DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.20251107120

介质材料表面三维共形导电线路制造技术的研究进展

项徽清[1]，罗　杰[1]，阎德劲[2]，文　磊[2]，苑　博[2]，刘秀丽[2]，方　杰[3]，崔西会[3]，聂剑坤[3]，
黎康杰[3]，黄西全[4]，袁弋岚[4]，张雨晴[2]，刘建国[1,5]
（1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心，湖北 武汉 430074；2. 中国电子科技集团公司第十研究所，四川 成都 610036；3. 中国电子科技集团公司第二十九研究所，四川 成都 610036；4. 深圳市奥凌电子科技有限公司，广东 深圳 518102；5. 泰兰特激光技术(武汉)有限公司，湖北 武汉 430223）

摘　要: 介质材料具有质轻、价廉、机械性能良好、化学性能稳定等优点，已经在日常生活和工业领域得到了非常广泛的应用。在介质材料表面制造共形导电线路，实现电气功能和机械功能的一体化集成制造，不仅进一步拓展了介质材料的应用范围，还推动了电子产品向微型化、轻量化、高集成度、多功能化、低能耗方向发展。文中综述了介质材料表面共形导电线路制造技术的研究进展，系统梳理了柔性膜转移、光刻、喷墨打印、微笔直写、激光直接成型、激光活化金属化、转印等典型技术，指出选用合适的制备工艺可实现共形导电线路的高效制造。此外，文章对比分析了各类共形导电线路制造技术的优缺点，并对共形导电线路的未来发展进行了展望。

关键词: 介质材料；共形制造技术；共形导电线路；共形天线

中图分类号: TN405　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1008-5300(2026)05-0051-13

引用格式: 项徽清, 罗杰, 阎德劲, 等. 介质材料表面三维共形导电线路制造技术的研究进展[J]. 电子机械工程, 2026, 42(5): 51-63.

Xiang Huiqing, Luo Jie, Yan Dejin, et al. A review of manufacturing technology of 3D conformal electrically conductive circuits on the surface of dielectric materials[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2026, 42(5): 51-63.

A Review of Manufacturing Technology of 3D Conformal Electrically Conductive Circuits on the Surface of Dielectric Materials

Xiang Huiqing[1], Luo Jie[1], Yan Dejin[2], Wen Lei[2], Yuan Bo[2], Liu Xiuli[2], Fang Jie[3], Cui Xihui[3], Nie Jiankun[3], Li Kangjie[3], Huang Xiquan[4], Yuan Yilan[4], Zhang Yuqing[2], Liu Jianguo[1,5]
(1. *Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074, *China*; 2. *The* 10*th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu* 610036, *China*; 3. *The* 29*th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu* 610036, *China*; 4. *Shenzhen Aoling Electronic Technology Co., Ltd., Shenzhen* 518102, *China*; 5. *Talent Laser Technology (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan* 430223, *China*)

Abstract: Dielectric materials have been widely used in daily life and industrial fields because of their light weight, low cost, good mechanical properties and chemical stability. The fabrication of conformal electrically conductive circuit patterns on the surface of the dielectric materials can integrate mechanical and electrical functions, which not only further expands their application range, but also enables electronic products to develop in the directions of miniaturization, light weight, high integration, multi-functionality and low energy consumption. Research progress in manufacturing technologies for conformal conductive circuits on dielectric material surfaces is reviewed. Typical techniques including flexible film transfer, photolithography, ink-jet printing, micro-pen direct writing, laser direct forming, laser-activated metallization and transfer printing are systematically summarized. It is indicated that efficient fabrication of conformal conductive circuits can be achieved by the selection of appropriate fabrication processes. Meanwhile, the advantages and disadvantages of various manufacturing technologies for conformal electrically conductive circuit are compared and analyzed, and the future development of conformal electrically conductive circuit is also prospected.

Keywords: dielectric material; conformal manufacturing technology; conformal electrically conductive circuit; conformal antenna

收稿日期: 2025-11-07
基金项目: “十四五”国防基础科研计划资助项目(JCKY2023210C019)

0 引 言

介质材料主要分为有机高分子材料(如塑料、树脂等)、无机材料(如陶瓷、铁氧体、玻璃等)和有机–无机复合材料(如掺玻璃纤维的塑料等)。介质材料具有质轻、价廉、易成型、易加工、机械性能良好、化学性能稳定等优点,在日常生活和工业领域具有广泛而重要的应用。然而,一方面,原始的介质材料表面往往呈化学惰性、表面能低,导致其对其他材料层的附着力低而难以满足实际应用需求;另一方面,随着现代5G通信等高端领域的快速发展,人们对介质材料的性能提出了更高的要求,既需要维持甚至提升材料原有性能,还期望其具备更多新型优异特性。例如,在介质材料表面制造某种具有特定功能的共形导电线路图案,从而将电气功能、机械功能等一体化集成在介质材料上。这既能满足其在汽车、微波器件、移动通信、可穿戴智能电子设备、医疗器械等领域的应用要求,又可有效推动器件向微型化、轻量化、高集成度、多功能化、低能耗方向发展。再如,在车窗玻璃、扰流板、车顶等非金属部件上制造共形天线,相比传统的鲨鱼鳍天线,共形天线风阻更小,性能更稳定,设计更灵活;在飞机蒙皮、导弹弹头、无人机的气动外形结构上制造用于雷达及通信导航设备的共形天线,极大地减少空气阻力和雷达散射界面,提高隐身性能;在介质材料(如陶瓷、高频层压板)制成的三维腔体或外壳内直接制造传输线、滤波器、耦合器等无源元件,实现微波模块(如收发组件)的高度集成化,显著减小模块体积和质量,减少互连带来的信号损耗和寄生效应,提升高频性能。

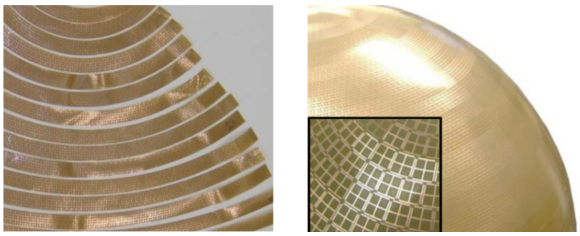
平面导电线路的制造工艺简单,技术成熟。但在实际应用中(例如飞行器雷达罩、三维共形天线等),为了满足载体的外形结构、空气动力学性能、隐身性能等,往往需要在三维曲面上制造共形导电线路[1]。但常用的平面导电线路制造技术(如印刷电路板制造技术)不适合或难以实现三维共形导电线路的制造。

因此,三维共形导电线路的制造吸引了国内外众多学者的广泛关注,经过几十年的研究,已经取得了一定的进展,包括柔性膜转移、光刻、喷墨打印、微笔直写、激光直接成型、激光活化金属化和转印技术等在内的各种制造技术被提出。本文综述了三维共形导电线路制造技术的国内外进展,对比分析了各制造技术的优缺点,以期为后续相关研究提供参考与借鉴。

1 共形导电线路制造技术

1.1 柔性膜转移技术

传统的共形导电线路制造通常采用柔性膜转移技术,即通过成熟的平面导电线路制造工艺在柔性薄膜上制备金属线路图案,然后将其裁剪成多个小单元,再反贴至三维曲面工件表面。文献[2–3]将三维球面的频率选择表面功能图案映射到二维平面上,采用印刷电路板工艺在聚酰亚胺(polyimide, PI)薄膜上制备频率选择表面功能图案,然后将平面图案裁剪成带状的小单元,如图1(a)所示,再将其粘贴在三维球面上,如图1(b)所示。



(a)裁剪的平面带状频率选择表面单元 (b)球面频率选择表面

图1 平面及球面频率选择表面[2–3]

