

附件 1:

南方科技大学

大学生创新创业训练计划项目 申请书

项目名称: 基于低频超声谐振诱导材料沉积打印的柔性传感器件制备工艺研究

项目负责人: 殷力林

所在院系: 电子与电气工程系

专业班级: 信息工程专业 1914 班

联系电话: 15598317517

E - mail: 11911403@mail.sustech.edu.cn

指导教师: 叶涛 职称 教授

申请日期: 2021 年 4 月 24 日

南方科技大学教学工作部 制

填 表 说 明

一、请严格按照表中要求填写各项。要求实事求是，表达明确、严谨。

二、项目只能由全日制本科生提出申请，原则上以二、三年级学生为主。申请者要品学兼优、学有余力，有较强的独立思考能力和创新意识，对科学研究、科技活动或社会实践有浓厚的兴趣。

三、“项目类别”指 A--创新训练项目；B--创业训练项目；C--创业实践项目。

四、申请书中第一次出现外文名词时，要写清全称和缩写，再出现同一词时可以使用缩写。

五、申请书用 A4 纸双面打印，于左侧装订成册。由指导教师和所在院系审查并签署意见后报送教学工作部，同时提交电子文档。

六、如表格不够，可以加附页。

项目 简 况	项目名称	基于低频超声谐振诱导材料沉积打印的电子皮肤器件制备工艺研究						
	项目类别	(A) A--创新训练项目；B--创业训练项目；C--创业实践项目						
	申请资助经费	20000 元			项目起止时间	2021 年 4 月至 2022 年 4 月		
项目 负 责 人	姓 名	殷加林		性别	男		出生年月	2000 年 10 月
	专业年级	信息工程专业 1914 班			学院（系、部）	电子与电气工程系		
	学分绩点及专业排名	3.23/4.00 排名 11/12			电 话	15598317517		
项目 组 主 要 成 员	姓 名	性 别	出生年月	专业年级	所在学院（系、部）	项目分工		签 字
	殷加林	男	2000/10	信息工程 19 级	电子与电气工程系	传感硬件平台搭建		殷加林
	冯晨曦	女	2000/03	微电子科学与工程 18 级	深港微电子学院	应用设计及测试		冯晨曦
	王星博	男	2000/09	微电子科学与工程 18 级	深港微电子学院	电路设计及电学测试		王星博
	叶浩腾	男	2000/08	信息工程 19 级	电子与电气工程系	器件制备及参数测试		叶浩腾
指 导 教 师	姓 名	性 别		出生年月	职 称	最高学历	最后学位	研究方向
	叶涛	男		1969. 12	教授	研究生	博士	物联网和微系统
	电 话	13266940594			E-mail	yet@sustech.edu.cn		
<p>一、立项依据（包括项目的意义，国内外研究现状与存在的问题，自身具备的知识条件,自己的特长、兴趣，相关经历，开展研究的前期准备工作等）</p> <p>1.1 项目意义</p> <p>柔性电子器件是当前的研究热点，其中电子皮肤类柔性传感器是类似人体皮肤的薄层柔性器件，通常具有传感、通讯、供能、显示、运算等功能或复合功能，可以用于包括智能机器人、智能假肢、健康监测、体表显示、植物生长监测等领域，会随着物联网、边缘计算、人工智能等领域的发展而得到越来越多的重视^[1-3]。根据 Global Market Insights 2020 年的报告，全球电子皮肤相关市场规模在 2019 年达到了 60 亿美元，并将在 2020 年至 2026 年以年化 14.4%的速度增长至 160 亿美元^[4]。</p>								



图 1 电子皮肤器件相关研究^[2]

随着电子皮肤器件朝着材料复合、功能复合、结构复合的方向发展，电子皮肤器件的制备工艺研究越来越得到重视，例如采用压印、转印、滚筒印刷、复合三维打印等技术，结合光刻、CNC、激光刻蚀、注塑等成熟工艺，实现对柔性电路及电子皮肤复杂层状结构的制备^[5]。

本项目将着眼于低频超声谐振诱导材料沉积技术，拓展其制备电子皮肤器件的相关工艺，实现电子皮肤器件的精细、快速、定制化制备。

1.2 国内的发展现状以及存在的问题：

电子皮肤类器件的制备工艺多种多样，且针对不同材料、不同结构而有相应适用的工艺。目前较为前沿的工艺研究主要集中在转印^[6]、压印^[7]、复合打印^[8]等技术。

