

104 基于电子信息技术器件和装置

10. 微能量源能量收集系统及其超低功耗片上温度传感

负责人：范世全

所在学院：电信学院

一、项目简介

可针对不同环境，完成震动能、压电能、摩擦电能、光电能、热能、化学能、风能、电磁能、射频信号能等能量的收集、存储，并根据需要为片上或片外低功耗传感器提供稳定且低噪的输出能量供给。此外，针对不同的传感器结构和类型进一步提供丰富的接口电路，用来读取传感器所产生的感应信号。配合低功耗收发机模块，可实现完整的无线传感节点功能。

二、特点

1. 电源管理部分静态电流可低至 65nA；
2. 整个 ASIC 功耗（包含温度传感）不足 1 μ W；
3. 具有最大功率点追踪；
4. 匹配最小 16k Ω 的厘米级以下压电片
5. 具有能量收集、存储和调整输出功能；
6. 提供超低噪声电源供给（10nA-100 μ A）片上/片外传感器；
7. 存储的能量支持 ZigBee、Bluetooth 等低功耗协议间歇数据传输；
8. 构建平均功耗小于 5 μ W 的无线传感节点。

三、市场情况

本项目能以超低功耗实现完整无线传感节点，在 IoT、环境监测等领域有良好的应用前景和社会经济效益。可解决无线传感节点的环境获能及温度传感（传感信息不局限于温度）。

四、技术成熟度

●概念验证 ⚙原理样机 ●工程样机 ●中试 ●产业化

此技术成熟，即将获得专利授权，寻求与企业合作。

五、合作方式

☒ 联合研发 ☒ 技术入股 ☐ 转让 ☒ 授权（许可） ☐ 面议

11. 压电精密驱动控制系统

负责人：徐明龙 宋思扬

所在学院：航天航空学院

一、项目简介

团队依托西安交通大学航空航天航空学院机械结构强度与震动国家重点实验室组建，以学院副院长、实验室主任徐明龙为带头人，经过十余年的积累，在压电驱动原理、驱动方案、驱动结构、驱动控制等方向取得了丰硕的研究成果与深厚的应用经验。形成了多自由度精密作动平台，大行程高精度作动器件、驱动控制算法与硬件三个方面系列化成果，在压电驱动的精密作动领域能够提供国际领先的压电精密驱动解决方案。

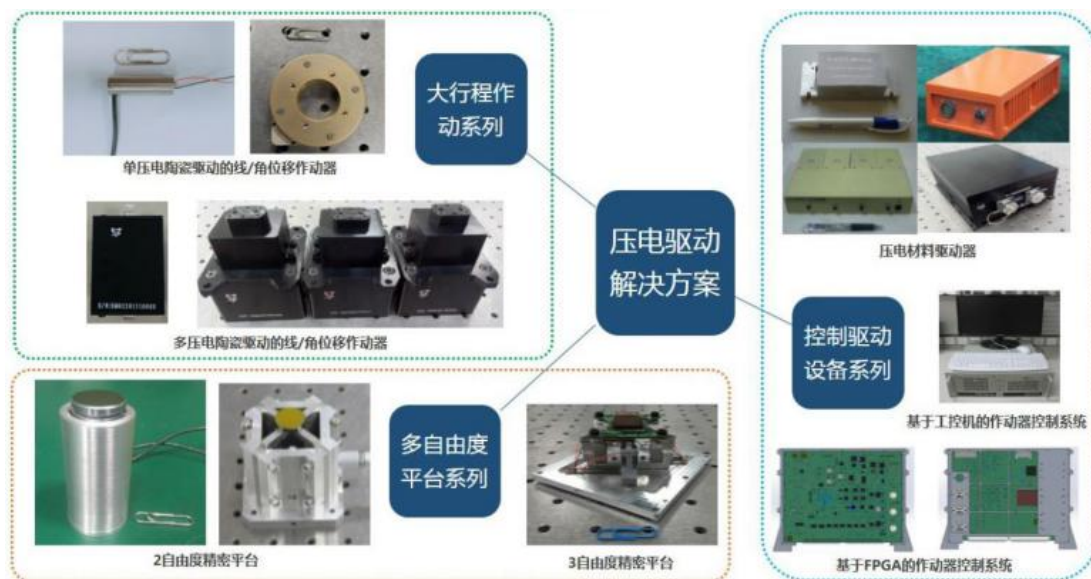


图 1 团队压电驱动解决方案

二、多自由度精密驱动平台

1. 二自由度精密组东平台

在卫星光通信中，两自由度精确指向调节结构用于快速调整角度的精密偏转定位机构，它是用于精密瞄准，相对于传统光学伺服系统，其精度和带宽都有大幅度提高，弥补了传统光学系统惯量大、带宽窄的缺陷，因此这种机构在军事、航空航天、光学工程以及精密检测等领域都有广泛应用。本团队采用压电陶瓷作