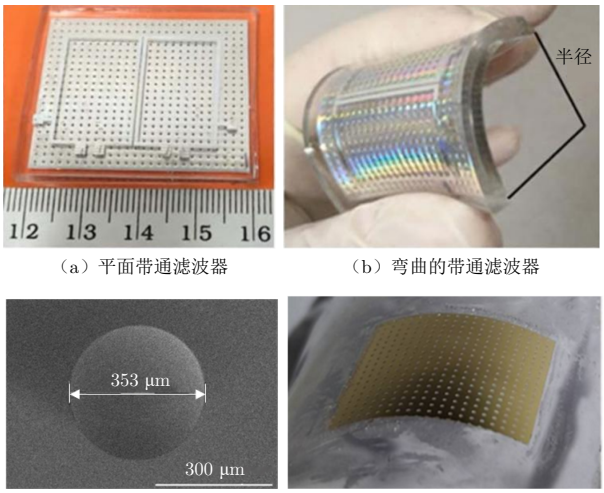
柔性膜在不可展开的大曲率表面上粘贴时会出现褶皱、缝隙等缺陷,且图案完整性差、拼接精度低,会影响器件最终的电磁性能。

1.2 光刻技术

传统的投影式光刻技术是一种典型的图案化制造技术,它通过局域选择性曝光,将掩膜版上的图案转移到基材表面的光刻胶上,再经过显影、刻蚀、去胶等工艺,将光刻胶上的图案转移至基材材料上。虽然光刻技术能够实现高精度和高集成度精细电路结构的制造,但它需要预先制作掩膜版,不仅成本高昂,而且掩膜版上的图案一旦制作完成便无法更改。此外,该技术灵活性有限,难以实现大面积非周期性图形和三维曲面图形的制造,且在三维领域的应用受到明显的限制。基于传统光刻技术的上述缺陷,众多研究者在传统光刻技术的基础上,不断改进工艺和技术,将光刻技术拓展到三维曲面图形的制造,主要成果包括软光刻技术、全息光刻技术和激光直写光刻技术。

软光刻技术主要使用弹性体掩膜将图案转移至三维基材上,目前常用聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)作为弹性体材料。PDMS具有非常低的玻璃化温度,在室温下是液体,但可通过交联轻易转化为固体弹性体[4]。此外,聚氨酯(polyurethane, PU)、PI交联的苯酚甲醛聚合物等也可用作弹

性体材料[5]。在此基础上，弹性体掩膜通过将弹性体浇注在表面具有浮雕结构的母体上，再经固化、剥离等工艺制备而成[6]。与传统的投影式光刻技术所使用的刚性掩膜不同，弹性体掩膜能够贴合在三维曲面上形成三维掩膜，进而实现三维图案的制造。如图 2(a)和图 2(b)所示，文献[7]利用软光刻技术制造了液态金属镓铟锡合金带通滤波器，其中镓铟锡液态合金被封闭在 PDMS 衬底的微流体通道中。相关实验证明，该滤波器在不同半径的弯曲或扭曲情况下，其频率响应几乎不受影响，仅在拉伸情况下，其中心频率略有下降。如图 2(c)和图 2(d)所示，文献[8]采用软光刻工艺在环氧树脂上制作了凸面微透镜阵列，并利用该微透镜阵列实现了100°的大视场成像。



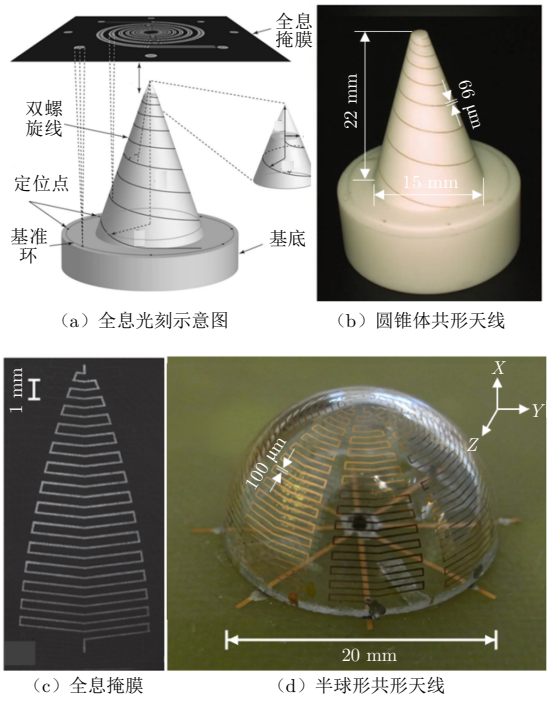
（a）平面带通滤波器　（b）弯曲的带通滤波器

（c）微透镜单元　（d）微透镜阵列

图 2　软光刻技术制备的带通滤波器和微透镜[7–8]

软光刻技术需要预先制备带有图案的弹性体掩膜，然后再将图案转移至目标基材上，不但步骤繁琐、工艺复杂，而且对于不可展开的曲面(如球面)，弹性体掩膜不能与其完全贴合，会导致图案失真，精度下降，影响器件的性能。

全息光刻技术将一束激光通过衍射光学元件形成一组发散的多个相干子光束，这组子光束通过透射掩膜选择所需的光束并发生相互干涉，以获得预设的三维干涉图案[9]。然后对三维工件表面预置的光刻胶进行选择性曝光，经过显影、刻蚀、去胶等工艺后获得三维图形。文献[10]利用全息光刻技术在圆锥体基底上制造了共形螺旋天线，线宽约为 66 μm，如图 3(a)和图 3(b)所示。文献[11]在直径为 20 mm 的半球形玻璃基底上，利用全息光刻技术成功制造了线宽 100 μm、线间距 400 μm 的八臂共形天线。其首先在玻璃基底表面溅射钛、金两层金属；然后利用多平面迭代技术完成全息掩膜图(图 3(c))的设计和计算；最后利用波长为 405 nm 的激光进行曝光，经过显影、腐蚀、去胶后得到共形天线(图 3(d))。



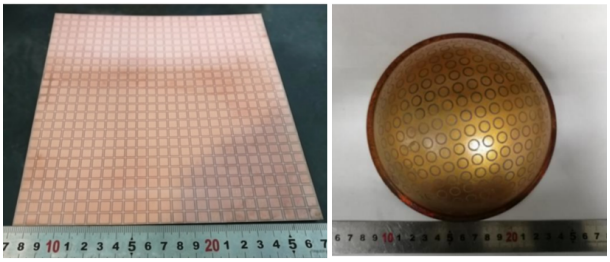
（a）全息光刻示意图　（b）圆锥体共形天线

（c）全息掩膜　（d）半球形共形天线

图 3　全息光刻技术制备的共形天线[10–11]

激光直写光刻技术是一种无需掩膜的光刻技术，通过控制激光束的扫描路径，按照预设图形直接曝光基底表面的光刻胶，再经过显影、刻蚀、去胶等工艺获得图案。激光直写光刻技术不需要使用掩膜，可利用机械设计软件(如 SolidWorks、AutoCAD 等)直接绘制目标图形，支持自由修改，工艺更简单，柔性化程度高，在三维曲面图案制造领域具有广阔的应用前景。

文献[12–13]研制了适用于制造大面积、跨尺度的三维曲面图形的激光直写光刻系统，通过动态聚焦单元，实现对激光束焦点位置在 Z 轴方向上的精确控制。文献[14–15]利用该系统成功制造了大尺寸平面(200 mm×200 mm)和曲面(底面直径 150 mm，矢高 50 mm，曲率半径 81.25 mm 的半球形)的频率选择表面，如图 4 所示。通过将激光直写光刻技术与激光直接刻蚀技术、柔性膜转移技术进行对比，发现激光直



（a）平面频率选择表面　（b）半球形曲面频率选择表面

图 4　激光直写光刻技术制备的频率选择表面[14–15]