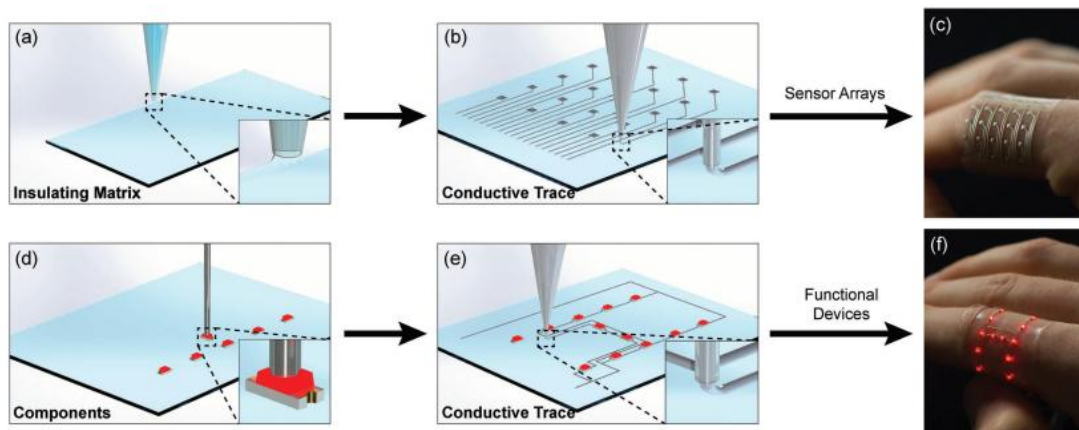


图2 复合三维打印技术制备电子皮肤器件[9]

复合打印技术是将多种材料沉积技术结合而成的技术，包括挤压式墨水直写技术、喷墨式材料沉积技术、自动取放技术等，能够实现多种材料的复合定制化制备。目前人们对电子皮肤器件的需求正在强调功能复合，而这这就要求制备电子皮肤器件的材料或部件呈现软-硬结合、精细-粗糙结合、大面积-小范围结合等特征^[10-12]，因此复合打印技术是未来发展电子皮肤器件的重要工艺基础。

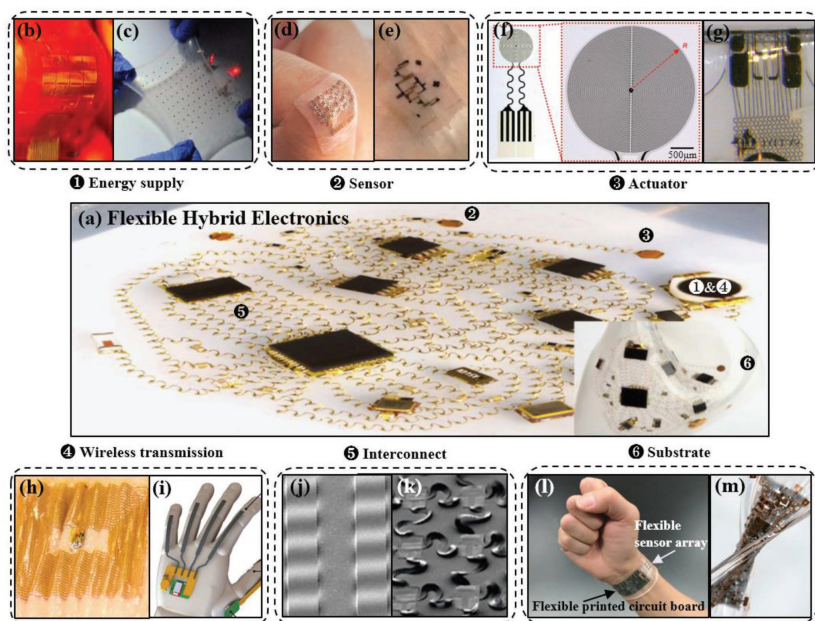


图3 复合电子皮肤器件^[11]

本项目所要研究的低频超声谐振诱导材料沉积打印技术是复合打印技术的技术基础之一，是一种材料沉积(material deposition)技术，具有低成本、灵活多变、数字化流程等明显优势。当前材料沉积打印的主流方案是喷墨式材料沉积打印技术，其基本特征是利用一定方式，如压电陶瓷脉冲激励、热脉冲激励等，将导电墨水从喷嘴中喷射出，沉积在基底表面形成所需图样。该技术一直以来因为易造成喷嘴堵塞而为人们所诟病，尤其在打印导电墨水时，墨水中的纳米颗粒等结构尺度较大，或在发生团簇时形成大尺度空间结构而更易造成喷嘴堵塞。此外，由于喷墨式材料沉积打印技术是通过离散的液滴连接形成所需图样，打印的线结构常常会出现边缘粗糙、线宽不均的问题^[13-14]。

