中国科学: 化学 2023 年 第 53 卷 第 10 期: 1954 ~ 1969
SCIENTIA SINICA Chimica chemcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述 芯片制造电子电镀表界面科学基础专刊

基于电化学微加工技术的多元兼容集成制造工艺及其应用

蔡涵[1,2], 李洪涛[1,2], 孙云娜[1*], 王艳[1], 汪红[1], 丁桂甫[1]

1. 上海交通大学先进微纳加工技术国家级重点实验室, 上海 200240
2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240
*通讯作者, E-mail: Cecilia_Sun@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-07-14; 接受日期: 2023-08-16; 网络版发表日期: 2023-08-25
国家重点基础研究发展规划(编号: 2021YFB2022800)和国家自然科学基金(编号: 62104141)资助项目

摘要 随着摩尔定律日益趋近其发展极限, 高集成、多功能微机电系统 (MEMS) 器件为智能化应用的发展提供持续不竭的动力. 若要实现兼容更多功能部件的系统集成, 关键是要突破多元材料、复杂结构难以异质异构集成制造的工艺难题. 基于电化学微加工的多元兼容集成制造技术, 以其低温且易于集成的工艺属性展现了材料多样性、结构多样性和工艺多样性兼容集成的潜力, 提供了有效解决上述难题的优势技术途径, 为面向重大需求的高性能、智能化、微型化的MEMS器件奠定技术基础. 本文对典型MEMS微加工技术的兼容性进行分析, 阐述基于电化学微加工技术的多元兼容集成制造工艺的技术内涵、发展潜力、关键技术和阶段成果, 并进一步探讨了后续发展亟需解决的基础科学问题.

关键词 电化学微加工, 多元兼容集成制造, MEMS微加工技术, 掩膜电镀, 功能器件系统集成

1 引言

纵观半导体行业的发展历史, 集成电路 (IC) 的集成度和工艺节点分别按照“摩尔定律”的翻番规律和缩减趋势不断地延续[1], 随着特征尺寸逐步逼近物理极限, 工艺的迭代速度已有所放缓, 功耗与性能难以平衡, 技术瓶颈制约了生产制程的发展步伐, 物理效应、芯片功耗和经济效益成为现阶段集成电路的发展瓶颈[2~4]. 各大研究机构一方面积极探索新型的可替代结构和微缩工艺, 力求在维持功耗的同时提升芯片性能并尽可能缩小空间尺寸; 另一方面则以应用需求为导向, 侧重尝试将不同功能芯片或异质异构元器件堆叠互联以实现多元兼容的集成效果[5,6]. 跟随硅基与非硅基微机电系统 (MEMS) 技术的发展, 系统芯片不再拘泥于传统IC技术下的微型电路模块, 而是利用先进MEMS工艺将微机械结构与电路系统高度集成在同一块载体, 成为探索后摩尔时代发展的关键路径之一.

市场需求和技术创新驱动了产品的发展进程, 图1所示为IC和MEMS工艺技术及其行业的发展历程[7~11]. 自2007年以来, 以智能手机为代表的消费电子产品引领了MEMS传感器的大规模商业化应用, 初步展示了多功能集成的优势和潜力. 此外, 除了以表面硅和体

引用格式: Cai H, Li H, Sun Y, Wang Y, Wang H, Ding G. Multi-compatible integrated manufacturing process and applications based on electrochemical micromachining technology. *Sci Sin Chim*, 2023, 53: 1954–1969, doi: 10.1360/SSC-2023-0144

© 2023 《中国科学》杂志社

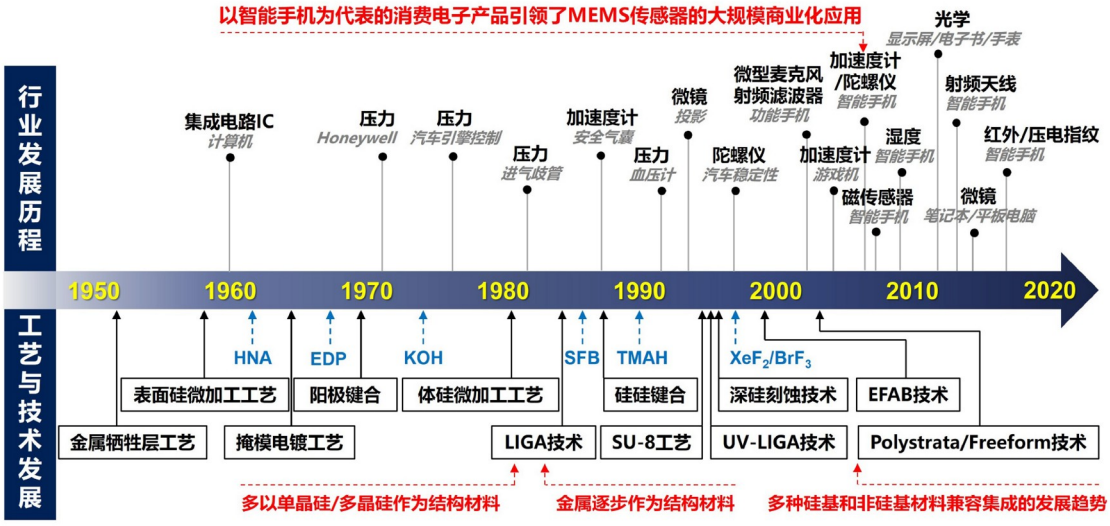

图 1　IC和MEMS工艺技术及其行业的发展历程 (网络版彩图)

Figure 1　The development process of IC/MEMS technology and its industry (color online).

硅工艺为主的硅基微加工技术, 伴随着LIGA工艺和聚合物工艺的开发, 以金属为代表的非硅基微加工技术进一步拓展了MEMS工艺的多样化发展, 多功能器件制造将成为推进硬件技术发展的新动力.

多种类型功能器件系统集成的发展方向使得芯片发展从一味地追求极限尺寸转向更为有效地将各类功能器件高密度多兼容的集成制备, 若要实现多类型功能微结构的一体化集成制造, 需要先解决多种材料、复杂结构异质异构集成的工艺难题[12]. 本文首先分析了典型的MEMS工艺以及基于典型工艺和掩膜电镀工艺所形成的标准化工艺, 并重点介绍了满足多种功能器件集成需求的多元兼容MEMS集成制造工艺, 该工艺技术以电化学成型和叠层制备作为技术路线, 配合基于掩膜电镀的通用化图形化方法和高选择性化学牺牲层工艺, 兼容多样性材料、结构和工艺, 实现一体化集成的三维MEMS微结构, 以适应多功能集成器件的发展趋势和应用需求.

2　典型MEMS工艺的兼容性分析

历经多年的开发与研究, MEMS器件及其工艺技术日益成熟, 相较于同属微纳加工尺度的IC制造技术, 尽管MEMS技术是以IC技术为基础演进发展而来, 但两者在结构、工艺、材料、机制、信号接口等方面仍旧存在显著的差别, 表1所示为MEMS与IC器件的主要区别. 从本质上来说, IC器件主要是通过表面微加工工艺构建平面微结构, 借助半导体材料特性在表面之下的结构内部形成复杂的电路系统, 并最终采用各种封装技术形成无活动性的零部件. 而MEMS技术整体拥有较高的灵活性和自由度, 不仅发挥出多元材料特性的最大化优势, 同时兼容多样化微加工工艺, 实现多元材料、复杂结构、泛尺寸和多维度的多类传感器或执行器的一体化兼容集成. 从器件种类来看, MEMS器件显然比IC器件更为丰富多样, 但多数MEMS器件未能满足产业化要求而停留在实验室级别, 其市场应用潜力尚未得到充分发挥. 这是由于MEMS器件属于多域值器件, 需要多种技术、材料和工艺的交叉和融合, 同时也需要满足微型化、集成化、功能化、批量化等应用需求, 因此, MEMS微加工技术是实现MEMS器件

表 1　MEMS与IC器件的区别

Table 1　Differences between MEMS and IC devices

	IC器件	MEMS器件
结构	平面, 固定	非平面, 可动, 多维度
工艺	表面微加工	多样化微加工
材料	半导体材料	多样化材料
机制	表面之下效应	表面效应
信号接口	电信号	机械、光、电信号等

兼容集成制造的重要手段之一.

2.1 典型的MEMS微加工技术

典型的MEMS微加工技术包括表面硅微加工技术、体硅微加工技术、LIGA/UV-LIGA技术、聚合物工艺技术和混合增材制造技术[13,14]，以下针对各类微加工技术的工艺特性及其兼容性进行详细地对比分析.

2.1.1 表面硅微加工技术

表面硅微加工工艺是一种利用在硅衬底表面上顺序淀积不同材料并选择性牺牲的方法来制造各种微结构的技术, 通常用于制备纵向尺寸较小的可动微结构, 平面薄膜结构常以多层叠加的方式构建复杂的三维微机械结构, 一般具备3~5层集成能力, 单层薄膜厚度以20 μm为上限，从而一定程度上制约了器件结构的多样性. 此外，由于它是一种基于集成电路平面工艺延展出的一种MEMS技术，易于与IC工艺兼容，具有广泛的适用性，是一种早期成熟的主流加工手段，常用于制备微齿轮、微马达、开关等多层叠加薄膜器件, 如图2所示为该技术制备的微马达器件.

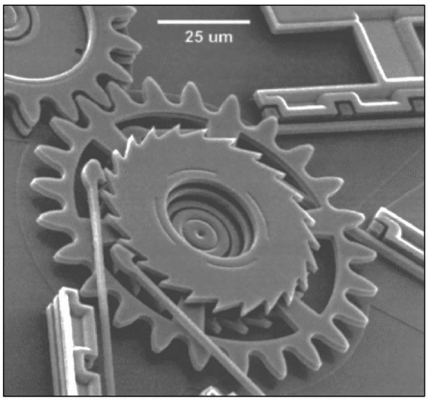

图 2 基于表面硅微加工技术的微马达结构[18]

Figure 2 Micromotor structure based on the surface silicon micromachining technology [18].

