

太赫兹多层平面透镜天线的分层制造技术研究



刘振浩¹, 邹小舟², 缪卓伟³, 胡孝昀¹, 曾永彬¹

1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016

2. 中航工业南京伺服控制系统有限公司, 江苏 南京 210032

3. 东南大学, 江苏 南京 210096

摘要: 现代信息科技的飞速发展对雷达系统提出了更高的要求,太赫兹(THz)雷达凭借其特殊的电磁特性在航空航天军事应用方面有着广阔的应用前景。高增益天线作为雷达系统的关键组成部分,在太赫兹波段的研究正受到高度关注。当天线工作频段高达1.0THz左右时,适用于低频器件的常规加工方法往往难以满足设计需求,限制了其进一步应用。本文提出并设计了一种基于UV-LIGA工艺的太赫兹多层平面透镜天线的分层制造方法,为提高透镜区域厚度均匀性,在外缘添加了片内辅助阴极作为装配区,经验证,厚度均匀性提高了33.08%。开展阶梯式电流密度电铸试验,当电流密度按1.5A/dm²、2A/dm²、1.75A/dm²阶梯变化时得到的沉积层具有更低的结合强度和表面粗糙度。透镜天线经过电性能测试,其在0.79~1.03THz范围内取得了良好的增益效果,有望应用于航空航天机载平台以提高雷达系统的识别能力。

关键词: UV-LIGA; 透镜天线; 太赫兹雷达; 分层制造; 微电铸

中图分类号: TN802

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.01.013

雷达作为现代防空系统的“眼睛”,通过截获辐射源发出的电磁信号来锁定目标的位置,广泛应用于空中侦察、制导识别等领域,是现代电磁探测的重要组成部分。军事技术的快速发展对雷达系统的感知能力、反导反隐身能力、保密能力等都提出了新的要求^[1]。太赫兹(THz)波具有的大带宽、抗干扰、强穿透等电磁特性使其在军事应用上具有广阔的潜力,太赫兹雷达与微波毫米波雷达相比具有更高的探测精度和方向性,对烟尘等有着良好的穿透能力,并对采用外形设计或涂覆吸波材料的目标均具有良好的反隐身能力^[2-3]。目前军事技术正朝着“空天地海”一体化全方位发展,电磁波谱中的各段将在信息系统中发挥互补的作用,作为未被完全开发的电磁频段,THz技术的研究与应用具有深远意义。

太赫兹雷达系统起初常用于探测飞机、航母等大尺寸目标的缩比模型,将测得的数据反推作为微波毫米波雷达的测试结果,从而克服其直接测试时场地或设备的限制^[4]。随着科学的发展,国内外学者基于逆合成孔径雷达(ISAR)

成像、合成孔径雷达(SAR)成像、阵列成像、孔径编码成像等方式研制了一批太赫兹雷达成像系统^[5],验证了太赫兹雷达的成像潜力。太赫兹雷达面临的主要问题是发射机低功率输出和接收机低灵敏识别,目前的研究方向主要朝着开发高功率的太赫兹源、研究合适的调制方法和优化传输与探测能力等^[6]。

搭载高增益天线是一种提高太赫兹信号传输能力的解决方案,常见的太赫兹高增益天线种类主要包括喇叭天线、透镜天线、阵列天线等^[7],透镜天线通过在发射前端对信号进行初步相位调控来提升系统的波束扫描性能和传输增益^[8],太赫兹多层平面透镜天线结合了传统透镜天线、平面阵列天线两者的优势,克服了传统透镜天线结构复杂、体积庞大的缺陷,是一种满足机载平台系统的小型化、低功耗要求的方案^[9],与单层天线相比,天线层数的增加可以获得更广的透射相位补偿范围,在雷达探测中具有更好的表现^[10]。

收稿日期: 2023-07-06; 退修日期: 2023-10-11; 录用日期: 2023-11-10

基金项目: 航空科学基金(201907052002)

引用格式: Liu Zhenhao, Zou Xiaozhou, Miao Zhuowei, et al. Research on layered manufacturing technology of terahertz multilayer planar transmit-array antenna[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(01): 115-124. 刘振浩, 邹小舟, 缪卓伟, 等. 太赫兹多层平面透镜天线的分层制造技术研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(01): 115-124.

太赫兹波所对应的波长为0.03~3mm,对应于该尺度的加工属于微细制造的范畴,在此范围外的微波与红外光电元件制造已有着诸如印刷电路板(PCB)技术、半导体光刻技术等相对成熟的工艺方法,而对于太赫兹器件,目前暂无明确体系的制造工艺。目前针对平面透镜天线的研制大多集中在微波毫米波或者太赫兹低段,围绕平面天线的加工方法,国内外学者从加工微波、红外光学元件的经验入手进行了诸多研究^[1],其中最常见的是3D打印技术。Wu Gengbo等^[12]通过优化打印部分的支撑结构,选择高温树脂($\epsilon_r=2.66$)作为材料,打印出中心频率为0.3THz的非涅耳透镜天线。基于低温共烧陶瓷(LTCC)技术,Xu Junfeng等^[13]将三层金属层与多层基板烧结层压加工出中心频率为0.27THz的透镜天线。在更高的频段下,G. O. David等^[14]通过深反应离子刻蚀(DRIE)技术在硅基上刻蚀出直径36 μm 高度变化的微柱,并在其表面镀2 μm 金层制造出0.3THz的超表面天线。Liu Guang等^[15]利用紫外光刻技术加工出中心频率为0.34THz的4层整体透镜天线,其周期长度为0.5mm。Han Zhengli等^[16]在活性树脂苯并环丁烯(BCB)柔性薄膜上光刻出双层菲涅尔波带片(FZP)透镜用于太赫兹成像系统。随着设计频率的不断提升,传统制造技术和设计方法加工的器件损耗大、效率低,在更高频段下加工难度上升甚至无法加工,因此需要从材料、工艺、设计等多个方面开展创新研究。

