

基于 3-D 打印技术的新型微波/毫米波无源波导器件

郭 诚^{1,2}, 李 津^{1*}, 尚小邦², Michael J. Lancaster², 徐 军¹, 何 熹^{1,2}, 高 杨², 翟欣雨³

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054;

2. University of Birmingham, Department of Electronic, Electrical and Systems Engineering,
Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, U. K. ;

3. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203)

摘要:综述了近年来基于多种 3-D 打印工艺的微波直至太赫兹频段无源波导器件的发展研究现状,并介绍了作者所在小组研制的多个基于立体光刻 3-D 打印工艺的滤波器(包括基于新型高 Q 值单模和双模球形腔体谐振器的 X 频段带通滤波器以及基于裂缝波导和紧凑片上结构的 W 频段带通滤波器).这些滤波器射频性能的测量与仿真结果吻合良好.与相同形状的铜制器件相比,采用非金属材料 3-D 打印器件的重量减轻了 80% 以上,并保持了优良的射频性能.

关键词:天线;带通滤波器;微波;毫米波;球形腔体谐振器;立体光刻;太赫兹;3-D 打印;波导

中图分类号: TN713, TN82 **文献标识码:** A

Novel microwave/millimeter-wave passive waveguide devices based on 3-D printing techniques

GUO Cheng^{1,2}, LI Jin^{1*}, SHANG Xiao-Bang², Michael J. Lancaster²,
XU Jun¹, HE Xi^{1,2}, GAO Yang², ZHAI Xin-Yu³

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. School of Electronic, Electrical and Systems Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, U. K. ;

3. Microsatellites Innovation Institute of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

Abstract: Recent advances on diversified 3-D printed passive waveguide devices operating from microwave to terahertz frequencies have been reviewed. Developed by the authors' group, several waveguide filters fabricated using a stereolithography (SLA)-based 3-D printing technique have been presented. They are two X -band bandpass filters based on novel high-quality-factor single-mode and dual-mode spherical cavity resonators, and two W -band bandpass filters based on a slotted rectangular waveguide and a compact on-plate structure. The presented filters demonstrate good agreement between the measured and simulated RF performances. Compared with their conventional counterparts made from copper, these SLA-printed devices exhibit a significant weight reduction over 80% due to the use of non-metallic printing materials, without any penalty of degrading their RF performances.

Key words: antenna, bandpass filter, microwave, millimeter-wave, spherical cavity resonator, stereolithography, terahertz, 3-D printing, waveguide

PACS: 84.30.Vn, 84.32.-y, 84.40.Az

收稿日期:2016-07-06,修回日期:2016-08-18

Received date: 2016-07-06, revised date: 2016-08-18

基金项目: U. K. Engineering and Physical Science Research Council (EPSRC) (EP/H029656/1); 国家留学基金 2014 年建设高水平大学公派研究生项目

Foundation items: U. K. Engineering and Physical Science Research Council (EPSRC) (EP/H029656/1); State Scholarship Fund under the 2014 China Scholarship Council Program for State-Supported Graduate Students Studying Abroad

作者简介 (Biography): 郭诚 (1990-), 男, 四川成都人, 博士, 主要研究领域为基于 3D 打印技术的微波无源器件以及基于肖特基二极管的太赫兹变频器件. 李津 (1988-), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要研究领域为 RF MEMS 滤波器工艺与可重构技术. 郭诚与李津为本文共同第一作者.

E-mail: spmguo@163.com, lijinshe@sina.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: lijinshe@sina.com

引言

现代先进无线电通信系统需要高性能多功能的微波/毫米波器件以适应复杂多变的电磁环境.在这些无线电通信系统尤其是射频前端收发系统中,传统的微波/毫米波无源波导器件具有射频损耗低和功率容量大等优势.与平面微波传输线(如微带线和共面波导)相比,这些空气填充的金属波导器件在要求低色散低射频损耗的应用中扮演着重要角色^[1].然而,射频功能复杂的波导器件往往具有复杂的3-D物理结构,当采用传统机械加工工艺(如计算机数控(Computerized Numerically Controlled, CNC)金属铣削和电火花加工)制造这些器件时,需要将一个结构整体拆分成多个部件进行加工,且难以实现形状特殊的3-D结构(如球面),这些因素必将导致器件的加工/装配误差大,加工成本高昂.特别地,对于工作在毫米波高频端(如W频段)的波导器件,传统机械加工工艺难以精确实现小的特征尺寸.此外,传统的全金属制波导器件重量大,冗余结构材料多,不利于在机载、舰载和航空航天等诸多应用中实现通信系统的小型化和轻型化.

一种比传统机械加工工艺具有更高尺寸精度的3-D结构制造工艺是基于硅和光刻胶厚膜的表面微加工技术^[2-9].该技术能够实现亚微米量级的加工精度,有利于加工很小的特征尺寸,因此可以广泛用于制作毫米波高频端直至亚毫米波频段的高性能波导器件,如基于硅工艺的WR-1.5波导与波导滤波器(工作频率500~750 GHz)^[2-3]和基于SU-8光刻胶厚膜工艺的63-GHz喇叭天线^[4]、W频段直至WR-1.5波导频段的波导与波导滤波器^[5-9].但相对而言微加工技术的成本高昂,流程复杂且加工周期长.

近年来,3-D打印技术的发展为微波/毫米波波导器件的轻型化和快速一体化加工提供了一种新的选择.“3-D打印”又称为“增材制造”,是多种该类型制造工艺的总称,是在计算机控制下通过不断层叠原材料将三维电子模型打印成三维实体的过程,它是与CNC铣削等传统“减材制造”工艺的加工模式完全相反的一种新型加工技术.虽然不同3-D打印工艺之间在原材料和打印原理上存在很大差异,但这些工艺的器件成型模式是一致的,即一个三维结构先被划分成有限个具有一定厚度的准二维层,再由打印材料逐层固化形成,每层材料的厚度由打印系统的分辨率决定,通常为几十至几百微米甚至更高.

根据打印原材料的形态,3-D打印系统可以大致分为以下四种^[10]:1. 液态聚合物打印系统;2. 熔融材料打印系统;3. 离散颗粒物打印系统;4. 固态薄层打印系统.液态聚合物打印系统普遍采用紫外线激光将光敏树脂逐层固化,典型技术如立体光刻(Stereolithography, SLA)、喷墨(Inkjet、Polymer Jetting或Multijet)和数字光处理等.熔融材料打印系统将熔融后的原材料从喷头中挤出,并在程序控制下按照一定的图案层层涂覆,经自然冷却后固化,如市场上最常见的熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling, FDM)技术.离散颗粒物打印系统采用高功率激光将原材料的微细颗粒物熔化或采用粘合剂将颗粒物粘结以形成每一层图案,并逐层重复这样的工序得到最后固化的物体,如典型的选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术和选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术.固态薄层打印系统将每一薄层材料切割成一特定形状并将多个薄层垂直键合构成三维物体,如典型的分层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)技术.3-D打印的器件是由多个准二维薄层在垂直方向层叠起来的,所以一个打印的曲面边缘在微观下往往会呈现锯齿状.近期报道的连续液态界面成型技术^[11]使得器件在垂直方向上被“连续地”制造出来,进一步提升了器件表面的光洁度.

和传统CNC工艺相比,3-D打印技术的第一个显著优势是:加工成本理论上只与打印物体的体积(即原材料用量)有关而与其几何结构的复杂程度无关,因此3-D打印复杂几何结构比传统CNC铣削工艺加工成本低.这使得3-D打印技术特别适合用于制造复杂精密的机械结构,近年来在机械制造^[12]、生物医学材料^[13]和电子通信^[14]等领域被广泛报道,有着非常重大的实用价值.在微波/毫米波电路与系统的研究领域,传统波导或腔体电路通常用全金属(铜或铝等)材料制作.若选用远低于金属材料密度的非金属介质作为3-D打印的结构材料(如光敏树脂、塑料、尼龙和陶瓷等),在相同结构下器件重量可以减小一半以上,这对于无线电通信系统尤其是卫星等航空航天通信系统的轻型化具有重要意义,这是3-D打印技术的第二个显著优势.