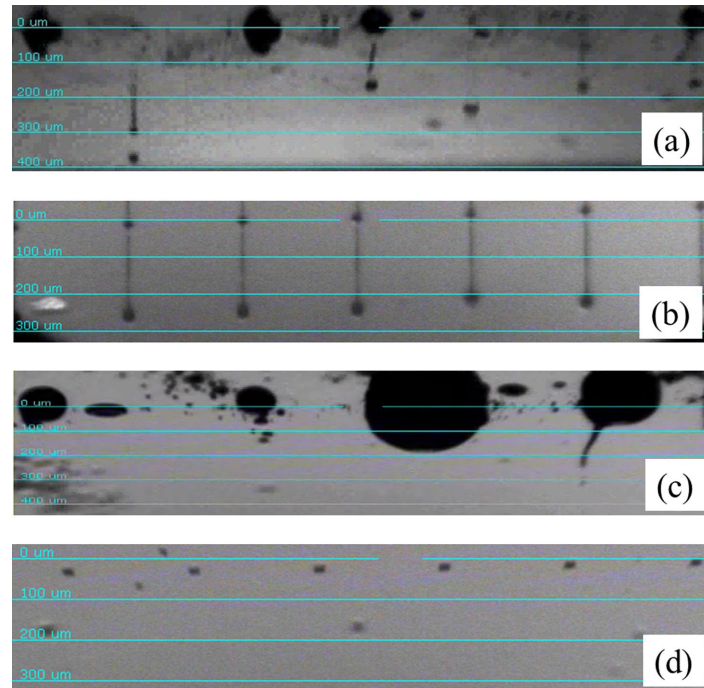


图 4 喷墨打印不同状态^[14] (a) misfiring, (b) stable drop-jetting, (c) nozzle clogging, (d) nonjetting

Sonoplot 公司提出的可控低频超声谐振释放技术可以利用单一打印头，利用超声谐振控制墨水释放，实现在材料表面连续、均匀地打印大粘度范围的墨水图样，能够很好地解决喷墨式材料沉积技术所面临的喷嘴堵塞、打印不连续、喷头更换成本高等问题，在柔性器件制备方面极具应用潜力^[15]。

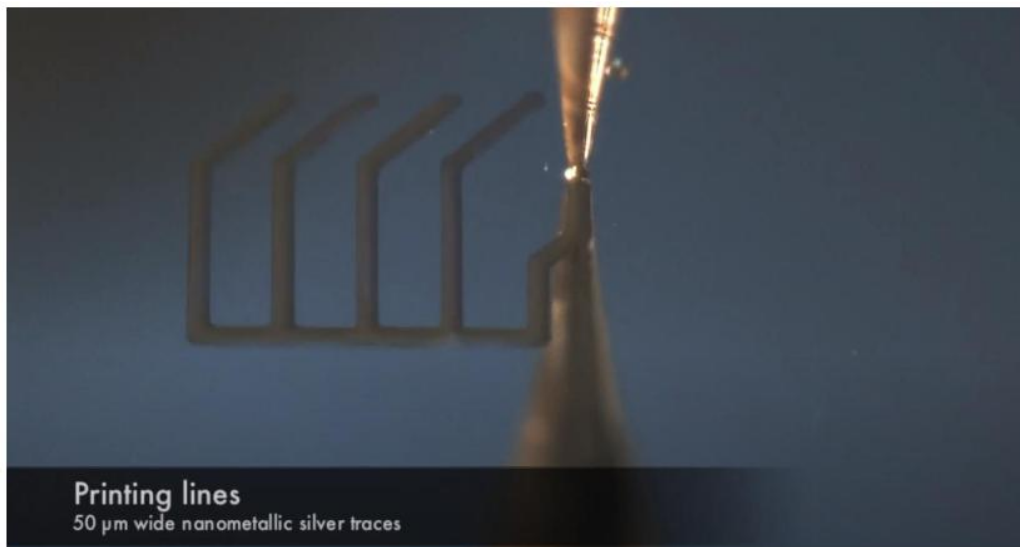


图 5 低频超声谐振材料沉积打印技术^[15]

参考文献：

[1]Xu, Kaichen, Yuyao Lu, and Kuniharu Takei. "Multifunctional skin - inspired flexible sensor systems for wearable electronics." *Advanced Materials Technologies* 4.3 (2019): 1800628.

[2]Yang, Jun Chang, et al. "Electronic skin: recent progress and future prospects for skin -

attachable devices for health monitoring, robotics, and prosthetics." *Advanced Materials* 31.48 (2019): 1904765.

[3]Ha, Minjeong, Seongdong Lim, and Hyunhyub Ko. "Wearable and flexible sensors for user-interactive health-monitoring devices." *Journal of Materials Chemistry B* 6.24 (2018): 4043-4064.

[4]<https://www.gminsights.com/industry-analysis/electronic-skin-market>

[5]Dahiya, Ravinder, et al. "Large-area soft e-skin: The challenges beyond sensor designs." *Proceedings of the IEEE* 107.10 (2019): 2016-2033.

[6] Linghu, Changhong, et al. "Transfer printing techniques for flexible and stretchable inorganic electronics." *npj Flexible Electronics* 2.1 (2018): 1-14.

[7] Shao, JinYou, et al. "Nanoimprint lithography for the manufacturing of flexible electronics." *Science China Technological Sciences* 62.2 (2019): 175-198.

[8] Khan, Yasser, et al. "A new frontier of printed electronics: flexible hybrid electronics." *Advanced Materials* 32.15 (2020): 1905279.