为驱动系统,设计了小体积直驱型高带宽压电直驱的精指向执行机构两自由度精确指向调节结构。

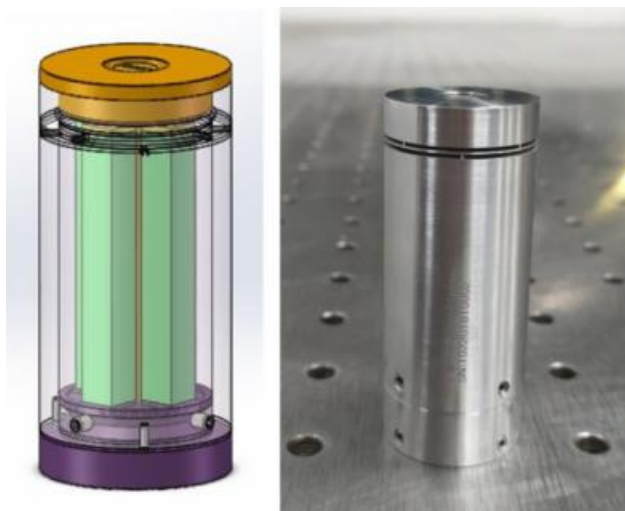


图 2 小体积直驱型高带宽压电直驱的精指向执行机构

该机构利用单个压电堆直接驱动,不引入放大机构,通过单轴下一对压电堆“推-拉”工作模式实现镜面偏转。该机构采用直驱作动方式,与位移放大式执行机构相比,该设计很大程度上减小了偏转机构径向尺寸,结构更紧凑,体积更小,同时具有更大的工作带宽和更高可靠性。此外该机构内部集成应变式偏转角传感单元(SGS)和信号处理电路用于闭环偏转角位移反馈,与国外产品相比具有更高的集成度。

表 1 小体积直驱型高带宽压电直驱的精指向执行机构性能指标

机构	X 轴行程	Y 轴行程	X 轴空载 工作效率	Y 轴空载 工作效率	机构尺寸	机构重量
T-01	2.5mrad	2.5mrad	2.0kHz	2.0kHz	$\Phi 25 \times 41\text{mm}^3$	190g
T-02	5.5mrad	5.5mrad	1.0kHz	1.0kHz	$\Phi 25 \times 60\text{mm}^3$	220g

2. 三自由度精密作动平台

在光学遥感领域,空间相机等有效载荷需要相机调节机构来承载并实现辅助运动。通过对调节机构的调整可以增大相机视野,实现成像并获取各种信息和图像。而卫星平台由于空间环境和星体活动部件等因素的影响,会产生微振动。随

随着空间相机分辨率水平的提高，这种微振动对成像品质的影响也显著增加。平台振动耦合到相机的光轴上，便会引起被摄景物与相机焦面发生相对运动，从而产生像移。当相机的空间分辨率很高时，这种像移会导致严重的像质退化，影响图像品质。

因此，实现空间相机稳像的关键技术便是要减小甚至抵消振动干扰对成像品质的影响。运用光学稳像控制系统，设计伺服机构可以在光路中实时校正相机光轴偏移。从而实现景物在主成像相机焦面上的相对稳定，减小像移，提高成像分辨率。

针对于这种需求，团队开发了一种三自由度（XY θ_z ）压电稳像作动平台，其结构如下图所示：

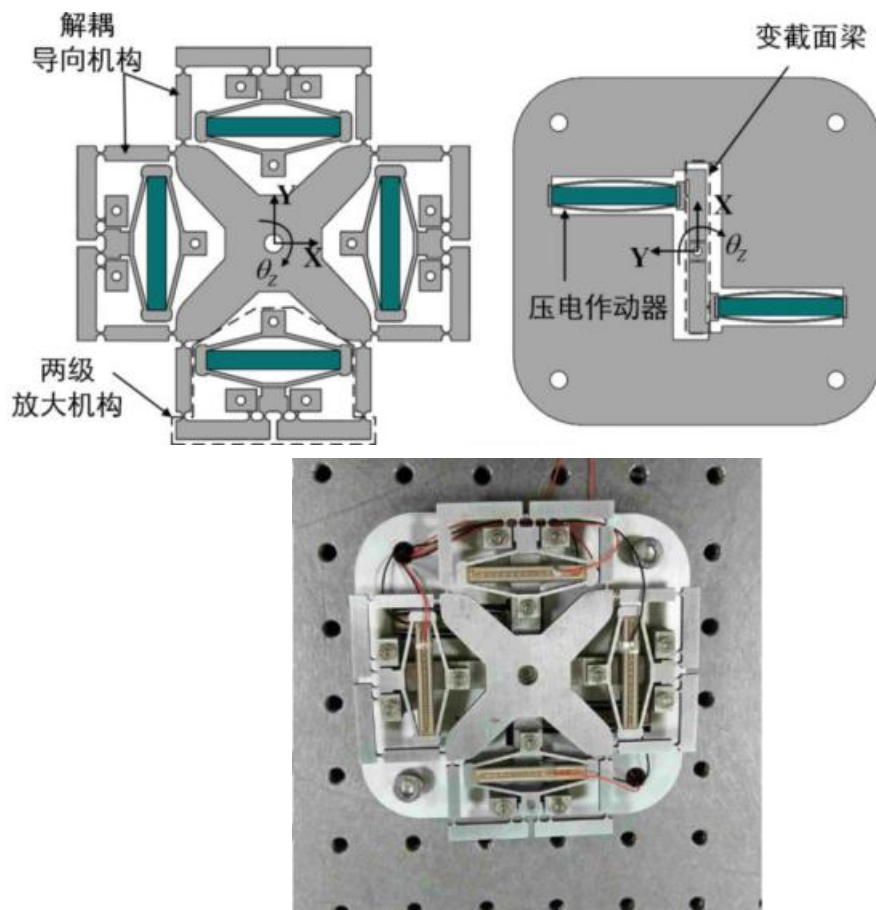


图3 三自由度压电驱动平台

该三自由度稳像结构由完全对称设计的 XY 平动并联机构和反对称设计的绕 Z 轴偏转机构经由一个底部设置凹槽的十字型连接结构用螺钉上下连接而成。当安装在菱形压电作动器中的压电堆在一对差分电压信号下，基于压电材料的逆压电效应，压电堆产生大小相等方向相反的一对位移。经由两级放大机构可实现