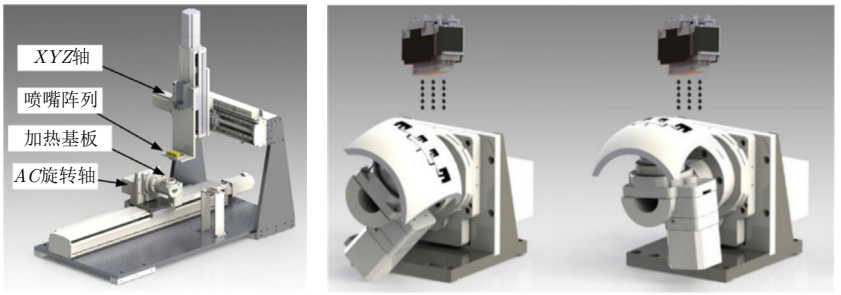
写光刻技术所制备的频率选择表面图案轮廓清晰陡直，对比度高，电磁波性能更好，实际测试的频率响应与模拟结果更接近。

改进前后的光刻技术都属于减材制造技术，都需要预先在基材全域表面制备金属层，再刻蚀去除图案区域以外的金属材料，该过程会不可避免地产生材料损耗，提高制造成本[16]。

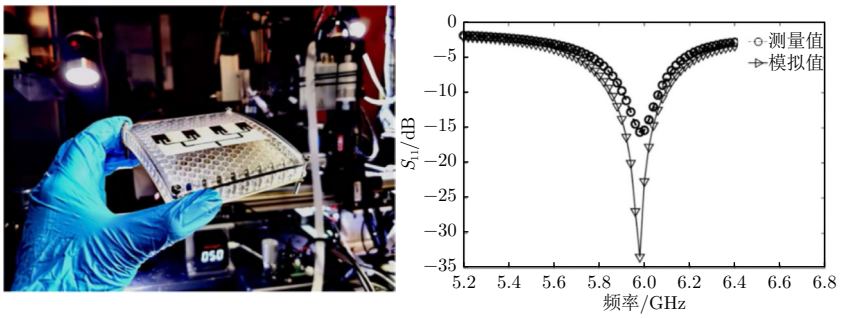
1.3　喷墨打印技术

喷墨打印技术是一种非接触式的增材制造技术，它通过压力系统控制导电墨水液滴(液滴直径通常为10～150 μm)喷出并精确落在基底上，待溶剂挥发，导电材料固化后直接形成图案[17-19]。文献[20]制备了基于全喷墨打印的3D转换器，金属层通过银纳米颗粒喷墨打印制备，介质层由SU-8聚合物喷墨打印制备。文献[21]证明了采用类似的多层喷墨打印工艺制备微波结构具备一定的可行性。文献[22]提出基于喷嘴阵列的喷墨打印技术，并建立曲面液滴扩散模型，分析曲面导线线宽与打印参数的关系。该喷墨打印设备包含五轴运动系统和两组喷嘴阵列，如图5(a)和图5(b)所示。利用该设备制造了共形微波传输天线阵列(图5(c))，天线的工作频率与设计值几乎完全一致(图5(d))。所设计的喷嘴阵列能够极大地提高打印效率，打印面积为100 mm×100 mm的图案用时不超过5 s。

另一种具有代表性的五轴喷墨打印制造系统包括喷射同步数控插补子系统、材料喷射控制子系统、数据处理和路径规划子系统、红外激光烧结子系统以及紫外线(ultraviolet, UV)固化子系统。文献[23]利用该系统打印了高度为400 mm、最大半径为420 mm的共形超表面，如图6(a)所示。此外，文献[24-25]采用NanoJet气溶胶喷射系统，在Kahu无人机系统的鼻锥区域打印纳米银颗粒墨水以制备超表面天线(图6(b))；打印完成后对涂层进行固化，再结合化学镀铜工艺，提升纳米银层的射频导电性能。该方法打

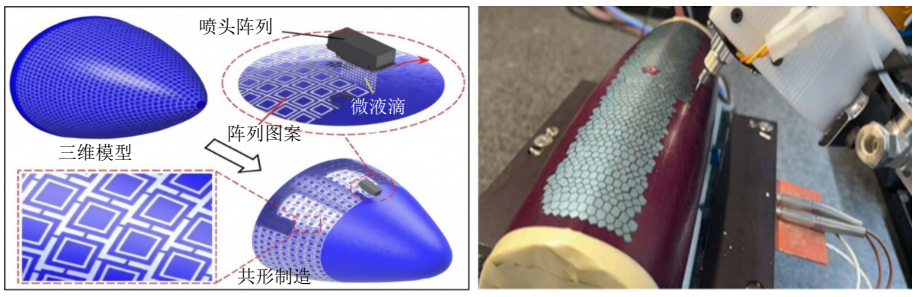


(a) 喷墨打印设备　(b) 喷嘴阵列



(c) 共形天线阵列　(d) 共形天线的频率响应

图5　喷墨打印设备及所制备的共形天线[22]



(a) 喷墨打印制造共形超表面示意图　(b) 气溶胶打印的无人机超表面天线

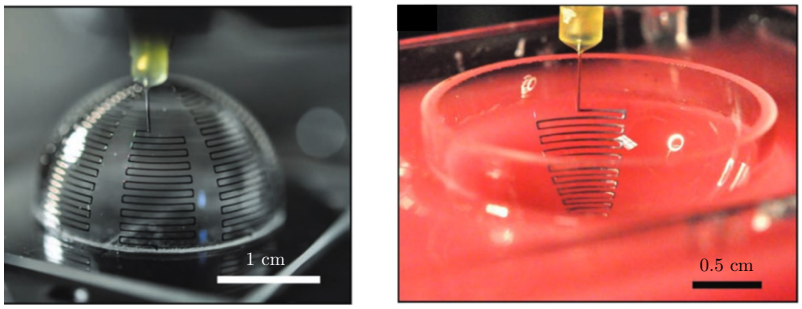
图6　喷墨和气溶胶打印制备的共形超表面[23-25]

印的超表面天线具备良好的电磁性能，能够满足无人机系统的应用要求。

与光刻技术相比，喷墨打印技术无需掩膜，图形质量不受光学系统的焦深限制，适用于复杂曲面图形的制造；同时，喷墨打印是一种按需打印的工艺，墨水只沉积在所需的位置上，避免了材料的浪费，节约了成本。然而，喷墨打印技术对导电墨水的流变性、均匀性、导电性、可印刷性等性能要求苛刻，限制了其应用范围[26–27]：一方面，对于给定的打印喷头，可打印的墨水黏度范围非常狭窄（大多数在 1～50 mPa·s），这种限制通常会导致开发新墨水的成本增加；另一方面，喷墨打印技术对墨水中颗粒尺寸也有限制，上限一般为打印喷嘴直径的 1/100，很容易导致许多功能材料无法应用喷墨打印技术。同时，一些在电子行业中拥有广阔应用前景的纳米结构材料（如纳米线、纳米纤维、纳米管等）具备独特的性能，但是在不改变其分散结构长宽比的情况下，很难通过喷墨打印技术实现图案化[28]。

1.4　微笔直写技术

微笔直写技术通过计算机精密控制驱动气压将电子浆料从微型笔头中挤出，按照预设图案轨迹在基材表面直写出线路，然后采用激光烧结或炉体固化，获得导电线路图案。该技术配合多轴运动平台可以在复杂三维曲面表面进行直写，实现共形制造；通过直写电子浆料与介质材料，可实现多种材料复合打印。如图 7 所示，文献[29]在凸、凹半球面上直写银浆，成功制备了八臂共形天线，其带宽接近尺寸极限，相比基本的单极天线提高了近一个数量级。