[9] Valentine, Alexander D., et al. "Hybrid 3D printing of soft electronics." *advanced Materials* 29.40 (2017): 1703817.

[10] Tong, Ge, Zhou Jia, and Joseph Chang. "Flexible hybrid electronics: Review and challenges." *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE, 2018.

[11] Ma, Yinji, et al. "Flexible hybrid electronics for digital healthcare." *Advanced Materials* 32.15 (2020): 1902062.

[12] Khan, Yasser, et al. "Flexible hybrid electronics: Direct interfacing of soft and hard electronics for wearable health monitoring." *Advanced Functional Materials* 26.47 (2016): 8764-8775.

[13] Castrejon-Pita, Jose Rafael, et al. "Future, opportunities and challenges of inkjet technologies." *Atomization and sprays* 23.6 (2013).

[14] Lee, Ayoung, et al. "Optimization of experimental parameters to suppress nozzle clogging in inkjet printing." *Industrial & engineering chemistry research* 51.40 (2012): 13195-13204.

[15] <https://www.sonoplot.com/>

1.3 自身具备的知识特点:

本项目涉及到个学科领域,包括微电子、机械、材料学、传感、通讯等。项目组

成员来自微电子科学与工程专业、通信专业及物理学专业，具备相关学科知识背景。目前，项目组成员已查阅足量文献，得到课题组的专业指导，并进行了初步的研究探索，已具备开展电子皮肤器件及制备工艺研究的能力。

