

MEMS 技术中的电镀工艺及其应用*

赵广宏¹, 薛彦鹏², 汪郁东¹, 尹玉刚¹, 陈青松¹, 李 军¹

(1 北京遥测技术研究所 北京 100094

2 北京科技大学 北京 100083)

摘要: 电镀已经成为 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 技术中的一种重要加工手段, 相比于传统意义的表面处理作用, MEMS 技术中的电镀主要用于制作微结构。介绍了几种常用的以电镀为核心方法的微结构加工工艺和它们的应用领域。微结构加工工艺包括 LIGA/UV-LIGA、EFAB、PolyStrata、TSV/TGV、MetalMUMPs 等, 结合设计好的光刻、镀膜、刻蚀等辅助微工艺技术, 能够完成具有超高深宽比、多层堆叠、悬空、可动等特点的复杂三维金属微结构, 并针对不同的使用需求, 可以实现典型的微机械结构、惯性传感器、射频器件、异构集成、系统散热等功能应用, 具有广泛的实用意义。

关键词: 微电子机械系统; 电镀工艺; 微结构

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2022)01-0029-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210820001

引用格式: 赵广宏, 薛彦鹏, 汪郁东, 等. MEMS 技术中的电镀工艺及其应用[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 29-40.

Electroplating processes in MEMS technology and its application

ZHAO Guanghong¹, XUE Yanpeng², WANG Yudong¹, YIN Yugang¹, CHEN Qingsong¹, LI Jun¹

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China;

2. University of Science and Technology Beijing 100083, China)

Abstract: Electroplating has become an important processing method in MEMS technology. Compared with surface treatment in the traditional sense, industries electroplating in MEMS technology is mainly used to fabricate microstructures. This article introduces several common MEMS technologies with electroplating as the core process and their application fields, which include LIGA/UV-LIGA, EFAB, PolyStrata, TSV/TGV, MetalMUMPs, etc. In combination with other well-designed micro-process technologies such as photolithography, coating, and etching, the complex three-dimensional metal MEMS microstructure with the characteristics of ultra-high aspect ratio, multi-layer stacking, suspended and movable can be fabricated. For different application requirements, the typical functional applications can be realized, such as micromechanical structure, inertial sensor, RF device, heterogeneous integration and heat dissipation, which have a wide range of practical significance.

Key words: Micro-electromechanical system (MEMS); Electroplating process; Micro structure

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210820001

Citation: ZHAO Guanghong, XUE Yanpeng, WANG Yudong, et al. Electroplating processes in MEMS technology and its application [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 29-40.

引 言

传统意义的电镀工艺是一种利用电化学方法实现的表面处理技术, 其原理主要是利用在电荷能量传递的过程中, 电子导体和离子导体的交界处会发生氧化还原反应, 使得阴极过程析出目标金属, 在合适的参数下以获得对阴极镀件具有表面装饰、氧化防护以及提高耐磨性、导电性、反光性、抗腐蚀性等特定作用的镀层。电镀技术发展至今有着悠久的历史和丰富的研究成果, 由于电镀工艺能够在常温范围内实现水溶液中的金属离子到原子形态的转换过程, 使其广泛应用于生产生活的各行各业。

MEMS 是微电子机械系统或微机电系统的英文简称,能够将微传感器、微执行器、信号处理、控制电路、微能源、热管理及各种形式的接口,通过综合设计形成多功能于一体的集成器件或系统。MEMS 作为智能微系统实现的五大构成要素之一^[1],被认为是狭义上的微系统技术,本质上是一种实现单一或多类用途的综合性前沿技术,涉及微电子学、信息学、光学、声学、化学、流体力学、自动控制、材料科学等多学科交叉。MEMS 技术制备的器件具有微型化、集成化、稳定性高、可批量生产等特点,在信息、生物、汽车、军事等领域具有广泛的应用前景,对国家保持技术领先优势具有重要意义^[2,3]。

随着 MEMS 技术中的金属微结构器件应用需求和加工难度的不断增加,电镀已经发展为 MEMS 器件实现工艺中不可缺少的一种。电镀工艺不再限于作为表面防护层应用,而是通过微区电镀来制备 MEMS 所需的特定金属机械微结构、功能微结构、互联微结构及散热微结构等。MEMS 技术中的电镀工艺与传统电镀过程最大的不同点在于,往往需要伴随以晶圆为载体的辅助工艺步骤,如种子层制备、光刻、腐蚀、研磨抛光、激光修调、多层堆叠等加工步骤,工艺方法相对更加复杂。经过多年的发展,已经形成了一些特色性的以电镀为主的 MEMS 加工工艺方法,本文主要介绍这些常用 MEMS 技术中的电镀工艺实现步骤和它们的研制应用。

1 MEMS 技术中的电镀工艺介绍

1.1 LIGA/UV-LIGA 技术

LIGA 是德文“光刻、电铸和注塑”的缩写,也是最早的以电铸结构为主的 MEMS 加工技术^[4]。LIGA 工艺过程包括 X 光同步辐射光刻、电铸制模和注模复制步骤,工艺步骤流程如图 1 所示^[5-7]。光刻需要在导电衬底上涂厚光刻胶,一般用甲基丙烯酸甲酯 (PMMA),它的化学特性是经 X 射线照射后可以被显影剂溶解。制膜要利用电镀微结构的方法在导电衬底上沉积金属,为了不引起微结构的变形, LIGA 电镀过程要求沉积的金属具有最小的应力,且在开模的过程中不会发生粘连导致微结构损坏,一般的可用电镀材料包括金、铜、镍以及镍合金等。电镀得到的金属微结构模型称为型芯,注膜复制工艺就是通过型芯大批量生产微型器件,成型的主要方法包括注射成型和热膜压印两种。由于 X 射线有非常高的平行度和极强的辐射强度,使得 LIGA 技术能够制造出深宽比达到 500、厚度从数百微米到毫米级别、侧壁光滑且平行度偏差在亚微米范围内的三维体结构,这是其它微制造技术无法实现的。此外,采用 LIGA 技术结合多掩模套刻、掩模板线性移动、倾斜承片台、背面倾斜光刻等措施,还能制造含有叠状、斜面、曲面等结构特征的三维微小元器件。

由于 LIGA 技术需要极其昂贵的 X 射线光源和制作复杂的掩模板,其工艺成本非常高,限制了该技术在工业上的广泛应用。于是出现了一类应用低成本光刻光源和掩模的制造工艺,这种新的加工技术制造性能与 LIGA 技术相当,通称为准 LIGA 技术或 LIGA-like 技术^[8]。其中,使用紫外光源对光刻胶曝光的 UV-LIGA 技术是一种成本和步骤都相对简单的工艺,最常用的是采用 SU-8 负型胶代替 PMMA 正胶作为光敏材料,可以减少曝光时间并提高加工效率。通常加工厚度可达 0.5 mm 以上,深宽比达 20:1 以上,侧壁陡直、表面平整,是最为常用的 MEMS 加工工艺之一。

1.2 EFAB 技术

EFAB (Electrochemical Fabrication) 是美国南加州大学的 Adam Cohen 等人,基于 SFF (Solid Freeform