本文根据所设计的太赫兹多层平面透镜天线的结构特点提出了一种相对简单的制造方法。基于分层制造的思想将天线整体在纵向上划分为透镜层、垫片层两组共9层的薄片结构,以UV-LIGA技术制造全金属天线,在保证各层尺寸精度的同时,提升了产品良率。借助物理场仿真对阴极极目标结构以及工艺参数等进行了设计研究,采用空气馈电的多层天线结构省去了传统多层实体制造路线中的热压黏合,简化了工艺路线。先分层制备后整体装配的工艺路线显著提高了加工过程的成功率。

1 整体设计与工艺路线

1.1 周期单元结构设计

太赫兹多层平面透镜天线由64 \times 64个周期阵元组成,各阵元在纵向上又可划分为9层微结构,如图1所示,选用电铸铜作为天线金属材料。需要注意的是,其中奇数金属透镜层中各阵元矩形块的宽度 b 并不固定,而是随距中心距离的改变而不断变化,图1(b)给出了整个透镜天线的完整结构,天线单周期的关键尺寸见表1。

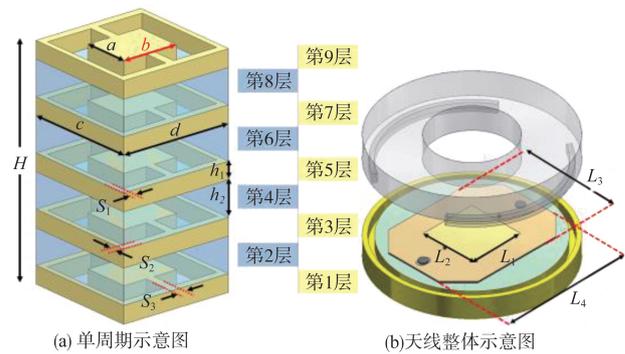


图1 太赫兹平面透镜天线结构示意图

Fig.1 Schematic of THz planar transmit-array antenna

表1 周期单元关键尺寸参数

Table 1 Geometric parameters of periodic units

几何参数	设计尺寸/ μm	几何参数	设计尺寸/ μm
a	85	h_1	30
b	27.1~106.9	h_2	60
c	190	H	390
d	190	L_1	1215
S_1	5	L_2	1214.5
S_2	7.5	L_3	2300
S_3	15	L_4	3000

1.2 分层制造的优势

偶数垫片层分隔相邻两片透镜层,中空结构作为空气间隙,由去除透镜区的加厚透镜层获得,为保证透镜区域电铸时的厚度均匀性以及方便后续装配,以图2的形式在透镜区周围增设一圈装配区。

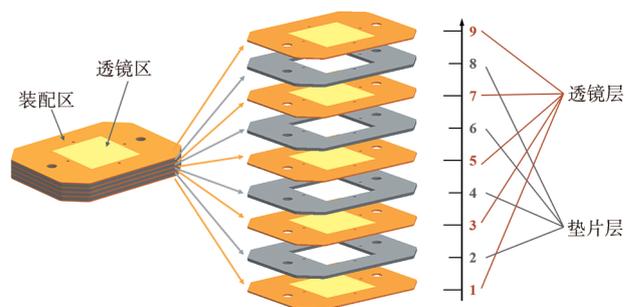


图2 分层结构示意图

Fig.2 Schematic of layered structure

各透镜层间通过空气进行馈电,没有密封性要求,可进行分层装配。由于省去了多层套刻时,如平坦化、导电化、刻蚀等步骤,整体制造的难度降低。以基片上放置9处结构为例,不同工艺下总体结构的制备成功率 Q 可由式(1)、式(2)计算

$$Q_1 = 1 - (1 - p_1^5 p_2^4)^9 \quad (1)$$

$$Q_2 = 1 - \left[\sum_{i=0}^4 p_1^i \cdot (1 - p_1)^{(9-i)} \right] \quad (2)$$

式中, Q_1 和 Q_2 分别为整体制备和分层制备的成功率; p_1 为透镜层制备成功率; p_2 为垫片层制备成功率。

图3所示为整体制造与分层制造的成功率对比,从图3可以看出,分层制备时由于有缺陷的透镜层可用作垫片层,因此有着更高的总体成功率,而整体制备时某一层出现的缺陷无法弥补,造成前步过程浪费。

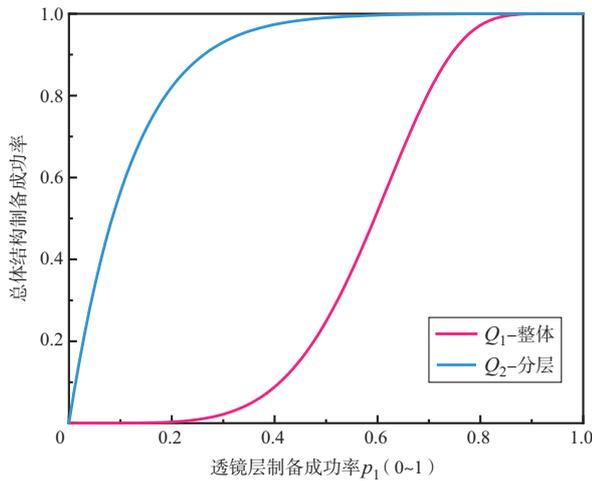


图3 整体制造与分层制造成功率对比

Fig.3 Comparison of success rates between overall preparation and layered preparation

1.3 工艺总体流程

图4是太赫兹多层平面透镜天线的制造工艺方案图,具体步骤为:(1)对SU-8胶曝光得到与透镜图案相反的凹模;(2)采用微电铸工艺在凹模内部电铸30 μm 铜;(3)选取质量较好的5片作为透镜层,进行去胶、脱模、防氧化等处理;(4)将其余4片延长电铸至60 μm ,去除中心透镜区得到垫片层;(5)将5片透镜层与4片垫片层依次装配后装夹固定。

UV-LIGA技术可制作任意二维截面形状的图形结构,尤其在金属MEMS加工方面有着广泛应用^[17]。产品尺寸由光刻过程保证,加工精度高;使用SU-8系列作为光敏材料,可制造较高深宽比的结构。本文采用的方法大幅降低了制造难度,加工一次即可在基底上形成所需的透镜结构,符合大批量生产的要求,制造成本相对较低。