2.1.2 体硅微加工技术

体硅微加工技术是利用干法或湿法刻蚀工艺对硅衬底进行选择性硅基去除，以获得较大纵向尺寸的硅微结构器件，如图3所示. 通过改变其刻蚀条件，例如尝试改变刻蚀溶液或气体环境的配比可大幅度提升体硅微结构各向异性的成型能力，为进一步优化MEMS器件性能提供技术支撑. 体硅工艺凭借其工艺流程简单、优越的高深宽比成型能力等优势在陀螺仪、加速度计、立体微针等微器件中有着广泛的应用. 需要注意的是，体硅工艺通常以单层结构平面集成为主，由于其叠加集成的难度较大，因此不易与其它工艺技术兼容.

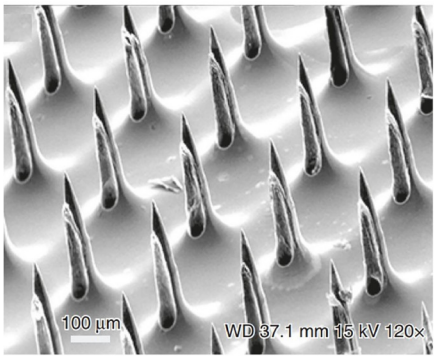

图 3 利用深反应离子刻蚀工艺制备硅基空心微针[32]

Figure 3 Silicon-based hollow microneedles fabricated by the deep-reactive ion-etching process [32].

2.1.3 LIGA/UV-LIGA技术

LIGA技术是一种跨尺度的超高深宽比三维微加工工艺，该技术主要包括光刻、电铸和模塑复制三个主要步骤，它借助同步辐射光刻形成一个具有任意图案的高深宽比三维微模具，用微电铸的方法填充微模具以形成金属微结构，利用模塑实现批量复制. 该技术具备优良的成型精度和重复性，加工的微结构侧壁陡直、平滑，小批量大深径比微加工效果优异，但是由于光源稀缺、成本高昂制约其广泛应用，产业化进程严重受阻. 为解决上述问题，通过引入普通紫外光刻光源和高灵敏度的厚膜光刻胶，创立了等同效果的UV-LIGA技术. UV-LIGA技术既可以弥补硅基表面微机械加工深度方向上应用潜力的不足，又能够避免体硅加工材料单一的弊端，形成了以金属为结构材料的低温工艺体系，该技术可制备厚膜SU-8微电铸模具和大深径比金属微结构器件，应用于高精度微尺度零部件及其组合体制造, 如图4所示.

2.1.4 聚合物工艺技术

聚合物工艺技术是一种新兴的非硅MEMS加工技术, 其主要应用于制备柔性衬底上的MEMS器件, 以满

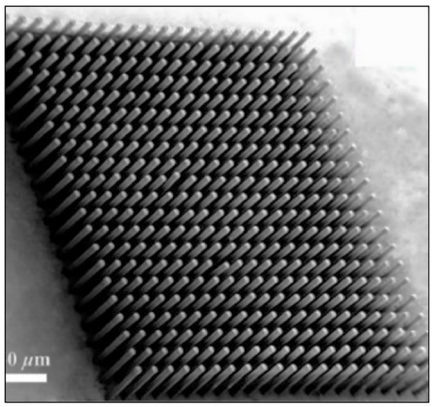

图 4　高深宽比SU-8微柱阵列[35]
Figure 4　High aspect ratio SU-8 micropillar array [35].

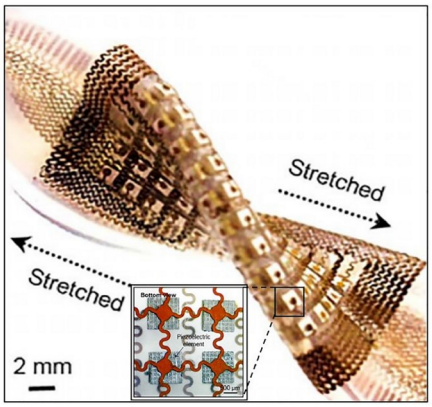

图 5　一种基于薄膜的低剖面可拉伸超声波探头[45] (网络版彩图)
Figure 5　A low-profile membrane-based stretchable ultrasonic probe [45] (color online).

足各种非平面物体表面物理量探测的需求，通常采用具有柔韧性的纳米材料、有机或无机材料代替硅、玻璃等刚性衬底作为柔性电子器件的聚合物薄膜层，利用掩膜电镀与Lift-off工艺实现薄层金属微结构与聚合物材料的兼容制备, 进一步拓展了低温成型工艺. 区别于传统的刚性MEMS器件，高可挠性的柔性电子器件更适用于复杂形面或生物表面适形接触的需求，聚合物工艺技术打破了传统MEMS器件无法实现曲面共形的壁垒，因此柔性MEMS器件在可穿戴电子、仿生电子、植入式医疗器械等生物医学领域显示出卓越的应用前景，如图5为一种基于柔性薄膜的可拉伸超声波探头.

2.1.5　混合增材制造技术

增材制造（AM）技术是以三维数字模型为基础, 将材料通过分层制造、逐层叠加的方式制造出实体零件的新兴制造技术，相对于传统的减材制造，是一种“自下而上”材料累加的制造方法. 其中，基于金属前驱体–聚合物基质的混合AM技术作为一种直接制造技术有望成为在芯片上制造高导电性三维金属微结构的有效技术途径之一. 当前的混合AM技术多数结合立体光刻3D打印、激光诱导光还原、化学电镀等方法选择性地图案化在平面或非平面基板上，成功制备出三维微纳金属微结构，在大规模全功能电子产品快速成型制备中具有巨大的潜力. 凭借高性能电气材料和高几何复杂度工艺，该技术可制备三维高频器件, 例如三维线圈[55]、微型喇叭天线阵列[56]等(图6). 然而，由于该方法所涉及的化学反应难以控制等原因,

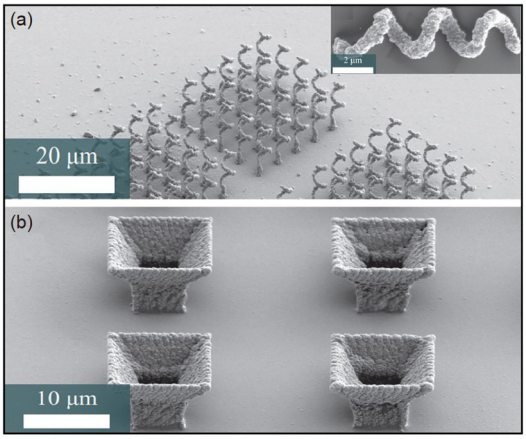

图 6　(a) 丝状螺旋阵列[56]; (b) 微型喇叭天线阵列[56] (网络版彩图)
Figure 6　(a) Arrays of filigree helices [56]. (b) An array of miniature horn antenna [56] (color online).

该技术的全部潜力至今尚未得到充分开发.

表2归纳总结了五种典型MEMS微加工技术的工艺特点、兼容能力、核心技术以及应用示例，可以发现不同MEMS技术之间由于其特性存在兼容差异而相互制约. 表面微加工技术表现出优越的多样化兼容性和集成制造能力，但微结构纵向尺寸较小；体硅微加工技术适合制备高深宽比单层微结构，但桎梏于硅材料体系，无法广泛兼容其他多样化材料；LIGA/UV-LIGA工艺、聚合物工艺以及混合增材制造工艺同属于低温工艺, 具备优势鲜明的工艺特色, 但聚合物工艺

表 2 典型MEMS微加工技术的对比分析结果

Table 2 Differences between MEMS and IC devices

	表面微加工工艺	体硅微加工工艺	LIGA/UV-LIGA工艺	聚合物工艺	混合增材制造工艺
工艺材料	硅、薄金属、氧化物	硅	厚金属、光敏聚合物	非硅基薄膜、柔性聚合物	金属、聚合物
衬底特点	平面, 刚性	平面, 硅基	平面, 刚性	非平面, 柔性	平面/非平面, 刚性
深宽比	较小	较大	极大	较小	较小
结构特色	叠层薄膜微结构	单层高深宽比微结构	高深款比三维微结构	柔性平面微结构	自下而上叠层微结构
制备环境	低温、高温	低温、高温	低温	低温	低温
多材料兼容性	优秀	差	一般	较差	较差
集成制造能力	优秀	较差	较好	一般	一般
核心技术	硅基薄膜制备、牺牲层去除技术、图形化微细加工技术等	硅基湿法刻蚀、深反应离子刻蚀、反应离子刻蚀等	同步辐射/紫外光刻技术、SU-8光刻、去胶技术、微电铸技术、微复制技术等	柔性层制备、掩膜电镀、非硅基薄膜制备技术、Lift-off工艺等	立体光刻三维打印、激光诱导还原、化学电镀等
应用示例	微马达[15~18]、微齿轮[19~21]、惯性开关[22~25]	陀螺仪[26~28]、加速度计[29~31]、立体微针[32~34]	批量制造微型零部件[35~37]、大深径比金属基器件[38~41]	可穿戴电子[42~45]、仿生电子[46~48]、植入式医疗器械[49~51]	立体线圈电路[52,53]、三维微流体结构[54]、微型天线/螺旋电感[55,56]

和混合增材制造技术难以实现厚金属沉积, 且金属导体与聚合物基质的隔离与融合相当困难. 由此可见, 目前常见的MEMS微加工技术多处于自成体系的发展状态, 各工艺体系之间融合程度较弱、协同发展趋势并不显著. 究其原因, 前两类典型微加工技术涉及高温工艺, 而后三类微加工技术则对工艺温度敏感, 因此, 由高温工序引发的一系列工艺兼容性问题不容忽视. 高温环境常常导致微加工结构的变形或材料性能的退化, 甚至出现严重的材料间热失配问题, 产生翘曲、皱裂、剥离等失效现象, 进而影响器件的性能与可靠性[57]. 而且不同材料经历高温后存在不同的反应性差异, 可能会导致交叉污染的现象发生, 进一步加剧工艺兼容性问题. 除此以外, 复合材料的相变温度不匹配也将使得多种材料或工艺体系难以兼容, 最终导致产品的精度较低、粗糙度较高、孔隙率较高, 甚至影响其电导率、热导率等性能. 综上所述, 低温成型是探索材料、结构、工艺多元兼容集成制造的有利途径, 基于电化学微加工技术的掩膜电镀工艺则在低温成型与兼容集成方面显现出良好的应用潜力和发展前景.