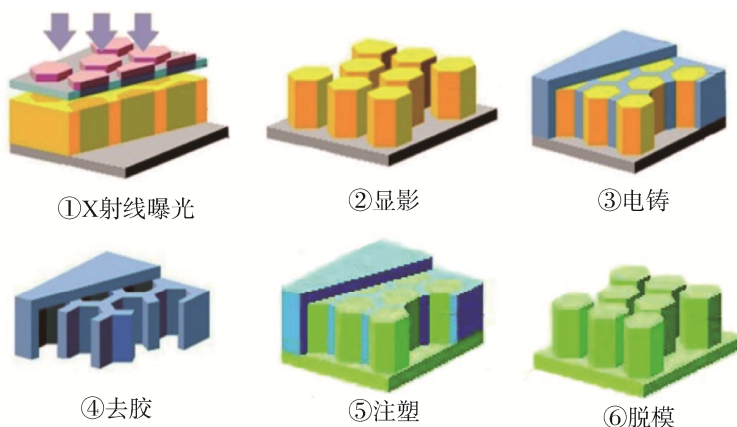


图 1 LIGA 技术的工艺过程
Fig. 1 Fabrication process of LIGA

Fabrication) 的分层制造原理开发出来的一种金属微结构 MEMS 加工技术, 已有近 20 多年的发展历史, 具有真正的三维微加工能力^[9]。该技术实质上是金属结构层电沉积、牺牲层电沉积、平坦化 3 个主要工艺环节的组合与复用, 并以层层叠加的方式来加工金属微结构和零件, 每层沉积厚度在两微米到数十微米范围。典型的 EFAB 技术工艺原理如图 2 所示, 通过合理组合和复用 EFAB 的 3 个工艺环节, 它可以制造厚度足够高的三维复杂金属或合金微结构。EFAB 技术有其自身显著的特点, 它是最早的将微结构设计和电镀技术融合的真正 3D 微结构器件标准化的技术, 在设计上可以依靠完全标准的商业化 CAD 软件完成结构的分层, 首次将复杂微结构器件的实现变成可能, 而使用该技术加工的器件, 无论从微结构尺度、复杂程度、深宽比等要求的角度, 都是电镀 3D 器件的各项技术中最为突出的, 尤其是在多层精细化的微结构器件制备领域, 至今仍是其他三维结构电镀技术所无法比拟的。

1.3 PolyStrata 技术

PolyStrata 工艺是一种专门用于制备微同轴结构的射频 MEMS 器件技术^[10,11], 该技术始于上世纪末, 最早由美国的罗门哈斯有限公司提出概念并逐步优化制备过程。它的核心过程是通过光刻、电镀、平面化获得所需要的形状, 包括多层金属和光刻掩膜的沉积过程。图 3 所示为 PolyStrata 制造工艺技术流程^[12]。沉积金属一般选用电导率高、成本低的铜, 每层铜的厚度一般均采用 50 μm 或 100 μm 两种层高结构, 加工层数也以 5 层结构和 10 层结构的器件为主。相比于 EFAB 技术, PolyStrata 不需要单独电镀牺牲层金属, 而是最后通过释放孔去除光刻胶, 获得被空气包围的中央导体和四周封闭的接地面。PolyStrata 技术主要针对高性能的射频微同轴器件和微系统产品开发, 加工的器件结构更加标准化, 有固定的层数和层高要求, 并成功引入了聚合物作为绝缘支撑材料, 突破了以往的全金属器件的限制。

1.4 TSV/TGV 技术

TSV (Through Silicon Vias) 硅通孔互联技术的诞生, 主要是为了解决半导体芯片封装的更高要求, 通过背面的垂直电连接为芯片堆叠提供更大的空间效率和互联密度, 进而有可能实现打破摩尔定律的局限性。这种技术的优点在于结构在垂直方向具有最短的路径, 一方面缩短了信号的传输路径, 减小了电阻, 提高了芯片的高频性能并降低了发热量; 另一方面减少了互连结构在芯片上的面积, 在相同面积下形成的堆叠结构具有更高的性能和更多的功能^[13,14]。随着 TSV 技术的发展, 该类技术已经不仅仅局限于

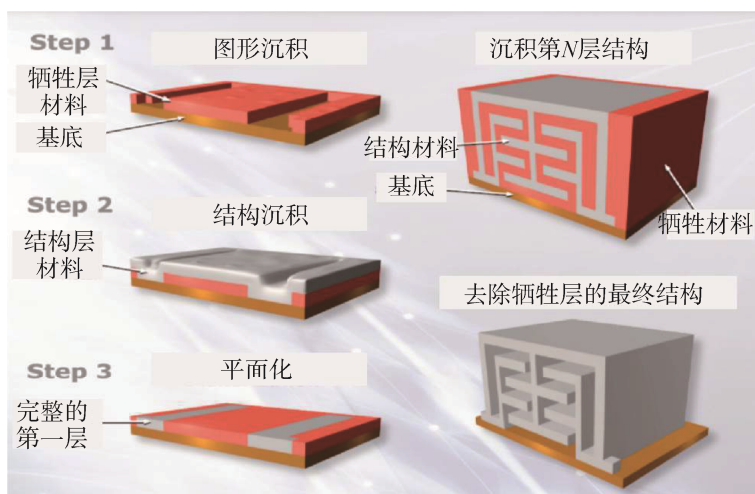


图 2 EFAB 技术的工艺过程

Fig. 2 Fabrication process of EFAB

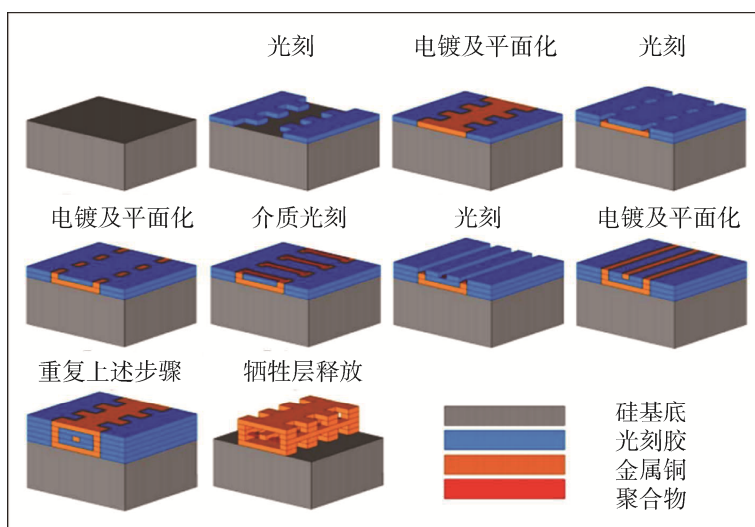


图 3 Polystrata 技术工艺过程

Fig. 3 Fabrication process of Polystrata

半导体芯片的封装互联, 同样发展出适合于 MEMS 芯片的封装互联, 也从 TSV 扩展到 TGV (Through Glass Vias) 等不同基材的垂直通孔互联工艺。相比于半导体互联 MEMS 技术中的 TSV/TGV 技术的主要不同点在于, 为满足 MEMS 敏感芯片的力学性能和工艺兼容性要求, TSV/TGV 技术制备的互联通孔直径和通孔深度更大^[15]。因此, 填孔工艺不能简单参照已有半导体的 TSV 填孔技术。一般的 TSV/TGV 技术的主要工艺步骤包括通孔结构制备、孔内绝缘层/种子层生长、电镀铜填孔、孔内铜柱的平坦化等。其工艺流程如图 4 所示。