1.4 前期研究工作：

1.4.1 项目前期研究内容

项目组利用 sonoplot 设备，目前已成功打印银纳米颗粒导电墨水和介电墨水材料，制备出相应的图样化结构。

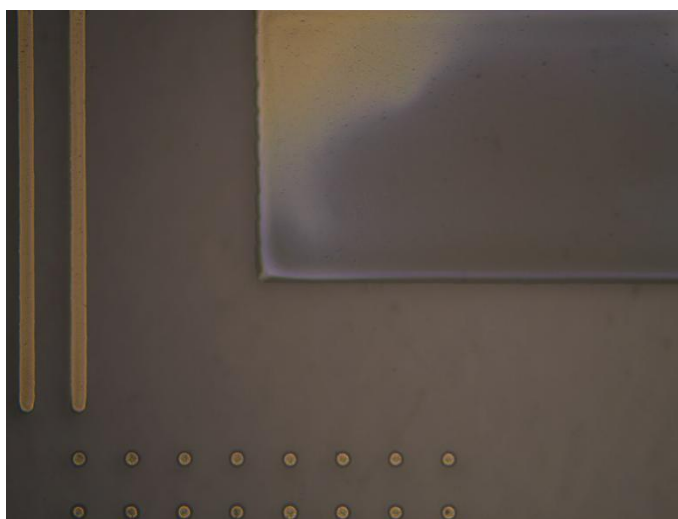


图 6 sonoplot 沉积银纳米颗粒点状、线状、面状结构

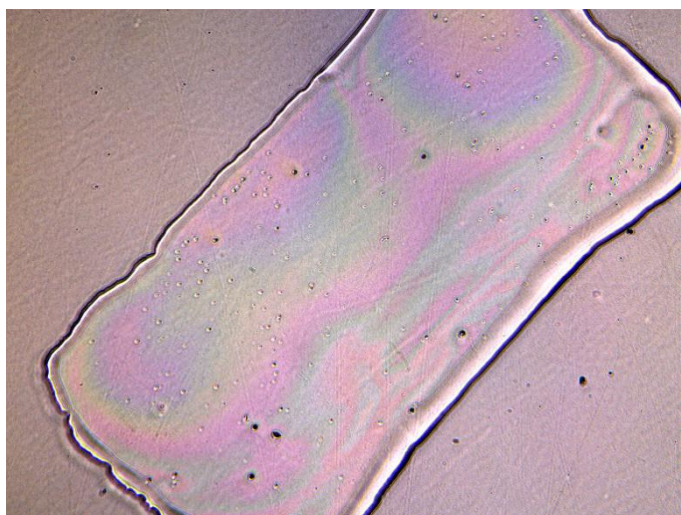


图 7 sonoplot 沉积介电材料图样

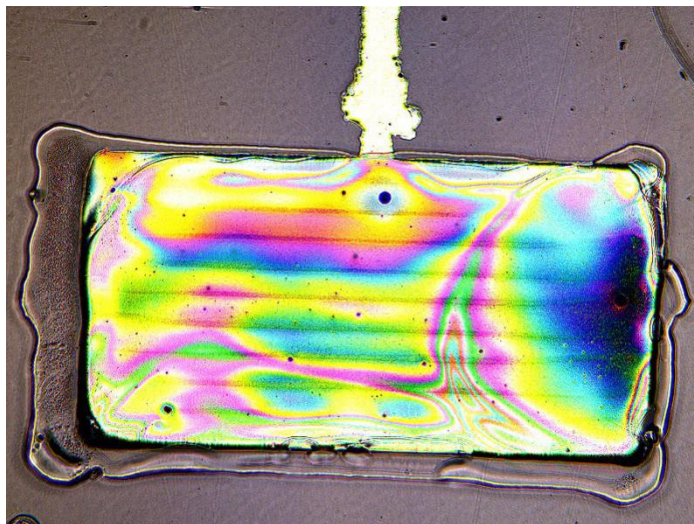


图 8 sonoplot 沉积导电层-介电层结构

在本项目中，项目组将基于现有研究进展，进一步探究利用低频超声谐振诱导材料沉积打印技术制备电子皮肤器件的制备工艺，开展银纳米颗粒、银纳米线、碳纳米管溶液等墨水的材料沉积实验，进一步完善工艺流程和工艺参数。