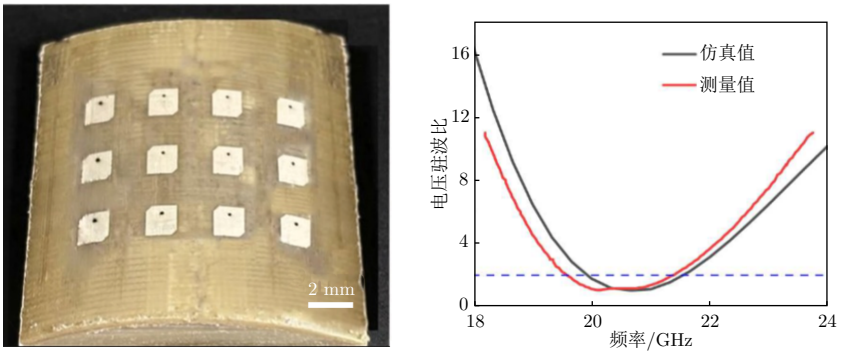


（a）凸半球面共形天线　　（b）凹半球面共形天线

图 7　微笔直写技术制备的共形天线[29]

文献[30]采用熔融沉积成型（fused deposition modeling, FDM）+激光微熔覆复合制造技术集成制造聚醚醚酮（polyetheretherketone, PEEK）基微带片天线。首先采用 FDM 技术打印 PEEK 基底，然后在其上直写银辐射图案，并采用激光烧结最终制备出微带片天线，如图 8(a)所示。实测的电磁性能与仿真结果显示出良好的一致性（图 8(b)）。

微笔直写技术受限于浆料中颗粒大小、微型笔头尺寸以及毛线管效应，在直写过程中很容易造成微型笔头堵塞，影响直写精度。此外，由于多轴运动平台移动速度缓慢，再加上复杂三维曲面不规则等原因，目前微笔直写的速度偏慢，加工效率有待提升。



（a）PEEK基微带片天线实物图　　（b）电压驻波比的仿真值与测量值结果

图 8　PEEK 基微带片天线及其电磁性能[30]

1.5　激光直接成型技术

激光直接成型（laser direct structuring, LDS）技术是德国 LPKF 公司提出的一种制造三维模塑互连器件（three-dimensional molded interconnect device,

3D-MID)的关键技术。如图 9 所示，LDS 技术的制造工艺主要分为三步[31]：1)将激光活性物质添加剂与聚合物材料一起熔融混合注塑成型，制成 LDS 塑料；2)在成型工件表面激光活化；3)进行化学沉积生长，实现区域选择性金属化。激光活化具备双重作用：其一，可分解激光活性物质，生成催化活性中心，在化学镀过程中实现铜层在激光活化区域的选择性催化沉积；其二，能够在聚合物基材表面构筑特殊微纳结构，以此提升金属镀层与基体之间的结合强度。LDS 技术的显著特点是在聚合物材料注塑时添加激光活性物质，使其在成型塑料件中均匀分布。

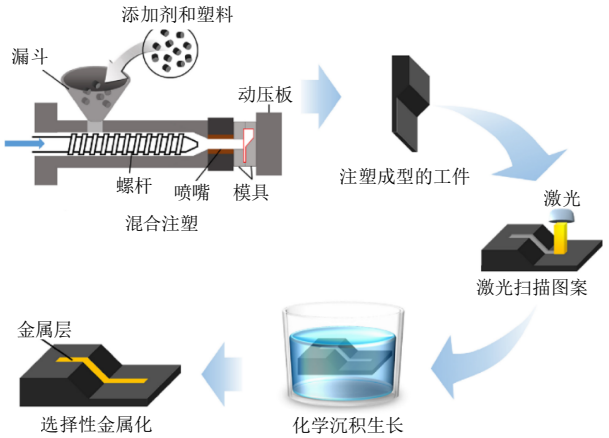
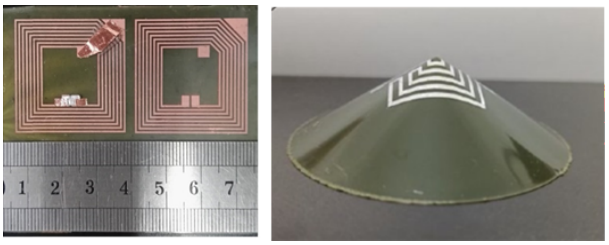


图 9　LDS 技术工艺流程示意图[31]

传统的激光活性物质主要是铬酸铜，但由于铬酸铜有毒，且会造成环境污染，因此众多学者围绕新型激光活性物质材料体系开展了大量研究，研究对象主要集中于金属氧化物与有机金属复合物。文献[31]利用溶胶–凝胶法合成铝酸铜粉末，并将其作为活性物质添加到聚碳酸酯(polycarbonate, PC)和 PI 中注塑成型，使用掺钕钇铝石榴石激光(波长λ=1 064 nm)扫描活化，化学沉积生长后成功实现了金属化。四川大学周涛教授研究团队近年来做了很多关于 LDS 技术激光敏感物质的研究和探索，并深入研究了激光与塑胶材料中敏感物质相互作用的机理，先后证明了羟基磷酸铜[32–34]、铜–铬氧化物[35]、乙酰丙酮合铜[36]、锑掺杂氧化锡(antimony-doped tin oxide, ATO)[37]、氧化钼[38]等含金属化合物作为激光敏感物质的可行性，并成功实现了共形导电线路的制造。该团队利用 LDS 技术在聚丙烯腈–丁二烯–苯乙烯共聚物(acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)基材上制造了近场通信(near field communication, NFC)电路，该电路由 8 圈线宽/线间距为 0.5 mm 的铜导线组成(图 10(a))，并成功实现了与智能手机间的数据读写功能；将 ATO 掺杂进苯乙烯–乙烯/丙烯–苯乙烯嵌段共聚物，利用 LDS 技术制备铜图案后，再在铜图案表面印刷一层液态镓铟锡合金，实现圆锥表面共形天线的制备，如图 10(b)所示[39]。



(a) NFC平面电路　(b) 圆锥表面共形天线

图 10　LDS 技术制备的平面电路和圆锥表面共形天线[39]

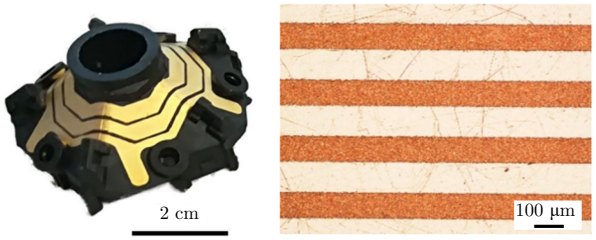
LDS 技术具有工艺简单、柔性化程度高、加工效率高等优点，且适用于三维共形导电线路的制造，是目前商业化程度最高的 3D-MID 制备技术。但由于它需要预先掺杂激光活性物质制成 LDS 塑料，因此原料成本较普通的聚合物材料更高。此外，掺杂激光活性物质会影响基材材料的物理性能(如导致聚合物介电常数升高)和机械性能(如产生微裂纹导致材料易碎)，特别是在高频下信号衰减显著[40–41]。同时，该技术不适用于已经注塑成型的普通聚合物材料。这些原因使其在高频、高可靠性等高端应用环境中受限严重。

1.6　激光活化金属化技术

激光活化金属化技术利用激光对基材表面预置的激光活性材料进行活化，使基材具有催化活性(即在基材表面产生催化活性中心)，能够催化后续化学镀过程，实现金属在激光辐照区域的选择性沉积。金属化学镀的原理：在不通电流的情况下，镀液中的金属离子受到催化活性中心影响，被还原剂还原成金属原子，沉积在基材表面形成金属镀层。

传统的激光活化金属化技术通常使用银、钯等贵金属作为激光活性材料。文献[42]利用皮秒激光和硝酸银在 PC 和 ABS 基材上成功制备了 3D-MID 器件(图 11(a))，且扫描速度可达 4.8 m/s。所获得的铜导线边缘清晰陡直，对比度高，如图 11(b)所示。