1.5 MetalMUMPs 技术

MUMPs (The Multi-User MEMS Processes) 工艺是 MEMSCAP 公司为工业机

构、科研院校的 MEMS 器件的研究和制造提供一套可靠、高效、开放的商业化标准工艺, 客户可使用标准的工艺手册来自由选择多种工艺版图层的组合, 完成器件的设计和优化。用户需购买一个或几个标准单元面积 ($1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$), 然后提交自己的设计版图, 8 到 12 周后完成产品。在产业界, MUMPs 工艺极大地降低了新产品开发的风险, 促使新产品能够不断推出。MUMPs 主要包含三种标准工艺, 即多晶硅表面加工工艺 Poly MUMPs、绝缘片上硅微机械工艺 SOI MUMPs、多层电镀镍工艺 MetalMUMPs。其中, MetalMUMPs 是以电铸镍、电铸金为主体结构的微器件制造技术, 金属结构通常由镍构成, 厚度一般为 $18\text{ }\mu\text{m} \sim 22\text{ }\mu\text{m}$, 可用作主要的结构材料层和电互联层, 掺杂多晶硅作电阻、其他机械结构或交叉电通路, 氧化硅作牺牲层 (PSG), 电绝缘层则由氮化硅来完成。镍金属结构侧壁的接触电阻通过金覆盖层实现, 硅衬底中通过氧化硅刻蚀的沟槽可作为另外的电或热绝缘层, 使用 MetalMUMPs 工艺已可以加工继电器、射频开关和微流体器件等。具体的 MetalMUMPs 标准工艺流程如图 5 所示^[16]。

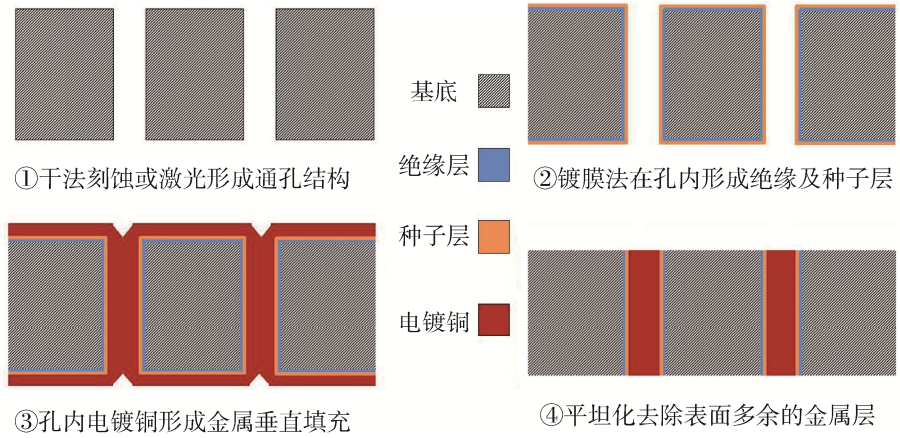


图 4 TSV/TGV 技术工艺过程

Fig. 4 Fabrication process of TSV/TGV

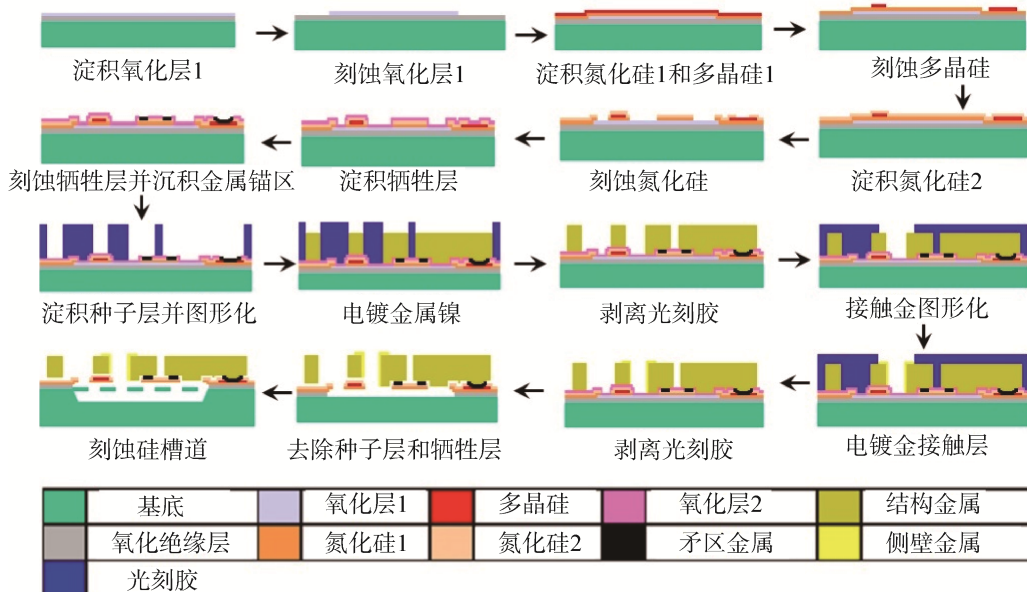


图 5 MetalMUMPs 工艺过程

Fig. 5 Fabrication process of MetalMUMPs

2 MEMS 技术中的电镀应用介绍

2.1 金属微结构

金属微结构能够作为微系统组成的传动装置、支撑结构、减震结构、执行器等进行使用。UV-LIGA 和 EFAB 技术是最为常用的机械结构实现方法,如图 6 所示。其中,UV-LIGA 技术主要针对深宽比要求相对高且结构相对简单的金属微结构,如高深宽比的齿轮、支撑架、微管等。目前报道的 UV-LIGA 工艺中已知的最大的深宽比可以达到 190:1 以上,该结果由美国路易斯安那大学通过使用 Cargille 折射率匹配液进行 SU-8 光刻间隙补偿方法后得到^[17]。而 EFAB 工艺可以实现比 UV-LIGA 工艺更为复杂的金属微结构,早在上世纪 90 年代,美国 Microfabrica 公司就将该项技术走向了商业化,专门开发了针对 EFAB 技术的商用设备和软件,实现了 EFAB 自动化生产,主要用于功能器件的微增材制造,如微型齿轮、微弹簧、微型镊子^[18]。该公司于 2019 年被半导体测试公司 Technoprobe 收购,主要用于增强半导体测试探针等产品的制造能力。