2.2 基于掩膜电镀技术的标准化工艺

基于电化学微加工技术的掩膜电镀工艺作为一种低温、低成本、高质量、高效率的非硅基表面微加工技术, 可借助多种类型的非硅材料叠层制作三维微结构, 选择余地大, 工艺兼容性好, 目前已有多个研究机构基于掩膜电镀工艺开发了一系列商业化成套工艺, 初步展示了其多元兼容集成的优势和潜力, 例如: 法国MEMSCAP公司的Metal MUMPs工艺[58~61]、美国Microfabrica的EFAB工艺[62~65]和Freeform工艺[66]、美国Nuvotronics的Polystrata工艺[67,68]. 下面介绍了几种基于掩膜电镀技术的典型标准化工艺, 如图7所示.

2.2.1 Metal MUMPs工艺

Metal MUMPs (The Multi-User MEMS Process) 工艺是一种在硅基表面微加工技术基础上兼容电镀厚膜金属镍的异质集成制造技术, 其工艺流程主要包括: 准LIGA工艺、厚金属电铸工艺和表面微机械加工工艺. MUMPS作为标准化工艺流程更强调其工艺的通用化, 以实现在单个硅片上完成更多不同的设计, 该工艺能够兼容大部分表面微加工器件, 其中涉及到多层掩膜电镀的低温工艺体系, 更合理地规避了高温工序所带来的影响, 有利于工艺技术之间的兼容和融合.

2.2.2 EFAB工艺

EFAB (Electrochemical Fabrication)工艺通过“掩膜电镀–高分散性覆盖电镀-化学机械抛光 (CMP) 平坦化-选择性刻蚀”四个单元工序的组合运用, 是一种以多薄层金属叠加为特色的高度集成三维微加工技术. 其成型精度±(1~2) μm, 单层厚度约10 μm, 纯金属

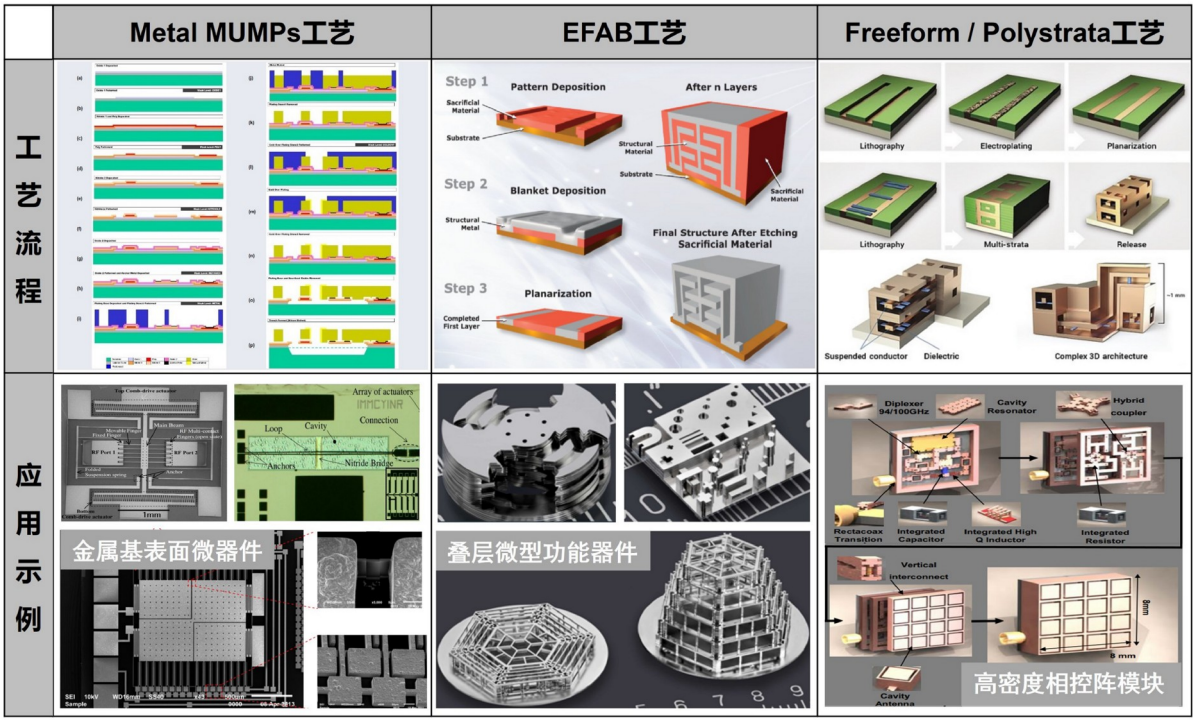

图 7　基于掩膜电镀技术的商业标准化工艺[58~68] (网络版彩图)

Figure 7　Commercially standardized process based on the mask-plating technology [58–68] (color online).

微结构集成能够叠加到50层以上，在多层微结构和异质材料集成方面拥有显著的技术优势，目前已经研制EMS-Alpha全自动化生产，成为金属基表面微加工技术的突出工艺代表.

2.2.3　Polystrata和Freeform工艺

以射频无源器件与射频微系统为需求牵引，Freeform和Polystrata工艺的基本原理与EFAB基本相同, 均结合了电化学沉积、CMP加工和化学选择性刻蚀等湿法微加工基础工艺，技术不同之处主要是首次将MEMS技术中大量应用的聚合物作为绝缘和结构支撑材料引入, 突破了以往全金属三维器件的限制. 两种技术工艺同样能力突出, 虽然作为同源技术, 但仍然独立发展, 与其它体系少见融合.

3　多元兼容集成制造工艺

3.1　多元兼容集成制造工艺的基本内涵

MEMS技术的多元化、集成化趋势越来越突出, 同时电化学微加工成型能力不断提升，存在这样一种可能：利用掩膜电镀等低温组合工艺，设计多样功能兼容的器件结构，并辅以灵活的工艺流程，进而实现满足不同材料、结构、工艺的多元兼容集成的微加工技术体系. 基于电化学微加工技术的多元兼容集成制造工艺是一种以低温电沉积和异质异构集成为核心制造工艺的高性能MEMS器件制造技术，其多样兼容性的特点主要体现为：材料多样性、结构多样性和工艺多样性方面. 图8表示出该技术多样性三元素的具体内容和相互联系，具体而言，材料的选择会直接影响到结构的设计和工艺的选择，由于不同的材料具有不同的物理、化学和机械性质，因此在结构设计时需要考虑材料的强度、刚度、韧性等因素. 其次，结构的特点则会对材料的选用和工艺的实施提出要求和限制，不同的结构形式和要求可能需要采用不同的材料和制造工艺，例如特殊结构需要具有一定的柔韧性、耐腐蚀性或导电性等，而且结构的复杂程度、尺寸精度、表面状态等都会对工艺的选用和实施提出具体要求. 此外, 工艺的选择和实施也会对材料的性能和结构的成型质量、工艺稳定性、生产效率等产生重要影响. 由此可见, 三元素之间相互促进和相互制约, 在实

际应用过程中需要综合考虑材料、结构和工艺的特点和要求, 通过合理的选择、协调和优化, 实现最佳的兼容性和综合效果.

3.2 多元兼容集成制造工艺的关键技术

基于电化学微加工技术的多元兼容集成制造工艺本质上为多层电化学增材制造, 在构建多元材料兼容的三维叠层非硅微器件时, 该技术将会对制备工艺的精细图形化加工效果、多层叠加制备能力、叠层累积内应力控制、界面结合力强度、去胶工艺选择性甚至功能材料的融入集成提出更高的技术要求. 因此, 本文分别从工艺拓展、工艺优化、工艺创新三方面提出相应的多元兼容集成制造关键技术, 如图9所示, 为多元兼容集成制造提供了良好的工艺基础和创新空间.

从工艺拓展来说, 基于掩膜电镀的通用图形化方法和复合牺牲层设计, 为各种材料融入低温工艺体系奠定了基础. 从工艺优化而言, 基于电子电镀低温组合工艺的良好基础, 通过一系列低应力电沉积技术控制异质集成复合微结构的内应力水平, 从而达到多层叠加集成能力, 实现更为丰富多样的三维立体微结构. 基于材料多样性的高选择性去胶技术保障了厚膜金属微结构表面的洁净度和完整性, 基于特异性界面的结合力强化技术则实现了SU-8胶与基底表面的可靠附着. 此外, 在工艺创新层面, 基于复合电化学技术的功



图 8 多元兼容集成制造工艺的多样性三元素 (网络版彩图)
Figure 8 Three elements of diversity for multi-compatible integrated manufacturing process (color online).