2 工艺优化

2.1 透镜区厚度均匀性优化

在金属微电铸工艺中,阴极表面电沉积厚度 D 可以表

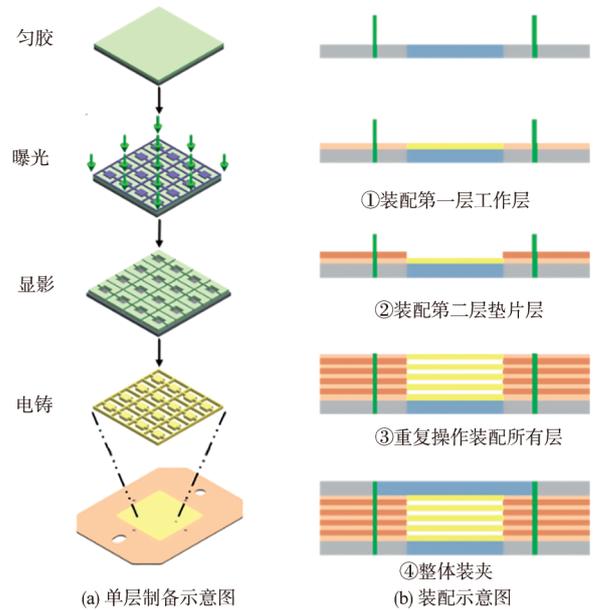


图4 UV-LIGA工艺方案图

Fig.4 Schematic diagram of the UV-LIGA sequence

示为

$$D = \frac{M}{z\rho F} Jt \quad (3)$$

式中, M 为金属的摩尔质量; z 为得失电子数; ρ 为金属密度; F 为法拉第常数(96485C/mol); 这些在单一金属电铸下均为常量。在相同电铸时间 t 下,影响铸层厚度 D 的主要参数为电流密度 J 。事实上在阴极表面电流密度的分布和电荷利用效率十分不规则,将会导致其在不同位置具有不同的厚度。对于精确设计的各个周期单元,阵面上过大的厚度极差势必导致透镜性能下降。

目前,提升厚度均匀性的方式主要包括增设绝缘挡板、添加辅助阴极改善电流分布情况;采用正反脉冲电铸、使用添加剂改善镀液分散能力等。本文结合后续装配方式,选择将阴极区调整为图2(a)所示的结构,在透镜区外缘增设装配区作为片内辅助阴极,来提高透镜区的厚度均匀性。

使用COMSOL Multiphysics有限元软件中的二次电流分布模块来模拟微米(μm)尺度的电沉积过程。构建的几何模型如图5所示,为简化计算进行整体缩放,分别删去X、Y方向上的偶数行、列对应的单元,保留其图形特征得到32 \times 32的简化模型,除阴阳极表面外均作绝缘处理,阴阳极表面主要的电极反应是铜的溶解与沉积,其反应式为



局部交换电流密度可根据 Butler-Volmer 公式进行计算

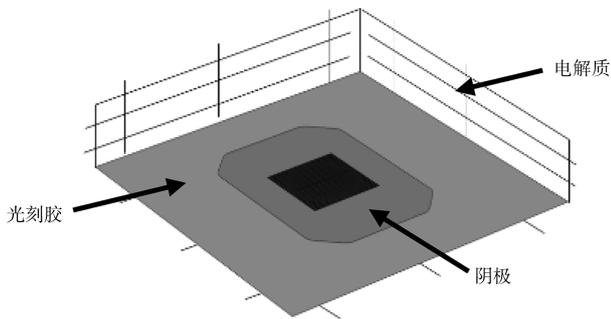


图5 电铸区域几何模型

Fig.5 Model geometry of electroforming area

$$i_{loc,Cu} = i_{0,Cu} \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta_{Cu}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c F \eta_{Cu}}{RT}\right) \right] \quad (5)$$

式中, $i_{loc,Cu}$ 为交换电流密度; α_a 、 α_c 分别为阳极、阴极传递系数; η_{Cu} 为过电位。将阴极表面平均电流密度 i_{avg} 设置为 $1A/dm^2$ 。图6所示是有无装配区时透镜表面厚度分布情况, 分别对对角线位置进行取点测量, 仿真结果和试验均表明此方式提高了整体厚度均匀性。

当阴极表面只存在透镜区时, 铸层轮廓呈现出四周高中心低的分布特点。这是由于电流在靠近边缘处时变得更加集中, 即所谓的边缘效应, 呈现出马鞍形的厚度分布。而在添加装配区作为阴极表面后, 电流此时集中在装配区的外缘, 使得透镜区处于低电流密度状态, 电流分布更加均匀, 仅在透镜中心处发生轻微聚集。定义厚度不均匀系数 σ 如式(6)所示

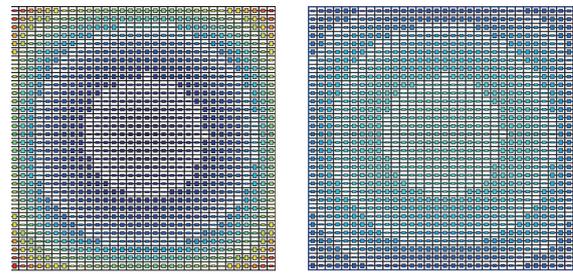
$$\sigma = \frac{\delta_a - \delta_b}{\delta_a + \delta_b} \quad (6)$$

式中, δ_a 、 δ_b 分别为透镜区内最大、最小厚度。可以注意到, 通过添加装配区, σ 由 40.84% 降低到 7.76%, 有效提高了透镜区内的厚度均匀分布。

2.2 SU-8紫外光刻

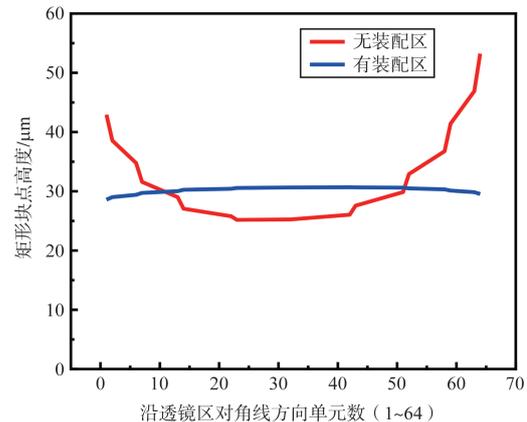
SU-8 2015 是一种负性光刻胶, 显影后基板上留下与掩膜版(Mask)图案相反的胶模, 其常用于制作厚度为 13~35 μm 的微结构, 光刻工艺的一般过程主要有基板预处理、匀胶、前烘、曝光、后烘、显影、检查等操作。