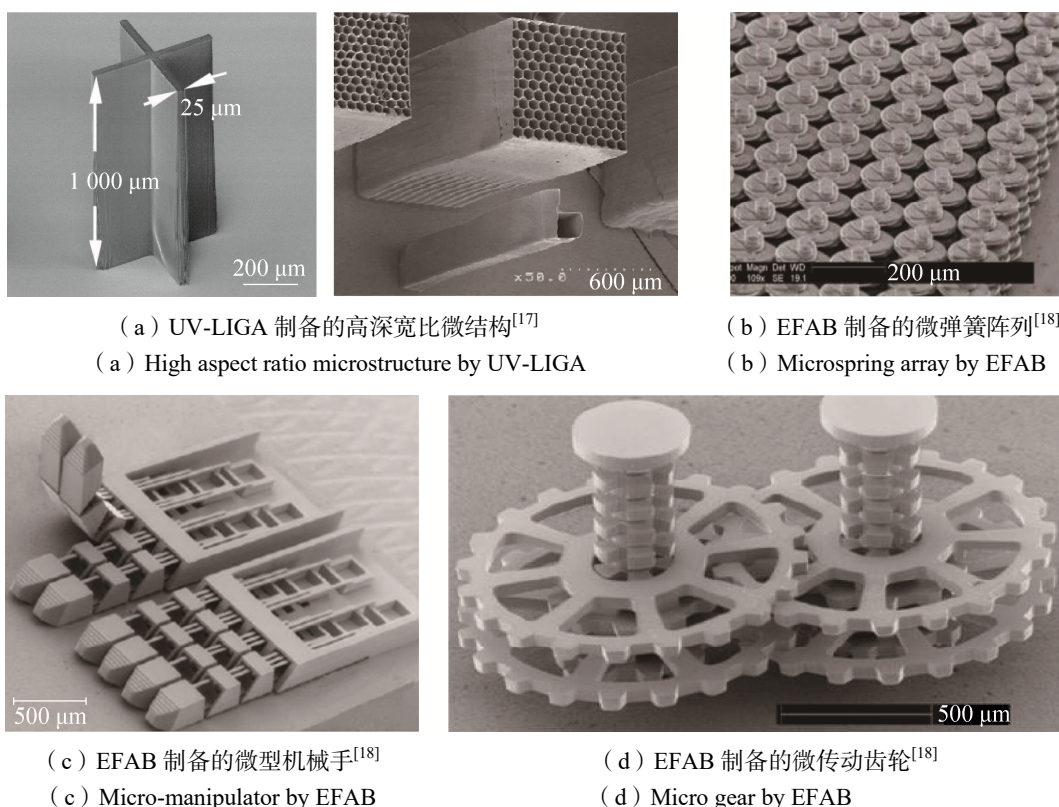


图 6 UV-LIGA 及 EFAB 制备的金属微结构

Fig. 6 Micro structures by UV-LIGA and EFAB

2.2 惯性传感器

惯性传感器是 MEMS 技术中的一大类代表性应用, MEMS 惯性传感器主要包括 MEMS 陀螺仪、MEMS 加速度计、惯性开关等典型产品,如图 7 所示。集成化、低功耗、低成本的 MEMS 惯性传感器主要满足民用消费需求,高性能、特殊应用环境下的 MEMS 传感器主要应用于军事领域。利用体工艺或表面微加工工艺制造惯性传感器往往需要昂贵的设备,除光刻设备以外, DRIE、阳极键合、气相沉积等设备都是十分常用的。而以电镀技术为主体结构实现的 MEMS 惯性传感器主要采用紫外线光刻和电铸设备,如 UV-LIGA 技术可以用来制备陀螺、加速度计、惯性开关等^[19-24]。此外,采用标准的 Meatal MUMPs 技术可以制备更加复杂的惯性传感器结构^[25,26], 这为低成本的 MEMS 惯性传感器提供了新的途径。

2.3 射频器件

电镀工艺在制备 MEMS 射频器件方面有着先天的技术优势,尤其是以电镀铜、金等具有高电导率

金属为主体结构的射频器件。Microfabriba 早期就通过 EFAB 技术进行射频 MEMS 器件产品的开发, 如图 8 所示, 这些器件包括微型体式电感、可变电容器、高性能的毫米波滤波器等^[18]。