动平台的 XY 平动；当安装在绕 Z 轴偏转机构中的压电堆在一对相同电压信号下，可实现动平台的绕 Z 轴偏转。

该三自由度 XY θ z 压电稳像作动结构具有结构紧凑、响应快、无机械摩擦以及 X 和 Y 方向可实现双向作动等优点；并且 XY 平动并联机构采用了两级放大结构，用于实现压电堆形变的位移放大输出，使得机构在整体结构尺寸较小的情况下能产生较大的微位移。此外，平动机构采用了对称设计的导向结构，实现了机构的解耦，提高了压电稳像作动结构的调节精度。

表 2 三自由度压电精指向执行机构性能指标

指标	X 轴行程	Y 轴行程	绕 Z 轴角行程	定位精度 XY, θ z	机构尺寸	基频	驱动电压
稳像机构	215 μ m	215 μ m	10 mrad	0.2%, 0.2%	106 $\times$ 106 $\times$ 23 mm	100Hz	0-120V

三、大型程压电作动器

1. 大推重比直线驱动器

针对于形状控制、加工进给等系统提出的高精度、大负载驱动需求，团队开发了具有很高推重比的直线驱动装置，该作动器能够在 600g 的质量内，实现 600N 以上的推拉力。



图 4 大推重比压电驱动器实物

该大行程作动器的设计技术指标如下表所示。

表 1 大推重比压电驱动器性能指标

性能指标	质量	推力	位移分辨率	驱动速度	位移行程
大推重比	小于 600g	600N	小于 1 μm	最大 5 $\mu\text{m/s}$	$\pm 3\text{mm}$

2. 小型直线驱动器

为适应在小的空间尺寸下实现高精度的位移输出，团队还设计了一款具有位移反馈功能的小型直线压电作动器，该作动器利用非对称的锯齿波驱动压电堆，通过惯性冲击原理作动，采用比例式线性霍尔传感器实时感知位移；并且结构紧凑，易于安装，具有作动快速精准，断电锁止，钳位力可调节的特点，能够在足够小的结构下实现大的推重比与高精度的位移输出性能。作动器行程可以依据客户需求定制，最高可达 6 毫米，其位移精度可达 0.5 微米，能够实现总行程千分之一的定位精度。

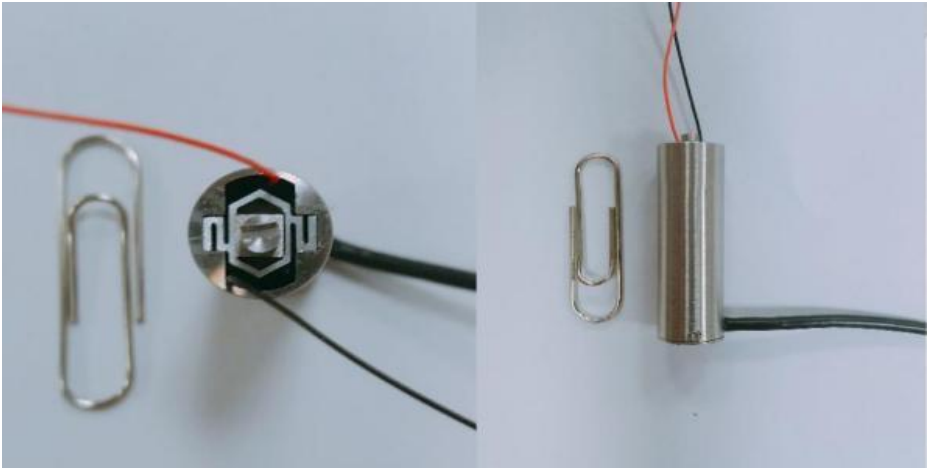


图 5 小型压电直线驱动器

该小型压电直线驱动器的性能指标如下表所示。

表 2 小型直线驱动器性能指标

产品	输出力(N)	锁止力(N)	重量(g)	尺寸(mm)	定位精度 (μm)
小型直线作动器	3	8	13	$\Phi 9.5*28$	0.5

3. 大行程旋转压电驱动器

针对科学研究，光学研究当中对旋转运动的精密控制需求，团队研发了压电材料驱动的精密旋转作动器，该作动器能够在惯性式驱动原理的控制下完成顺时针逆时针两个方向的 360° 大范围圆周运动，且能够实现千分之一度的角位移分辨率。作动器内部集成有光栅式角位移传感器。



图 6 大行程旋转驱动器

作动器技术指标见下表：

表 3 大行程旋转驱动器性能指标

指标	尺寸	重量	锁止 扭矩	转角 行程	最小步 距	最大转速	光栅传感 器精度
旋转驱 动器	Φ 55mm*12.5mm	65g	50Nmm	360°	0.2m°	20° /s	0.21m°