值得注意的是并非所有的3-D打印工艺都适用于制作微波/毫米波器件,且制作不同类型或不同工作频段的器件也需要采用不同的3-D打印工艺.目前文献报导的微波/毫米波器件的3-D打印模式有以下四种:1. 先用非金属3-D打印机制造出器件的

几何结构,然后对结构表面进行金属化,这样的器件其射频性能和用纯金属材料制作的器件是完全相同的;2. 用金属 3-D 打印机直接打印出纯金属器件,再对其表面进行抛光;3. 3-D 打印纯介质几何结构,如透镜天线等;4. 3-D 打印介质基片或平面结构,再在上面涂覆(或印制)导电材料制成微波传输线^[15]或天线^[16, 17]等. 下节将重点介绍前三种模式,其中前两种模式可以用于制作波导器件,如腔体滤波器、喇叭天线和直通波导等,而第三种模式可用于加工如介质滤波器、移相器、匹配负载和介质透镜天线等器件,其材料一般是陶瓷和塑料等低损耗介质^[18].

1 射频器件的 3-D 打印技术发展:从 UHF 到 THz

采用 3-D 打印技术制作微波/毫米波器件的先驱工作在文献[19-22]中进行了报道. 这些器件主要包括基于波导或腔体结构的 Ku 频段谐振器、带通滤波器、天线及其集成组件,一些代表性的器件如图 1 所示. 这些器件采用 SLA 工艺打印光敏树脂聚合物而成,其打印分辨率(材料层厚)为 $50\ \mu\text{m}$, 器件表面的金属化采用涂覆导电油墨作为种子层并随后电镀一层约 $40\ \mu\text{m}$ 厚的铜实现. 除了光敏树脂之外,基于陶瓷材料的 SLA 打印工艺(CSLA)也被广泛用于制作毫米波频段的介质天线(阵列)、介质波导和介质谐振器滤波器^[23-29].

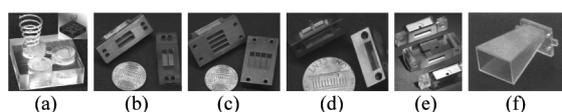


图 1 基于光敏树脂聚合物材料 SLA 3-D 打印工艺的代表性微波/毫米波器件(2004~2005 年)^[21, 22] (a) 单片集成前端滤波器的螺旋天线;(b) 垂直集成 Ku 频段二阶带通滤波器;(c) 垂直集成 Ku 频段四阶带通滤波器;(d) Ku 频段集成单极子天线;(e) 横向集成 Ku 频段窄带二阶带通滤波器;(f) Ku 频段喇叭天线

Fig. 1 Featured microwave/millimeter-wave devices fabricated using an SLA 3-D printing technique and photosensitive resin polymers (in 2004~2005)^[21, 22] (a) A helix antenna monolithically fabricated with a front-end filter module; (b) A Ku -band vertically integrated two-pole bandpass filter; (c) A Ku -band vertically integrated four-pole bandpass filter; (d) A Ku -band integrated monopole antenna; (e) A Ku -band narrowband horizontal two-pole bandpass filter; (f) A Ku -band horn antenna

近年来,3-D 打印技术在工艺原理和材料兼容性上迅速发展,极大地促进了 3-D 打印射频器件的

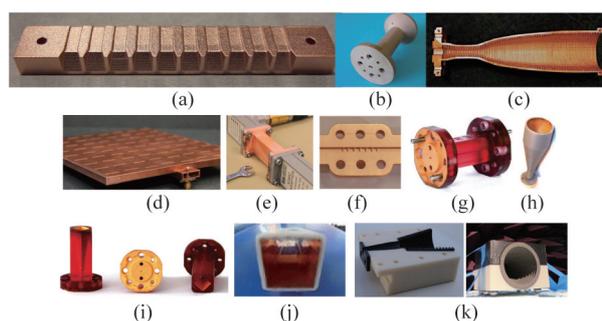


图 2 基于“非金属打印+表面金属化”模式的 3-D 打印毫米波器件^[30-37]. (a) Ka 频段宽带喇叭天线阵列 (SLA); (b) 带法兰的 WR-10 直通波导 ($75\sim 110\ \text{GHz}$) (SLA); (c) W 频段波纹喇叭天线 (SLA); (d) X 频段波导缝隙天线阵列 (SLA); (e) WR-90 直通波导 ($8.2\sim 12.4\ \text{GHz}$) (FDM); (f) W 频段六阶波导带通滤波器 (SLA); (g) WR-3.4 直通波导 ($220\sim 330\ \text{GHz}$) (SLA); (h) 92.5-GHz 波纹喇叭天线 (SLA); (i) WR-3.4 频段对角线喇叭天线 (SLA); (j) 内表面金属化的直通波导 (FDM); (k) Ku 频段波纹圆锥喇叭天线 (FDM)

Fig. 2 3-D printed millimeter-wave devices made of non-metallic materials followed by surface metallization^[30-37]. (a) A Ka -band broadband horn antenna array (SLA); (b) A WR-10 thru waveguide ($75\sim 110\ \text{GHz}$) with flanges (SLA); (c) A W -band corrugated horn antenna (SLA); (d) An X -band waveguide slot antenna array (SLA); (e) A WR-90 thru waveguide ($8.2\sim 12.4\ \text{GHz}$) (FDM); (f) A W -band sixth-order waveguide bandpass filter (SLA); (g) A WR-3.4 thru waveguide ($220\sim 330\ \text{GHz}$) (SLA); (h) A 92.5-GHz corrugated horn antenna (SLA); (i) A WR-3.4-band diagonal horn antenna (SLA); (j) A thru waveguide with metalized internal surface (FDM); (k) A Ku -band corrugated conical horn (FDM)

进步,这主要反映在三个方面:一是多种新型打印工艺被用于制作多用途的射频器件;二是发展出了这些射频器件的多种打印模式,即不再局限于“非金属打印+金属化后处理”的传统模式;三是可打印的射频器件的工作频率从特高频(UHF)提升到了毫米波甚至太赫兹(THz)频段.

文献[30-37]报道了多种采用“非金属打印+表面金属化”模式制作的空气填充波导、滤波器和喇叭天线等器件,工作频率从 $10\ \text{GHz}$ 直至 $300\ \text{GHz}$,如图 2 所示. 这些器件可以采用 SLA 或 FDM 打印机加工. SLA 工艺的一个突出优势在于分辨率高和表面光洁度高,能够实现较高的加工精度,有利于打印波纹、腔体和沟道等复杂密闭结构. 例如,文献[34]中提出的 WR-3.4 波导($220\sim 330\ \text{GHz}$),其 SLA 工艺打印分辨率为 $25\ \mu\text{m}$,测得器件的横向加工精度小于 $\pm 10\ \mu\text{m}$,且该波导的损耗值非常趋近理论极限,表明 SLA 工艺加上适当的后处理工艺能够实现很好的机械精度和表面质量. 因此,SLA 对于

打印工作在毫米波高频段和对物理尺寸精度要求高的器件是首选工艺. 而 FDM 打印机通过将熔融的塑料类聚合物从喷头中挤出构建物体结构. 该工艺的分辨率受到喷头口径的限制, 通常喷头口径远大于 SLA 工艺中采用的激光束直径, 所以该工艺的分辨率(典型值约为 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$) 普遍低于 SLA. 因此 FDM 更适用于制造工作在微波低频段的器件, 与用传统 CNC 工艺制作的相同器件相比, 其加工成本更低且重量更小, 如文献[33, 36]中 X-Ku 频段的波导和天线.