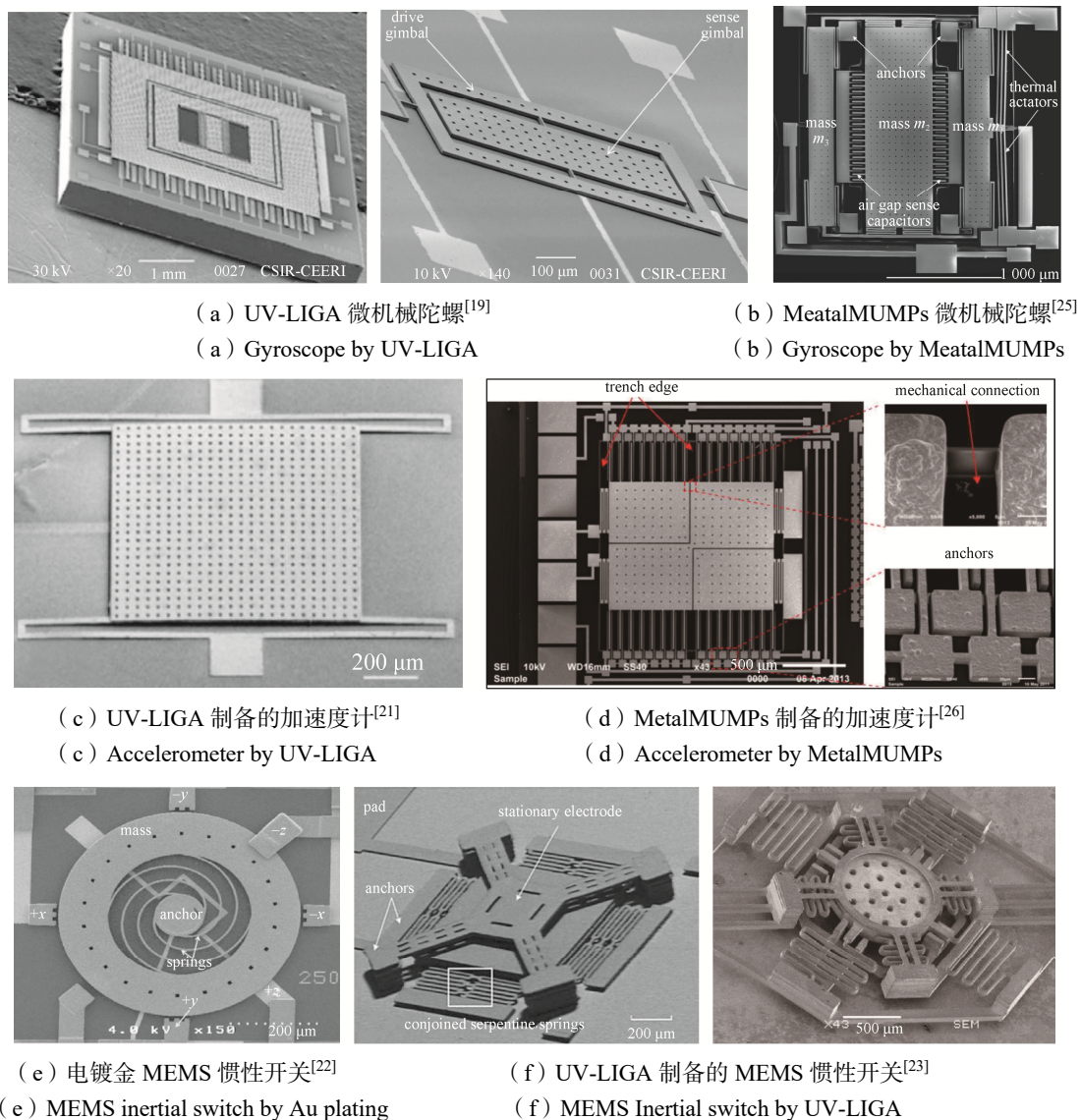


图 7 电镀工艺制备的惯性传感器

Fig. 7 Inertial sensor prepared by electroplating

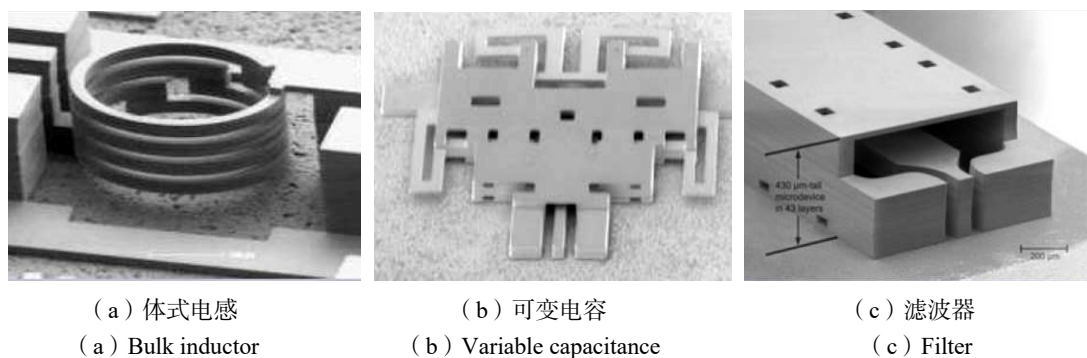


图 8 EFAB 工艺制备的射频 MEMS 器件^[18]

Fig. 8 RF MEMS device prepared by EFAB

PolyStrata 技术的出现,极大地拓展了通过电镀技术制备的射频器件的应用范围。从 2002 年开始,美国科罗拉多大学和 Nuvotronics 有限公司一直致力于研究基于 PolyStrata 工艺的微同轴结构来实现高性能射频器件,研究人员通过该技术不但实现了功分器、耦合器、滤波器等一系列性能优异的射频器件^[27],而且实现了宽带天线、功率放大器、相控阵天线、太赫兹阵列等系统级射频组件,如图 9 所示^[28-31]。

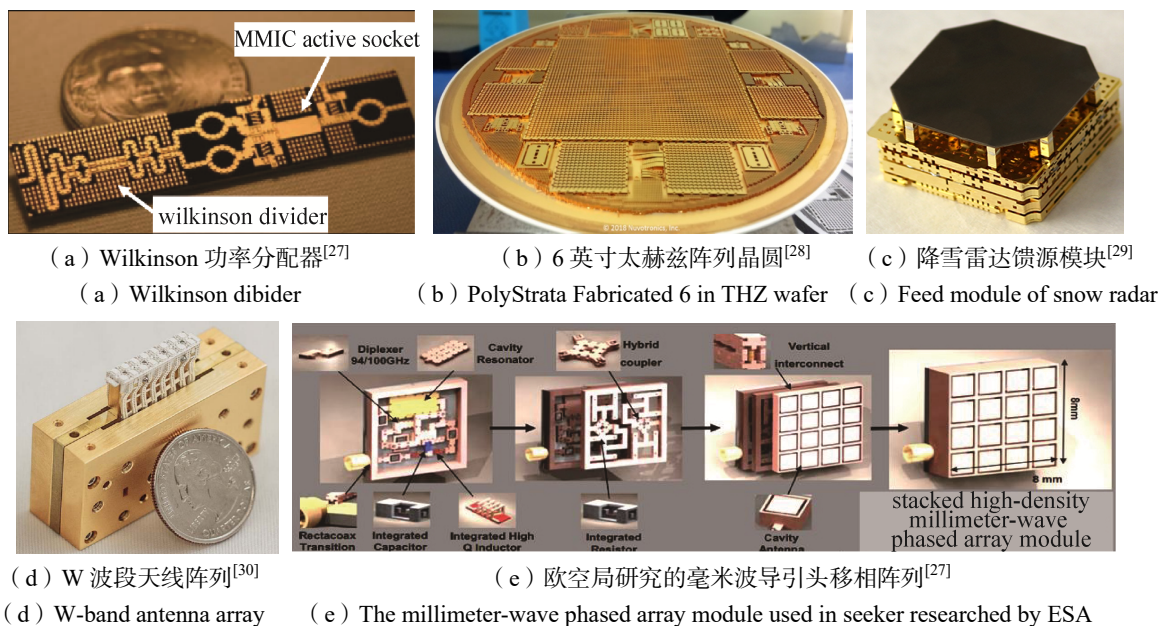


图 9 PolyStrata 工艺制备的射频 MEMS 器件及模块
 Fig. 9 RF MEMS devices and modules prepared by PolyStrata

传统的薄膜电镀技术也有十分典型的射频 MEMS 器件的应用,最为常见的是以电镀金薄膜为主的射频 MEMS 开关^[32]。此外,商业化的 MetalMUMPs 工艺也为射频器件的研制提供了相当便利的条件,采用标准工艺可以很好地实现电热驱动射频开关、移相器、滤波器等一系列射频器件,如图 10 所示^[33-36]。

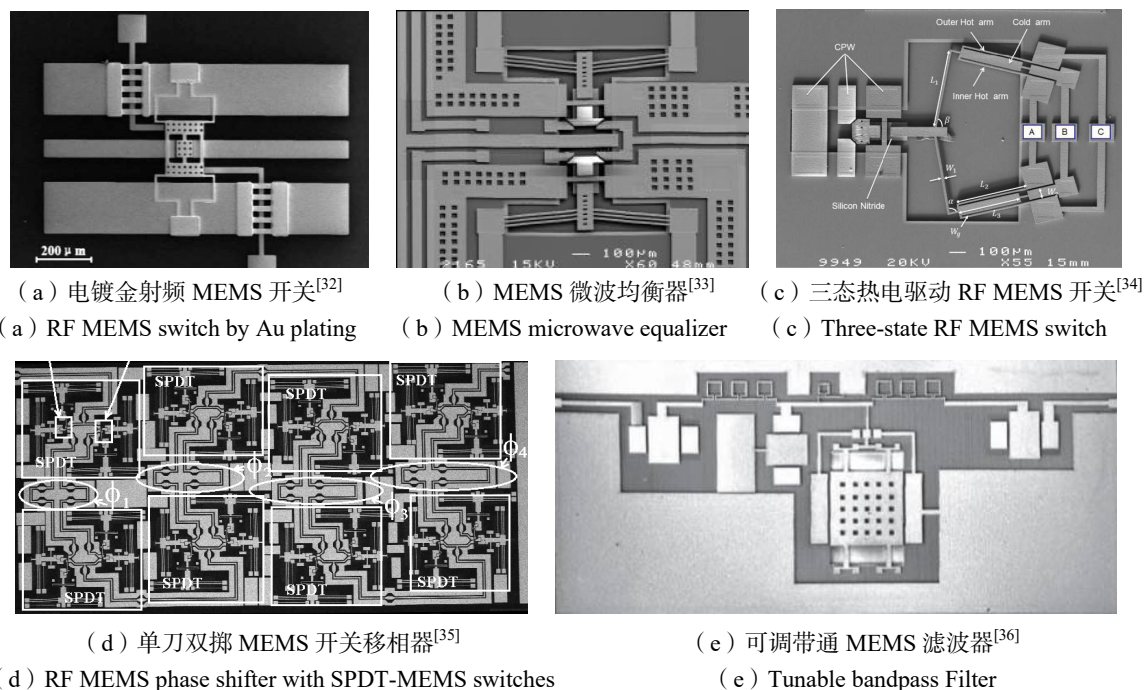
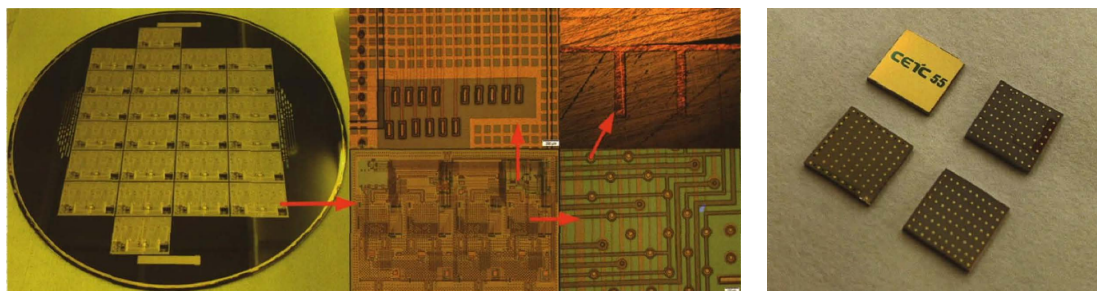