文献[43]利用激光活化金属化技术成功制备了 5G 天线，将钯离子与 4–乙烯基吡啶的复合物涂覆在 PI 基材上，干燥成膜后，利用 UV 脉冲激光在 PI 基材上扫描，将钯离子还原成钯原子，同时过氧化苯甲酸叔丁酯分解产生的自由基引发 4–乙烯基吡啶与 PI 的共聚反应，增强催化活性中心与基材间的附着力。化学镀后得到高质量的铜电路图案，最小线宽约为 30 μm，

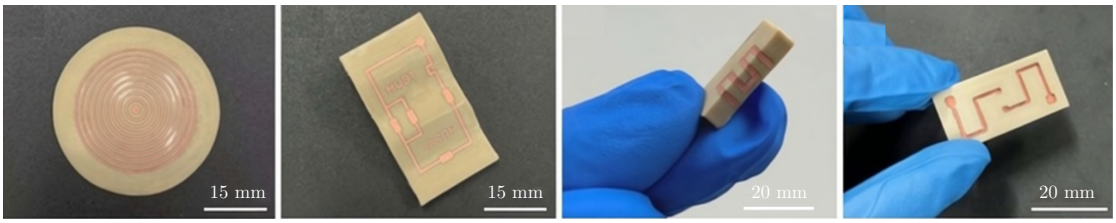


（a）三维模塑互连器件　　（b）铜导线显微图片

图 11　激光活化金属化技术制备的导电线路[42]

且铜图案在弯曲疲劳试验后表现出优异的附着力和良好的导电性。

贵金属激光活性材料在激光作用前后均具有催化活性，尤其是对于粗糙表面，这些活性物质难以彻底清洗干净，化学镀时容易发生溢镀，导致图案选择性差、线路短路等问题，影响器件的正常功能。文献[44]利用疏水涂层辅助激光活化的方式，首先在基底材料表面涂覆硅氧树脂疏水涂层；然后利用激光选择性刻蚀、活化，实现基材表面润湿性调控，提升氯化钯活化液在基材表面的浸润选择性；最后通过化学镀实现金属图案的制造。利用该技术可在 3D 打印的 PEEK 基板上将铜导线分辨率提升至 60 μm，并可在多种形状的 PEEK 工件表面构筑三维共形导电线路，如图 12 所示。



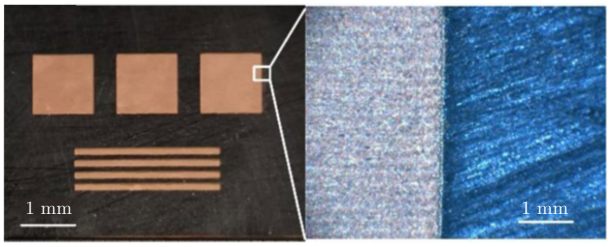
（a）同心圆形线路　（b）平面集成功能线路　（c）柱面共形导电线路　（d）蛇形弯折线路

图 12　不同形状的 PEEK 基共形导电线路[44]

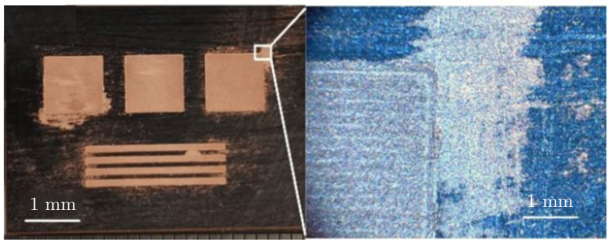
笔者团队改进了激光活化金属化技术，采用羟基磷酸铜[40]、磷酸镍[45]等非贵金属材料作为激光活性物质，这些材料只在激光活化后才具有催化活性。通过激光改性在介质基材表面构建特定的微结构，并在基材外表面预置不含贵金属的激光活性物质，经激光活化后，在镀液区域选择性地制造出三维共形导电线路。在圆柱形 PEEK 表面制造的螺旋天线如图 13 所示。利用激光调控基材表面微纳结构，能够极大地提高异质界面金属结合强度（可达 40 MPa），可满足高过载等极端服役条件要求。同时将非贵金属与贵金属激光活性物质在结合强度、制造精度、图案选择性等方面进行了深入对比，结果表明两者在结合强度和制造精度方面效果相同，但贵金属活性物质的图案选择性较差，易诱导金属铜沉积在非图案区，造成短路，如图 14 所示。



图 13　圆柱形 PEEK 表面制备的共形导电线路



（a）非贵金属激光活性物质制备的金属图案

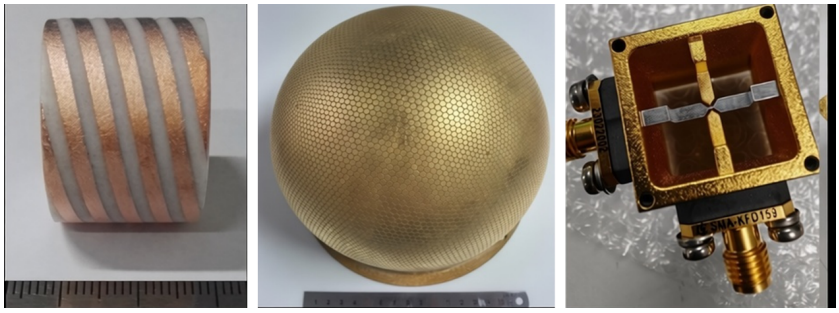


（b）贵金属激光活性物质制备的金属图案

图 14　贵金属与非贵金属激光活性物质的图案选择性对比

此外，采用非贵金属激光活性物质，在成本控制、环境友好性、基材适应性等方面具有显著优势，同时避免了贵金属体系常见的溢镀问题。综上所述，改进后的激光活化金属化技术是一种通用的、成本更低的共形导电线路制造技术。

国内泰兰特激光技术（武汉）有限公司利用该技术进行了曲面共形电路规模化的批量生产，部分产品如图 15 所示。各产品的性能及可靠性均完成实际应用场景验证测试，已投入实际服役。



（a）聚四氟基螺旋天线　（b）石英氰酸酯复材基超表面球罩　（c）聚苯醚基喇叭天线

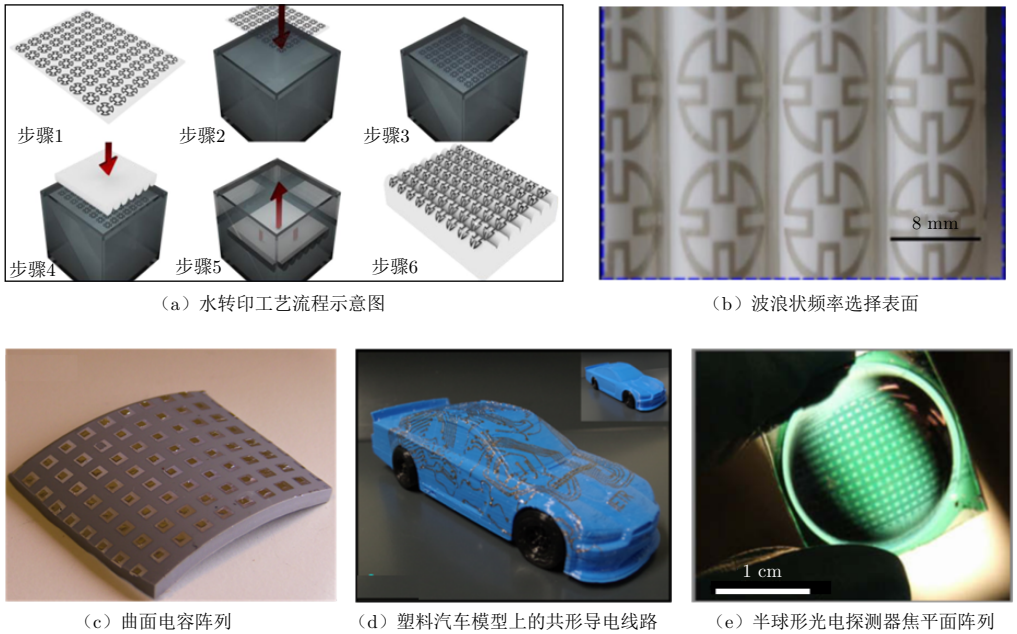
图 15　泰兰特激光技术（武汉）有限公司生产的共形电路

1.7　转印技术

转印技术是一种将微纳功能图案组装成具有二维或三维空间分布的功能组件的通用方法，适用于大规模装配场景。典型的转印工艺包括图案拾取和印刷两个步骤[46]：首先在供体基材上制备功能组件（如微纳米膜、纳米线、纳米管等）；然后将印章与功能组件接触，使功能组件被拾取到印章上；最后将带有功能组件的印章与目标基材接触，移除印章后将功能组件打印到目标基材上。转印技术主要包括运动控制转印法[47–48]、热释放转印法[49]、水转印法[50–52]、剪切辅助转印法[53]、激光辅助转印法[54–55]等。