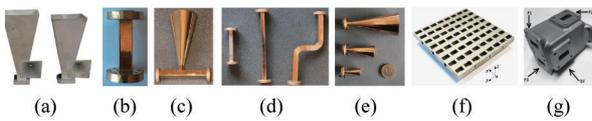


图3 金属3-D打印毫米波器件^[38-44]. (a) Ku频段喇叭天线(EBM); (b) E频段波导带通滤波器(SLM); (c) E频段射频前端(SLM); (d) D频段波导(SLM); (e) E、D和H频段圆锥喇叭天线(SLM); (f) Ku频段天线阵列(SLS); (g) 4×4 Butler矩阵(SLS)

Fig. 3 Metallic 3-D printed millimeter-wave devices^[38-44]. (a) Ku-band horn antennas (EBM); (b) An E-band waveguide bandpass filter (SLM); (c) An E-band radio front end (SLM); (d) D-band waveguides (SLM); (e) E-, D-, and H-band conical horn antennas (SLM); (f) A Ku-band antenna array (SLS); (g) A 4×4 Butler matrix (SLS)

文献[38-44]报道了多种采用“金属打印”模式制作的毫米波波导器件, 如 Cu-15Sn 合金 E 频段波导带通滤波器^[39]、射频前端^[40]以及 E、D 和 H 频段矩形波导^[41], 如图 3 所示. 这些器件可以采用电子束熔炼(EBM)、SLM 或 SLS 打印机加工. 这类打印机采用高能激光将原材料的微细颗粒(通常为塑料、金属、陶瓷或玻璃的粉末)熔融并逐层叠加厚度, 典型层厚为 $20 \sim 50 \mu\text{m}$. 使用金属材料的该工艺打印射频器件后其表面无需金属化, 但表面光洁度较差, 且普遍使用的合金材料的电导率远低于铜、银和金. 这将显著增大毫米波器件的射频损耗. 此外, 金属打印实体固化冷却后体积会收缩, 导致实际物理尺寸与设计值存在误差, 一定程度上会恶化器件的射频性能. 例如, 文献[39]中 $60 \sim 90 \text{ GHz}$ 带通滤波器由于金属打印的加工误差($2\% \sim 3\%$)和表面粗糙度($R_a = 6 \mu\text{m}$)大, 带通滤波器的通带中心频率偏移 2.7% , 通带插入损耗约为 8 dB . 因此, 金属 3-D 打印射频器件需要后处理工艺(如超声波水浴和微机械打磨)除去器件内表面的残留原材料粉末并将器件内表面抛光. 相对于 SLA 和 FDM 工艺而言, SLS 和 SLM 工艺的成本较高.

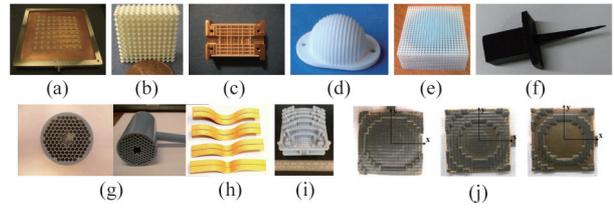


图4 3-D打印毫米波/太赫兹介质器件^[23-24, 27, 29, 45-50]. (a) 8×8 单片矩形介质谐振器天线阵列(CSLA); (b) 单片透镜天线中的亚波长周期性结构(CSLA); (c) 33-GHz窄带三阶带通滤波器(CSLA); (d) 60-GHz集成透镜天线中的矾土陶瓷透镜(CSLA); (e) X频段 Luneburg 透镜(喷墨); (f) X频段波导负载(FDM); (g) 太赫兹介质波导(喷墨); (h) 太赫兹等离子波导(喷墨); (i) 60-GHz频率扫描透镜(喷墨); (j) 100-GHz介质反射阵列天线(喷墨)

Fig. 4 3-D printed millimeter-wave dielectric devices^[23-24, 27, 29, 45-50]. (a) An 8×8 monolithic rectangular dielectric resonator antenna array (CSLA); (b) A subwavelength periodic structure in a monolithic lens antenna (CSLA); (c) A 33-GHz narrowband three-pole bandpass filter (CSLA); (d) An alumina lens in a 60-GHz integrated lens antenna (CSLA); (e) An X-band Luneburg lens (Inkjet); (f) An X-band waveguide load (FDM); (g) A terahertz dielectric waveguide (Inkjet); (h) Terahertz plasmonic waveguides (Inkjet); (i) A 60-GHz frequency-scanning lens (Inkjet); (j) 100-GHz dielectric reflect array antennas (Inkjet)

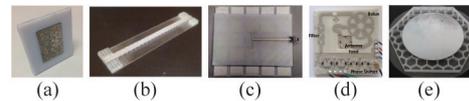


图5 3-D打印微波/毫米波介质基片和平面结构^[15-17, 51-52]. (a) 2.3-GHz贴片天线(喷墨); (b) 悬置微带(FDM); (c) 2.6-GHz偶极子天线(FDM); (d) 相控阵天线单元(FDM); (e) 2.4-GHz贴片天线(喷墨)

Fig. 5 3-D printed microwave/millimeter-wave dielectric substrates and planar structures^[15-17, 51-52]. (a) A 2.3-GHz patch antenna (Inkjet); (b) Suspended microstrip (FDM); (c) A 2.6-GHz dipole antenna (FDM); (d) A phased array antenna unit cell (FDM); (e) A 2.4-GHz patch antenna (Inkjet)

文献[23-29, 45-50]报道了多种毫米波介质器件, 如图 4 所示. 这些器件可以采用 CSLA、FDM 或喷墨(也称聚合物喷射快速成型)打印机制作, 常用的材料分别为低损耗的陶瓷、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)塑料或光敏树脂. 其中, 喷墨是一种从多个喷头中滴出液态光敏树脂聚合物(以及支撑材料)并用紫外线逐层固化的 3-D 打印工艺, 其成型原理与 FDM 工艺类似, 但使用的是类似 SLA 工艺的原材料. 喷墨工艺分辨率高, 也适用于打印尺寸精细的器件.

文献[15-17, 51-52]介绍了几种 3-D 打印的 $1 \sim 10\text{-GHz}$ 平面传输线和平面天线. 这些器件的加工

结合了 FDM 和喷墨工艺,在打印完介质基片后在其表面上涂敷(或打印)导电银浆,其射频性能可与用传统平面微波介质基片(如 Rogers 系列^[53])制作的器件相比拟.打印这类包含多层不同材料的平面结构时,喷墨打印机往往具有多个喷头,分别用于打印介质材料和导电材料,如文献[16]中介绍的 nScript 3Dn-300 打印机.

上述四种 3-D 打印模式涉及的打印工艺中,除 SLS/SLM 工艺可直接使用金属材料构形之外,其余工艺均使用非金属材料构形.因此,当 3-D 打印微波/毫米波波导器件或一些口径天线时,结构表面的金属化是必不可少的后处理工艺之一.在 3-D 打印技术发展早期,这一金属化工艺通过先在器件表面均匀涂覆一薄层导电油墨^[54]作为种子层,待油墨干燥后再电镀一层铜实现.例如,文献[21]中用 50 μm 分辨率 SLA 工艺加工的 Ku 频段带通滤波器,其腔体表面采用此法实现了 40 μm 厚的电镀铜层.目前,非金属材料表面的金属化广泛采用商用化学镀镍加电镀铜法^[32, 33].化学镀镍工艺将 3-D 打印的介质结构材料浸入一系列化学溶液中,对其表面进行预处理,材料表面在催化剂作用下活化并沉积一薄层镍^[55].该工艺可以在整个与化学溶液接触的结构表面实现均匀的镍种子层,随后用常规的电镀铜工艺增厚金属层(厚度通常大于 5 倍趋肤深度).因此,对于工作在毫米波高频段和对物理尺寸变化敏感的器件而言,金属镀层的质量(厚度、表面粗糙度和均匀性)也是决定这些器件射频性能的关键因素.