图 10 MetalMUMPs 工艺制备的射频 MEMS 器件
 Fig. 10 RF MEMS devices prepared by MetalMUMPs

2.4 异构集成

通过 TSV/TGV 方式实现垂直互联是射频微系统技术实现异构集成的重要方式之一。国内, 南京微电子器件研究所已经建立起了基于 8 英寸硅晶圆的 TSV 射频转接板的三维异构集成的工艺技术, 如图 11 所示, TSV 的尺寸为 $(30:200)\mu\text{m}$, 支持多层硅晶圆片级的堆叠, 并且利用该技术已经研制出了 38 GHz 异构集成的收发芯片和 4 层硅片堆叠集成的 X 波段硅基变频芯片^[37]。



(a) 8 英寸集成硅孔、多层布线、微焊盘的硅转接板圆片

(a) 8 wafer patterned with TSV, RDL and micro bumps

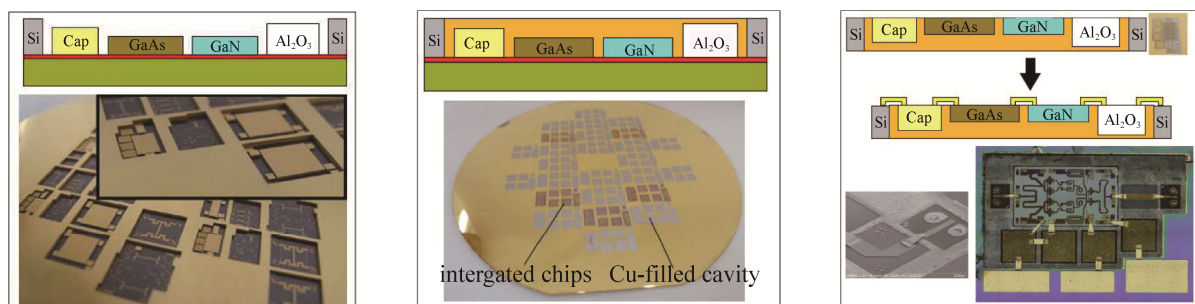
(b) 硅基三维异构集成样品

(b) Modules packaged by TSV

图 11 硅基 TSV 三维异构集成样品^[37]

Fig. 11 Silicon-based heterogeneous integrated module by TSV

2019 年美国科罗拉多大学博尔德分校的 Zoya Popovic 等人发表文章, 提出了一种叫作 MECA (Metal-Embedded Chip Assembly) 的系统集成技术^[38]。该方法采用电镀铜技术可以实现硅集成电路、陶瓷电容、陶瓷耦合器、GaAs 集成电路等多芯片的异构集成, 并通过电镀金桥接设计代替了传统的金丝引线, 如图 12 所示。这种近乎于全金属集成的封装形式具有优异的散热和电学性能, 并且优化的金桥结构相比于传统的微带线具有更低的损耗和色散。



(a) 组装芯片和载片晶圆

(a) Assembled chips and temporary wafer

(b) 电镀铜后的组装芯片

(b) Cu heat spreader is electroformed

(c) 多芯片电镀金桥

(c) Air-bridge Au MECA

图 12 铜基 MECA 三维异构集成样品^[38]

Fig. 12 Cu-based heterogeneous integrated module by MECA

2.5 散热微结构

MEMS 器件组成的微系统具有集成度高、微型化、功能强大等特点, 但同时该结构对系统散热性能有很高的要求, 尤其是伴随着 GaN 等三代半导体材料的逐步应用, 导致系统的散热密度和散热难度急剧增大, 具体体现为高面热流密度、高体热流密度和热堆叠^[39]。降低系统工作时器件的温度, 是有效提升器件使用寿命的方法。电镀技术能够沉积高导热的金属铜作为通道体结构或辅助结构, 形成特有的微型散热片结构, 如图 13 所示。美国佐治亚理工大学通过 TSV 辅助结构形成了以硅为主体的针翅散热阵列微流通道^[40]。电子科技集团三十八所针对大功率集成微波散热需求, 研究了 TGV 结构的高导热转接板^[41]。上海交通大学通过采用 UV-LIGA 技术和氮化铝陶瓷组合研制了高性能的液体微流散热片, 并就电镀散热片的形状以及形状对散热的影响进行了研究^[42-44]。