2015 型光刻胶运动黏度约为 1250 mm^2/s , 在常温下有着较好的流动性, 但由于储存温度一般较低, 每次使用时应提前在 30 $^{\circ}C$ 热板上预热 5min 左右。胶膜的厚度通过设定不同的匀胶转速来获得。将 4mL 左右的液态胶滴至基板中央后进行旋涂, 在 800 r/min 低转速下旋涂 10s, 随后增加转速至 1100 r/min 高速旋转 30s。旋涂结束后的胶膜需要静置在水平桌面上进行自平整过程来降低整个胶膜表面的高度差。



(a) 无装配区

(b) 有装配区



(c) 试验测量沿透镜区对角线位置厚度结果

图6 有无装配区时透镜区域厚度分布情况

Fig.6 Thickness distribution of lens area when the assembly area is added or not

首先将甩好的胶放入烘箱并在 65 $^{\circ}C$ 保持 90s, 随后升温至 95 $^{\circ}C$ 保持 15min, 此过程可以提高胶与基板间的结合力, 降低线宽误差并修复甩胶后胶膜表面出现的微小气孔等缺陷; 试验所用的曝光设备为 SUSS MJB4, 其曝光时的辐射照度为 20 mW/cm^2 , 采用接触式曝光, 时间为 7s; 曝光后光刻胶内部产生的光酸要在后烘阶段发生交联反应, 所采用的后烘条件为 65 $^{\circ}C$ 保持 90s, 95 $^{\circ}C$ 保持 9min; 将基板浸泡在显影液中 5min 显影去除未固化的光刻胶, 此过程可以配合异丙醇(IPA) 来判断显影进程; 最后洗掉残留的白色杂质并静待胶模自然风干。图7是采用上述参数制备的胶模。

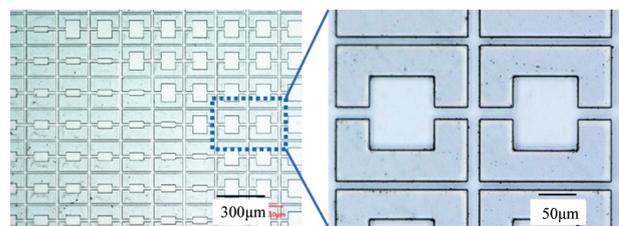


图7 形貌尺寸良好的胶模

Fig.7 Film with good morphology and size

2.3 阶梯式微电铸参数优化

与经典 Lift-off 工艺不同, 本文采用抛光过后的不锈钢作为基底, 通过选取合适的电铸工艺将铸层金属与基底之间的结合强度控制在合适范围内, 既能满足基本的电沉积要求, 又能保证后续脱模时图案的完整度。省去了牺牲层的打底过程, 从而使工艺流程得以简化。

本文采用的电铸液是由 70g/L 的 H_2SO_4 以及 200g/L 的 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 组成的微观整平能力更好的高铜低酸溶液, 添加适量 Cl^- 降低铸层内应力, 电铸电源采用可编码直流电源。通过前期基础试验发现, 微流道内部铜离子的电沉积过程可以大致划分为充电预镀期、加速沉积期以及填平末期三个阶段。

第一阶段主要影响铸层金属与基底间的结合强度以及接触面形貌。由金属电结晶理论可知^[18], 新生态吸附原子在电流密度较小的情况下形成晶体时, 由于结晶过程的速度受吸附原子的表面扩散步骤控制, 成核速度小于生长速度, 使得更多数的吸附原子并入晶格内部的低能量点, 此时铸层与基底的结合强度相对较高。就本工艺方法而言, 过高的结合强度是不被期望的。

合适的电铸条件可以精确复制基底表面形貌, 以不同电流密度进行预镀, 从图 8 所示的接触面形貌可以看出: 过低的电流密度达不到沉积所需的过电位而产生漏镀, 过高的电流密度会使底面烧焦, 并且在铸层外侧边缘电流集中处由于结合强度过低而出现飞边翘曲。因此, 综合考虑选取初始电流密度为 $1.5A/dm^2$ 。

图 9 给出了阴极表面电沉积时外部电位随时间的变化。开始通电后, 阴极电位负移, 短时间内电子用于阴极表面的充电, 此时并未出现金属铜的沉积; 随后电位开始回正, 发生离子还原反应, 伴随晶核长大开始出现一层薄铜; 当阴极表面完全被新沉积的铜覆盖之后, 外部电位开始趋于稳定。可以看出, 随电流密度升高, 达到稳定所需的时间缩短, 在 $1.5A/dm^2$ 的电流密度下大约 3~5min 后电压趋于稳定, 也意味着此时第一阶段结束。

第二阶段提高电流密度填充胶模内部大部分区域, 此阶段主要影响铸层外侧表面粗糙度。根据化学热力学原理, 电结晶过程中形核速度 ω 与阴极过电位的关系可由式(7)表示

$$\omega = K \exp\left(-\frac{\pi h \sigma_1^2 L A}{\rho n F R T \eta_c}\right) \quad (7)$$

式中, K 为指前因子; h 为原子高度; σ_1 为界面张力; L 为阿伏伽德罗常数; A 为金属原子量; ρ 为金属密度; n 为金属离子的价数; F 为法拉第常数; R 为气体常数; T 为热力学温度; η_c