综上所述,SLA、FDM、SLS(SLM)和喷墨工艺目前均可用于打印微波/毫米波无源波导器件,快捷地实现这些器件中难以机加工的复杂结构,降低加工成本,缩短加工周期,但这些技术各自均存在一定的局限性.SLA、FDM 和喷墨工艺需要表面金属化等后处理工艺,往往难以严格控制金属镀层的质量(特别是器件内表面),带来的尺寸误差会恶化器件的射频性能,这在工作于 W 及以上频段的窄带器件中较为严重.SLA 和喷墨工艺使用的光敏树脂耐热性

差,工作温度难以高于 50 $^{\circ}\text{C}$,不能用于工作在高温高功率环境下的器件.相比之下 FDM 工艺使用的塑料类材料耐热性稍好,但该工艺的加工精度难以满足毫米波高频器件的要求.金属 SLS(SLM)打印的波导器件无需表面金属化,但其表面粗糙度较大,需要清洗抛光等后处理工艺,而目前难以实现复杂内部结构(如近似封闭的腔体或管道)的抛光.此外,金属材料冷却后收缩会导致尺寸和形状改变,进一步恶化器件的射频性能.目前,基于 SLA 或 SLM 工艺的宽带器件(如波导和喇叭天线)在 300 GHz 左右的频段已经具备较好的射频性能,用 SLA 工艺打印的这些高频器件也成功实现了高质量的表面金属化^[34, 41, 56],但实现 W 频段以上的窄带器件尚有一定难度.

以下小节将介绍作者所在小组研制的基于 SLA 3-D 打印工艺的 X 和 W 频段带通滤波器,包括基于新型高 Q 值单模和双模球形腔体谐振器的 10-GHz 带通滤波器(相对带宽(FBW)分别为 5% 和 3%),基于裂缝波导的 90-GHz 带通滤波器(FBW: 11%)和基于紧凑片上结构的 100-GHz 带通滤波器(FBW: 4%).

2 基于球形谐振器的 X 频段 3-D 打印轻质带通滤波器

2.1 单模球形谐振器和五阶带通滤波器

与被广泛用于腔体滤波器的传统矩形和圆柱形腔体谐振器相比,在相同谐振频率下,球形谐振器具有更高的空载品质因数(Q_u).在 10 GHz 处,工作在 TM_{101} 基模的球形谐振器的 Q_u 约为 14450,是相同频率下矩形谐振器(TE_{101} 基模) Q_u 值的 1.8 倍多,是相应圆柱形谐振器(TE_{111} 基模) Q_u 值的约 1.3 倍.相应地,球形谐振器的体积是矩形谐振器的约两倍,这有利于在毫米波高频应用中实现高 Q_u 值的同时减小器件射频性能对加工误差的灵敏度.但球形谐振器难以用传统的 CNC 铣削工艺加工,而采用 3-D 打印则可以有效地解决这一问题.

基于球形谐振器的五阶带通滤波器^[57]结构如

表 1 10 GHz 处几种类型腔体谐振器的比较

Table 1 Comparison of several types of cavity resonators operating at 10 GHz

类型	矩形单模	矩形双模	圆柱形单模	圆柱形双模	球形单模	球形双模
Q_u	7 957	11 039	11 200	12 457	14 450	14 450
物理尺寸(mm)	22.86 × 10.16 × 19.9	19 × 19 × 24	10.0(R) × 31.5(H)	15(R) × 18.5(H)	13.1(R)	13.1(R)
基模	TE_{101}	$\text{TE}_{101}/\text{TE}_{011}$	TE_{111}	TE_{111}	TM_{101}	TM_{101}
第一个有效高次模(频率)	TE_{201} (15.1)	TM_{110} (11.15)	TE_{112} (13.0)	TM_{011} (11.14)	TE_{2m1} (14.1)	TE_{2m1} (14.1)

* “R”和“H”分别表示半径和高度.腔体边界为铜(仿真用导电率: $5.97 \times 10^7 \text{ S/m}$).频率单位 GHz.

图 6(a) 所示, 滤波器中心频率 10 GHz, FBW 5%. 球形谐振器的级间耦合通过调节两个相邻谐振器重叠部分的面积实现, 而源与负载端的输入输出耦合则通过调节首尾两个谐振器分别与输入输出矩形波导之间的开孔面积实现. 为了抑制球形谐振器的高次模以获得更宽的无寄生频带, 滤波器采用了 Ω 形的折叠耦合拓扑, 与直列式等多种耦合拓扑相比, 该拓扑能够在带外抑制度和加工难易程度上获得最好的折衷.

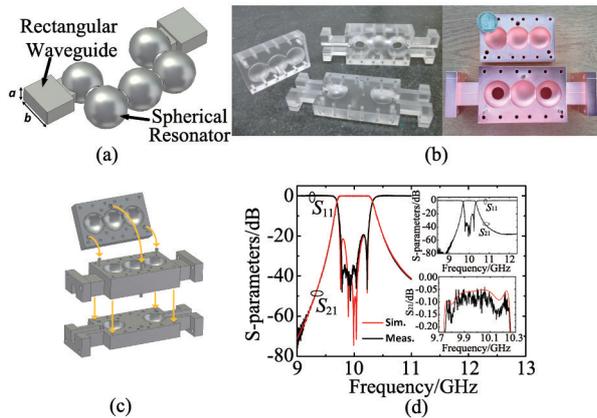


图 6 基于单模球形谐振器的 10 GHz 3-D 打印五阶带通滤波器^[57]. (a) 几何构形(矩形波导口宽高: $a = 22.86$ mm, $b = 10.16$ mm); (b) 加工的滤波器模块照片(左: 镀铜前; 右: 镀铜后; 铜层厚度 25 μm); (c) 滤波器装配示意图; (d) 仿真与测量结果

Fig. 6 A 10-GHz 3-D printed fifth-order bandpass filter based on single-mode spherical resonators^[57]. (a) Geometrical configuration (Width and height of the rectangular waveguide port: $a = 22.86$ mm and $b = 10.16$ mm); (b) Photographs of the fabricated filter's building blocks (left: as-printed; right: copper-plated; copper layer thickness: 25 μm); (c) Assembly illustration of the filter; (d) Simulated and measured results

采用 SLA 3-D 打印工艺加工了该滤波器的三个结构模块, 并用化学镀镍加电镀铜法实现了模块表面的金属化, 加工的滤波器模块如图 6(b) 所示. 注意到该滤波器可以用 SLA 工艺实现一体化打印, 但将该结构拆分后打印可以更好地实现球形谐振器内表面的金属化. 电镀铜层带来的腔体体积变化在电子模型中进行了结构补偿. 滤波器的装配和仿真与测量结果分别如图 6(c) 和(d) 所示. 仿真与测量的滤波器 S 参数一致吻合. 滤波器的中心频率偏移约为 5 MHz(中心频率的 0.05%), 测得通带的平均插入损耗为 0.107 dB, 高出仿真值约 0.035 dB. 这些偏差主要是由于铜层厚度的加工误差和铜层电导率低于仿真值造成的. 该滤波器样品质量为 280 g, 若用纯铜制造, 其质量将是该样品的 7 倍多, 可见采用

轻质的非金属 3-D 打印材料可以在不失器件结构特点和射频性能的同时显著减小器件质量. 通过优化设计该滤波器的电子模型, 去除冗余的结构材料, 可以进一步减轻滤波器的重量.

2.2 双模球形谐振器和四阶带通滤波器

虽然球形谐振器具有高 Q_u 值的优势, 但与矩形谐振器相比其高次模更加靠近基模, 一个工作在 10 GHz 处的矩形谐振器, 其第一个能够激励级间耦合的有效高次模(TE_{201})的谐振频率为 15.1 GHz, 而球形谐振器相应的高次模(TE_{2ml})的谐振频率为 14.1 GHz. 上节中五阶带通滤波器的 Ω 形折叠拓扑可以一定程度上抑制球形谐振器的高次模, 但必然增大了滤波器的体积. 采用双模谐振器可以进一步实现该滤波器体积的小型化和更复杂的如包含传输零点的滤波函数^[58, 59]. 与传统矩形或圆柱形双模腔体谐振器^[60, 61]相比, 球形双模谐振器的第一个有效高次模的谐振频率更加远离基模频率. 表 1 比较了几种类型的腔体谐振器的关键参数, 可见, 采用双模球形谐振器设计滤波器有助于改善无寄生通带频率范围.

