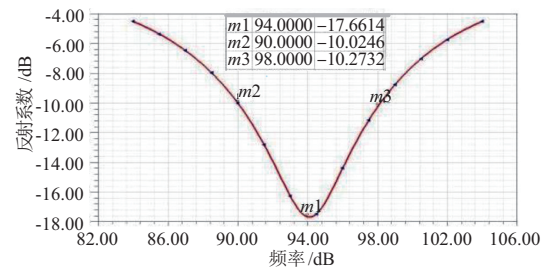
表 2 对应的尺寸设计需要建立在 50  $\Omega$  阻抗匹配环

境,因为匹配情况好坏决定着毫米波信号是否可以无失真地由天线单元辐射出去.在微波毫米波频段里,等效表面阻抗  $Z_s$  可由以下公式求得:

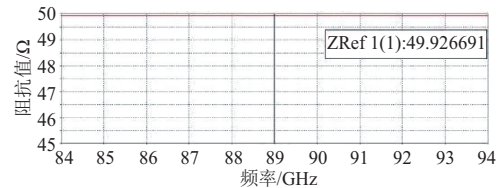
$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2)$$

其中,  $R_s$  表示等效电阻,  $X_s$  表示等效电抗.

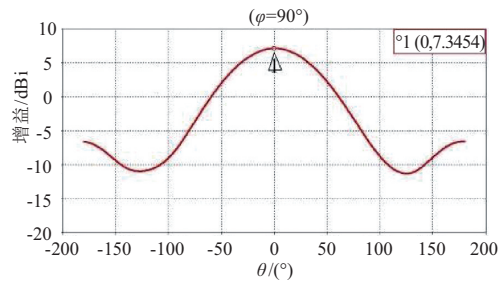
经过建模仿真,微同轴天线单元在中心频率 94 GHz 附近的反射系数、阻抗匹配、E 面与 H 面增益仿真曲线如图 7 所示.



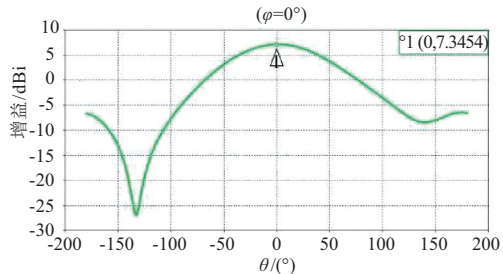
(a) 微同轴天线单元反射系数仿真结果



(b) 微同轴天线单元等效阻抗仿真结果



(c) E 面增益仿真曲线

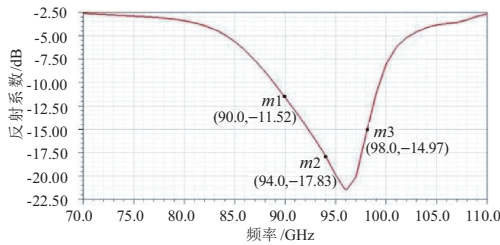


(d) H 面增益仿真曲线

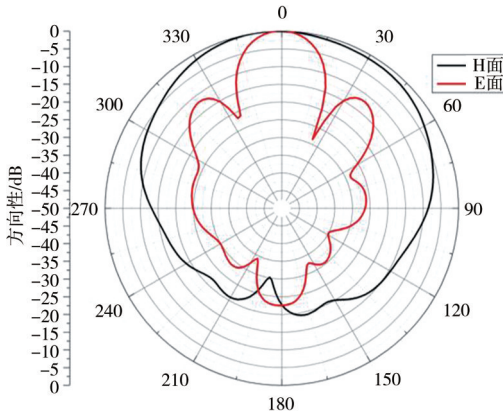
图 7 微同轴天线单元各指标仿真结果

经过优化仿真,微同轴天线单元并馈组阵端口反射系数,以及 90 GHz、94 GHz、98 GHz 处远场方向图仿真结果如图 8 所示.