1.4.2 项目在柔性电子领域的研究积累

1) RFID/NFC 电子织物柔性天线的制备

项目组已基于刺绣工艺制作并实验了 RFID/NFC 电子织物柔性天线部件，相关测试正在进行中。

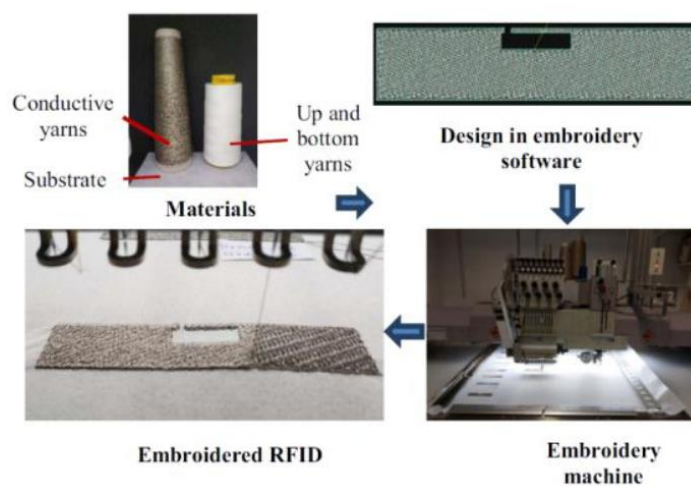


图 9 编织 RFID 标签制作过程

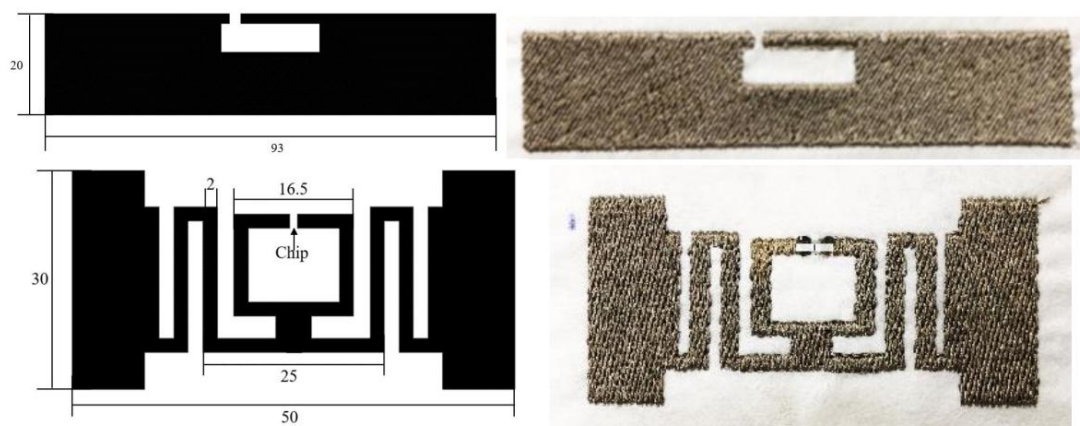


图 10 RFID 刺绣天线

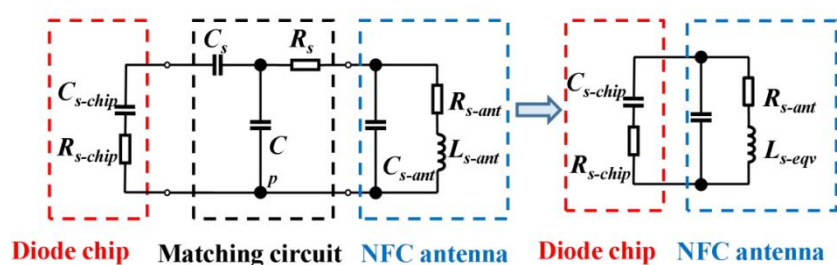


图 11 NFC 线圈电感计算模型

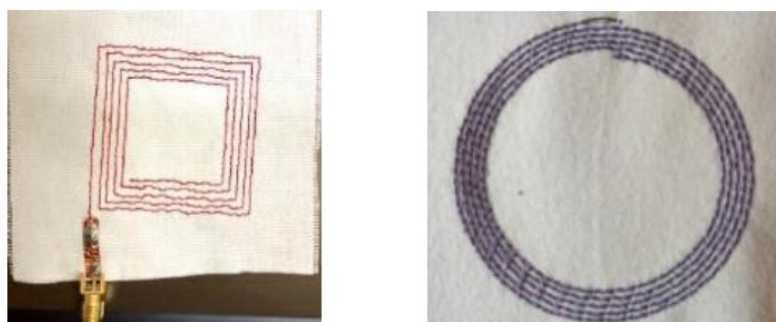


图 12 NFC 编织线圈

2) 基于电子织物的人体呼吸传感

项目组利用电子织器件，制备了基于平面线圈耦合的位移传感器，并将其用于呼吸传感，进行了相关实验测试，实验结果表明传感器能良好感知人体呼吸动作。

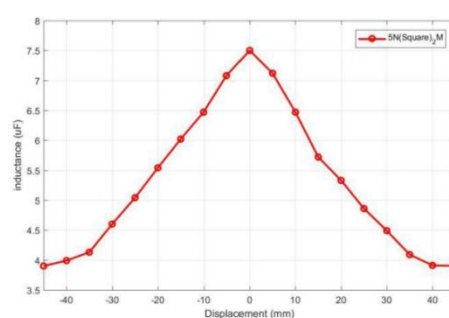
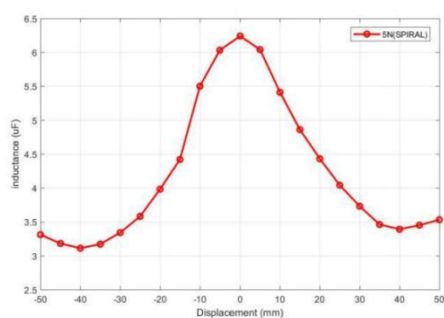


图 13 编织线圈位移传感，（a）两个圆形线圈串联，（b）两个方形线圈串联

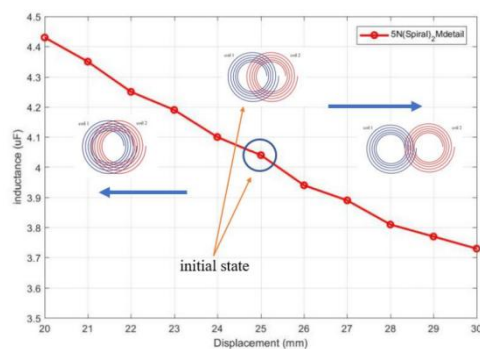


图 14 判断方向的位移传感器

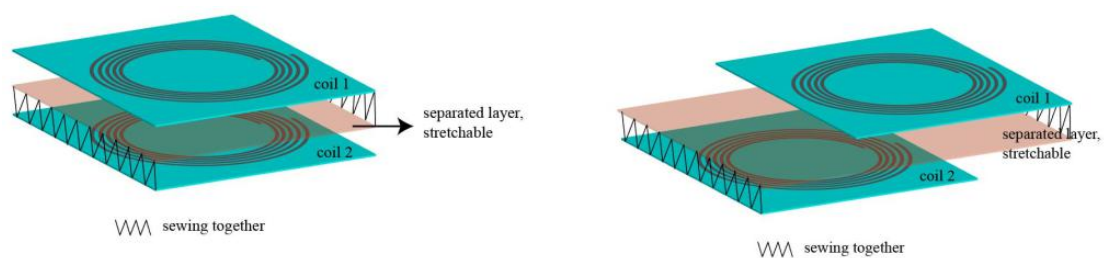


图 15 拉伸传感器示意图



图 16 拉伸传感器呼吸监测

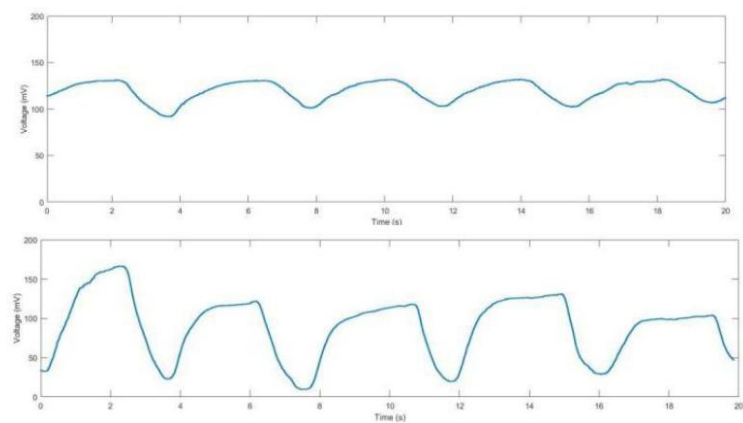


图 17 呼吸波形（滤波后），上图为正常呼吸波形，下图为深呼吸

二、项目研究内容（包括 1.具体研究内容和技术考核指标；2.拟解决的关键问题；3.项目可行性分析）

2.1 研究内容

项目计划基于 sonoplot 公司生产的 Microplotter II 材料沉积打印系统，研究包括银纳米颗粒、银纳米线、碳纳米管等导电墨水在 PDMS、TPU、Ecoflex 等材料表面的打印工艺及墨水配比，制备出具有压力探测等功能的电子皮肤传感器件，并由此总结一套利用材料沉积打印技术制备柔性电子皮肤器件的研究方法。