基于双模球形谐振器设计的四阶带通滤波器^[62]如图 7 所示, 其中心频率 10 GHz, FBW 3%, 具有一对关于中心频率对称的传输零点, 位于 9.7 GHz 和 10.3 GHz. 滤波器包含两个球形谐振器, 每个谐振器产生两个相互正交极化的 TM_{101} 简并模, 如图 7(a) 所示. 这两个谐振模式之间的耦合通过在腔体 $\pm 135^\circ$ 方向上的柱子 C1 和 C2 实现, 柱子伸入腔体的长度控制这两个模式间的耦合强度. 每个模式的谐振频率通过 180° 和 90° 方向上的柱子(腔体 I: T1 和 T2; 腔体 II: T3 和 T4)实现. 两个腔体之间的模式耦合采用一个十字形的开槽实现, 其中水平方向上的开槽引入了模式“1”和“4”之间的负交叉耦合(M_{14}), 可以实现一对对称的传输零点. 滤波器的完整结构和耦合拓扑如图 7(b) 所示, 其外部耦合 M_{s1} 和 M_{4t} 通过控制球形腔与输入输出矩形波导重叠区域的开槽面积实现. 值得注意的是, 该滤波器腔体和波导壁上开有大量矩形槽, 这有助于进一步减轻滤波器质量并提高腔体内表面的金属化质量. 镀液可以通过这些开槽流入腔体内部, 使电镀过程中铜离子在腔体内外的镀液中均匀扩散分布并在内外腔壁上沉积更加均匀. 这些开槽的尺寸和位置经过了特别的设计, 不会切割腔体和导体壁上的电流, 因此不会造成内部电磁场能量的泄漏.

采用与小节相同的加工工艺实现了该滤波器

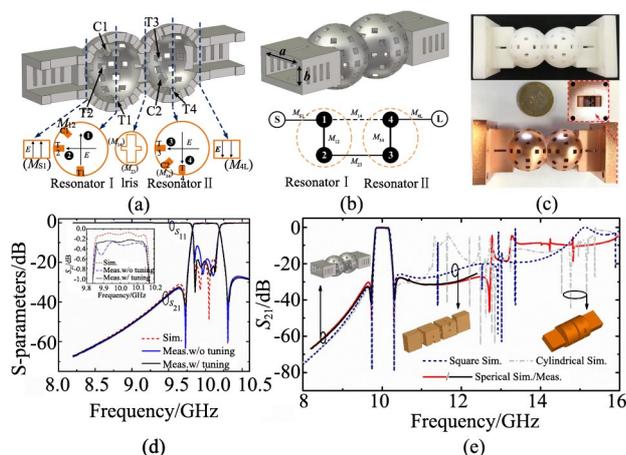


图 7 基于双模球形谐振器的 10-GHz 3-D 打印四阶带通滤波器^[62]。(a) 纵向剖面视图(黑底数字:谐振模式;截面中的黑实线箭头:电场方向);(b) 滤波器完整结构和耦合拓扑(白色节点:源(S)与负载(L);黑色节点:谐振模式;实/虚线:直接/交叉耦合;矩形波导口宽高: $a = 22.86$ mm, $b = 10.16$ mm);(c) 加工的滤波器照片(上:镀铜前;下:镀铜后);(d) 窄带 S 参数幅频响应;(e) 宽带 S_{21} 幅频响应

Fig. 7 A 10-GHz 3-D printed fourth-order bandpass filter based on spherical dual-mode resonators^[62]. (a) A longitudinal section view (black circled numbers; resonant modes; black solid arrows in cross sections; electric field directions); (b) A complete filter structure and coupling topology (white nodes: source (S) and load (L); black nodes: resonant modes; solid/dashed lines: direct/cross couplings; width and height of the rectangular waveguide port: $a = 22.86$ mm and $b = 10.16$ mm); (c) Photographs of the fabricated filter (up: as-printed; down: copper-plated); (d) Narrowband S -parameter amplitude-frequency responses; (e) Wideband S_{21} amplitude-frequency responses

的一体化打印和金属化。滤波器样品如图 7(c) 所示。类似地,10 μm 厚电镀铜层带来的腔体体积变化在电子模型中进行了结构补偿。球形腔中的模式耦合与频率调谐柱子也实现了同步打印,无需额外的调谐螺钉和调试工作。滤波器的仿真与测量结果一致吻合,如图 7(d) 所示。测得通带的平均插入损耗为 0.34 dB,高出仿真值约 0.19 dB,这主要是由于铜层厚度的加工误差和铜层电导率低于仿真值造成的。将一段金属短截线通过球形谐振腔壁上 T2 柱子旁的开槽伸入腔体内微调滤波器的通带性能,可以将因加工误差而恶化的通带内回波损耗调至优于 18 dB。相应地,微调后通带平均插入损耗减小至 0.24 dB,而金属短截线可以粘在腔体上。图 7(e) 比较了三种双模腔体带通滤波器的宽带射频性能。可见,基于球形双模谐振器的滤波器具有最好的带外抑制度和最宽的无寄生频率范围(直至 12.7 GHz)。该双模滤波器与上一小节中的单模滤波器相比射频

响应相似,但其体积仅为后者的约 20%。该双模滤波器的频率偏移小于 1 MHz(中心频率的 0.01%),进一步表明其高精度一体化的打印优势。在滤波器电子模型的设计中去除了腔体周边的冗余结构材料,滤波器样品的质量仅为 56 g,是其纯铜样品质量的约 15%。

注意到上述两款 X 频段滤波器均采用光敏树脂作为打印材料,其材料的极限工作温度约为 40 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ 。为了适应高温高功率环境条件下的应用,可采用如 Somos PerFORM^[63] 或 3-D-System Accura Bluestone^[64] 等特殊材料来制作这两个器件。这些材料通常是重掺杂微纳米陶瓷粉末的光敏树脂,综合了 SLA 工艺的高精度优势和陶瓷的耐高温属性,具有 120 ~ 250 $^{\circ}\text{C}$ 的极限工作温度。此外,陶瓷粉末掺杂的光敏树脂的热膨胀系数明显低于普通光敏树脂。例如,0 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ 时 Somos PerForm 树脂的线性热膨胀系数 34.3 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ^[63] 约为铜(17 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ^[65]) 的 2 倍,而 Somos 9420 树脂(149.5 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ^[66]) 的该系数为铜的近 9 倍。因此,采用陶瓷粉末掺杂的光敏树脂作为打印材料有助于滤波器获得更好的热稳定性。

3 W 频段 3-D 打印带通滤波器

3.1 90-GHz 裂缝波导五阶带通滤波器

基于裂缝波导结构的 W 频段五阶带通滤波器^[67] 如图 8 所示,设计中心频率 90 GHz,绝对带宽 10 GHz。该滤波器的结构特点在于平行于矩形波导的窄边和宽边开了一些缝隙,如图 8(a) 所示。与上一节球形谐振器的开槽原理相同,这些缝隙不但进一步减小了器件的重量,还便于金属镀液流入腔体内部。这些缝隙没有切割波导壁电流,因此不会带来显著的辐射损耗或显著改变滤波器的通带射频性能。滤波器的谐振器级间和输入输出耦合均通过矩形波导中不同宽度的膜片实现,其射频设计和关键物理尺寸在文献[67]中进行了详述。

滤波器采用 Swisstol2 公司^[56] 的 SLA 工艺打印并先后电镀了约 10 μm 厚的铜和约 100 nm 厚的金(钝化层),样品如图 8(b) 所示。滤波器的仿真与测量结果吻合良好,但通带整体往低频端偏移了约 2.5 GHz(2.78%),测得通带平均插入损耗约为 0.4 dB,高出仿真值 0.25 dB,测得通带回波损耗优于 18 dB,如图 8(c) 所示。这些差异主要有以下几个原因: 1. 回波损耗恶化引入的插入损耗; 2. 金属表面粗糙度(典型值 1 μm) 引入的插入损耗; 3. 光敏树脂