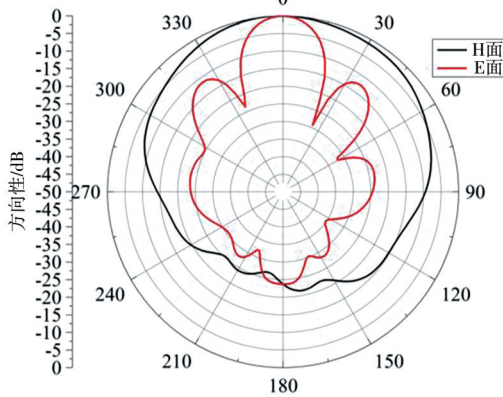
根据经过仿真得到的微同轴天线单元的反射系数参



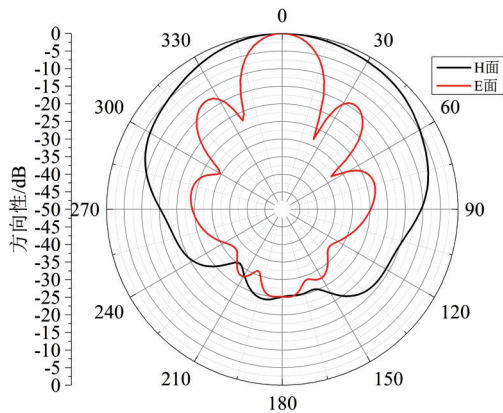
(a) 微同轴天线单元并馈组阵反射系数仿真曲线图



(b) 90 GHz 方向图仿真结果



(c) 94 GHz 方向图仿真结果



(d) 98 GHz 方向图仿真结果

图 8 微同轴天线单元并馈组阵方向图仿真结果

路匹配和信号驻波的角度来看,可以基本满足可加工的要求. 天线单元等效阻抗只有实部部分,  $Z_s \approx 49.93 \Omega$ , 可视为  $50 \Omega$ , 实现了较好的阻抗匹配. 受微同轴天线的组成成分影响,单元的增益在端射点处约为  $7.35 \text{ dBi}$ , 无栅瓣产生,指标与等口径的喇叭天线接近,因为其介质损耗和传输损耗极小,所以效率也远优于传统贴片天线.

由于辐射单元馈电位置的不对称性,天线的 H 面方向图也呈现出不对称性. 表 3 总结出了上述微同轴天线阵列若干指标仿真结果.

表 3 微同轴阵列天线反射系数、增益、3 dB 波束宽度 vs 频率的仿真结果

频率	90 GHz	94 GHz	98 GHz
反射系数	-11.52 dB	-17.83 dB	-14.97 dB
增益	12.16 dBi	12.52 dBi	13.01 dBi
3 dB 波束宽度 (E 面)	25.2°	24.7°	22.3°
3 dB 波束宽度 (H 面)	94.7°	88.4°	83.5°

在 90 GHz~98 GHz 工作频带范围内,根据馈电位置相对于 H 面是非对称的,经过理论和仿真情况的分析,该仿真结果符合并馈阵列天线的关键指标要求.

### 4.3 W 波段微同轴传输线和天线单元、阵列加工测试结果

建立在新型晶圆级封装技术之上,基于上述晶圆级微同轴结构工艺总体方案,实际制作出了该微同轴天线单元. 同时,在亚毫米级对第 2 节仿真优化得到的并馈阵列天线网络进行实物加工,图 9 显示的是模型实际尺寸与传统四通道毫米波波导天线尺寸对比示意图,该模型中的并馈组阵天线面尺寸仅为  $8 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ . 经过计算验证,其体积仅为传统波导天线体积的  $1/100$ .

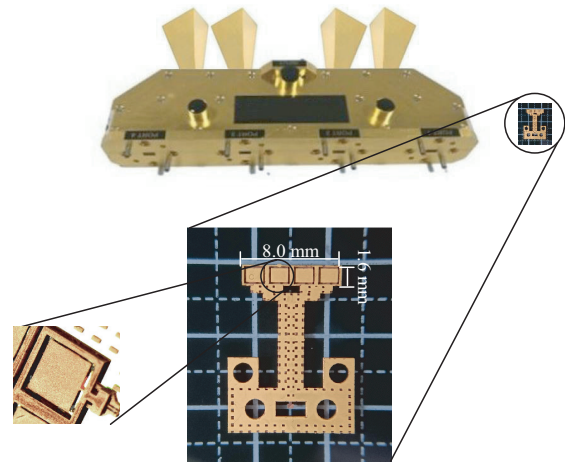


图 9 微同轴天线单元并馈组阵加工实物及尺寸对比图

将微同轴阵列天线固定在测试台上,经自动化测试系统对测试类工具如探针组件等校准后,探针组件的插损可以视为 0. 建立在高精度度测试的基础上,对

数结果,在带宽约 8 GHz 内,反射系数均小于  $-10 \text{ dB}$ , 从电

微同轴阵列天线的反射系数、方向图、增益进行了综合实测,并得到相应仿真实测结果对比示意图及表格.