四、控制驱动设备

团队可以依据不同需求的压电执行机构实现多种方式的驱动控制，以基于 FPGA 的压电作动器驱动控制系统为例：

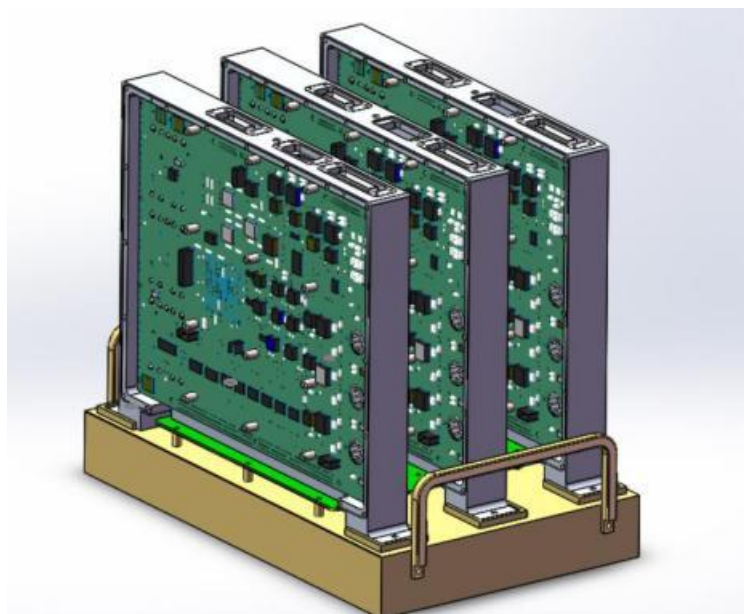


图 7 压电作动器控制系统模型示意图



图 8 压电作动器控制系统实物

该 FPGA 控制系统能够实现多协议数字通信、三通道独立驱动、支持双通道 16 位高速数据采集、闭环控制等多个功能。可以应用于大行程的尺蠖式压电作动器、惯性式压电作动器、压电式多自由度调节平台等多种压电驱动结构。该驱动设备已经为科研院所提供了航天级的定制产品。

表 4 大行程旋转驱动器性能指标

序号	参数	条件	指标	单位
1	指令刷新速率		>45	KHz
2	驱动板质量	包括结构	≤ 2.2	kg
3	驱动板结构尺寸		$326 \times 194 \times 33$	mm ²
4	功耗	动态功耗	≤ 20	W
		静态	≤ 18	W

五、市场前景及应用

主要应用于航空航天领域，同西安、北京等航天所均有合作。

六、技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☐中试 ☒产业化

实验室目前可满足订单生产。

七、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☐面议

合作要求：军工背景的企业。

12. 高光谱偏振成像光谱仪

负责人：张淳民

所在学院：理学院

一、先进遥感仪器—成像光谱仪

具有自主知识产权；国际上首台偏振干涉成像光谱仪（机载、星载、地面），参加了国家“十一五”重大科技成就展。

成果：国家 863 项目 2 项；国家自然科学基金 2 项；获授权发明专利 3 项；发表 SCI 论文 80 余篇；出版专著 1 部。



地面样机



机载样机

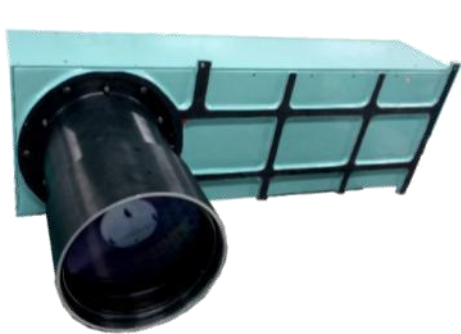


星载样机

二、先进遥感仪器—偏振成像光谱仪

研发成果：首次提出基于 Savart 偏光镜的图像、光谱、偏振态多维信息一体化获取技术；研制了星载原理样机，开展了模拟星载探测实验。

成果：获国家 863 计划 1 项；国家自然科学基金 2 项；发表 SCI 论文 20 余篇；获授权发明专 5 项。



三、偏振成像光谱仪

仪器特性：高空间/高光谱分辨率 NISP、短波/中波红外波段 NISP（高科技，具有相机、光谱仪、偏振仪全部功能、具有地理信息导航及时间、气象信息；具备精确定位功能，并与仪器有机结合、适合于农业、工业、环保、军事、民用探测要求。具备鲁棒性、成本低，小型轻量，结构紧凑，结实，易维护、维修，抗振抗冲击，抗高低温，自动控制，可编程，可联网、适合于大力推广。

应用领域：可用于农业、工业、环保、资源普查等。

1) 环境、资源探测

- a. 环境污染监测，包括温室气体，如 CO_2 ， CH_4 等，大气污染物质，如雾霾等。
- b. 工业水质、土地污染等。
- c. 自然环境变迁实时监测，如土地沙化，植被变化等。
- d. 地质、矿物资源探测，水质检验。

2) 精准农业遥感探测

- a. 作物播种面积评估、长势评估、产量评估。
- b. 病虫害监测，包括病虫害种类、分布、区域、病虫害程度。
- c. 农作物生长环境监测与评估，包括土地水分、土地湿度、土地养分等。
- d. 农产品安全性监测与评估，如农药残留，包括农药种数、残留量、分区分布、重金属污染等。
- e. 农业生产对环境的影响。如 CO_2 ， CH_4 的释放，水体、土地、空气污染。

3) 民用探测

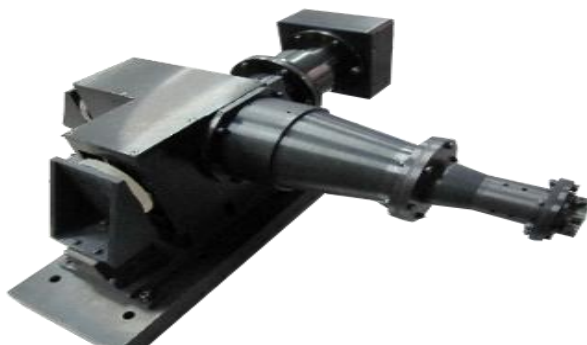
- a. 可设计成手持式仪器探测水果、蔬菜表面磷沉积和农药残留。
- b. 药品安全性监测等。