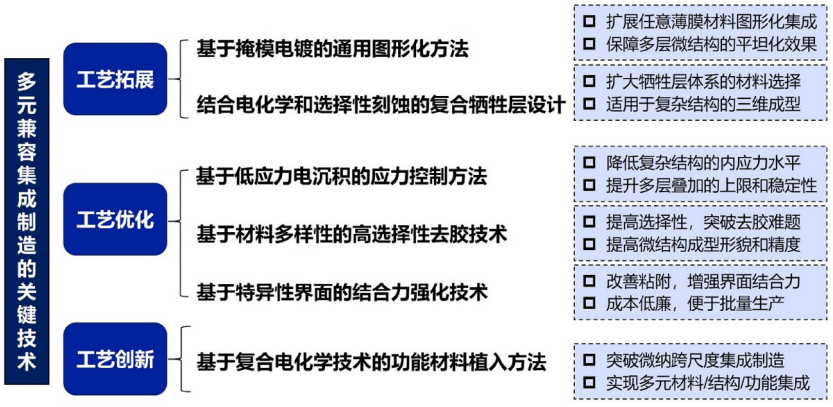

图 9 多元兼容集成制造的关键技术及其特性 (网络版彩图)
Figure 9 Key technologies and characteristics for multi-compatible integrated manufacturing (color online).

能材料植入方法成功地将纳米结构适度可控地集成到器件中以满足不同应用需求，这一突破为微纳集成制造提供了更大的跨尺度范围和精准的可控性，为实现更复杂的功能性器件奠定了基础.

3.2.1　基于掩膜电镀的通用图形化方法

图形化方法研究是金属基表面微加工技术的核心内容之一, 按照分层叠加制造原理, 基于掩膜电镀开展图形化电子电镀微加工工艺，结合CMP等工艺的优势组合，对薄膜微结构材料实现多层叠加的可集成制造微加工. 该图形化过程中需要克服的主要难题是随着叠加层数的增加，CMP等平坦化手段对表面纹理、均匀度、平整度等表面效果影响越大，在各个叠层所产生的缺陷将会对构件的结构强度或运动机能产生不可逆的影响. 因此, 区别于传统光刻胶的图形化方法, 该技术的优势在于去除掩膜电镀模具后，在非图形区域填充具有一定机械强度的薄膜作为后续研磨平坦化的保护层, 其通用工艺流程如图10所示, 平衡整体结构强度、提高结构平整度, 以此重复, 直至实现多层叠加为特色的高度集成三维微加工. 该技术实现了对更多薄膜材料的三维集成制造，为复杂叠层结构的完整性提供有效途径.

3.2.2　结合电化学和选择性刻蚀的复合牺牲层设计

复合牺牲层方法是结合电化学沉积和化学选择性刻蚀等微加工基础工艺开发的金属微结构多层集成的微加工技术. 该工艺构造器件的原理与硅基表面微加工技术有一定相似，区别为不管结构材料还是牺牲性材料均为金属介质，如图11. 该工序的难点在于需要在复合实体结构的深处完全清除牺牲性材料，而对结构性材料不应该有明显损伤，这不仅需要刻蚀剂对结构性材料完全没有作用，而且对牺牲性材料要能够高效反应并且反应产物不会沉淀. 复合牺牲层方法的关键技术是结构性材料与牺牲性材料的匹配选择，而化学刻蚀选择性是两类材料选择的最重要依据，该方法灵活实现各种材料匹配且适用于复杂微结构的三维成型制备.

3.2.3　结合低应力电沉积技术的复合微结构应力控制方法

基于电子电镀表面微加工技术叠加构建高集成度三维微结构时，镀层的内应力是多层叠加稳定性的重要影响因素，低应力镀层有利于多层叠加层数上限提升，这是该工艺优于传统硅基表面微加工最大层数的本质所在. 因此，基于电子电镀低温工艺的良好基础, 研究高性能的电镀添加剂体系和电镀参数与结构内应力水平的联系，平衡电度速率、电镀均匀性、结构内应力以及镀层质量之间的关系，建立一系列微结构应力控制的工艺优化和结构改良方法，如图12所示为电磁型射频 (RF) MEMS开关中所提出的超低应力悬空结构[69~71]. 在电沉积过程中，降低异质集成复杂微结构的内应力积聚程度，避免复合微结构变形、翘曲甚

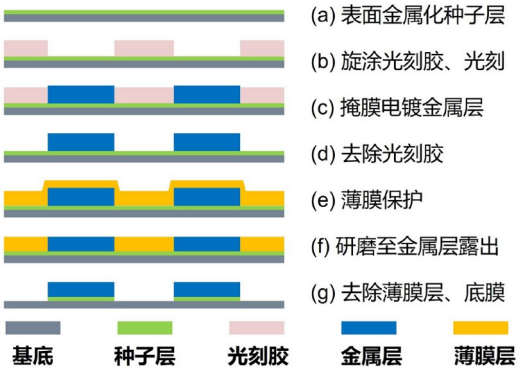

图 10　基于掩膜电镀的通用图形化流程 (网络版彩图)

Figure 10　Generalized graphical process flow based on the mask plating (color online).

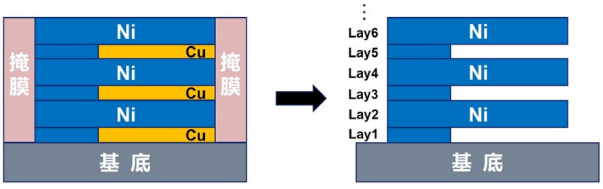

图 11　复合牺牲层设计的示意图 (网络版彩图)

Figure 11　Schematic of the composite sacrificial layer (color online).

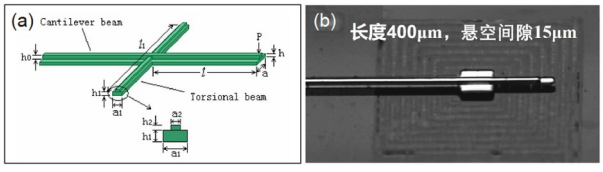

图 12　超低应力悬空微结构[69~71]. (a) 结构优化; (b) 悬臂梁样品 (网络版彩图)

Figure 12　Ultra-low stress suspension microstructure [69–71]. (a) Structural optimization. (b) Cantilever beam sample (color online).

至层间剥离, 集成层数可达到二十层以上.

3.2.4 基于材料多样性的高选择性去胶技术

高度异质集成的电子电镀微加工技术拓展了厚膜金属微结构叠加集成的能力, 展现了诱人的发展潜力, 但环氧光刻胶的去除工艺是目前公认制约其广泛应用的主要技术瓶颈, 其中典型代表有SU-8系列光刻胶. 常规去胶的效果如图13a所示, 去胶后金属表面粗糙、有被腐蚀掉的微孔. 本文提出了自主研发的基于材料多样性的高选择性SU-8去胶技术, 彻底清除狭小空间的SU-8胶, 且避免了对金属微结构表面的严重腐蚀, 目前适用于镍、铁、钴、铬、铜、金、银及其合金等, 利用该技术可以得到光滑侧壁, 如图13b所示, 对微结构成型精度有很大帮助, 该技术成本低廉且便于批量生产, 向解决去胶难题的方向进一步突破.

3.2.5 基于特异性界面的结合力强化技术

在高深宽比微结构的成型过程中, 常常由于SU-8胶与金属种子层结合力欠佳的问题导致微结构的移位或者脱落, 界面结合力成为了决定高深宽比结构制作成败的关键因素, 因此, 通常考虑选择与SU-8胶有特异性结合的衬底界面以减少结合力不足的风险. 经过长期开发和科研实践积累可知, 结合力问题的解决方法有以下几种途径: 其一, 由于不同衬底与SU-8胶结合强度差异非常明显, 图14所示为不同衬底界面对结合力的影响[35], 常用金属种子层如铬、铜、钛与SU-8结合力一般, 单晶硅、氧化钛、金等作为衬底界面与SU-8有较好的结合力, 所以针对具体加工目标要求优选合适的界面材料非常有必要. 其二, 光刻工艺的参数选择和流程优化对提高结合力也有明显帮助, 例如结合力与曝光剂量有最佳匹配值, 过曝光与欠曝光均有损结合强度, 但适度欠曝光可通过后烘大幅度提升结合强度等. 其三, 内应力积聚是造成SU-8结构与衬底剥离的根本原因, 大面积掩膜容易造成内应力积聚, 尝试应力隔离设计, 将大面积连续结构分割成一系列小面积将有助于内应力释放. 此外, 课题组还提出来一种由类图钉等多种微纳结构阵列组成的过渡强化层[72], 如图15, 由于扩大有效接触面积、提高机械互锁性能, 最终通过提高特异界面粘附强度来获得高稳定性的聚合物结构.

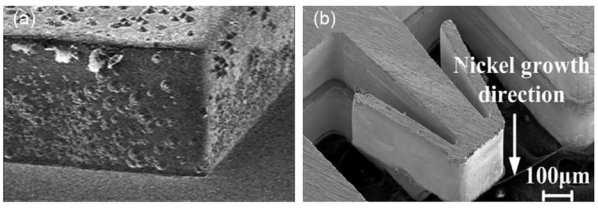

图 13 (a) 常规去胶; (b) 多元兼容去胶

Figure 13 (a) Conventional removal process. (b) Multi-compatible removal process.