反射系数实测结果如图 10 所示.

由此可见,测试结果与图 8(a)所示微同轴天线单元并馈组阵反射系数仿真曲线图基本吻合,反射系数在 90 GHz~98 GHz 频带范围内均在 -10 dB 以下. 设置 W 波段标准喇叭天线作为辐射源,由于毫米波空间传播衰减严重,所以将辐射源与微同轴阵列天线之间的距离设定为 1 m,后者接收到的辐射对应于 90 GHz、94 GHz 和 98 GHz 处的归一化 E 面与 H 面方向图仿真与

实测结果比照如图 11 所示.

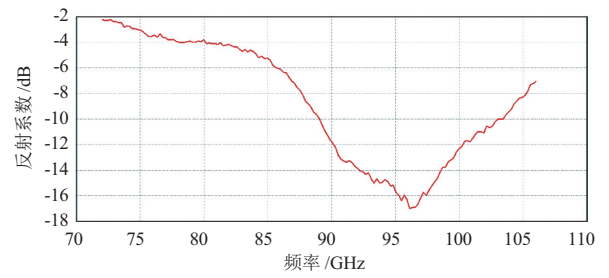
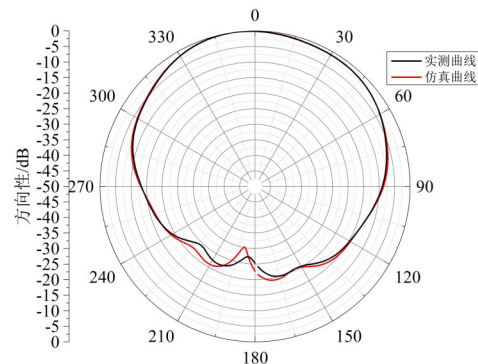
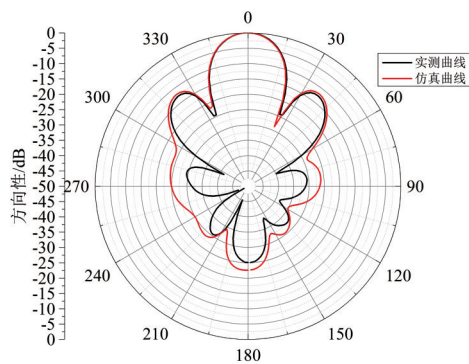
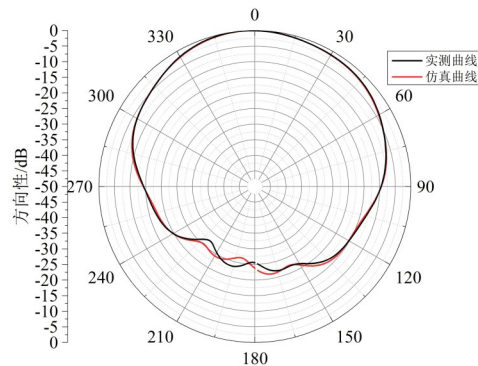
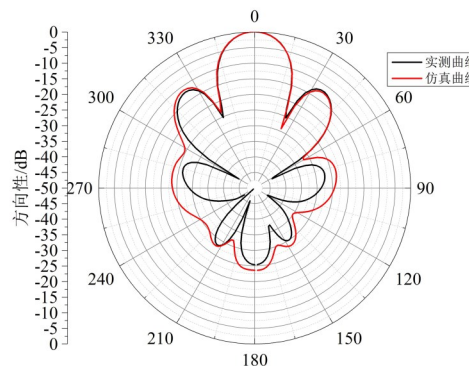


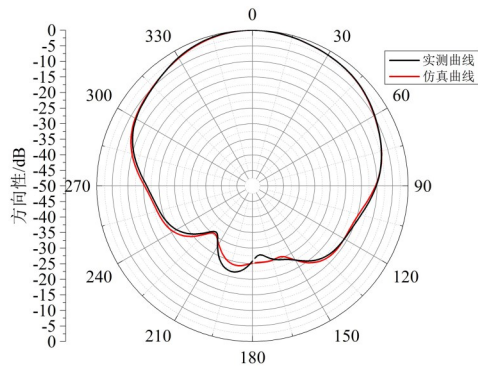
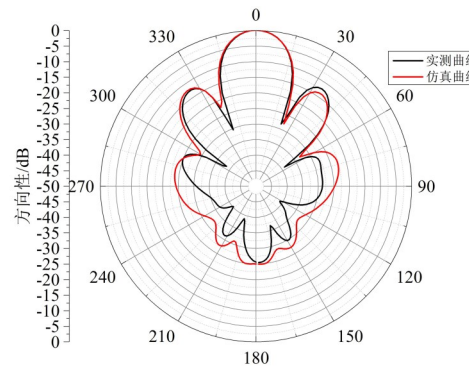
图 10 微同轴天线单元并馈组阵反射系数测试曲线图