经济效益：按地面民用、科研、军事和航空航天使用，估计年产量与年利润十分可观。

四、先进遥感仪器—风成像干涉仪

研发成果：理论研究取得重要进展；提出了静态风成像干涉仪新原理、新方案；实验研究取得良好结果。

成果：主持完成国家级项目 3 项；发表 SCI 论文 60 余篇；获授权发明专利 2 项；出版专著 1 部；



风成像干涉仪

风成像干涉仪 仪器特性：

仪器特点：

1) 风成像干涉仪技术指标

(1) 卫星平台高度：600 km

(2) 探测大气高度范围：25~110 km

探测谱线强度峰值高度（日间 45km，夜间 94km）附近区域

(3) 工作波段：1.27 μm （准/单色光）

(4) 风速探测范围：大于 5m/s

(5) 风速探测精度：5m/s

(6) 温度测量范围：200~1000K

(7) 温度测量精度：3~5K

(8) O_3 浓度测量相对精度

在探测谱线强度峰值高度，

日间 5%（45 km），夜间 10%（94km）

(9) 廓线重要分辨率：2km（垂直）。

2) 可探测参数种类

温度、风场、 O_3 同时探测

3) 大气温室气体反演系统技术指标

a. 探测目标气体： CO_2 、 O_3 、 CH_4 等

b. 反演结果相对偏差小于 1%

先进遥感仪器—风成像干涉仪 应用领域：可用于大气探测、航天航空领域等。

经济效益：国内还未有机构研制风成像干涉仪，其在航空航天，军事、科研上的需求量极大、大气温室气体反演系统，进行算法集成后，以打包软件方式或者数据库方式出售、成本极低，可以带来可观的经济效益。

五、合作方式

●联合研发 ⚙技术入股 ⚙转让 ●授权（许可） ●面议

13. 可调谐外腔式半导体激光器

负责人：李创社、张彦鹏

所在学院：电子科学与工程学院

一、项目简介

半导体激光器由于体积小、效率高、结构简单、便于调谐等优点，在工业、军事、科研以及家电等领域发挥越来越重大作用，已成为重要的基础器件。

项目研制和开发了半导体激光器系列产品，主要包括：

1、可调谐外腔半导体激光器

激光器二极管（LD）发出的光经准直透镜后平行入射到外腔闪耀光栅上，经光栅分光得到一级衍射光和零级光。一级衍射光反馈回外腔与有源区光场相互作用，实现压窄线宽、降低噪声目的；零级光经聚焦透镜后作为输出光，调整光栅的角度可实现波长的调谐。产品覆盖从 762 到 795 纳米（nm）各种波长，输出功率 50~100 毫瓦（mW），线宽<500 kHz，可用于工业测量、光通信、光信息处理、激光光谱学等。

2、外腔半导体激光器稳频系统

通过调制激光器的外腔、激光管的注入电流等得到激光光谱信号，处理后得到参考谱线中心频率两侧极性相反的稳频误差控制信号，将激光频率锁定在参考谱线中心附近。

激光稳频在精密干涉测量、光频标、光通信、激光陀螺及其精密光谱研究等领域中有广泛应用。产品可实现三种激光稳频，将线宽限制在 100kHz 左右。主要有：

(1) 饱和吸收锁——锁峰：产品精度高且易于操作。利用饱和吸收峰将激光器精确锁在某一固定频率上。

(2) FP 腔锁——锁峰：产品使用非常方便。通过改变 FP 腔的腔长实现一定范围的波长扫描。

(3) PID 电路锁——锁边：产品简单易用，用于对精度要求不高的锁频应用。

3、外腔半导体激光放大器

放大器可对入射激光进行放大，同时保持注入光的偏振、线宽和波长等物理特性不变。产品输入光功率 10 mW~50 mW，放大倍数 13dB，输出功率 500mW~1000mW，增益带宽 30nm。

二、技术创新性和领先性

高精度、高稳定激光器伺服系统，提高了波长调谐范围及缩小了输出线宽。注入电流变化控制在 0.001~0.0001 毫安量级；温控精度达到 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ~ $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ ；PZT 精密控制实现纳米量级的腔长调谐。高性能的激光器稳频系统，实现频率锁定，将激光线宽限制在 100kHz 左右。高功率的激光放大系统，实现对 762 到 795 纳米特定输出激光的放大，放大后的激光输出功率达到 1W。

三、市场及效益分析

项目产品年产值超过 500 万，形成显著的社会、经济效益。

四、合作方式

●联合研发 ●技术入股 ●转让 ●授权（许可） ⚙面议

14. 耐高温 1000℃ 光纤光栅传感系统

负责人：司金海、陈涛

所在学院：电信学院

一、项目简介

光纤光栅传感器具有响应快、可分布式测量、并行传输容量大、抗电磁干扰等特点，适用于应变、温度、应力等多种参量的测量。传统的光纤光栅由光敏光纤制备，其折射率调制是由于色心的产生形成的。在 400℃ 以上这种光栅结构就被擦除，无法应用在高温环境下。