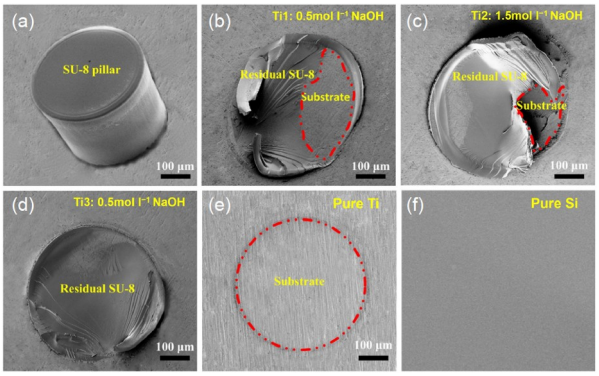

图 14 不同衬底与SU-8结合力测试结果[35]. (a) 剪切试验前的SU-8圆柱体; (b~f) 分别表示Ti1、Ti2、Ti3、纯Ti和Si SU-8圆柱体在剪切试验后的断裂面 (网络版彩图)

Figure 14 Binding test results between different substrates with SU-8 [35]. (a) The SU-8 cylinder of the shear test before testing. (b–f) represent the fracture surfaces of SU-8 cylinder after the shear test for Ti1, Ti2, Ti3, pure Ti and Si, respectively (color online).

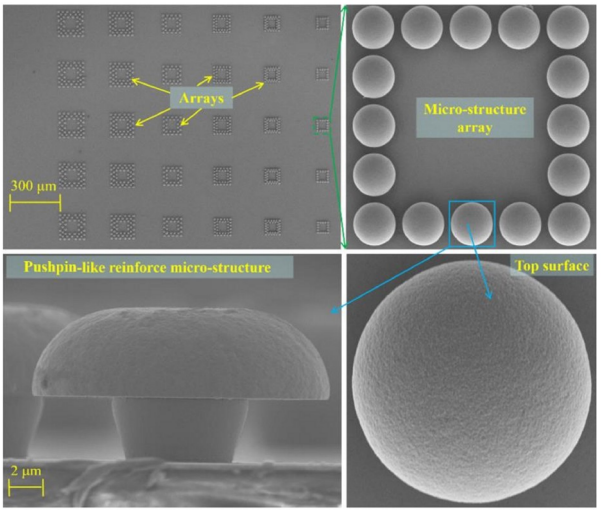

图 15 一种类图钉微结构阵列的过渡强化层[72] (网络版彩图)

Figure 15 The transitional reinforcement layer with pushpin-like microstructure array [72] (color online).

3.2.6　基于复合电化学微加工的功能材料植入方法

纳米功能材料是先进材料发展的重要方向，一维纳米材料作为代表性的功能材料，具有尺寸效应、高比表面积、优异的力学性能、量子限制效应以及可控性和可制备性等独特优势. 针对微纳跨尺度集成制造难题，通过引入纳米材料的设计理念，基于电化学微加工技术手段，成功实现了纳米结构适度可控集成到微结构体系之中，在微结构异质集成体系中实现更多样化的结构组合和功能集成，进一步拓展了结构多样性集成的范围，为解决不同领域需求提供更多可能性. 基于电化学微加工的功能材料植入技术对高性能纳米功能材料进行精确调控沉积和微纳复合加工，展示了具备材料改性、结构可控、性能突破的跨尺度规模复合制备方法，实现了金属与功能材料的多元三维成型，为能源存储、微电极阵列、生物传感器等相关领域的研究和应用提供了重要的技术支持，图16展示了基于复合电镀技术将碳纳米管（CNT）植入电极表面的加工方法[73,74].

4　多元兼容集成制造工艺的示范应用

面向多功能、高集成度MEMS器件集成制造的广泛需求，多元兼容集成制造工艺在电化学微加工的基础上，灵活运用上述特色工艺技术，满足不同材料、结构和多种MEMS工艺的多样化兼容集成. 迄今为止，基于电化学微加工技术的多元兼容集成制造工艺已尝试开发了一系列包括金属基MEMS惯性开关、双稳态射频MEMS开关、双向MEMS继电器、金属基微通道散热器、场发射器件等多类高性能MEMS单元器件，如图17所示，逐步形成了以低温组合工艺加工和复杂多元兼容集成为特征的新型非硅基制造技术体系. 本文分别从高密度集成的非硅表面微加工制造、多功能兼容的异质异构集成制造、适度集成的UV-LIGA厚膜集成制造和基于一维纳米材料的微纳融合集成制造四个方面展示该工艺技术的示范应用.

4.1　高密度集成的非硅表面微加工制造

面对MEMS微器件越来越复杂的结构和越来越多的叠层设计，非硅基表面微加工工艺成功地结合图形化电镀工艺和牺牲层技术实现了多层悬空结构的金属基叠层制备，拓展了传统MEMS技术的涵盖范围. 图17a~c分别为单轴、三轴、全方向高集成度金属基MEMS惯性开关，充分地展示出多元兼容MEMS集成工艺的显著优势，其依据叠层结构设计，借助基于掩膜电镀的叠层图形化方法和复合牺牲层工艺设计，利用电化学和化学选择刻蚀的高效成型方法，形成了一套高密度集成的非硅表面微加工工艺流程. 图18分别展示了单轴敏感、三轴敏感、全向敏感的金属基MEMS惯性开关演示样品[22~24]. 课题组利用多元兼容MEMS集成技术实现了多层金属微结构的精准叠加集成，MEMS惯性开关从单弹簧支撑到多弹簧、从单向固定到全方向发展、从刚性接触到柔性接触逐步发展, 不仅扩展了多方位敏感感测的能力, 同时也进一步增强了惯性开关的稳定性、可靠性和功能性，使其能够适用于更为复杂的应用环境.

4.2　多功能兼容的异质异构集成制造

MEMS中仅依靠单一材料或结构设计实现高性能

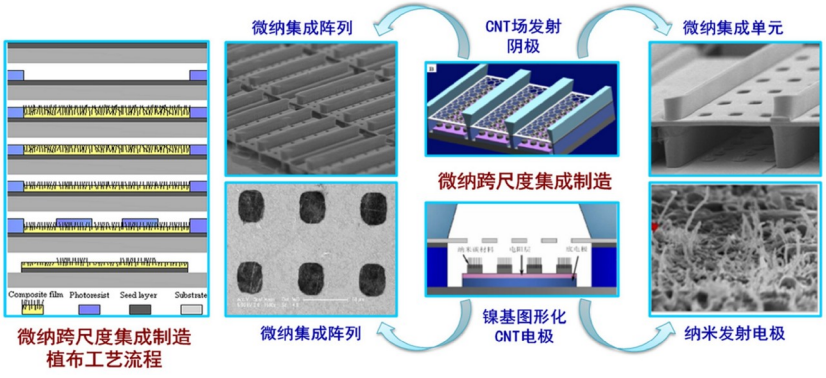

图 16　基于复合电镀技术将CNT植入电极表面[73,74] (网络版彩图)

Figure 16　CNT implanted on electrode surfaces based on the composite-electroplating technology [73,74] (color online).

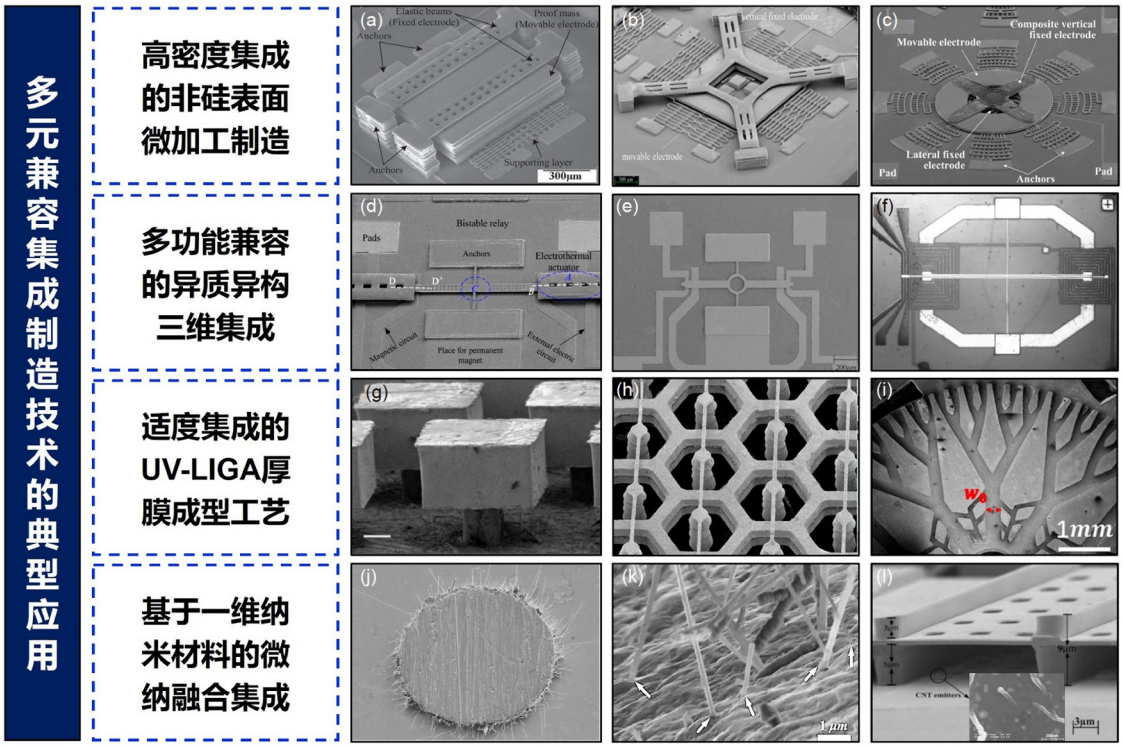

图 17 多元兼容集成MEMS工艺的示范应用[22~24,38~40,69~71,75~83] (网络版彩图)
Figure 17 Demonstration application of multi-compatible integrated MEMS process [22–24,38–40,69–71,75–83] (color online).