(a) 90 GHz E面(左)、H面(右)方向图



(b) 94 GHz E面(左)、H面(右)方向图



(c) 98 GHz E面(左)、H面(右)方向图

图 11 微同轴天线单元并馈组阵E面、H面方向图仿真与实测结果示意图

同时,以标准喇叭天线的增益作为参考值,实际测量微同轴天线单元和微同轴阵列天线的增益,并分别和各自的仿真结果作对比,结果如图 12 所示.

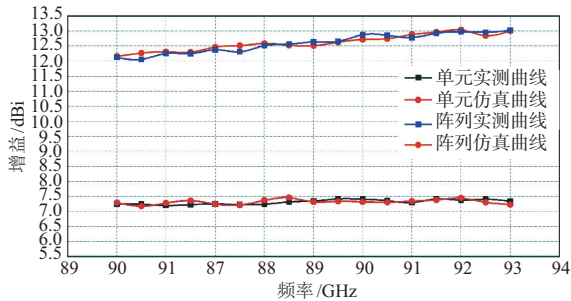


图 12 微同轴天线单元及阵列天线增益

由图 12 可知,在工作频带内,该微同轴天线单元增益满足大于 7 dBi 的性能指标,增益平坦度为 0.22 dB,一致性较好.与此同时,微同轴阵列天线增益超过 12 dBi,增益平坦度为 0.85 dB,但随着频率提高会有上下浮动,分析其原因可能是经过天线单元并馈组阵后,每个天线单元之间的互耦效应导致耦合能量的矢量和会在特定频率产生反射,反映在增益上就会有随频率变化的波动,但测试曲线的走线趋势基本与仿真曲线相吻合,平坦度指标也达到了设计要求.

利用式(3)近似估算天线的方向性  $D$ .

$$D \approx \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\theta_{HP}^{\circ}\phi_{HP}^{\circ}} \quad (3)$$

其中  $\theta_{HP}^{\circ}$  和  $\phi_{HP}^{\circ}$  分别是 E 面和 H 面的 3 dB 波束宽度.

天线效率可以利用式(4)计算得到.

$$\eta = \frac{G}{D} \quad (4)$$

其中  $G$  是天线增益.

表 4 列举了在上述三个频点端射处的反射系数、增益、E 面和 H 面的 3 dB 波束宽度,以及天线效率的仿真实测结果对照情况.

表 4 微同轴阵列天线反射系数、增益、3 dB 波束宽度 vs 频率的仿真实测对照

频率		90 GHz	94 GHz	98 GHz
反射系数	仿真	-11.52 dB	-17.83 dB	-14.97 dB
	实测	-11.90 dB	-14.93 dB	-14.91 dB
增益	仿真	12.16 dBi	12.52 dBi	13.01 dBi
	实测	12.13 dBi	12.64 dBi	13.03 dBi
3 dB 波束宽度 (E 面)	仿真	25.2°	24.7°	22.3°
	实测	24.6°	23.8°	21.8°
3 dB 波束宽度 (H 面)	仿真	94.7°	88.4°	83.5°
	实测	94.2°	88.1°	83.6°
天线效率	仿真	96.1%	95.5%	91.2%
	实测	93.3%	94.3%	89.0%

由表 4 可知,该结构的反射系数、波束宽度和天线效率实测值和仿真结果基本相符.该并馈组阵天线表现出了很好的辐射特性,并且在 8 GHz 的范围内,基本实现了不受频率影响的辐射分布,天线效率基本维持在 90% 以上,充分体现了微同轴天线结构的超低损耗,与仿真结果高度一致.这个结果进一步表明,该 3 mm 微同轴天线在满足高增益宽带辐射特性的同时,大大减小了天线的尺寸和剖面高度,这与同频段工作下的其他类型天线相比是一个显著的优势.