本项目针对传统光纤光栅温度传感器的上述不足，采用超短脉冲微纳加工技术结合特殊封装工艺制备可用于高温环境下的光纤光栅温度传感器。

二、产品性能优势

1. 耐高温光纤光栅的刻写

(1) 采用超短脉冲激光作为光源取代传统的紫外光光源，基于超短脉冲激光与光纤材料的非线性作用诱导材料产生永久折射率改变，解决传统光纤光栅结构的高温消退问题，可对任何材料的光纤进行直接刻写。

(2) 工艺简单，不需要对光纤进行载氢增敏处理；

(3) 在玻璃转化温度高的光纤中直接刻写光纤光栅，克服传统石英光纤熔点低的限制。实验室已经具备加工反射率 90% 以上的光纤布拉格光栅的条件，加工的石英光纤布拉格光栅在 1000℃ 的环境下保持 1 小时反射率仍保持在常温反射率的 90%，相关参数接近国际报道最好水平。

2. 耐高温光纤光栅的封装

分为管式封装与片式分装，解决传统光纤光栅封装方法不耐高温的问题。

(1) 管式封装（探头式）

利用耐高温管材保护光栅结构，并在低温区粘接。简单方便、可以手持、耐高温性能好。

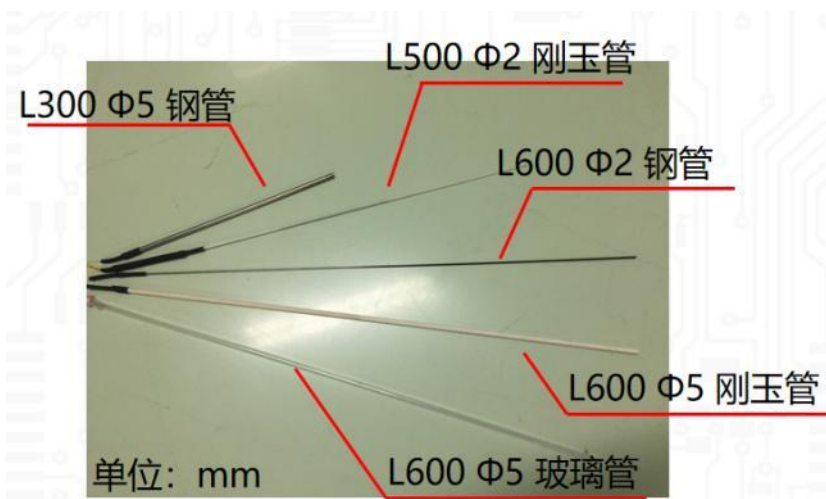


图 1 管式封装展示

(2) 片式封装（分布式）

采用耐高温的金属涂层光纤，可在一根光纤上同时实现多点传感。

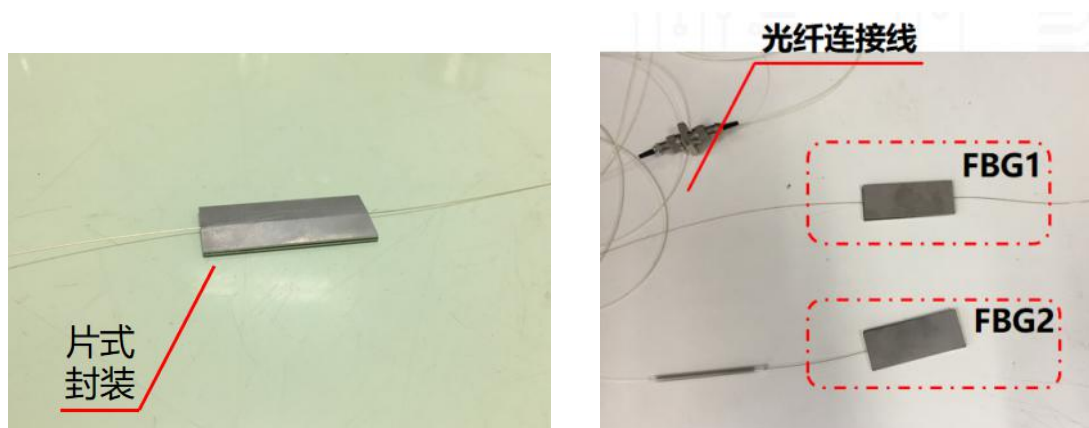


图 2 分布式封装展示

3. 解调系统

- (1) 实时显示并保存温度变化；
- (2) 多通道扫描多点传感解调；
- (3) 实时显示并保存 FBG 反射光谱；
- (4) 基于 Visual Studio 2015 平台开发。
- (5) 误差小于 4‰。