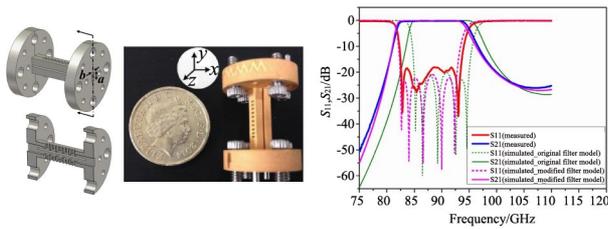


图8 90-GHz 3-D打印裂缝波导五阶带通滤波器^[67]. (a) 结构示意图(矩形波导口宽高: $a = 2.54$ mm, $b = 1.27$ mm);(b) 加工的滤波器照片;(c) 仿真与测量结果

Fig. 8 A 90-GHz 3-D printed slotted waveguide fifth-order bandpass filter^[67]. (a) Structural illustration (Width and height of the rectangular waveguide: $a = 2.54$ mm and $b = 1.27$ mm); (b) Photograph of the fabricated filter; (c) Measured and simulated results

固化过程中体积膨胀导致实际腔体偏大. 在显微镜下测得加工样品的实际物理尺寸并代入模型仿真, 可以得到与测量响应吻合更好的结果, 如图8(c)所示.

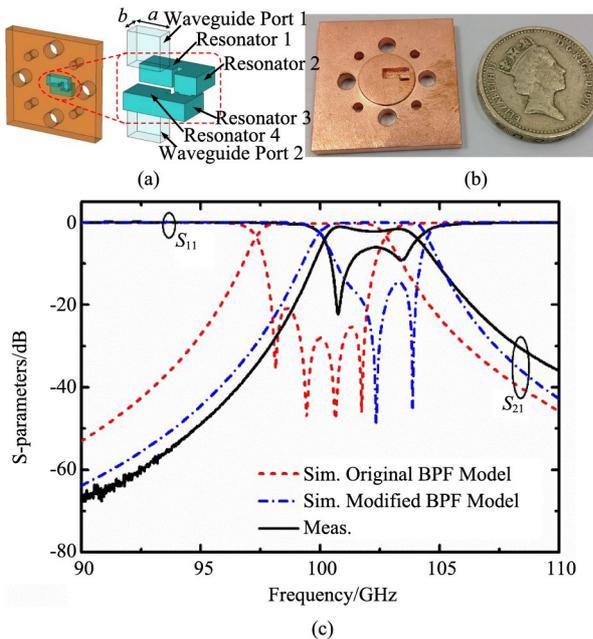


图9 100-GHz 3-D打印紧凑片上结构四阶带通滤波器. (a) 结构示意图(矩形波导口宽高: $a = 2.54$ mm, $b = 1.27$ mm);(b) 加工的滤波器照片;(c) 仿真与测量结果

Fig. 9 A compact 100-GHz 3-D printed on-plate fourth-order bandpass filter. (a) Structural illustration (Width and height of the rectangular waveguide: $a = 2.54$ mm and $b = 1.27$ mm); (b) Photograph of the fabricated filter; (c) Measured and simulated results

3.2 100-GHz 紧凑片上结构四阶带通滤波器

一种基于紧凑片上结构的 W 频段四阶带通滤波器如图9所示,设计中心频率 100 GHz,绝对带宽 4 GHz. 该结构在一个矩形薄片的两侧各挖出两个

工作在 TE_{101} 模式的矩形谐振腔及其之间的矩形耦合腔,构成了一个具有四阶切比雪夫响应的带通滤波器,滤波器的输入输出耦合通过控制矩形波导口与第“1”和第“4”号谐振腔的开口重叠面积实现,如图9(a)所示.

滤波器采用 3-D-Parts 公司^[68]的 SLA 工艺打印并电镀了约 10 μm 厚的铜,样品如图9(b)所示. 滤波器的仿真与测量结果如图8(c)所示. 在该设计中,为了研究镀铜层厚度对 W 频段带通滤波器通带性能的影响,没有对该滤波器的电子模型进行结构补偿. 因此,电镀铜之后腔体两侧的物理尺寸具有较大误差,都较仿真值缩小了十几微米,导致谐振腔体积缩小,谐振频率增大,谐振器级间耦合强度减小,通带往高频端偏移了约 2 GHz,且带宽较设计值缩小了约 10%,通带回波损耗严重恶化 (< 10 dB),通带插入损耗 (1 ~ 2 dB) 明显高于仿真值. 在显微镜下测出滤波器的实际物理尺寸并对原始仿真模型进行修正,修正模型的仿真结果与测量结果基本吻合. 注意到该滤波器结构要求测量系统的波导法兰与之无缝相连,因此要求打印的接口表面具有很好的表面平整度. 文献^[67]中采用激光微加工工艺直接在黄铜片上切割该结构,激光切割的加工误差小 (< 10 μm),且切面平整无需表面金属化,其仿真与测量的滤波器通带性能因此一致吻合.

上述两款 W 频段滤波器的研究表明,对于毫米波高频 (W 及以上频段) 器件,SLA 打印工艺可以保证高加工精度,但器件性能会受到金属镀层质量 (特别是厚度) 的影响. 因此,设计开槽结构并优化金属化工工艺对于精确实现滤波器的射频性能非常重要. 还值得注意的是,目前多数 3-D 打印的波导滤波器均工作于 100 GHz 以下频率,100 GHz 以上频段的 3-D 打印滤波器 (如文献^[33]中的 107 GHz 带通滤波器) 鲜有报道,且频率越高打印及其后处理工艺受到的误差制约越大,难以实现较好的窄带滤波响应. 因此,这两款 W 频段滤波器也是当前少有的几个 3-D 打印毫米波高频滤波器的典型代表. 最后,表2总结比较了多个文献报道的 3-D 打印滤波器技术.

4 结论

本文综述了基于 3-D 打印技术的 UHF 至 THz 频段多种无源波导器件,讨论比较了 SLA、FDM、SLS/SLM 和喷墨四种广泛用于制作微波/毫米波器件的 3-D 打印工艺及其相应的加工模式,并综述了

表 2 与部分文献报道的 3-D 打印带通滤波器的比较

Table 2 Comparison with state-of-the-art 3-D printed bandpass filters

参考文献	打印工艺	中心频率(GHz)/相对带宽	频率偏移	通带插入损耗(dB)	物理尺寸(mm ³)	表面金属化工艺
[21]	SLA	19.65 / 1.2%	0.15%	1.7	11 × 11 × 12	导电油墨 + 电镀铜
[27]	CSLA	33 / 1%	1.5%	1.7	28 × 40 × 3.6	(无需)
[33]	SLA	107.2 / 6.3%	7.2%	0.95	2.5 × 1.25 × 9	化学镀镍 + 电镀铜
[39]	SLM	75.5 / 6.8%	2.7%	5 - 10	3.1 × 1.5 × 36	(无需)
[40]	SLM	83.5 / 6%	1.8%	5 - 6	N/A	(无需)
[44]	SLS	12.5 / 4%	1.8%	N/A	N/A	(无需)
[57]	SLA	10 / 5%	0.05%	0.11	120 × 51 × 55	化学镀镍 + 电镀铜
[62]	SLA	10 / 3%	<0.01%	0.24	76 × 30 × 31	化学镀镍 + 电镀铜
[67]	SLA	87.5 / 11.5%	2.78%	0.5 - 0.8	15.39 × 3.27 × 4.54	化学镀镍 + 电镀铜/金
本文	SLA	102.5 / 3.6%	2.5%	1 - 2	4.73 × 4.08 × 2.64	化学镀镍 + 电镀铜