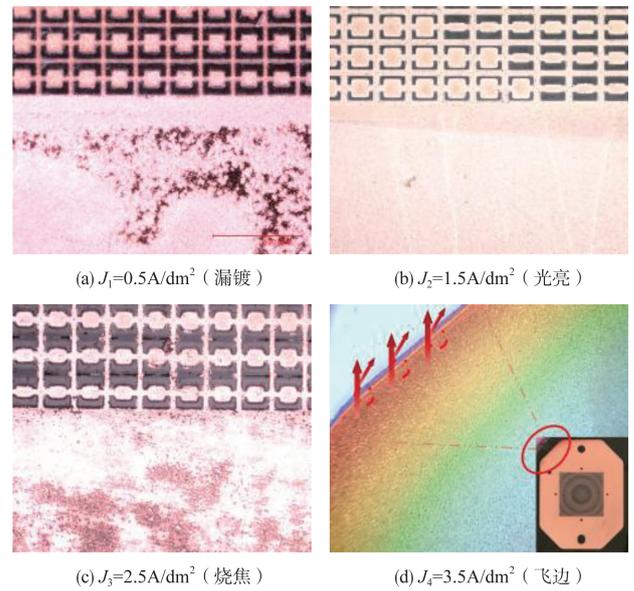


图 8 第一阶段不同电流对应的表面形貌

Fig.8 Electroforming appearance under different current density in the first stage

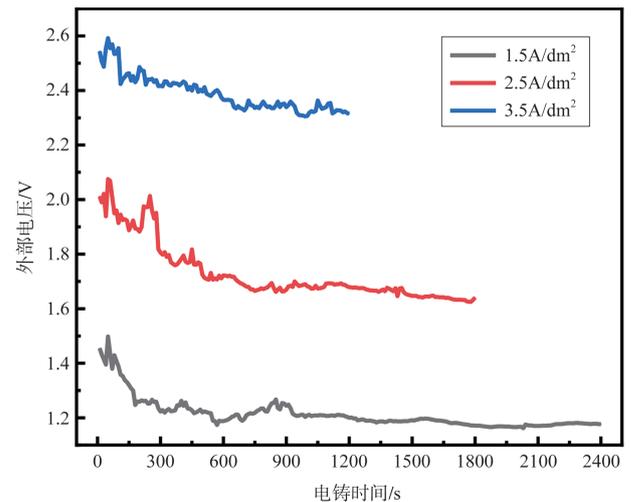


图 9 不同电流密度下外部电压随时间变化曲线

Fig.9 External voltage variation curve under different current densities

为阴极过电位。其中主要影响因素是界面张力和阴极过电位, 在预镀之后增大电流密度可以提高阴极过电位, 促进晶核的形成, 获得细致的晶层。

为此开展单因素试验进行验证, 在第二阶段施以不同大小的电流密度, 使用 KEYENCE VHX-6000 测得的表面粗糙度如图 10 所示。随着阴极电流密度的增加, 铸层表面的线粗糙度 Ra 先减小后增大, 以 $2A/dm^2$ 最为理想。而随着电流密度进一步增大, 阴极表面铜离子的扩散速度小于电化学反应进行

的速度,剩余电子与氢离子结合发生析氢反应,此时获得的铸层形貌粗糙有条纹,且电流过高处容易出现烧焦。

第二阶段结束后,光刻胶之间大部分区域已被填满,当胶模最大深宽比小于1时,对流传质作用明显,浓差极化作用减弱。对此时的铸层进行二次电流密度仿真,选取图11中A—A'位置进行测量,比较不同电流密度下生长面沉积速度的差异。由于电流密度集中在局部矩形块的边缘位置,测得A—A'方向上的厚度呈现出四周高中间低的“马鞍形”分布。仿真对比了不同大小的电流密度对此分布的影响程度,结果表明,随着电流密度的增加,此差异导致的厚度极差愈加明显。低电流密度虽然同样会导致厚度不均,但此时内部沉积速度差相对于高电流而言得到减弱。

因此,第三阶段选择降低电流密度,其目的是减小“边缘效应”的影响,使高电荷区的沉积速率相对减缓,对各个小周期而言,可以降低局部厚度极差。

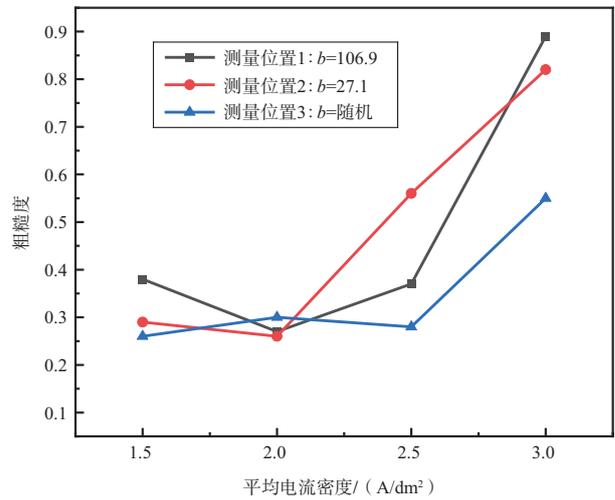
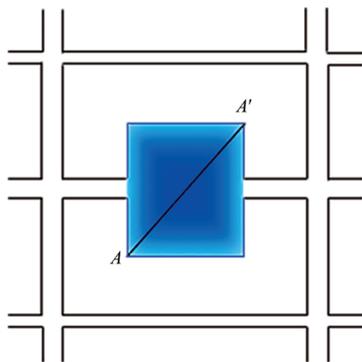
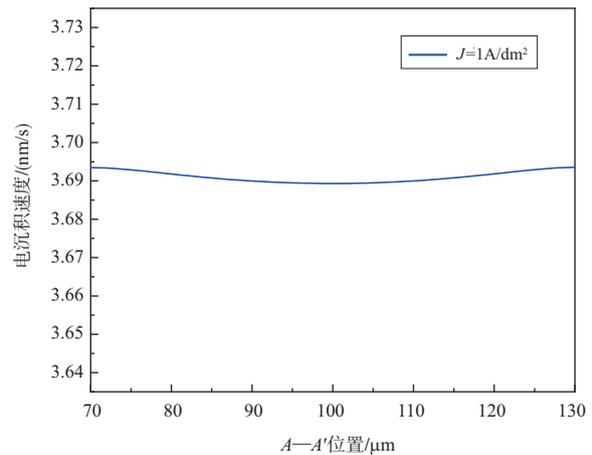