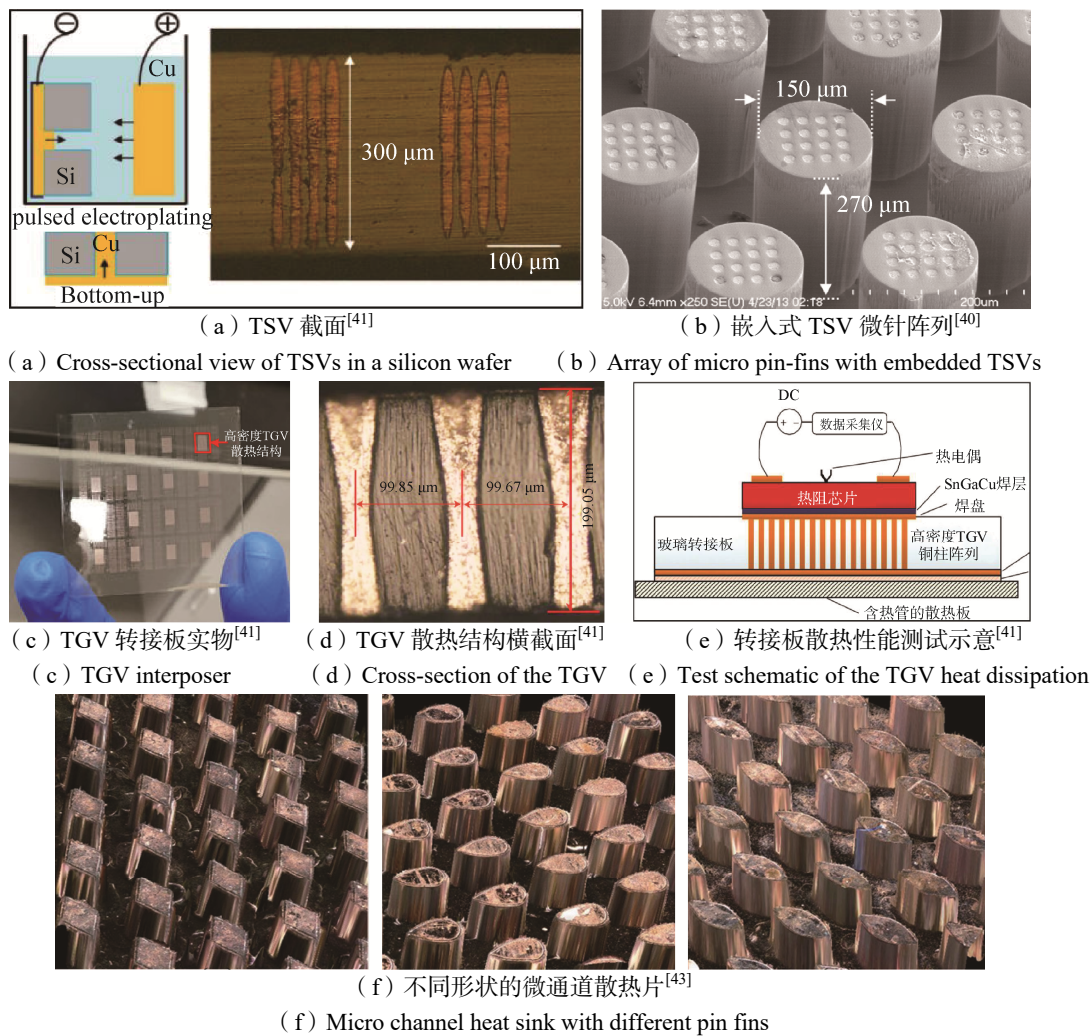


图 13 电镀工艺制备的散热微结构

Fig. 13 Heat dissipation microstructure prepared by electroplating

3 结束语

本文介绍了 MEMS 技术中以电镀为主的几种典型加工工艺的基本流程和技术应用，主要包括 LIGA/UV-LIGA、EFAB、TSV/TGV、PolyStrata、MetalMUMPs 等。表 1 是针对每项 MEMS 工艺技术的特点及应用场景的对比总结，这些技术将辅助工艺与电镀工艺相结合可以制造出多种类器件，满足 MEMS 技术在微结构、传感器、射频器件、异构集成、系统散热等方面的开发需求。

表 1 MEMS 工艺及其应用对比

Table 1 Comparison of MEMS process and its application

工艺名称	工艺步骤	工艺特点	工艺应用
LIGA/ UV-LIGA	X 光辐射或紫外光光刻，电 镀制模和注模复制	高深宽比微型器件制备技术	高深宽比齿轮、微管等；陀螺、加速度 计；散热片等
EFAB	金属结构层电沉积、牺牲层 电沉积、平面化	多层精细化的三维复杂金属微结 构制备技术	复杂的金属微结构，微增材制造齿轮、 弹簧等，射频 MEMS 器件产品
PolyStrata	光刻、电镀、平面化	异质材料为支撑的金属同轴微结 构制备技术	高性能射频同轴器件及系统级射频同轴 组件
TSV/TGV	通孔制备、电镀	高深宽比阵列通孔金属填充技术	MEMS 芯片的封装互联，散热微流通道
MetalMUMPs	氧化层沉积、刻蚀、光刻、 电镀、剥离	标准化高效率小尺度金属结构微 加工技术	更加复杂的惯性传感器结构，射频器件

电镀工艺有着其它微加工技术不具备的典型优势。其一, 电镀工艺是一种典型增材加工方法, 能够采用类似于多层堆叠的加法模式, 较容易形成三维器件结构, 为复杂金属微器件制备提供了良好途径; 其二, 电镀工艺不需要昂贵的真空环境设备, 尤其是以电镀铜和电镀镍为主的器件应用, 是潜力极大的低成本、批量化加工方法。综上所述, 能够实现复杂金属微结构和典型领域功能的高端电镀工艺, 必将是未来微电子机械系统发展的一大助力。

参考文献

- [1] 尤政. 智能制造与智能微系统[J]. 中国工业和信息化, 2019(12): 50–52.
- [2] 王国栋, 邢朝洋, 李男男, 等. 微系统技术综述[C]//第四届航天电子战略研究论坛论文集(新型惯性器件专刊), 2018.
- [3] 马福民, 王惠. 微系统技术现状及发展综述[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(6): 12–19.
MA Fumin, WANG Hui. Overview of microsystem technology and its development[J]. Electronic Components & Materials, 2019, 38(6): 12–19.
- [4] HRUBY J. LIGA technologies and applications[J]. Mrs Bulletin, 2001, 26(4): 337–340.
- [5] BECKER E W, EHRFELD W, HAGMANN P, et al. Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic moulding (LIGA process)[J]. Microelectronic Engineering, 1986, 4: 35–56.
- [6] LEHR H, EHRFELD W. Advanced microstructure products by synchrotron radiation lithography[C]//In Proc. of the European Symposium on Frontiers in Science and Technology with Synchrotron Radiation, Aix-en-Provence, France, April 5–8, 1994.
- [7] HU Jianfei, GUO Jinjin. The development of microsystem technology[C]//IEEE 2017 2nd International Conference on Integrated Circuits and Microsystems, 2017: 96–100.
- [8] CUI Z, LAWES R A. Low cost fabrication of micromechanical systems[J]. Microelectronic Engineering, 1997, 35: 389.
- [9] ADAM COHEN, URI FRODIS, TSENG Fangang, et al. EFAB: low-cost automated electrochemical batch fabrication of arbitrary 3-D microstructures [C]//SPIE 1999 Santa Clara CA, 1999.
- [10] SAITO Y, FONTAINE D, ROLLIN J M, et al. Monolithic micro-coaxial power dividers[J]. Electronics Letters, 2009, 45(9): 469–470.
- [11] VANHILLE K, et al. Ka band surface-mount directional coupler fabricated using micro rectangular coaxial transmission lines[C]//IEEE MTT-S IMS Digest, 2008: 1549–1552.
- [12] ZHOU Hongyu, SUTTON N A, DEJAN S F. Wideband W-band patch antenna[C]//Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2011.
- [13] 赵璋, 董志义. 3D-TSV 技术——延续摩尔定律的有效通途[J]. 电子工业专用设备, 2011(3): 10–16.
ZHAO Zhang, DONG Zhiyi. The 3DTSV packaging technologies——Effective way of continuation Moore's law[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2011(3): 10–16.
- [14] 邓丹, 吴丰顺, 周龙早, 等. 3D 封装及其最新研究进展[J]. 微纳电子技术, 2010, 47(7): 443–450.
DENG Dan, WU Fengshun, ZHOU Longzao, et al. 3D Package and Its Latest Research[J]. Micronanoelectronic Technology, 2010, 47(7): 443–450.
- [15] 王宇哲, 汪学方, 徐明海, 等. 应用于 MEMS 封装的 TSV 工艺研究[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(1): 62–67.
WANG Yuzhe, WANG Xuefang, XU Minghai, et al. Research of TSV Technology for MEMS Packaging[J]. Micronanoelectronic Technology, 2012, 49(1): 62–67.
- [16] MEMSCAP. MetalMUMPs Design Handbook[M]. Rev. 4. 0. Copyright © 2002–2012.
- [17] YANG Ren, WANG Wanjun. A numerical and experimental study on gap compensation and wavelength selection in UV-lithography of ultra-high aspect ratio SU-8 microstructures[J]. Sensors and Actuators B, 2005, 110(2): 279–288.
- [18] Microfabrica Inc. Application examples[DB/OL]. [2007-11-11]. http://www.microfabrica.com/applications/applications_iofo.htm.
- [19] ANKUSH JAIN, RAM GOPAL. Formation of thick SU-8 mold for the fabrication of UV-LIGA based nickel micro-gyroscope structures[J]. Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials, 2014, 44(4): 330–335.
- [20] ANKUSH JAIN, RAM GOPAL. Reliability testing of Ni-Fe as structural material in MEMS gyroscope[J]. Journal of