材料沉积打印技术的主要技术参数包括墨水配比、打印控制、温度控制、基材材质等，主要评估指标在打印图样方面包括最小打印线宽、线宽一致性、墨水的附着力，在导电路径方面包括柔性电路的电学特性，在器件层面的主要评估指标为力学测量的灵敏度、测量范围、测量的一致性、器件的耐拉伸能力等。

当前利用材料沉积打印技术制备电子皮肤类柔性器件的相关研究正在持续进行，但由于工艺过程尚未统一、器件的制备目的多样，相关材料、参数仍未有较为清晰的指导或产品。项目计划基于现有研究水平，在较为成熟的墨水及基材基础上，以打印过程及器件表现为评估标准，循环优化墨水配比、基材类型、打印控制等技术参数，并由此总结出相应的研究方法。



图 18 项目研究基本思路

项目研究内容具体包括：

1) 导电墨水配比研究

a. 项目将利用商业购买的银纳米颗粒墨水、银纳米线墨水开展初期打印工艺探索，重点将观察打印线装结构或点阵结构时最小线宽、线宽一致性；

b. 将观察导电墨水在不同材质表面吸附能力及干燥过程；

c. 将通过 SEM 观察导电颗粒，包括银纳米线、银纳米颗粒、碳纳米管等在材质表面微观形貌；

d. 将测试基材拉伸、压缩、弯折后打印的图样性质变化，观察导电颗粒附着情况；

e. 将测试导电路径电学性能，主要包括电导率及其与基材形变相关关系，以及材料拉伸、压缩、弯折老化后线路相关电学性能变化；

f. 将利用以上观察优化商业购买的导电墨水配比；

g. 将利用上述研究经验，尝试配置碳纳米管墨水，并循环优化墨水配比。

2) 柔性材质基底研究

a. 与导电墨水研究类似，将根据打印相关测试及电路电学性能测试结果循环优化包括 PDMS、TPU、Ecoflex 等材料制备及材料配比；

b. 将根据研究过程尝试使用其他柔性基底材料。

3) 电子皮肤柔性传感器件设计制备

项目将基于工艺研究，设计并制备不少于一种电子皮肤柔性传感器件：

a. 项目将从目前较为成熟的容性电子皮肤触觉传感器入手，熟悉电子皮肤器件设计制备及测试流程，而后将设计一种应用场景，并根据应用场景设计及制备更为复杂的电子皮肤器件结构；

b. 将根据测试结果，撰写学术论文或研究专利。

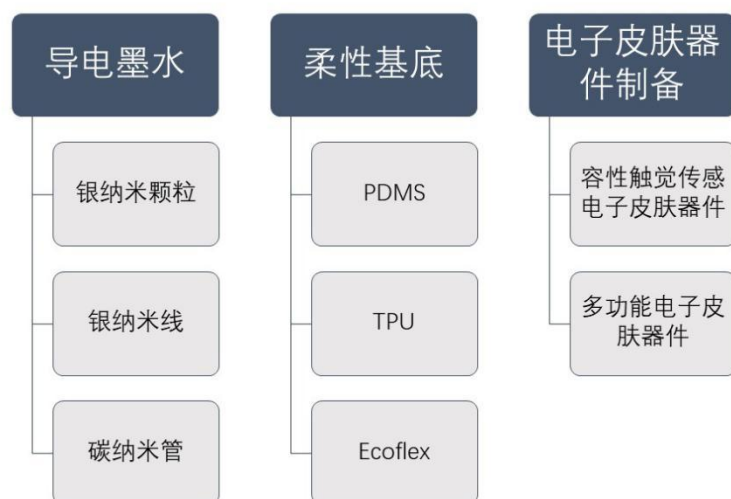


图 19 项目主要研究内容

2.2 技术考核指标

- 1) 完成银纳米颗粒、银纳米线、碳纳米管材料在 PDMS、Ecoflex、TPU 材料基底上的沉积实验，并进行图样化；
- 2) 利用至少一种墨水材料和一种基底材料制备出线宽 $<50\ \mu\text{m}$ 的导电图样
- 3) 制备出至少两种具有压力传感能力的电子皮肤传感器件，传感精度不低于 100Pa。