图10 第二阶段不同电流密度对应的线粗糙度

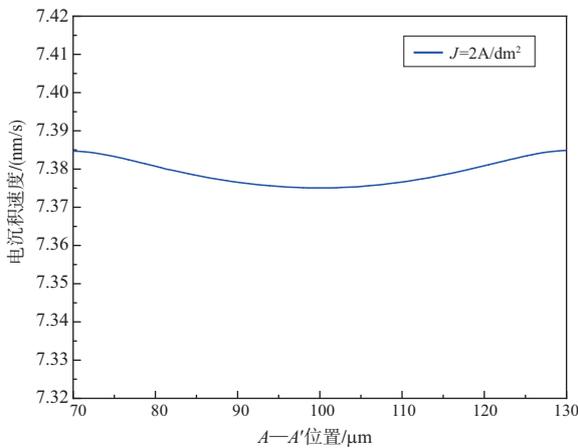
Fig.10 Line roughness under different current densities in the second stage



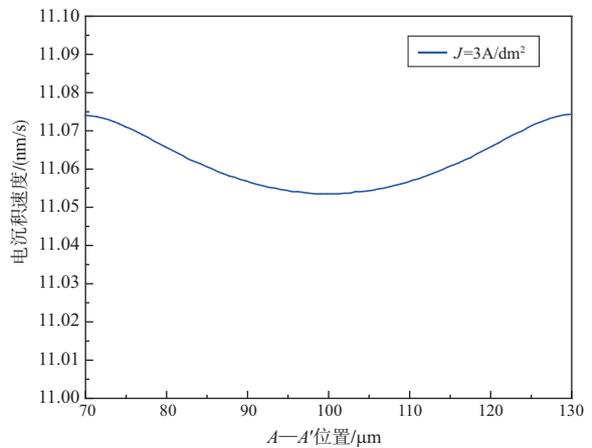
(a) 测量位置示意图



(b) J=1A/dm²时的沉积速差



(c) J=2A/dm²时的沉积速差



(d) J=3A/dm²时的沉积速差

图11 第三阶段A—A'截面沉积速度差异

Fig.11 Difference in electroforming speed at A—A' in the third stage

通过测量单周期矩形块位置的面粗糙度 Ra 来表征局部厚度偏差,即轮廓表面与中心面的算术平均高度。结果如图 12 所示,降低电流密度至 $1.75\text{A}/\text{dm}^2$ 填充剩余高度至 $30\mu\text{m}$,完成透镜层的制备。

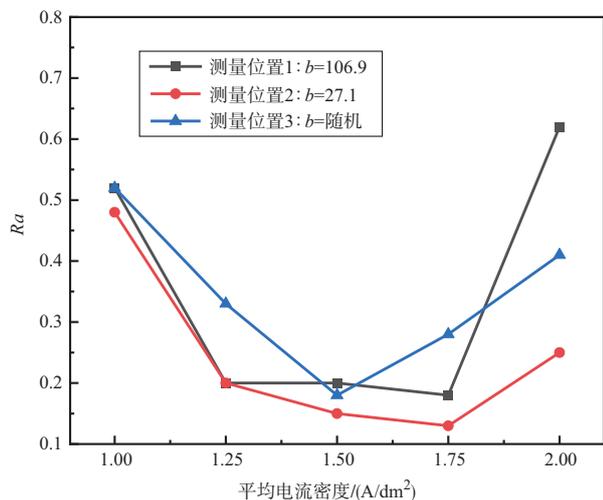


图 12 第三阶段不同电流密度对应的面粗糙度

Fig.12 Surface roughness under different current densities in the third stage

采用上述工艺获得了如图 13 所示的单层天线结构,使用工具显微镜测量尺寸误差,结果表明,其线宽误差控制在 $1\mu\text{m}$ 以内,内外表面粗糙度分别在 Ra 0.15、 Ra 0.3 以下。SEM 图像显示小周期结构经过化学去胶后没有残余胶块。从基板上剥离下的金属保存完整,证明其具有一定的机械强度,跨尺度连接处没有发生断裂现象。

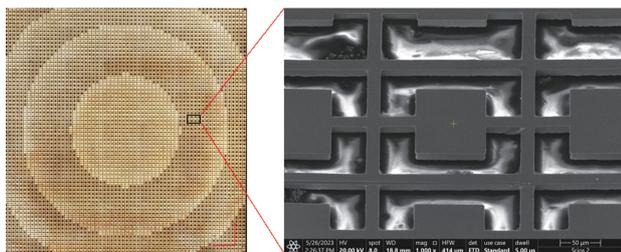


图 13 平面透镜天线单层实体结构

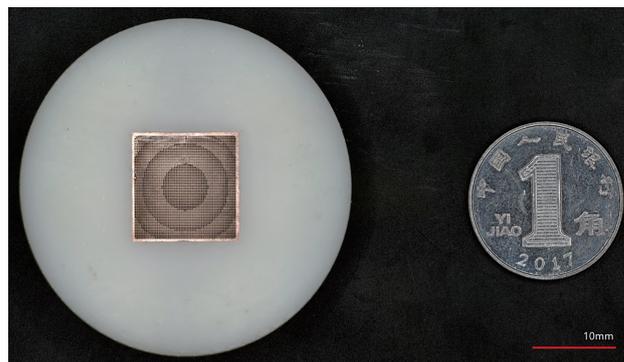
Fig.13 Photograph of single layer antenna