- Micro/ Nanolithography, Mems, and Moems, 2016, 15(4): 040501.
- [21] MD. S M, ZEYNEP C B, DONALD P B. Design, fabrication and characterization of flexible MEMS accelerometer using multi-Level UV-LIGA[J]. Sensors and Actuators A, 2017,263:530–541.
- [22] LUKE J C, COLLIN R B. Triaxial inertial switch with multiple thresholds and resistive ladder readout[J]. Sensors and Actuators A, 2013,195: 191–197.
- [23] CAI Haogang, DING Guifu, YANG Zhuoqing, et al. Design, simulation and fabrication of a novel contact-enhanced MEMS inertial switch with a movable contact point[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(11): 115033.
- [24] DU Liquan, ZHAO Ming, WANG Aoan, et al. Fabrication of novel MEMS inertial switch with six layers on a metal substrate[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(9): 2025–2032.
- [25] SHAKOOR R I, BAZAZ S A, BURNIE M, et al. Electrothermally actuated resonant rate gyroscope fabricated using the MetalMUMPs[J]. Microelectronics Journal, 2011, 42(4): 585–593.
- [26] QU Peng, QU Hongwei. Design and characterization of a fully differential MEMS accelerometer fabricated using MetalMUMPs technology[J]. Sensors, 2013, 13: 5720–5736.
- [27] ZOYA POPOVIC. Micro-coaxial Micro-fabricated feeds for phased array antennas[C]//2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2010.
- [28] JARED WILLIAMS JORDAN. Monolithically fabricated 4096-Element, PolyStrata®Broadband D-band array demonstrator[C]//2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2019.
- [29] Nuvotronics. Nuvotronics[EB/OL]. <http://www.nuvotronics.com>.
- [30] BENJAMIN L C, GREGORY A S. Microfabricated dual-polarized, W-band antenna architecture for scalable line array feed[C]//2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015.
- [31] 焦海龙, 赵广宏, 李文博, 等. RF MEMS 国内外现状及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2017, 38(5): 1–10.
JIAO Hailong, ZHAO Guanghong, LI Wenbo. RF MEMS: State of arts and development trend[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(5): 1–10.
- [32] LI Muhua, ZHAO Jiahao, YOU Zheng. Design and fabrication of a low insertion loss capacitive RF MEMS switch with novel micro-structures for actuation[J]. Solid-State Electronics, 2017, 127: 32–37.
- [33] LEI Han. A reconfigurable microwave equalizer with different maximum attenuations based on RF MEMS switches[C]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(1): 17–18.
- [34] ZHU Yanqing, HAN Lei, WANG Lifeng, et al. A novel three-state RF MEMS switch for ultrabroadband (DC-40GHz) applications[J]. IEEE Electron Device Letters. 2013, 34(8): 1062–1064.
- [35] MAHER B K, RAAFAT R M, SAFIEDDIN S N. A novel latching RF MEMS phase shifter[C]. 2014 44th European Microwave Conference (EuMC), 2014.
- [36] LANG Leijie, XIA Yu, LI Xiuhan, et al. Fabrication and characteristics of tunable bandpass filter using MetalMUMPS technology[C]//Proceedings of the 2011 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2011: 249–253.
- [37] 郁元卫, 张洪泽, 黄旻, 等. 硅基射频微系统三维异构集成技术[J]. 固体电子学研究进展, 2019, 39(3): 封 3.
YU Yuanwei, ZHANG Hongze, HUANG Min, et al. Silicon based RF microsystem using 3D heterogeneous intergration technology[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2019, 39(3): seal 3.
- [38] JOSÉ ANTONIO ESTRADA. Metal-embedded chip assembly processing for enhanced RF circuit performance[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(9): 3537–3546.
- [39] 胡长明, 魏涛, 钱吉裕, 等. 射频微系统冷却技术综述[J]. 现代雷达, 2020, 42(3): 1–11.
HU Changming, WEI Tao, QIAN Jiyu, et al. A review of the cooling technologies for RF microsystems[J]. Modern Radar, 2020, 42(3): 1–11.
- [40] OH H, GU J M, HONG S J, et al. High-aspect ratio through-silicon vias for the integration of microfluidic cooling with 3D microsystems[J]. Microelectronic Engineering, 2015, 142: 30–35.
- [41] 王强文, 郭育华, 刘建军, 等. 高散热性能 TGV 转接板[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(2): 177–183.
WANG Qiangwen, GUO Yuhua, LIU Jianjun, et al. High heat dissipation performance of the TGV interposer[J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(2): 177–183.

- [42] ZHAO Junhong, WANG Yan, DING Guifu, et al. Design, fabrication and measurement of a microchannel heat sink with a pin-fin array and optimal inlet position for alleviating the hot spot effect[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(11): 115013-1-115013-9
- [43] YANG Dawei, JIN Zhiyu, WANG Yan, et al. Heat removal capacity of laminar coolant flow in a micro channel heat sink with different pin fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113: 366-372.
- [44] YANG Dawei, WANG Yan, DING Guifu, et al. Numerical and experimental analysis of cooling performance of single-phase array microchannel heat sinks with different pin-fin configurations[J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2017, 112: 1547-1556.

[作者简介]

赵广宏 1984 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为传感器及 MEMS 工艺技术。

薛彦鹏 1983 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电子电镀及其技术应用。

汪郁东 1996 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为 MEMS 工艺技术。

尹玉刚 1982 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为 MEMS 与传感器。

陈青松 1972 年生, 硕士生导师, 研究员, 主要研究方向为传感器及仪器仪表。

李 军 1963 年生, 助理工程师, 主要研究方向为特种元器件测试。

(本文编辑: 杨秀丽)