转印技术广泛应用于柔性电子器件、智能医疗、太阳能电池等领域。近年来国内外众多学者对利用转印技术制备共形天线做了很多实质性的探索。例如，文献[56]利用水转印技术成功制备了波浪状频率选择表面，其制备工艺如图 16(a)所示。首先利用丝网印刷技术在平面聚乙烯醇（polyvinyl alcohol, PVA）表面制备频率选择表面的功能性金属阵列图案。然后将印有金属图案的 PVA 浸入水中，PVA 溶于水使金属图案漂浮在水面上。再将目标三维基材缓慢浸入水中与金属图案接触，使金属图案转移到目标三维基体上，所制备的频率选择表面的频率响应与数值模拟的结果相符，如图 16(b)所示。文献[57]利用水转印技术制备了曲面电容阵列（曲率半径 5 cm），如图 16(c)所示。该电容器包括两层（顶层和底层）150 nm 厚的金属铝和 1.3 μm 厚的介质层，电容约为 34 pF，并利用该电容器阵列成功制备了电容性曲面触摸屏。此外，在塑料汽车模型上应用该技术（图 16(d)）后，成功转印了复杂的电路结构，展示了水转印技术制备共形导电线路的巨大潜力。文献[58]利用弹性 PDMS 印章（由一组平行的宽 40 μm、高 15 μm 的脊组成），将金属图案转印至目标基板上，成功制备了半球形有机光电探测器焦平面阵列，如图 16(e)所示。

文献[59]利用转印技术制备共形液态合金电路，



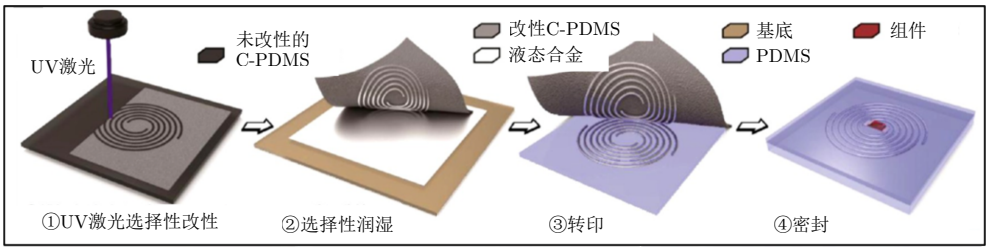
（a）水转印工艺流程示意图　（b）波浪状频率选择表面

（c）曲面电容阵列　（d）塑料汽车模型上的共形导电线路　（e）半球形光电探测器焦平面阵列

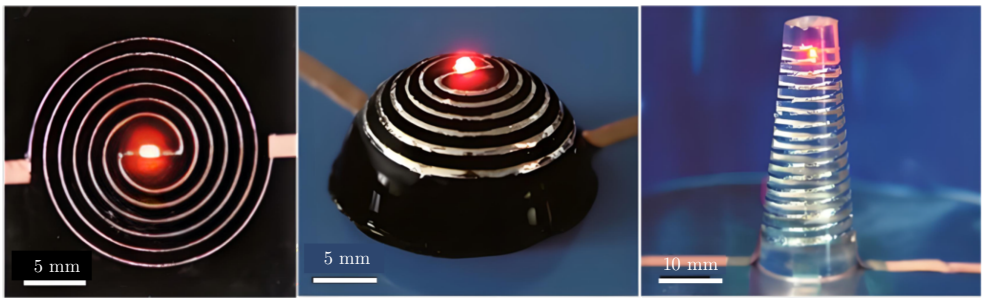
图 16　水转印工艺流程示意图及所制备的共形导电线路[56–58]

其制备工艺如图 17(a)所示。首先利用 UV 激光选择性改性碳掺杂 PDMS(C-PDMS)印章，调控 C-PDMS 对液态合金的润湿性(液态合金无法润湿激光改性区域，仅能润湿未改性区域)。然后用激光改性后的 C-PDMS 印章接触并吸附液态合金，再将吸附了液态合金的 C-PDMS 印章与目标基材接触，将液态合金图案成功转印至目标基材上。研究人员利用该技术成功在平面、球面和圆锥面上制备了共形螺旋天线，分别如图 17(b)～图 17(d)所示。

转印技术虽然工艺简单，能满足大规模的生产，但对贴合面之间的黏性要求很高，需要精确控制：图案拾取时，需保证印章–图案界面黏附强度高于图案–供体界面黏附强度，使图案于供体界面发生分离，实现图案向印章的转移；印刷时，则要求目标基材–图案界面黏附强度大于印章–图案界面黏附强度，令图案脱离印章，完成向目标基材的转印。



（a）转印技术工艺流程示意图



（b）平面共形螺旋天线　（c）球面共形螺旋天线　（d）圆锥面共形螺旋天线

图 17　转印技术工艺流程示意图及所制备的共形天线[59]

2　共形制造技术综合对比分析

在三维共形导电线路的制造技术领域，各类工艺方法呈现出鲜明的技术特征与适用边界。通过系统梳理与对比分析，可以清晰地看到一条从“传统平面工艺改造”到“专用三维工艺开发”，再到“多功能复合工艺探索”的技术发展路径。这一演进过程不仅反映了制造精度与曲面适应性之间的持续博弈，还体现了行业对高效率、低成本、环保化生产的迫切需求。柔性膜转移技术的本质是三维问题二维化处理，难以应对不可展开曲面；LDS 技术虽商业化成熟，但掺杂激光活性物质影响基材高频性能；激光活化金属化技术具有后处理、材料通用性强等优势，是非贵金属催化体系的重要发展方向。为了更清晰地展示各种共形制造技术的优劣与发展现状，本文从典型线宽、曲面适应性、适配材料、加工效率、成本和主要应用场景六个维度进行系统对比，如表 1 所示。

表 1　共形制造技术综合对比分析

制造技术	典型线宽/μm	曲面适应性/%	适配材料	加工效率	成本	主要应用场景
柔性膜转移	10～100	＜40	柔性薄膜	高	低	汽车车窗天线
光刻	5～100	50～70	光刻胶	中	高	飞行器透明座舱盖
喷墨打印	50～150	40～60	专用墨水	中高	中	可穿戴设备中的共形天线
微笔直写	50～200	40～60	电子浆料	低	中	特种传感器、存储器等器件封装
LDS	100～150	＞90	LDS塑料	高	中高	手机天线、汽车方向盘内的共形电路
激光活化金属化	30～100	＞90	普通介质材料	高	中低	高频雷达罩、频率选择表面、弹载天线
转印	≥40	＞90	多种功能材料	高	高	汽车内饰、智能蒙皮

此外，从技术适应性角度来看，各类工艺对三维曲面的处理能力存在显著差异。柔性膜转移技术作为最早应用的方案，在曲率变化平缓、可展开的规则曲面上表现尚可，但在球面等不可展开曲面上会出现明显的拼接缝隙与褶皱缺陷，产生的拼接误差会导致电磁波散射和性能恶化，使其应用场景受到严格限制。相比之下，光刻技术展现出更强的曲面适应性与更高的制造精度，线宽可达 10 μm 以下，特别适合用于航空航天领域对精度要求极高的频率选择表面和共形天线。喷墨打印和微笔直写作为增材制造的代表，虽通过多轴运动控制实现了对三维曲面的直接制造，但前者受限于墨水流变特性，后者受限于挤出精度。二者的显著优势是能够实现不同材料的叠层制造，已成为多层曲面电路制造的重要发展方向。