2.3 拟解决的关键问题

电子皮肤柔性器件制备工艺技术复杂，项目拟通过研究低频超声谐振诱导材料沉积打印技术：

- 1) 解决电子皮肤器件柔性电路灵活制备的问题；
- 2) 解决常规喷墨式材料沉积打印技术在面对柔性电路打印所存在的导电颗粒过大导致喷嘴易堵塞问题。

2.4 项目可行性分析

本项目是对材料沉积技术的应用拓展，基于 sonoplot 公司的低频超声谐振诱导的材料沉积打印设备制备电子皮肤柔性传感器件，探索相关制备工艺。

项目难度适中，不涉及未知的科学难题，有助于培养学生的文献研究、实验方法、逻辑思维、创新探索能力，有助于项目组开展柔性电子器件制备、穿戴器件应

用、体域网构建的进一步深入探索，具有充分可行性。

三、项目实施方案（1.项目人员组成及分工；2. 项目研究进度安排：包括查阅资料、选题、自主设计项目研究方案、开题报告、实验研究、数据统计、处理与分析、研制开发、填写结题表、撰写研究论文和总结报告、参加结题答辩和成果推广；3. 配套条件要求：包括仪器设备、场地、材料、资料、实验课时及指导教师要求等）

3.1 项目人员组成及分工：

殷加林（项目主持）：负责研究方案的设计，柔性电路及器件测试，报告撰写

叶浩腾（测试）：熟悉应用相关制备流程及材料特性，测试器件参数，报告撰写

王星博（测试）：测量柔性电路电学参数，材料沉积打印工艺应用，报告撰写

冯晨曦（应用）：设计电子皮肤柔性传感器件实际应用并进行测试，报告撰写

3.2 项目研究进度安排

开展时间	进度安排
2021. 05-2021. 07	阅读相关文献；搜集材料沉积打印相关墨水信息；熟悉低频超声谐振材料沉积打印基本原理及操作流程，熟悉相关参数；了解 PDMS、TPU、Ecoflex 等柔性基材制备流程及材料特性。
2021. 08-2021. 10	采购相关材料；利用银纳米颗粒、银纳米线墨水开展打印工艺探索，测量柔性电路电学参数，观测打印图样形貌特征，测试柔性电路力学性质，并迭代优化；探索优化银纳米颗粒、银纳米线墨水配比，配置碳纳米管墨水，并迭代优化。
2021. 11-2022. 03	基于工艺研究设计不少于一款电子皮肤柔性传感器件，测试器件参数，设计一种应用场景，并根据应用场景迭代优化。
2022. 04-2022. 05	总结材料沉积打印工艺研究方法；撰写相关论文或专利文件；撰写结题报告，完成结题工作。

3.3 配套条件要求

1、仪器

A) sonoplot Microplotter II 材料沉积打印设备（已购）

B) 拉压力试验机（已购）

C) 其他电学测量辅助设备

2、材料

A) 银纳米颗粒墨水（已购）

B) 银纳米线墨水（未购）

C) 碳纳米管溶液（未购）

D) PDMS（已购）

E) TPU（已购）

F) Ecoflex（未购）

四、项目经费预算（包括大概支出科目、金额、计算根据及理由）

序号	支出科目	预算金额	计算根据及理由
1	资料、复印	1000	项目日常开销
2	实验设备及材料	10000	根据银纳米线、碳纳米管、Ecoflex 材料价格及用量预估
3	加工测试	5000	部分测试项目委托第三方测试所需费用
4	发表论文	4000	论文出版费用
合计		20000	

五、预期成果（研究论文、专著、调研报告、设计方案、专利、软件、产品、成果鉴定等）

- 1) 预期将形成基于低频超声谐振材料沉积打印技术制备电子皮肤器件的工艺流程一套；
- 2) 预期将基于工艺研究设计制备不少于两种电子皮肤传感器件；
- 3) 预期将发表不少于一篇学术论文或不少于一件专利文件。

六、本项目的创新之处

项目立足于工艺发展实际，在缺乏相关研究报道的基础上，开展对低频超声谐振材料沉积打印制备电子皮肤柔性器件的研究，预期将促进电子皮肤器件研究领域的工艺探索，为后续各类电子皮肤器件制备提供支持。

项目有两大创新点：

一是从工艺入手，开展对电子皮肤类柔性器件制备的系统研究，补充了该领域对工艺探索较少的不足；

二是采用低频超声谐振材料沉积打印技术作为制备工艺，补充了材料沉积打印制备电子皮肤柔性器件工艺细节上的缺失。

七、项目诚信承诺

本项目负责人和全体成员郑重承诺，该项目研究不抄袭他人成果，不弄虚作假；按项目研究进度保质保量完成各项研究任务。

项目负责人签名：殷加林 项目组成员签名：冯晨曦 王星博
叶浩腾

2021 年 4 月 24 日

2021 年 4 月 24 日

八、指导教师意见（包括项目研究的选题意义及研究方案的科学性、可行性等）

该项目立意比较新颖，技术方法有一定的独创性和实用性。同意推荐。

指导教师签字：叶浩腾

2021 年 4 月 25 日

九、院、系初审意见
<div>负责人签字：年 月 日</div>
十、学校意见
<div>负责人签字：（盖 章） 年 月 日</div>