多功效器件的制备能力十分有限，异质异构兼容集成是未来芯片的必然趋势. 多功能兼容的异质异构集成工艺对材料与结构进行优化选择和匹配设计，选择以金属为主要结构材料，兼容独特的绝缘材料和聚合物体系，将高性能材料和多样化结构以灵活的工艺集成方式组合在一起，从而形成复杂、高集成度、多功能兼容的微纳集成系统. 具备可动和悬浮部件的RF MEMS开关[69~71]和MEMS微继电器[75~78]展示了多功能兼容的异质异构集成制造, 如图17d, e所示分别为带有十字形、圆环形支撑结构的扭梁/悬臂梁的双向双稳态微继电器，而图17f为电磁型双稳态RF MEMS开关. 从图19可见, 此类MEMS传感器最主要的困难是由于其整体结构复杂而难以实现一体化集成制作，其中涉及复杂的叠层结构具有以下特点: (1) 多材料. 包括石英基片、永磁体、坡莫合金、氧化铝介质、铜导线、粘结层和镍应力校正层，其中软磁材料坡莫合金起到多种功能性作用; (2) 多结构. 结构涉及到多层金属线圈、低应力悬梁、金属触点、共面波导传输线等多种微结构，如图19a所示; (3) 多工序. 正如图19b所示, 工艺流程复杂, 合计36步主要工序, 主要围绕着掩膜电镀、层间平坦化、分层湿法刻蚀等技术. 除了探究一系列单元结构成型技术以外，同时开发出一套联合低应力沉积工艺和高选择性低温释放工艺的高效刻蚀方法，适用于低刚度、低应力、大径长比的悬臂梁结构，如图20所示为改进前后释放地低应力低刚度的坡莫合金悬臂梁[76].

4.3 适度集成的UV-LIGA厚膜集成制造

随着MEMS技术不断取得进展，以UV-LIGA工艺为代表的厚膜金属适度集成三维微加工技术在微结构制造方面逐渐显现出诱人的应用潜力，其中高选择性SU-8去胶工艺和基于特异性界面的结合力强化技术拓展了厚膜金属微结构叠加集成的能力，有助于大深径比厚膜结构的成型制备. 图17g~i和图21分别展示了基于UV-LIGA厚膜集成工艺的微金属基微通道散热器[38,40]、银基微柱阵列结构[79]以及金属复合转接板[39]. 以金属材料为主的复合结构金属微通道散热器借助高热导率材料电子电镀微加工技术的优势，再造

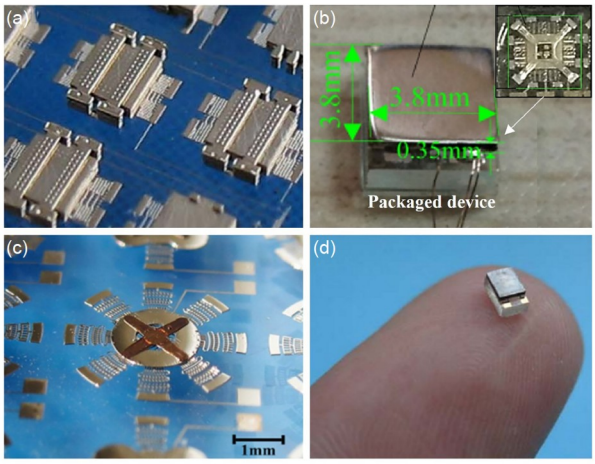

图 18　金属基MEMS惯性开关[22~24]. (a) 单轴结构; (b) 三轴结构; (c) 全向结构; (d) 演示样品 (网络版彩图)

Figure 18　Metal-based MEMS inertial switches [22–24]. (a) Single-axis structure. (b) Three-axis structure. (c) Omnidirectional structure. (d) Demonstration samples (color online).

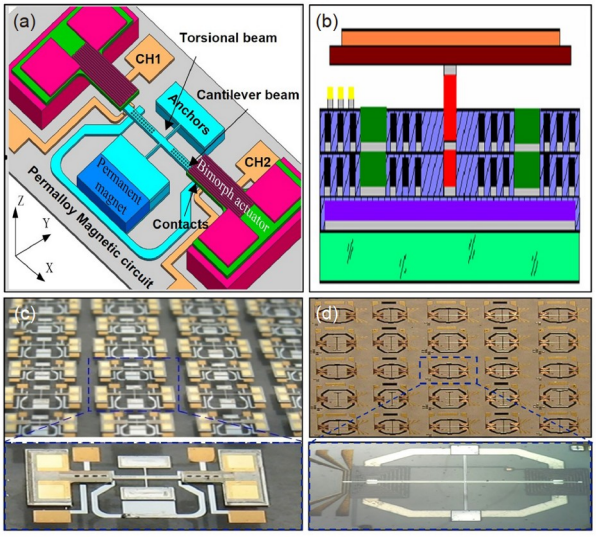

图 19　结构示意图和演示样机. (a, c) RF MEMS 开关[69~71]; (b, d) MEMS微继电器[75~78] (网络版彩图)

Figure 19　Structural schematic and demonstration samples. (a, c) RF MEMS switch [69–71]. (b, d) MEMS microcantilever-based actuator [75–78] (color online).

微流体热输运体系, 创新微流体高效换热机制, 提供了突破散热技术瓶颈、释放高功率芯片负载能力的新途径, 是最具潜力的超高热流密度散热解决方案之一. UV-LIGA厚膜集成制造的优势不仅体现在高深宽比结构的成型制造能力上, 此外, 借助厚膜SU-8胶叠层套刻技术制备多层厚膜微结构是UV-LIGA的另一独

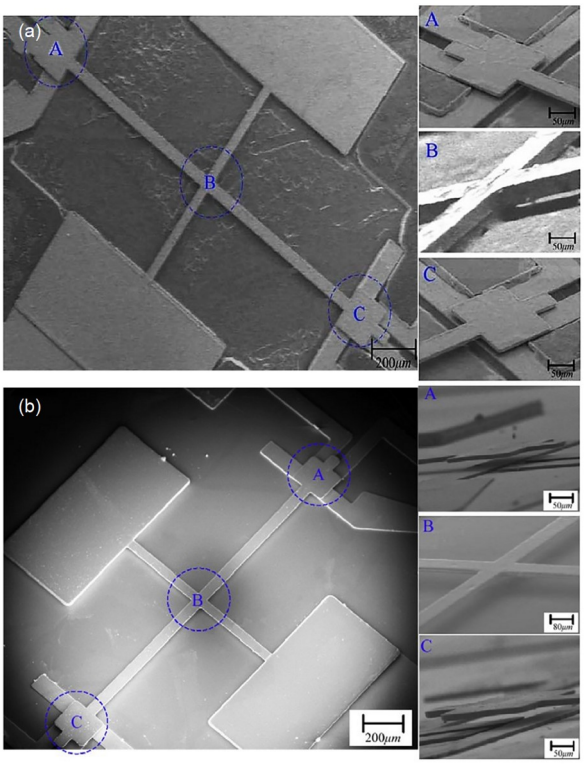

图 20　低应力低刚度的坡莫合金悬臂梁[76]. (a) 释放工艺改进前; (b) 释放工艺改进后 (网络版彩图)

Figure 20　The low-stress and low-stiffness permalloy-based cantilever beams [76]. (a) Before release process improvement. (b) After release process improvement (color online).

特优势, 其中图17g属于具有二级微结构的金属扰流柱[38]. 适度集成的UV-LIGA厚膜成型工艺拓展了MEMS器件和系统设计的材料选择余地和规模化加工制造的技术途径, 而多层套刻能力也更有利于通过厚膜微结构多层集成获得更复杂组合结构, 实现更为丰富的器件功能, 对MEMS技术的发展产生积极推动作用.

4.4　基于一维纳米材料的微纳融合集成制造

CNT作为一维纳米材料的典型代表, 是一种具有多方面独特性质的纳米功能材料, 其中场发射器件是其热点应用方向之一. 由于CNT通常以粉末状态存在, 其长径比高的特点使其相互团聚且形态复杂多变, 操作难度较大, 而且CNT基传感器需要CNT与导电电极之间实现有效紧密结合以解决发射性能点密度不足、电子发射不稳定等问题, 因此CNT与电极的可控集成是其传感器领域规模化应用的关键技术难题. 基于一

维纳米材料的微纳融合集成工艺, 设计“刻蚀–电镀–再刻蚀”的方法将CNT分散“植布”在金属膜电极, 制备了一端或双端植入金属基底的柔性复合阵列电极[80,81], 如图22和图17l, 该技术将一维纳米材料CNT融入微加工体系, 实现了CNT与多种金属材料的跨尺度集成制造, 新型“植布”工艺使得CNT均匀分散且含量可调(图22d), 在牢固物理结合和电接触的前提下, 保障了柔性电极在复杂弯曲条件下稳定的场发射性能(图22b). 除此以外, 进一步探究了纳米线[82]与SiC晶须[83]等纳米材料的复合电镀制备和微纳融合集成, 如图17j, k所示, 开辟了跨宏、微、纳尺度的一条低成本且可控集成制备的技术路线.