在加工效率与成本效益的平衡方面，不同技术路线呈现出明显的差异。LDS 技术凭借其在效率、成本和曲面适应性上取得的完美平衡，成为商业化最成功的方案。其将激光活化与化学镀结合，加工速度可达米/秒量级，线宽控制在 100～150 μm，完全满足消费电子产品的制造要求，进而建立起完整的产业链和标准体系。然而，如前所述，LDS 基材必须预先掺杂激光活性物质，这不仅提高了原料成本，还可能影响材料的本征性能，特别是在高频应用时介电损耗会明显增加。相比之下，激光活化金属化技术采用后处理方式，可在普通聚合物表面直接制造电路，材料成本显著降低，同时保持了较高的加工效率和精度。这种技术路线的通用性更强，被认为是下一代三维电路制造的有力竞争者。

总体而言，三维共形导电线路制造技术的发展呈现出明显的融合趋势，不同技术路线之间的界限正在模糊，复合工艺成为解决复杂需求的有效途径。未来，随着新材料、新工艺、新技术的不断突破，三维共形导电线路制造技术将在更多领域发挥关键作用，推动电子产品向更加微型化、轻量化、高集成度的方向发展。

3 展 望

在系统梳理、深入分析现有三维共形导电线路制造技术的基础上，本文提出四点展望，以期为该领域后续研究指明技术方向，提供研究思路。

1）技术融合与系统集成

当前，尚无任何一种技术能够同时在加工精度、曲面适应性、生产效率和成本控制四个维度上达到最优，不同技术路线之间的深度融合与系统级创新将成为未来发展的重要突破点。例如，激光活化技术在调控界面结合强度方面具备显著优势，可很好匹配转印技术对界面结合强度的严苛要求；同时激光活化拥有高精度图案化能力，转印技术则具备高效加工特性，适用于大尺寸工件。二者相结合，有望实现复杂曲面工件的高速、高精度电路制备。这种跨技术的协同创新，将是推动共形制造从“实验室工艺”迈向“工业化产线”的关键。

2）突破应用瓶颈的材料体系创新

当前绝大多数技术受限于材料体系，未来材料创新应聚焦于高性能与高兼容性、非贵金属催化体系、面向特定需求的定制化材料开发（如低损耗高透波基板、生物相容性封装材料）三个方面，以拓展共形电路在柔性机器人、航空航天、植入式医疗设备等特殊环境下的应用。

3）面向极端环境的可靠性提升

在航空航天等领域，要求共形电路必须具备在振动、高低温交变、湿热、盐雾等极端环境下长期稳定工作的能力。然而，目前大多数研究仍停留在实验室环境下的性能演示，对其可靠性的系统研究尚显不足。未来工作必须将可靠性提升至与性能同等重要的战略高度，从材料、结构、工艺三个层面展开对性能、疲劳寿命、环境适应性等方面的系统研究。

4）智能化与数字化制造

将人工智能、数字孪生等先进信息技术与物理制造过程深度融合，是实现共形制造高品质、高一致性、高柔性的有效途径。结合人工智能与数字孪生技术，实现曲面路径自主规划、工艺参数实时优化、缺陷在线监测，提升制造一致性与良品率，是提升未来高端制造竞争力的关键。

4 结束语

本文系统梳理了柔性膜转移、光刻、喷墨打印、微笔直写、激光直接成型、激光活化金属化、转印七类主流介质表面三维共形导电线路制造技术，分别阐述了各类工艺的技术原理、研究案例与技术短板，并从加工精度、曲面适应性、适配材料、加工效率、成本、应用场景六个维度完成横向对比分析。综合对比结果表明：柔性膜转移工艺存在不可展开曲面拼接缺陷；传统光刻属于减材制造，三维曲面加工成本较高；喷墨打印与微笔直写虽可实现曲面增材制造，但分别受限于墨水体系与加工效率；商业化成熟的 LDS 技术需要基材预先掺杂激光活性物质，会改变基体本征介电、

力学性能，高频应用受到制约；激光活化金属化可直接在普通介质基材表面制备线路，具备高选择性、高界面结合强度、基材普适性好等优势，是极具发展潜力的技术路线；转印技术适合大规模功能单元组装，但对界面黏附力控制要求严苛。当前各类制造工艺均存在自身适用边界，尚无单一技术可以兼顾高精度、高曲面适配、高效率与低成本的全部需求。面向汽车电子、消费电子、航空航天等领域对微型化、轻量化共形天线与微波器件的实际需求，后续研究应当重点聚焦多技术融合创新、功能材料体系开发、极端环境可靠性评价、数字化智能制造等方向，推动三维共形导电线路制造技术从实验室研究进一步走向工程化实用。

参 考 文 献

[1] 史则颖, 叶冬, 彭子寒, 等. 飞行器共形天线新型制造工艺及应用研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524812.

[2] Gregoire D J. 3D artificial impedance surfaces[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Chicago, USA: IEEE Press, 2012: 1–2.

[3] Gregoire D J. 3-D conformal metasurfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 233–236.

[4] Kajtez J, Buchmann S, Vasudevan S, et al. 3D-printed soft lithography for complex compartmentalized microfluidic neural devices[J]. Advanced Science, 2021, 8(12): 2101787.

[5] Brehmer M, Conrad L, Funk L. New developments in soft lithography[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2003, 24(3/4): 291–304.

[6] Kim J G, Takama N, Kim B J, et al. Optical-softlithographic technology for patterning on curved surfaces[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(5): 055017.

[7] Li R Q, Guo Y X, Chen W, et al. A flexible liquid-metal alloy bandpass filter[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2018, 28(5): e21265.

[8] Seo M, Seo J M, Cho D I, et al. Insect-mimetic imaging system based on a microlens array fabricated by a patterned-layer integrating soft lithography process[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2011.

[9] Juodkazis S, Mizeikis V, Misawa H. Three-dimensional structuring of resists and resins by direct laser writing and holographic recording[M]//Marder S R, Lee K S. Photoresponsive Polymers I. Berlin, Germany: Springer, 2007: 157–206.

[10] Purvis A, McWilliam R, Johnson S, et al. Photolithographic patterning of bihelical tracks onto conical substrates[J]. Journal of Micro/Nanolithography MEMS and MOEMS, 2007, 6(4): 043015.

[11] Toriz-Garcia J J, Cowling J J, Williams G L, et al. Fabrication of a 3D electrically small antenna using holographic photolithography[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(5): 055010.

[12] Ai J, Du Q F, Qin Z L, et al. Laser direct-writing lithography equipment system for rapid and μm-precision fabrication on curved surfaces with large sag heights[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20965–20974.

[13] Ai J, Lv M, Jiang M, et al. Focused laser lithographic system for efficient and cross-scale fabrication of large-area and 3D micro-patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 335–341.

[14] Ai J, Xiang H Q, Du Q F, et al. Rapid and high-performance processing technology for large-area frequency selective surfaces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 129–133.

[15] 艾骏. 高效率曲面激光直写光刻关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

[16] Pease R F, Chou S Y. Lithography and other patterning techniques for future electronics[J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(2): 248–270.

[17] Derby B. Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution[J]. Annual Review of Materials Research, 2010, 40: 395–414.

[18] 尹周平, 黄永安, 布宁斌, 等. 柔性电子喷印制造: 材料、工艺和设备[J]. 科学通报, 2010, 55(25): 2487–2509.

[19] 陈建魁, 李顺博, 尹周平, 等. 柔性电子喷印制造液滴沉积控制研究综述[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2022, 50(12): 75–88.