*N/A:文献未说明。

作者所在小组研制的基于 SLA 3-D 打印工艺的两款 X 频段球形谐振器带通滤波器和分别基于裂缝波导和紧凑片上结构的两款 W 频段带通滤波器。采用 3-D 打印技术可以很好地实现传统 CNC 铣削工艺难以精确加工的高 Q 值球形谐振器,而采用 3-D 打印双模球形谐振器则有效地实现了球形谐振器滤波器的小型化(相似通带性能但双模滤波器体积减小了 4 倍多)。通过在谐振器壁上开槽,可以在不失滤波器通带性能的同时进一步减轻器件质量并有利于实现高质量的内表面金属化。

SLA 和喷墨工艺打印分辨率高,适合加工对物理尺寸变化敏感的毫米波高频器件,其使用的是低熔点低密度的光敏树脂作为打印材料,与传统 CNC 工艺制作的毫米波全金属腔体器件相比具有轻质的突出优势(重量减轻 80% 以上),在机载、舰载和航空航天等要求电子器件轻型化和小型化的领域有广泛的应用。这些工艺的挑战首先在于器件表面金属化等后处理工艺的质量难以完美控制,这对毫米波高频窄带器件的影响较为突出,本文提出的这两款 W 频段滤波器也是当前 3-D 打印毫米波高频滤波器的典型代表;其次在于器件的工作温度受到材料属性的限制,对于高温高功率环境下的应用,器件可以采用如陶瓷粉末掺杂的光敏树脂等具有更好耐热性的打印材料制作,这些材料对毫米波滤波器热稳定性的影响有待进一步研究。

相比之下,采用非金属材料的 FDM 工艺的打印分辨率较低,更适合于加工 X 及以下频段的器件。金属材料的 SLS/SLM 工艺可以直接打印成型全金属器件,材料温度属性较好且无需表面金属化,但其缺陷是表面粗糙度较大,需要抛光等后处理工艺,加工成本高。该工艺可用于少数特种材料定制器件的加工。

References

- [1] STIL I, FONTANA A L, LEFRANC B, *et al.* Loss of WR10 waveguide across 70-116 GHz: Proceedings of International Symposium on Space Terahertz Technology, 2012 [C]. Tokyo, Japan: International Symposium on Space Terahertz Technology, 2012: 151 - 153.
- [2] LEONG K M K H, HENNIG K, ZHANG Chunbo, *et al.* WR1.5 silicon micromachined waveguide components and active circuit integration methodology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, **60**(4): 998 - 1005.
- [3] RECK T J, JUNG-KUBIAK C, GILL J, *et al.* Measurement of silicon micromachined waveguide components at 500 - 750 GHz [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, **4**(1), 33 - 38.
- [4] MURAD N A, LANCASTER M J, GARDNER P, *et al.* Micromachined H-plane horn antenna manufactured using thick SU-8 photoresist [J]. *Electronics Letters*, 2010, **46**(11): 743 - 745.
- [5] SHANG Xiaobang, KE Maolong, WANG Yi, *et al.* Micromachined WR-3 waveguide filter with embedded bends [J]. *Electronics Letters*, 2011, **47**(9), 545 - 547.
- [6] SHANG Xiaobang, KE Maolong, WANG Yi, *et al.* Micromachined W-band waveguide and filter with two embedded H-plane bends [J]. *IET Microwave, Antennas & Propagation*, 2011, **5**(3), 334 - 339.
- [7] SHANG Xiaobang, KE Maolong, WANG Yi, *et al.* WR-3 band waveguides and filters fabricated using SU8 photoresist micromachining technology [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, **2**(6), 629 - 637.
- [8] SHANG Xiaobang, TIAN Yingtao, LANCASTER M J, *et al.* A SU8 micromachined WR-1.5 band waveguide filter [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2013, **23**(6), 300 - 302.
- [9] SMITH C H III, SKLAVONUOS A, BARKER N S. SU-8 micromachining of millimeter and submillimeter waveguide circuits: IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2009 [C]. Boston, MA: IEEE, 2009: 961 - 964.
- [10] GIBSON I, ROSEN D W, STUCKER B. *Additive manufacturing technologies* [M]. New York: Springer, 2010.
- [11] TUMBLESTON J R, SHIRVANYANTS D, ERMOSHKIN N, *et al.* Continuous liquid interface production of 3-D objects [J]. *Science*, 2015, **347**(6228), 1349 - 1352.
- [12] SYMES M D, KITSON P J, Yan J, *et al.* Integrated 3-D-

- printed reactionware for chemical synthesis and analysis [J]. *Nature Chemistry*, 2012, **4**: 349–354.
- [13] VAIDYA M. Startups tout commercially 3-D-printed tissue for drug screening[J]. *Nature Medicine*, 2015, **21**(2):1.
- [14] KONG Y L, TAMARGO I A, KIM H, *et al.* 3-D printed quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(12): 7017–7023.
- [15] DEFFENBAUGH P I, WELLER T M, CHURCH K H. Fabrication and microwave characterization of 3-D printed transmission lines[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, **25**(12): 823–825.
- [16] PA P, LARIMORE Z, PARSONS P, *et al.* Multi-material additive manufacturing of embedded low-profile antennas [J]. *Electronics Letters*, 2015, **51**(20):1561–1562.
- [17] KETTERL T P, VEGA Y, ARNAL N C, *et al.* A 2.45 GHz phased array antenna unit cell fabricated using 3-D multi-layer direct digital manufacturing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, **63**(12):4382–4394.
- [18] DEFFENBAUGH P I, RUMPF R C, CHURCH K H. Broadband microwave frequency characterization of 3-D printed materials[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, **3**(12): 2147–2155.
- [19] GONG Xun, LIU Bosui, KATEHI L P B, *et al.* Layer-by-layer stereolithography (SL) of complex medium; IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004 [C]. Monterey, CA; IEEE, 2004: 325–328.
- [20] GONG Xun, MARGOMENOS A, LIU Bosui, *et al.* High-Q evanescent-mode filters using silicon micromachining and polymer stereolithography (SL) processing; IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2004 [C]. Fort Worth, TX; IEEE, 2004: 433–436.
- [21] LIU Bosui, GONG Xun, CHAPPELL W J. Applications of layer-by-layer polymer stereolithography for three-dimensional high-frequency components[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, **52**(11):2567–2575.
- [22] HUANG Yilei, GONG Xun, HAJELA S, *et al.* Layer-by-layer stereolithography of three-dimensional antennas; IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2005 [C]. Washington, D. C.; IEEE, 2005: 276–279.
- [23] BUERKLE A, BRAKORA K F, SARABANDI K. Fabrication of a DRA array using ceramic stereolithography[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, **5**(1), 479–482.
- [24] BRAKORA K F, HALLORAN J, SARABANDI K. Design of 3-D monolithic MMW antennas using ceramic stereolithography[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, **55**(3): 790–797.
- [25] BRAKORA K, HALLORAN J, SARABANDI K. Subwavelength periodic lattices for the design of MMW components using ceramic stereolithography; IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2006 [C]. Albuquerque, NM; IEEE, 2006: 4511–4514.
- [26] BRAKORA K F, SARABANDI K. Integration of single-mode photonic crystal clad waveguides with monolithically constructed ceramic subsystems[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, **8**: 433–436.
- [27] DELHOTE N, BAILLARGEAT D, VERDEYME S, *et al.* Ceramic layer-by-layer stereolithography for the manufacturing of 3-D millimeter-wave filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, **55**(3): 548–554.
- [28] CHARTIER T, DUTERTE C, DELHOTE N, *et al.* Fabrication of millimeter wave components via ceramic stereo- and microstereolithography processes[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, **91**(8): 2469–2474.
- [29] NGUYEN N T, DELHOTE N, ETTORRE M, *et al.* Design and characterization of 60-GHz integrated lens antennas fabricated through ceramic stereolithography[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, **58**(8): 2757–2762.
- [30] SCHULWITZ L, MORTAZAWI A. A compact millimeter-wave horn antenna array fabricated through layer-by-layer stereolithography; IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2008[C]. San Diego, CA; IEEE, 2008: 1–4.
- [31] TIMBIE P T, GRADE J, VAN DER WEIDE D, *et al.* Stereolithographed MM-wave corrugated horn antennas; Proceedings of International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2011 [C]. Houston, TX; IEEE, 2011: 1–3.
- [32] LE SAGE G P. 3-D printed waveguide slot array antennas [J]. *IEEE Access*, 2016, **4**:1258–1265.
- [33] D'AURIA M, OTTER W J, HAZELL J, *et al.* 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, **5**(9):1339–1349.
- [34] VON BIEREN A, DE RIJK E, ANSERMET J-Ph, *et al.* Monolithic metal-coated plastic components for mm-wave applications; Proceedings of International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2014 [C]. Tucson, AZ; IEEE, 2014: 1–2.
- [35] GETERUD E G, BERGMARK P, YANG J. Lightweight waveguide and antenna components using plating on plastics; Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation, 2013 [C], Gothenburg, Sweden; IEEE, 2013: 1812–1815.
- [36] CHIEH J-C S, DICK B, LOUI S, *et al.* Development of a Ku-band corrugated conical horn using 3-D print technology[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, **13**:201–204.
- [37] MACOR A, DE RIJK E, ALBERTI S, *et al.* Note: Three-dimensional stereolithography for millimeter wave and terahertz applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, **83**(046103):1–3.
- [38] GARCIA C R, RUMPF R C, TSANG H H, *et al.* Effects of extreme surface roughness on 3-D printed horn antenna [J]. *Electronics Letters*, 2013, **49**(12):734–736.
- [39] ZHANG Bing, ZIRATH H. 3-D printed iris bandpass filters for millimetre-wave applications[J]. *Electronics Letters*, 2015, **51**(22): 1791–1793.
- [40] ZHANG Bing, ZIRATH H. A metallic 3-D printed E-band radio front end[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, **26**(5):331–333.
- [41] ZHANG Bing, ZIRATH H. Metallic 3-D printed rectangular waveguides for millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2016, **6**(5):796–804.
- [42] ZHANG Bing, ZHAN Zhaoyao, CAO Yu, *et al.* Metallic 3-D printed antennas for millimeter- and submillimeter wave applications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Sci-*