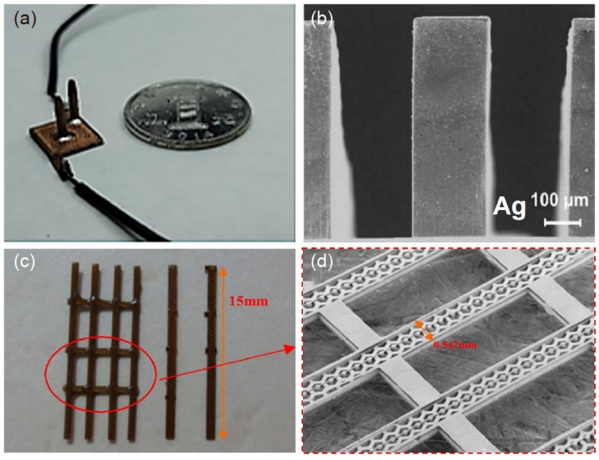

图 21 UV-LIGA厚膜集成制造器件. (a) 铜基微通道散热器[38,40]; (b) 银微柱阵列[79]; (c, d)金属复合转接板[39] (网络版彩图)

Figure 21 UV-LIGA thick-coating integrated manufacturing devices. (a) Copper-based microchannel heat sink [38,40]. (b) Silver micropillar array [79]. (c, d) Metal composite interposer [39] (color online).

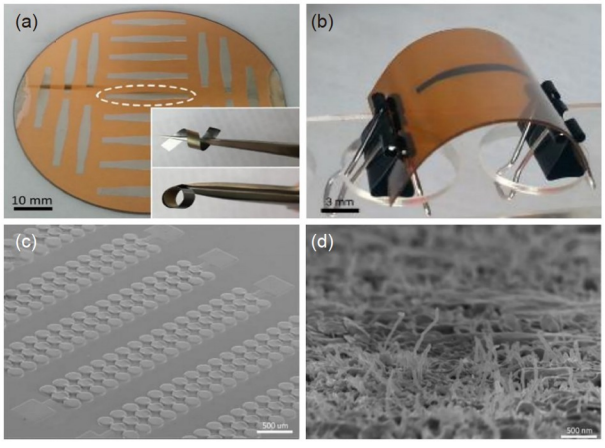

图 22 CNT场致发射阴极阵列器件[80,81]. (a) 晶圆级样品; (b) 弯曲状态下的性能测试; (c) 复合CNT的场发射电极阵列; (d) CNT均匀分布的表面形貌 (网络版彩图)

Figure 22 CNT-based field emission cathode array devices and CNT-based flexible field emission electron source [80,81]. (a) Wafer-level samples. (b) Performance test under bending condition. (c) Field emission electrode array-composited CNTs. (d) Surface morphology of uniformly distributed CNTs (color online).

5 总结与展望

随着微纳尺度器件高密度、多功能、复杂化集成的发展以及兼容制造应用需求的增加, MEMS器件相较于IC器件更适合于高灵活度的多种类型功能器件系统集成, 具备卓越的开发潜力和应用前景. 微加工技术是微纳尺度集成制造的先决条件, 通过对典型MEMS微加工技术和掩膜电镀工艺的兼容性进行对比和分析, 发现各类技术自成体系且协同融合程度较低, 因此, 本团队提出了基于电化学微加工技术的多元兼容集成制造工艺, 以掩膜电镀为基础, 灵活结合多种低温工艺体系, 着重围绕工艺拓展、工艺优化、工艺创新三方面开发一系列多元兼容MEMS集成的特色关键工艺, 以满足MEMS技术对材料多样性、结构多样性和工艺多样性的多元化微加工制备需求, 实现多功能元器件的异质异构一体化集成. 同时本文阐述了基于多元兼容MEMS集成技术所研发的高密度集成的非硅表面微加工制造、多功能兼容的异质异构集成制造、适度集成的UV-LIGA厚膜集成制造和基于一维纳米材料的微纳融合集成制造的阶段性成果, 成功展示了该集成技术的高水平兼容制造能力.

然而, 与MEMS微纳加工技术相比, 基于电化学微加工的多元兼容集成技术远未成熟, 因此需要开展深入的基础工艺和装备体系研发与建设. 其一, 加强电子电化学微加工技术的基础材料、深度融合机制和全面化工艺体系研究, 协调建立重要金属材料电子电镀基础数据库, 为进一步研发可靠兼容的标准化成套工艺体系奠定良好的工艺基础; 其二, 以应用为导向, 解决特定领域问题为目的, 发展优势材料、创新结构、全面功能的新型MEMS器件, 进一步拓展多元兼容MEMS技术的优势; 其三, 加强技术交叉的集成创新, 不断促进电子电镀兼容技术与微电子、微机械、微传感在航空、通信、医疗等多个智能化领域的交流融合, 提供高可靠性、高集成度、功能多元化的解决方案.

参考文献

1 Hoefflinger B. ITRS: The International Technology Roadmap for Semiconductors. In *The Frontiers Collection*, 2012, 161–174
2 Hennessy JL, Patterson DA. *ACM/IEEE 45th Annual ISCA*, 2018, 27–29
3 Siozios K, Anagnostos D, Soudris D, Kosmatopoulos E. Mastering the Challenges of Changing Energy Systems. In *The Smart-Grid Concept: Design Challenges and Paradigms*. *Springer Nature*, 2018, 167–168
4 Bohr M. *IEEE Solid-State Circuits Newsl*, 2007, 12: 11–13
5 Bauer H, Veira J, Weig F. *McKinsey on Semiconductors*, 2013
6 Tummala RR. *IEEE Trans Adv Packag*, 2004, 27: 241–249
7 Fujita H. *IEEJ Trans SM*, 1997, 117: 401–406
8 Liu C. *Adv Mater*, 2007, 19: 3783–3790
9 Ni M, Tong WH, Choudhury D, Rahim NAA, Iliescu C, Yu H. *Int J Mol Sci*, 2009, 10: 5411–5441
10 Ko WH. *Sens Actuat A-Phys*, 2007, 136: 62–67
11 Eloy JC, Henning AK, Mounier E. *Int Soc Opt Photonics*, 2005, 5717: 43
12 Lapisa M, Stemme G, Niklaus F. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2011, 17: 629–644
13 Xu YQ, Yang YJ. *Micronanoelectronic Technology*. 2010, 47: 425–431 (in Chinese) [徐永青, 杨拥军. 微纳电子技术, 2010, 47: 425–431]
14 Zhang S, Jia YQ. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2005, 9: 109–112 (in Chinese) [张帅, 贾育秦. 现代制造工程, 2005, 9: 109–112]
15 Yasseen AA, Chien Hung Wu AA, Zorman CA, Mehregany M. *IEEE Electron Device Lett*, 2000, 21: 164–166
16 Sarajlic E, Yamahata C, Berenschot E, Tas N, Fujita H, Krijnen G. *Micromachines*, 2010, 1: 48–67
17 Wang L, Mills JK, Cleghorn WL. *Proc SPIE*, 2009, 7208: 72080B1-12
18 Horstmann JT, Goser KF. *MicroElectron Eng*, 2003, 67-68: 390–396
19 Horiuchi T, Furuuchi Y, Nakamura R, Hirota K. *MicroElectron Eng*, 2006, 83: 1316–1320
20 Sniegowski JJ, Miller SL, LaVigne GF, Rodgers MS, McWhorter PJ. *Transducers*, 1996
21 Avram M, Volmer M, Avram AM, Iliescu C, Bragaru A. Advanced magnetoresistance sensing of rotation rate for biomedical applications. In *29th International Semiconductor Conference (CAS 2006)*, 2006, 231–234
22 Yang Z, Ding G, Cai H, Zhao X. *IEEE Trans Electron Devices*, 2008, 55: 2492–2497
23 Chen W, Wang Z, Wang Y, Yang Z, Ding G, Wang H, Zhao X. *Micro & Nano Lett*, 2014, 9: 514–518
24 Yang Z, Zhu B, Chen W, Ding G, Wang H, Zhao X. *J Micromech Microeng*, 2012, 22: 045006
25 Currano LJ, Bauman S, Churaman W, Peckerar M, Wienke J, Kim S, Yu M, Balachandran B. *Sens Actuat A-Phys*, 2008, 147: 490–497
26 Lee S, Park S, Kim J, Lee S, Cho D. *J Microelectromech Syst*, 2001, 9: 557–567
27 Ni Y, Li H, Huang L. *Sensors*, 2014, 14: 20419–20438
28 Challoner AD, Ge HH, Liu JY. Boeing Disc Resonator Gyroscope. In *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2014, 504–514
29 Kal S, Das S, Maurya DK, Biswas K, Ravi Sankar A, Lahiri SK. *MicroElectron J*, 2006, 37: 22–30
30 Zhang FT, He XP, Shi ZG, Zhou W. Structure Design and Fabrication of Silicon Resonant Micro-accelerometer Based on Electrostatic Rigidity. In *World Congress on Engineering 2009*, 2009, 2176: 37–45
31 Petsch K, Kaya T. Design, Fabrication, and Analysis of MEMS Three-Direction Capacitive Accelerometer. In *Proc ASEE North Central Section*, 2012
32 Li Y, Zhang H, Yang R, Laffitte Y, Schmill U, Hu W, Kaddoura M, Blondeel EJM, Cui B. *Microsyst Nanoeng*, 2019, 5: 41
33 Roh H, Yoon YJ, Park JS, Kang DH, Kwak SM, Lee BC, Im M. *Nano-Micro Lett*, 2022, 14: 24
34 Ribet F, Stemme G, Roxhed N. *Biomed Microdevices*, 2018, 20: 101
35 Lai L, Sun Y, Wu H, Yang Z, Ding G. *J Micromech Microeng*, 2019, 29: 047002
36 Begemann M, Lohf A, Nienhaus M, Berg U, Ehrfeld W, Michel F. *MicroSyst Technologies*, 2001, 7: 145–150
37 Malek CK, Saile V. *MicroElectron J*, 2004, 35: 131–143
38 Zheng R, Wu Y, Li Y, Wang G, Ding G, Sun Y. *Int J Heat Mass Transfer*, 2022, 182: 121925