3 测试结果

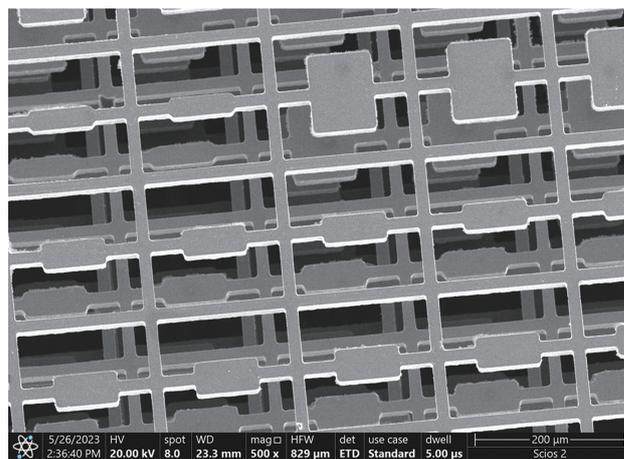
3.1 天线多层组装

按图 4(b) 的方式依次装配透镜层和垫片层,其中各层的定位孔是随前述工艺而制备的,其尺寸精度可由光刻步骤保证。工件各方向的自由度由定位平面与定位销组合限制。设

计了装配整形一体式夹具应对金属片体自带的和装配过程导致的微小翘曲和层间距离变化,在两侧装配区平面施以轴向预紧力,提升轴向装配精度,装配后的实物如图 14 所示。



(a) 天线实物图



(b) 中心局部 SEM 图

图 14 装配后的多层平面透镜天线

Fig.14 Photograph of multilayer planar transmit-array antenna

装配后同轴度误差的存在会使信号部分损失,降低信号增益,随后对误差结果中 X、Y 方向的对准误差进行了仿真分析,表明此定位方式引入的误差影响在可接受范围之内。

3.2 电性能测试

如图 15 所示,该天线的电性能测试可在太赫兹远场暗室中进行。将待测天线置于电动转台中心位置并旋转转台,可以得到不同方向下的辐射方向测试结果。

测试结果的误差来源主要有:全波仿真无法重构加工表面的粗糙度;天线收发端的测试涉及馈源和金属阵面两部分,其间必然存在位移、偏转等误差;纯金属阵列涉及多层结构,在分层装配时无可避免地引入装配误差。

图 16 给出了此太赫兹多层平面透镜天线的 E 面、H 面方向图实测结果。在主瓣范围内,测试结果与仿真结果吻

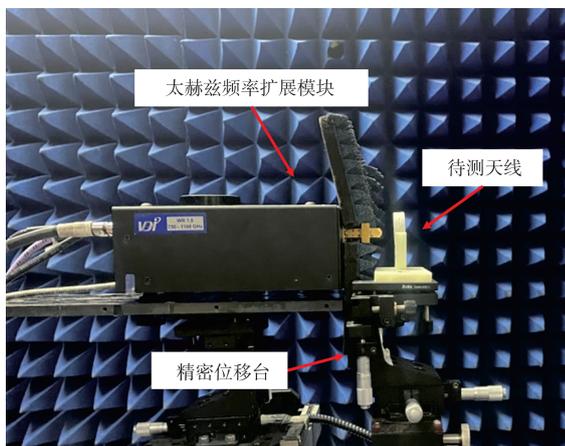
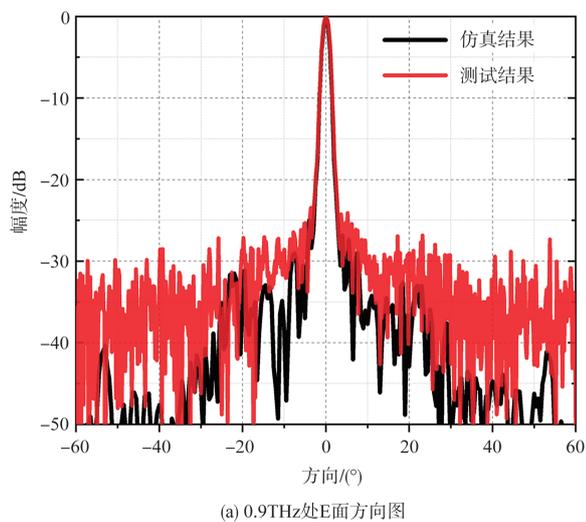
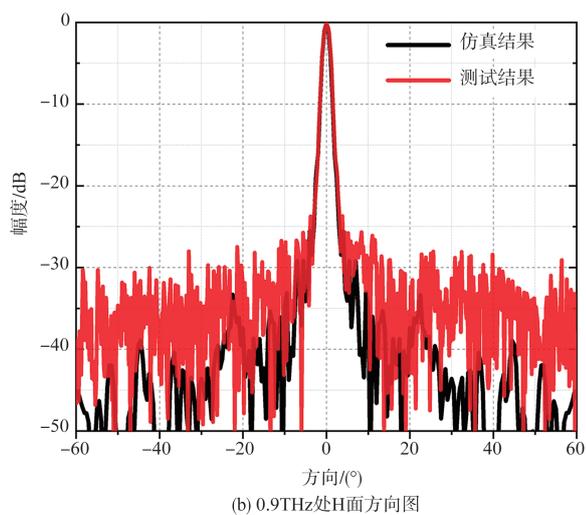


图15 透镜天线测试场景

Fig.15 Proposed TA under test



(a) 0.9THz处E面方向图



(b) 0.9THz处H面方向图

图16 透镜天线辐射特性图

Fig.16 Radiation patterns of the TA antenna

合较好。在0.9THz频点处,E面和H面的半功率波束宽度分别为 3.3° 与 3.4° ,3dB增益带宽为0.79~1.03THz,在0.91THz处测得的最大增益为36.47dBi。

分析电性能测试结果发现:所加工的太赫兹多层平面透镜天线在相关频带内取得了较好的增益效果与宽带辐射特性,有利于降低大气衰减提升太赫兹系统的接收距离,提高目标识别能力与成像分辨率。

4 结论

随着雷达系统频域的不断拓宽,太赫兹技术正逐步走入研究人员的视野,从航空航天工程应用的角度出发,太赫兹雷达需要新的技术突破与创新应用,加载高增益天线是提高机载平台太赫兹信号传输能力的可行方案。本文提出了一种基于UV-LIGA技术的太赫兹多层平面透镜天线分层加工方法,优化后的区间配置在提高透镜区的厚度均匀性的同时简化了装配过程,发挥了分层制造的优势。试验研究过程中得出如下结论:

(1)在添加片内辅助阴极作为装配区的同时,吸收了透镜区边缘的电流,从而提高了透镜区厚度均匀性。

(2)对于微流道内部薄层电铸,深宽比随时间不断减小,电沉积中段应增大电流密度,适当增加阴极极化以细化晶粒,降低表面粗糙度;而沉积末期降低电流密度可以减缓厚度极差的增加。