[20] Mariotti C, Aluigi L, Thai T T, et al. A fully inkjet-printed 3D transformer balun for conformal and rollable microwave applications[C]//Proceedings of 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Memphis, USA: IEEE Press, 2014: 330–331.

[21] Cook B S, Cooper J R, Tentzeris M M. Multi-layer RF capacitors on flexible substrates utilizing inkjet

printed dielectric polymers[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(7): 353–355.

[22] Li Z, Huang J, Yang Y P, et al. Additive manufacturing of conformal microstrip antenna using piezoelectric nozzle array[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3082.

[23] Zhou Y L, Wang S L, Yin J Y, et al. Flexible metasurfaces for multifunctional interfaces[J]. ACS Nano, 2024, 18(4): 2685–2707.

[24] Gupta E, Bonner C, Lazarus N, et al. Multiaxis manufacture of conformal metasurface antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(11): 2629–2633.

[25] Yi H, Gao X Q, Chang F L, et al. Ink-jetting-based conformal additive manufacturing: advantages, opportunities, and challenges[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2025, 7(3): 032002.

[26] van Osch T H J, Perelaer J, de Laat A W M, et al. Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates[J]. Advanced Materials, 2008, 20(2): 343–345.

[27] Bonaccorso F, Bartolotta A, Coleman J N, et al. 2D-crystal-based functional inks[J]. Advanced Materials, 2016, 28(29): 6136–6166.

[28] Finn D J, Lotya M, Coleman J N. Inkjet printing of silver nanowire networks[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(17): 9254–9261.

[29] Adams J J, Duoss E B, Malkowski T F, et al. Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces[J]. Advanced Materials, 2011, 23(11): 1335–1340.

[30] Zhang S H, Bai W X, Meng L, et al. Hybrid additive manufacturing of high-quality polyetheretherketone (PEEK) -Ag conformal circuits by a laser in-situ crystallisation assisted fused deposition modelling and laser micro-cladding technique[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2025, 20(1): e2536563.

[31] Yang J U, Cho J H, Yoo M J. Selective metallization on copper aluminate composite via laser direct structuring technology[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 110: 361–367.

[32] Zhang J H, Zhou T, Wen L, et al. Fabricating metallic circuit patterns on polymer substrates through laser and selective metallization[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(49): 33999–34007.

[33] Zhang H Y, Zhang J H, Su G H, et al. Ultraviolet photodetector on flexible polymer substrate based on nano zinc oxide and laser-induced selective metallization[J]. Composites Science and Technology, 2020, 190: 108045.

[34] Xu H R, Zhang J H, Feng J, et al. Fabrication of copper patterns on polydimethylsiloxane through laser-induced selective metallization[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(24): 8821–8828.

[35] Zhang J H, Zhou T, Wen L. Selective metallization induced by laser activation: fabricating metallized patterns on polymer via metal oxide composite[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(10): 8996–9005.

[36] Zhang J, Feng J, Jia L Y, et al. Laser-induced selective metallization on polymer substrates using organocopper for portable electronics[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(14): 13714–13723.

[37] Zhang J H, Zhou T, Xie Y, et al. Exposing metal oxide with intrinsic catalytic activity by near-infrared pulsed laser: laser-induced selective metallization on polymer materials[J]. Advanced Materials Interfaces, 2017, 4(23): 1700937.

[38] Xu H R, Feng J, Xiao C C, et al. Autocatalytic laser activator for both UV and NIR lasers: preparation of circuits on polymer substrates by selective metallization[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(27): 31411–31423.

[39] Xiao C C, Feng J, Xu H R, et al. Scalable strategy to directly prepare 2D and 3D liquid metal circuits based on laser-induced selective metallization[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(17): 20000–20013.

[40] Xiang H Q, Zhou Z C, Yang Y, et al. Fabrication of metallic patterns on ordinary polymer substrates by laser direct activation and electroless plating[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 33: 102209.

[41] 项徽清. 激光选区活化磷酸盐制造共形导电线路的机理与关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.

[42] Ratautas K, Vosylius V, Jagminienė A, et al. Laser-induced selective electroless plating on PC/ABS polymer: minimisation of thermal effects for supreme processing speed[J]. Polymers, 2020, 12(10): 2427.

[43] You J L, Chang C P, Pu N W, et al. Electroless plating of a 5G copper antenna on polyimide patterned

with laser-induced selective activation and curing of metal-organic catalyst[J]. Applied Surface Science, 2022, 599: 153990.

[44] Wu L X, Meng L, Wang Y Y, et al. Fabrication of polyetheretherketone (PEEK)-based 3D electronics with fine resolution by a hydrophobic treatment assisted hybrid additive manufacturing method[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2023, 5(3): 035003.

[45] Xiang H Q, Nie J K, Zhou Z C, et al. Selective metallization on ordinary polymer substrates by laser direct activation of copper phosphate or nickel phosphate[J]. Langmuir, 2023, 39(5): 2063−2072.

[46] Zhou H L, Qin W Y, Yu Q M, et al. Transfer printing and its applications in flexible electronic devices[J]. Nanomaterials, 2019, 9(2): 283.

[47] Feng X, Cheng H Y, Bowen A M, et al. A finite-deformation mechanics theory for kinetically controlled transfer printing[J]. Journal of Applied Mechanics, 2013, 80(6): 061023.

[48] Feng X, Meitl M A, Bowen A M, et al. Competing fracture in kinetically controlled transfer printing[J]. Langmuir, 2007, 23(25): 12555−12560.

[49] Yan Z C, Pan T S, Xue M M, et al. Thermal release transfer printing for stretchable conformal bioelectronics[J]. Advanced Science, 2017, 4(11): 1700251.

[50] Lee C H, Kim D R, Zheng X L. Fabrication of nanowire electronics on nonconventional substrates by water-assisted transfer printing method[J]. Nano Letters, 2011, 11(8): 3435−3439.

[51] Lee C H, Kim D R, Zheng X L. Transfer printing methods for flexible thin film solar cells: basic concepts and working principles[J]. ACS Nano, 2014, 8(9): 8746−8756.

[52] Zhao J H, Guo Y, Cai L L, et al. High-performance ultrathin $BiVO_4$ photoanode on textured polydimethylsiloxane substrates for solar water splitting[J]. ACS Energy Letters, 2016, 1(1): 68−75.

[53] Cheng H Y, Wu J, Yu Q M, et al. An analytical model for shear-enhanced adhesiveless transfer printing[J]. Mechanics Research Communications, 2012, 43: 46−49.

[54] Saeidpourazar R, Sangid M D, Rogers J A, et al. A prototype printer for laser driven micro-transfer printing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14(4): 416−424.

[55] Saeidpourazar R, Li R, Li Y H, et al. Laser-driven micro transfer placement of prefabricated microstructures[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(5): 1049−1058.

[56] Harnois M, Himdi M, Yong W Y, et al. An improved fabrication technique for the 3-D frequency selective surface based on water transfer printing technology[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1714.

[57] le Borgne B, de Sagazan O, Crand S, et al. Conformal electronics wrapped around daily life objects using an original method: water transfer printing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(35): 29424−29429.

[58] Xu X, Davanco M, Qi X F, et al. Direct transfer patterning on three dimensionally deformed surfaces at micrometer resolutions and its application to hemispherical focal plane detector arrays[J]. Organic Electronics, 2008, 9(6): 1122−1127.

[59] Zhang S, Wang B, Jiang J J, et al. High-fidelity conformal printing of 3D liquid alloy circuits for soft electronics[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(7): 7148−7156.

项徽清 男，1994 年生，博士，主要从事激光等−增−减材复合制造和激光三维共形制造技术、材料、工艺及装备研究。

刘建国（通信作者） 男，1973 年生，博士，教授，主要从事激光等−增−减材复合制造和激光三维共形制造技术、材料、工艺及装备研究。