39 Wang M, Cheng P, Li J, Wang Y, Wang H, Ding G, Zhao X. *J Micromech Microeng*, 2014, 24: 025016

40 Ma C, Sun Y, Wu Y, Zhang Q, Wang Y, Ding G. *Int J Heat Mass Transfer*, 2023, 202: 123717

41 Chung SJ, Hein H, Mohr J, Pantenburg FJ, Schulz J, Wallrabe U. *Proc SPIE*, 2000, 4194

42 Zhao H, Kim Y, Wang H, Ning X, Xu C, Suh J, Han M, Pagan-Diaz GJ, Lu W, Li H, Bai W, Aydin O, Park Y, Wang J, Yao Y, He Y, Saif MTA, Huang Y, Bashir R, Rogers JA. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118: e2100077118

43 Oh YS, Kim JH, Xie Z, Cho S, Han H, Jeon SW, Park M, Namkoong M, Avila R, Song Z, Lee SU, Ko K, Lee J, Lee JS, Min WG, Lee BJ, Choi M, Chung HU, Kim J, Han M, Koo J, Choi YS, Kwak SS, Kim SB, Kim J, Choi J, Kang CM, Kim JU, Kwon K, Won SM, Baek JM, Lee Y, Kim SY, Lu W, Vazquez-Guardado A, Jeong H, Ryu H, Lee G, Kim K, Kim S, Kim MS, Choi J, Choi DY, Yang Q, Zhao H, Bai W, Jang H, Yu Y, Lim J, Guo X, Kim BH, Jeon S, Davies C, Banks A, Sung HJ, Huang Y, Park I, Rogers JA. *Nat Commun*, 2021, 12: 5008

44 Park S, Heo SW, Lee W, Inoue D, Jiang Z, Yu K, Jinno H, Hashizume D, Sekino M, Yokota T, Fukuda K, Tajima K, Someya T. *Nature*, 2018, 561: 516–521

45 Hu H, Zhu X, Wang C, Zhang L, Li X, Lee S, Huang Z, Chen R, Chen Z, Wang C, Gu Y, Chen Y, Lei Y, Zhang T, Kim NH, Guo Y, Teng Y, Zhou W, Li Y, Nomoto A, Sternini S, Zhou Q, Pharr M, di Scalea FL, Xu S. *Sci Adv*, 2018, 4: eaar3979

46 Zhang J, Hao L, Yang F, Jiao W, Liu W, Li Y, Wang R, He X. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 33848–33855

47 Kim Y, Parada GA, Liu S, Zhao X. *Sci Robot*, 2019, 4: eaax7329

48 Wang TY, Meng JL, Rao MY, He ZY, Chen L, Zhu H, Sun QQ, Ding SJ, Bao WZ, Zhou P, Zhang DW. *Nano Lett*, 2020, 20: 4111–4120

49 Maeda Y, Okihara C, Hasegawa Y, Taniguchi K, Matsushima M, Sugiyama T, Kawabe T, Shikida M. *Microsyst Technol*, 2020, 26: 3705–3713

50 Herbert R, Lim HR, Rigo B, Yeo WH. *Sci Adv*, 2022, 8: eabm1175

51 Son D, Lee J, Lee DJ, Ghaffari R, Yun S, Kim SJ, Lee JE, Cho HR, Yoon S, Yang S, Lee S, Qiao S, Ling D, Shin S, Song JK, Kim J, Kim T, Lee H, Kim J, Soh M, Lee N, Hwang CS, Nam S, Lu N, Hyeon T, Choi SH, Kim DH. *ACS Nano*, 2015, 9: 5937–5946

52 Li J, Zhang Y, Wang P, Wang G, Liu Y, Liu Y, Li Q. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 22891–22901

53 Wang P, Li J, Wang G, Hai Y, He L, Yu Y, Wang X, Chen M, Xu B. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 28060–28073

54 Xu J, Li X, Zhong Y, Qi J, Wang Z, Chai Z, Li W, Jing C, Cheng Y. *Adv Mater Technol*, 2018, 3: 1800372

55 Ha CW, Prabhakaran P, Son Y. *3D Printing Additive Manufacturing*, 2019, 6: 165–170

56 Waller EH, Karst J, Freymann GV. *Light Sci Appl*, 2021, 2: 6

57 Fabis PM, Shum D, Windischmann H. Thermal modeling of diamond-based power electronics packaging. In *15th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 1999: 98–104

58 Almeida L, Ramadoss R, Jackson R, Ishikawa K, Yu Q. *J Micromech Microeng*, 2006, 16: 1189–1194

59 Mirzajani H, Aghdam EN, Ghavifekr HB, Jafarpour A. 3-state, High Contact and Release Force RF MEMS Switch Designed based on MetalMUMPs Process. In *25th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2017: 318–323

60 Qu P, Qu H. *Sensors*, 2013, 13: 5720–5736

61 Zine-El-Abidine I, Okoniewski M. *J Micromech Microeng*, 2007, 17: 2280–2287

62 Cohen A, Zhang G, Tseng FG, Frodis U, Mansfeld F, Will P. EFAB: Rapid, low-cost desktop micromachining of high aspect ratio true 3-D MEMS. In *IEEE Int Conf Micro Electro Mech Syst*, 1999: 244–251

63 Microfabrica Inc. Going beyond silicon MEMS with EFAB technology-white paper. Burbank, Microfabrica Inc, 2004

64 Evans JD, Bang C. *Proc IMECE*, 2002: 351–354

65 Alper SE, Ocak IE, Akin T. *J Microelectromech Syst*, 2007, 16: 1025–1035

66 Kempers R, Colenbrander J, Tan W, Chen R, Robinson AJ. *Int J Thermofluids*, 2020, 5-6: 100029

67 Jordan JW, Stacy W, Ng J, Cannon BL, Caba A, Vanhille KJ, Clough J, Stanton B. *IEEE Int Symp AP-USNC/URSI NRSM*, 2018: 817–818

68 Sherrer D, Fisher J. *US Patent*, US20040263290a1, 2004

69 Zhang YH, Ou-Yang WH, Wang H, Ding GF, Cai BC, Lai ZS. *Microfabrication Technology*, 2007, 5: 56–60. (in Chinese) [张永华, 欧阳炜霞, 汪红, 丁桂甫, 蔡炳初, 赖宗声. 微细加工技术, 2007, 5: 56–60]

70 Zhang YH, Ding GF, Shun XF, Li XP, Cai BC. *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, 2005: 1–4,

71 Zhang YH, Ding GF, Cai BC, Lai ZS. *Microfabrication Technology*, 2007, 1: 60–64 (in Chinese) [张永华, 丁桂甫, 蔡炳初, 赖宗声. 微细加工技术, 2007, 1, 60–64]

72 Wu Y, Ding G, Zhu Y, Wang Y, Liu R, Sun Y. *Polymers*, 2023, 15: 1015

73 Deng M, Ding G, Wang Y, Cui X, Wang H, Zang F, Wu H. *Vacuum*, 2011, 85: 827–832
74 Deng M, Ding G, Wang Y, Wu H, Yao Y, Zhu L. *Carbon*, 2009, 47: 3466–3471
75 Wu Y, Ding G, Zhang C, Wang J, Mao S, Wang H. *MicroElectron J*, 2010, 41: 325–330
76 Wu YB, Ding GF, Wang J, Zhang CC, Wang H. *MicroElectron Eng*, 2010, 87: 2035–2041
77 Wu YB, Wang J, Yan CP, Mao SP, Zhang CC, Wang H, Ding GF. *Microsyst Technol*, 2010, 16: 1869–1879
78 Wu Y, Zhang C, Wang H, Ding G. *J Micromech Microeng*, 2011, 21: 045007
79 Cai H, Li Y, Wu Y, Zhang H, Zhang Y, Sun Y, Wang G, Song J, Ding G. *J Electrochem Soc*, 2023, 170: 022504
80 Cui XM, Wang Y, Deng M, Ding GF. *J Funct Mater*, 2011, 42: 1972–1976
81 Sun B, Wang Y, Ding G. *Opt Mater Express*, 2016, 6: 2304–2312
82 Sun Y, Wu Y, Cai H, Luo J, Wang Y, Ding G. *Compos Part A-Appl Sci Manufacturing*, 2021, 143: 106276
83 Lai L, Wu Y, Yang Y, Wang H, Yang Z, Ding G. *J Electrochem Soc*, 2019, 166: D726–D736

Multi-compatible integrated manufacturing process and applications based on electrochemical micromachining technology

Han Cai[1,2], Hongtao Li[1,2], Yunna Sun[1*], Yan Wang[1], Hong Wang[1], Guifu Ding[1]

[1] *National Key Laboratory of Advanced Micro and Nano Manufacture Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*
[2] *School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*
**Corresponding author (email: Cecilia_Sun@sjtu.edu.cn)*

Abstract: With the development of Moore's law gradually approaching its limit, highly integrated and multifunctional micro-electro-mechanical systems (MEMS) devices have provided continuous motivation for intelligent applications. To realize the system integration compatible with more functional components, it is crucial to break through the difficulty of heterogeneous manufacturing, multiple materials and complex structures. Multi-compatible integrated manufacturing technology is based on electrochemical micromachining, reducing the fabrication temperature and facilitating the integration process. It demonstrates the potential for integrating diverse materials, structures, and processes. Meanwhile, it provides an effective solution to the above challenges, laying a technical foundation for fabrication of high-performance, intelligent, and miniaturized MEMS devices with significant demand. This article analyzes the compatibility of typical MEMS fabrication technologies, introduces the technical connotation, development potential, key technologies, and stage achievements of multi-compatible MEMS-integrated manufacturing processes, and further explores the fundamental issues need to be addressed in the future.

Keywords: electrochemical micromachining, multi-compatible integrated manufacturing, MEMS micromachining technology, mask-electroplating, functional device system integration

doi: 10.1360/SSC-2023-0144