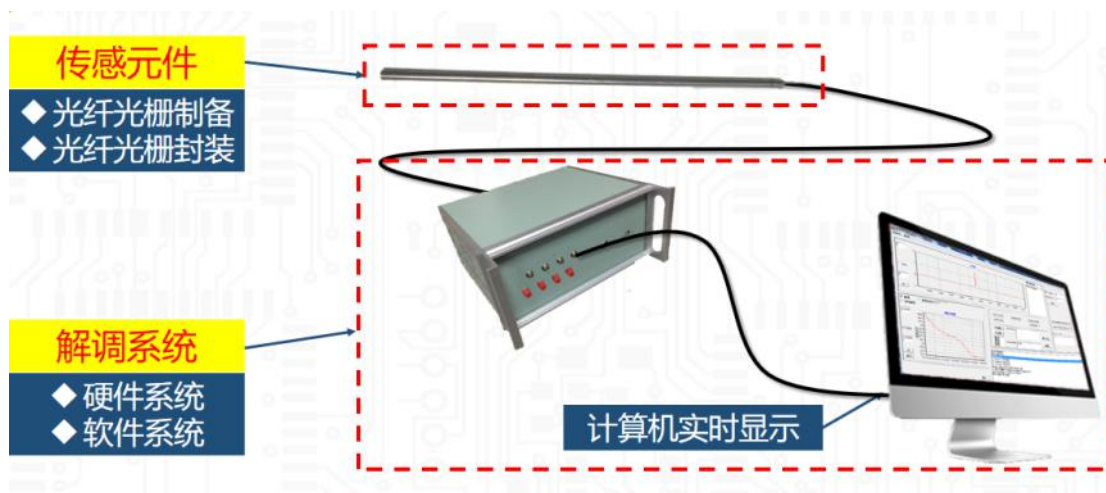


图 3 解调系统

三、市场前景及应用

可应用于冶金、煤炭、石油、化工等高温领域。在隧道、桥梁、大坝、发电站、变电站、储油基地、各类仓库、化工厂高层建筑、航天工业等领域都有着重要的应用。

四、技术成熟度

☐ 概念验证 ☐ 原理样机 ☒ 工程样机 ☐ 中试 ☒ 产业化

五、合作方式

☐ 联合研发 ☐ 技术入股 ☐ 转让 ☒ 授权（许可） ☒ 面议

15. 激光雷达

负责人：孙剑

所在学院：航天航空学院

一、项目简介

激光雷达是无人机，无人车，机器人等智能装备的核心模块。它被誉为机器人的眼睛，具有探测距离远，测量精度高，抗干扰能力强的特点。在无人机，无人车，机器人等智能装备的导航与避障领域具有极其广泛的应用前景。目前激光雷达存在价格非常高、探测距离有限、质量体积比较大等问题。本研究团队经过多年研究，研发出了一种新型的激光雷达技术体系，与国内市场现有的激光雷达技术相比，本项目的技术方案具有成本低、测距精度高、适应性广的优点。

二、产品性能优势

1. 高重复频率激光测距仪

性能	本项目产品	PULSEDLIGHT	北醒光子
测量频率	1KHz	500Hz	500Hz
测量距离	40 米	40 米	20 米
测量精度	厘米级	厘米级	厘米级
重量	30g	20g	50g
价格	300 元	1000 元	1500 元

2. 高重复频率激光测距仪

性能	本项目产品	思岚科技	北阳科技
测量频率	20Khz	4Khz	2.7Khz
扫描频率	20Hz	15Hz	20Hz
测距精度	厘米级	0.5-1%	厘米级

探测距离	40 米	8 米	30 米
尺寸	Φ 50*45	Φ 72.5*41	124*126*150
适用环境	室内/室外	室内	室外
售价	500 元	千元	万元

3
. 16
线
扫
描
激

光雷达

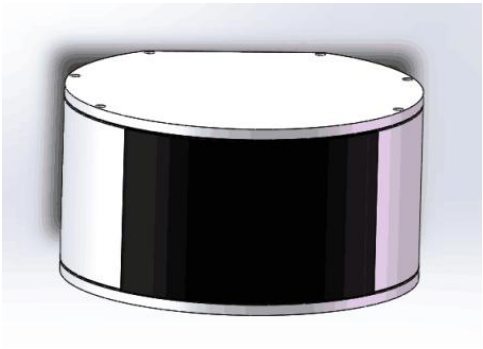
性能	指标
探测距离	200 米
测距精度	厘米级
扫描频率	20Hz
重量	200g
价格	1500 元
适用对象	无人机避障

4. 64 线扫描激光雷达

性能	本项目产品	Velodyne	禾赛
探测距离	150 米	150 米	150 米
点云数量	2MHz	1. 2Mhz	640KHz
扫描线数	64 线	64 线	40 线
扫描频率	20Hz	20Hz	20Hz
价格	5 万	60 万	≈60 万



16 线扫描激光雷达



64 线扫描激光雷达

本项目的特色及技术创新点：

- 本项目产品能够实现对高、中、低档激光雷达的全覆盖。
- 本项目产品在实现高重频厘米级测距精度的前提下，产品售价比同行产品至少低 1/3。
- 独创的超高重频激光器技术，可以输出最高 100Khz 脉冲激光。
- 在国内率先完成了 MEMS 激光雷达主动成像实验。
- 自主研发的高速、高精度标定系统。

三、市场前景及应用

据高盛预测，到 2020 年高端激光雷达的市场规模将达 100 亿元。而面向扫地机器人，VGA 货运机器人，无人机避障的中低端激光雷达的市场需求则以每年 30% 以上的速度在增长。到 2022 年市场对各类激光雷达的需求近 320 亿美元。

该项目目前已经与深圳、杭州、西安、北京等地的公司就服务机器人导航激光雷达、激光测距雷达、无人驾驶激光雷达、激光测距雷达等方面开展合作。

四、技术成熟度

☒ 概念验证 ☐ 原理样机 ☐ 工程样机 ☒ 中试 ☐ 产业化

五、合作方式

☒ 联合研发 ☒ 技术入股 ☐ 转让 ☒ 授权（许可） ☐ 面议

16. 油井天然气/氮气实时监测装置

负责人: 李昕

所在学院: 微电子学院

一、项目简介

与国内外现有的关于天然气混合气体中各种种类的识别以及在线检测设备的技术相比较, 该技术选择用多种传感器构造智能传感器阵列的技术手段。以深度学习算法网络为信息辨识计算方法, 以 FPGA 来完成网络算法的硬件实现, 最终获得一套智能化天然气混合气体多种气体 (包括氮气) 在线监测装置。