(3)此类平面透镜天线对水平方向装配误差具有较高容忍度,优化定位方式提高装配对准精度可进一步提升传输增益。

AST

参考文献

- [1] 张博准,郭凯. 太赫兹技术在军事应用领域内的发展与潜力[J]. 航空兵器,2022,29(5):28-34.
Zhang Bohuai, Guo Kai. Development and potential of terahertz technology in military applications[J]. Aero Weaponry, 2022, 29(5): 28 -34. (in Chinese)
- [2] 王宏强,罗成高,邓彬,等. 太赫兹雷达前沿探测成像技术[J]. 遥测遥控,2021,42(4): 1-17.
Wang Hongqiang, Luo Chenggao, Deng Bin, et al. Advanced detecting and imaging technology for terahertz radar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 1-17. (in Chinese)
- [3] 徐国跃,钱淇,方罡,等. 多频段隐身材料的研究现状与进展[J]. 航空科学技术,2022,33(1):1-9.

- Xu Guoyue, Qian Qi, Fang Gang, et al. Research status and progress of multi-spectrum stealth materials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(1): 1-9. (in Chinese)
- [4] Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J, et al. A 1.56THz compact radar range for W-band imagery of scale-model tactical targets[J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2000, 4053: 615-622.
- [5] 王宏强, 邓彬, 秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. *雷达学报*, 2018, 7(1): 1-21.
- Wang Hongqiang, Deng Bin, Qin Yuliang. Review of terahertz radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 1-21. (in Chinese)
- [6] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. *中国基础科学*, 2006, 8(1): 7-12.
- Liu Shenggang. Recent development of terahertz science and technology[J]. *China Basic Science*, 2006, 8(1): 7-12. (in Chinese)
- [7] He Yejun, Chen Yaling, Zhang Long, et al. An overview of terahertz antennas[J]. *China Communications*, 2020, 17(7): 124-165.
- [8] 洪伟, 余超, 陈继新, 等. 毫米波与太赫兹技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(8): 1086-1107.
- Hong Wei, Yu Chao, Chen Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2016, 46(8): 1086-1107. (in Chinese)
- [9] 曹兰英, 董晔, 郭维娜. 机载火控雷达发展趋势探究[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(6): 1-8.
- Cao Lanying, Dong Ye, Guo Weina. Development trend analysis of airborne fire-control radars[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(6): 1-8. (in Chinese)
- [10] You Xiaohu, Wang Chengxiang, Huang Jie, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China: Information Sciences*, 2021, 64(1): 1-74.
- [11] 李玥萱, 张聘, 白龙. 3D打印电磁功能结构研究现状与挑战[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(8): 1-10.
- Li Yuexuan, Zhang Pin, Bai Long. Research status and challenges on the 3D printing electromagnetic functional structure[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(8): 1-10. (in Chinese)
- [12] Wu Gengbo, Zeng Yuansong, Chan Kafai, et al. 3D printed circularly polarized modified Fresnel lens operating at terahertz frequencies[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2019, 67(7): 4429-4437.
- [13] Xu Junfeng, Chen Zhining, Qing Xianming. 270GHz LTCC-integrated high gain cavity-backed Fresnel zone plate lens antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 1679-1687.
- [14] David G O, Cecile J K, Maria A D, et al. Design, fabrication and testing of a modulated metasurface antenna at 300GHz [C]. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2017.
- [15] Liu Guang, Wang Hongjian, Jiang Jingshan, et al. Terahertz substrateless transmitarray antenna design and microfabrication [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(9): 2096-2100.
- [16] Han Zhengli, Takida Y, Ohno S, et al. Terahertz Fresnel-zone-plate thin-film lens based on a high-transmittance double-layer metamaterial phase shifter[J]. *Optics express*, 2022, 30(11): 18730-18742.
- [17] Zhang Honggang, Zhang Nan, Michael G, et al. Advances in precision micro/nano-electroforming: A state-of-the-art review [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2020, 30(10): 103002.
- [18] 冯绍彬, 商士波, 包祥, 等. 电位活化现象与金属电沉积初始过程的研究[J]. *物理化学学报*, 2005, 21(5): 463-467.
- Feng Shaobin, Shang Shibo, Bao Xiang, et al. Study of potential activation phenomenon and initial process of the metal electrodeposition[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2005, 21(5): 463-467. (in Chinese)

Research on Layered Manufacturing Technology of Terahertz Multilayer Planar Transmit-array Antenna

Liu Zhenhao¹, Zou Xiaozhou², Miao Zhuowei³, Hu Xiaoyun¹, Zeng Yongbin^{1*}

1. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

2. *AVIC Nanjing Servo Control System Co., Ltd., Nanjing 210032, China*

3. *Southeast University, Nanjing 210096, China*

Abstract: The rapid development of modern information technology has put forward higher requirements for radar systems, and terahertz (THz) radar has broad prospects in aerospace military applications due to its special electromagnetic advantages. As a key component of radar systems, high-gain antennas are receiving high attention in the terahertz band. When the frequency band reaches about 1.0THz, conventional processing methods suitable for low frequency devices often fail to meet design requirements, which limits their further application. This paper proposes a layered manufacturing method for terahertz transmit-array antenna (TA) based on UV-LIGA technology. In order to improve the thickness uniformity of the transmission area and facilitate subsequent assembly, the in-chip auxiliary cathode was added as an assembly area on its outer edge. Experimental verification shows that its thickness uniformity has increased by 33.08%. During the step current density electroforming experiment, when the cathode current density is 1.5A/dm², 2A/dm², 1.75A/dm², the electroformed structure has moderate bonding strength and low surface roughness. Through the TA's wireless communication testing, the TA prototype achieves good gain in the range of 0.79THz and 1.03THz. It is expected to be applied to aerospace platforms to improve radar system recognition capabilities.

Key Words: UV-LIGA; transmit-array antenna; terahertz radar; layered manufacturing; micro-electroforming

Received: 2023-07-06; **Revised:** 2023-10-11; **Accepted:** 2023-11-10

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(201907052002)