## 5 结论

本文设计的 W 波段空气填充微同轴天线单元增益大于 7 dBi,阵列天线增益大于 12 dBi,后者的 E 面方向图 3 dB 波束角超过了 20°,天线辐射效率达到 90%,并且微同轴天线的晶圆级加工发挥了小型化的优势,使得其与相同波段工作的波导天线相比,体积最大可降至 1/100.传统 3 mm 介质谐振器天线、MEMS 天线等虽然可以满足本身具有小型化的优势,但其在减少损耗方面对介质的参数要求较大.基于铜基 3D 微同轴的毫米波天线单元及其阵列天线具备很好的圆片级加工特点,可以不受介质类型的限制,能进一步实现该频段的有源相控阵天线,并且其性能可以满足未来在 5G 毫米波通信中的应用,发挥其小型化、低损耗的显著优势.未来射频微系统是矩形微同轴器件发展的必然趋势,它将对传统射频电路的设计、制造实现及系统集成方式产生巨大影响.随着研究深入,3D 微同轴天线结构的潜力也将在太赫兹频段的应用中展现出广阔前景.

## 参考文献

- [1] MRUK J R, FILIPOVIC D S. Micro-coaxial V-/W-band filters and contiguous duplexers[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2012, 6(10): 1142-1148.
- [2] FILIPOVIC D S, et al. Modeling, design, fabrication, and performance of rectangular m-coaxial lines and components[J]. IEEE MTT-S, 2006, 2(5): 1393-1396.
- [3] MRUK J R, SAITO Y, KIM K, RADWAY M, FILIPOVIC D S. Directly fed millimeter-wave two-arm spiral antenna[J]. IET Electron Lett, 2010, 46(24): 1585-1587.
- [4] REID J R, MARSH E D, WEBSTER R T. Micromachined rectangular coaxial transmission lines[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2006, 54(8): 3433-3442.
- [5] ZHANG X, WU W, HUANG J, ZHANG W. Dual-polarized frequency-selective rasorber with two transmission bands[J]. IEEE Access, 2019, 99: 1-1.
- [6] LLAMAS-GARRO I, LANCASTER M J, HALL P S. Air-filled square coaxial transmission line and its use in micro-

- wave filters[J]. IEE Proc-Microw Antennas Propag, 2005, 152(3): 12-14.
- [7] MOZNEBI A R, ARSANJANI A, AFROOZ K, et al. Low-loss and broadband coaxial line to air-filled substrate integrated waveguide transition[J]. Reviews of modern physics, 2009, 81(2): 109-162.
- [8] PARMENT F, GHIOTTO A, VUONG T P, et al. Millimeter-wave air-filled substrate integrated waveguide slot array antenna[J]. Electron Lett, 2017, 53(11): 704-706.
- [9] DESLANDES D, WU K. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form[J]. Microw Wirel Compon Lett, 2001, 11(2): 68-70.
- [10] PARMENT F, GHIOTTO A, VUONG T P, et al. Air-filled substrate integrated waveguide for low-loss and high power-handling millimeterwave substrate integrated circuits[J]. Trans Microw Theory Tech, 2015, 63(4): 1228-1238.
- [11] PARMENT F, GHIOTTO A, VUONG T P, et al. Double dielectric slab-loaded air-filled SIW phase shifters for high-performance millimeter-wave integration[J]. Trans Microw Theory Tech, 2016, 64(9): 2833-2842.
- [12] MARTIN T, GHIOTTO A, et al. Broadband air-filled SIW to waveguide transition for interconnect, instrumentation and measurement applications[J]. IEEE Int Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes, 2017, 4(3): 1-3.
- [13] LIMA I S, PARMENT F, GHIOTTO A, et al. Broadband dielectric-to-half-mode air-filled substrate integrated waveguide transition[J]. Microw Wirel Compon Lett, 2016, 26(6): 383-385.

#### 作者简介



**刘博源** 男,1991年生于河北石家庄. 现为国防科技大学电子科学学院博士研究生. 主要研究方向为微波毫米波器件和复合电磁材料.  
E-mail: liuboyuan@nudt.edu.cn



**江云(通讯作者)** 男,1990年生于湖南邵阳. 现为国防科技大学电子科学学院博士研究生. 主要研究方向为毫米波无源器件.  
E-mail: 867581306@qq.com



**黄昭宇** 男,1992年生于河北石家庄. 现为国防科技大学电子科学学院博士研究生. 主要研究方向为相控阵紧耦合天线、毫米波器件与系统.

E-mail: huangzhaoyu10@163.com