- ence and Technology, 2016, **6**(4):592–600.
- [43] HUANG Guan-Long, ZHOU Shi-Gang, CHIO T-H, *et al.* 3-D metal-direct-printed wideband and high-efficiency waveguide-fed antenna array; IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2015 [C], Phoenix, AZ, IEEE, 2015: 1–4.
- [44] TORNIELLI DI CRESTVOLANT V, IGLESIAS P M, LANCASTER M J. Advanced Butler matrices with integrated bandpass filter functions[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, **63**(10):3433–3444.
- [45] LIANG Min, NG W-R, CHANG K, *et al.* A 3-D Luneburg lens antenna fabricated by polymer jetting rapid prototyping[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, **62**(4):1799–1807.
- [46] ARBAOUI Y, LAUR V, MAALOUF A, *et al.* Full 3-D printed microwave termination: A simple and low-cost solution[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, **64**(1):271–278.
- [47] WU Ziran, NG W-R, GEHM M E, *et al.* Terahertz electromagnetic crystal waveguide fabricated by polymer jetting rapid prototyping[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(5):3962–3972.
- [48] PANDEY S, GUPTA B, NAHATA A. Terahertz plasmonic waveguides created via 3-D printing[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21):24422–24430.
- [49] YI Huan, QU Shi-Wei, NG K-B, *et al.* 3-D printed millimeter-wave and terahertz lenses with fixed and frequency scanned beam[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, **64**(2):442–449.
- [50] NAYERI P, LIANG Min, SABORY-GARCI? A R A, *et al.* 3-D printed dielectric reflectarrays: Low-cost high-gain antennas at sub-millimeter waves[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, **62**(4):2000–2008.
- [51] KIMIONIS J, ISAKOV M, KOH B S, *et al.* 3-D-printed origami packaging with inkjet-printed antennas for RF harvesting sensors[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, **63**(12):4521–4532.
- [52] MCKERRICHER G, TITTERINGTON D, SHAMIM A. A fully inkjet-printed 3-D honeycomb-inspired patch antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, **15**:544–547.
- [53] Rogers Corporation. [OL]. (2016) [2016-07-04]. www.rogerscorp.com.
- [54] T-Tech Inc. Conductive Ink, QP-Ink [OL]. (2016) [2016-05-27]. www.t-techtools.com.
- [55] MALLORY G O, HAJDU J B. *Electroless plating: Fundamentals and applications*[M]. Orlando, FL, USA: Noyes Publications/William Andrew Publishing, 1990.
- [56] SWISSto12 SA. [OL]. (2016) [2016-05-27]. www.swissto12.com.
- [57] GUO Cheng, SHANG Xiaobang, LANCASTER M J, *et al.* A 3-D printed lightweight X-band waveguide filter based on spherical resonators [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, **25**(7):442–444.
- [58] HONG Jia-Sheng, LANCASTER M J. *Microstrip filters for RF/microwave applications*[M]. New York, USA: Wiley, 2001.
- [59] CAMERON R J, KUDSIA C M, MANSOUR R R. *Microwave filters for communication Systems*[M]. New York, USA: Wiley, 2007.
- [60] AMARI S. Application of representation theory to dual-mode microwave bandpass filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, **57**(2):430–441.
- [61] HU Hai, WU Ke-Li, CAMERON R J. Stepped circular waveguide dual-mode filters for broadband contiguous multiplexers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, **61**(1):139–145.
- [62] GUO Cheng, SHANG Xiaobang, LI Jin, *et al.* A lightweight 3-D printed X-band bandpass filter based on spherical dual-mode resonators[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, **26**(8):568–570.
- [63] DSM Desotech Inc., Somos PerFORM [OL]. (2016) [2016-05-27]. www.dsm.com.
- [64] 3-D Systems, Inc. Accura Bluestone [OL]. (2016) [2016-07-04]. www.3dsystems.com.
- [65] HIDNERT P, DICKSON G. Thermal expansion of some industrial copper alloys[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1943, **31**:77–82.
- [66] DSM Desotech Inc., Somos 9420 [OL]. (2016) [2016-07-04]. www.dsm.com.
- [67] SHANG Xiaobang, LANCASTER M J, GUO Cheng, *et al.* W-band waveguide filters fabricated by laser micromachining and 3-D printing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, **64**(8):2572–2580.
- [68] 3-D-Parts Ltd. [OL]. (2016) [2016-07-04]. www.3dpartsltd.co.uk.

(上接第 80 页)

- [17] Jiang Z, Rui-zhang G, Shi-yu H. Comparative Studies on the Characteristics of the Fourier-Transform Infrared Spectra between Sturgeon and Shark Chondroitin Sulfates [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (郑江, 关瑞章, 黄世玉. 鲟鱼和鲨鱼硫酸软骨素红外光谱特性的比较研究. 光谱学与光谱分析), 2008(01): 106–109.
- [18] Jing-xi X, Jun-biao C, Xu-ming W. Application of infrared spectrum in organic chemistry and pharmaceutical chemistry [M]. Beijing: Science Press(谢晶曦, 常俊标, 王绪明. 红外光谱在有机化学和药物化学中的应用, 北京: 科学出版社), 2001: 13.
- [19] Wei-jie Z. Technology for complex polysaccharide study [M]. Shanghai: Scientific and Technical Press(张惟杰. 复合多糖生化研究技术, 上海: 科学技术出版社), 1987: 121, 261, 271.
- [20] Qi-ming F, Qing-bo Z, Guo-fan Z, *et al.* Inhibition mechanism of sodium hexametaphosphate on calcite [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(冯其明, 周清波, 张国范, 等. 六偏磷酸钠对方解石的抑制机理. 中国有色金属学报), 2011(02): 436–441.