二、技术指标 (性能参数)

1. 甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳、一氧化碳、氮气的检测量程均为 0—100%;
2. 各种气体检测精度为 0.5 级;
3. 数据存储和通信可以首先无线通信且手机读取;
4. 设备寿命 10 年。

三、市场前景及应用

可以用于采油厂、矿井、油田等资源开采环境; 也可以适用于家居、城市污染检测 (烟雾、可燃气体、甲醛、雾霾、空气尘埃等); 以及适用于人体健康检测。

四、技术成熟度

☐ 概念验证 ☒ 原理样机 ☒ 工程样机 ☒ 中试 ☒ 产业化

五、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☐面议

17. 面向小型化、集成化微波器件(超)低温共烧陶瓷技术

负责人：周迪

所在学院：电子科学与工程学院

一、项目简介

低温共烧陶瓷技术（Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC）是近年来兴起的一种令人瞩目的多学科交叉的整合组件技术，因其优异的电子、热力学等特性已成为未来电子元件集成化、模块化的首选方式。国内被动元件厂商多年来与日商呈现很大差距，国内 LTCC 的发展成效将是缩短这一差距的关键。团队专注小型化、集成化微波器件（超）低温共烧陶瓷技术研发，并取得了一些成果。

二、产品性能优势

团队研发了一系列可以在 900℃ 烧结的 K12 及 K40 型微波介质陶瓷（如表格 1 所示），研究其与 Ag 电极的共烧兼容特性，如图 1 所示。可以看出 Ag 电极能独立存在且无扩散，说明 K40 型微波介质陶瓷粉体与 Ag 电极有很好的兼容性。

表 1 LTCC 微波介质陶瓷烧结温度及介电性能列表

Composition	ST (°C)	ϵ_r	Q	Qf (GHz)	f (GHz)	TCF (ppm/°C)
SrMoO ₄ -TiO ₂ -CuO	900	12.1	5720	47,200	8.26	+1
CaMoO ₄ -TiO ₂ -CuO	900	13.0	6960	57,400	8.25	-5
Li ₂ O-Nb ₂ O ₅ -TiO ₂ -B ₂ O ₃ -CuO	900	40	2480	16,000	6.489	+20
ZnSnTiNbO-B ₂ O ₃ -CuO	900	42	3800	24,000	6.246	-3

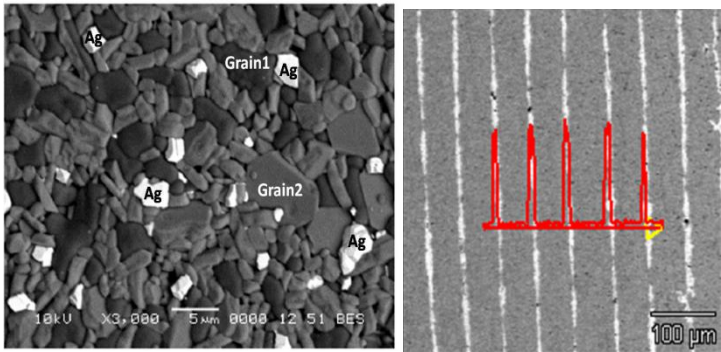


图 1 K40 与 Ag 粉共烧后背散射电子图像及厚膜多层共烧后样品断面背散射及能谱线扫图

三、技术成熟度

☒概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

该系列结果已在相关企业初步实现产业转化。

四、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☒转让 ☒授权（许可） ☒面议

18. 面向高频介质谐振器、滤波器的高品质因数微波介质陶瓷

负责人：周迪

所在学院：电子科学与工程学院

一、项目简介

微波介质陶瓷是近四十年来迅速发展起来的新型功能电子陶瓷,广泛用于介质谐振器、滤波器、介质天线基板等。为满足微波器件向高集成化、小型化、高可靠性方向发展,微波介质需要具有高介电常数、低介电损耗及近零温度系数。目前微波陶瓷和器件的生产水平以日 Murata 公司、德 EPCOS 等公司为最高。其产品已在 300MHz~40GHz 系列化,年产值达数十亿人民币。国内微波介质陶瓷及器件的生产在技术、品种及规模上与国外相比有较大差距。团队在中高 K 值微波介质陶瓷研究方面做出了一系列原创性工作,研发了一系列具有自主知识产权的新型微波介质陶瓷。

二、产品性能优势

(1) 中 K 值微波介质陶瓷:

K24~28: 采用高品质因数且具有正值 TCF 的 Li_2TiO_3 、 TiO_2 等对 $\text{Li}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{1.5})\text{O}_4$ 进行补偿, 获得介电常数 26 附近的温度稳定型微波介质陶瓷, 其 Qf 高达 94,000GHz;

K32~35: 在 BaO-ZnO- TiO_2 三元相图中选取 $\text{BaZn}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ ($\epsilon_r=30$ 、Qf=68,000GHz、TCF=-30ppm/°C) 及 BaTi_4O_9 组份 ($\epsilon_r=35\sim38$ 、Qf=20,000~50,000GHz、TCF=+10ppm/°C), 可以构建温度稳定型中 K 微波陶瓷;

(2) 高 K 值微波介质陶瓷:

K40~45: 采用多相复合的方法在 $(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_2\text{-ZrO}_2\text{-TiO}_2$ 三元体系内构建了一系列高品质因数微波介质陶瓷, 其中 1240℃ 烧结的温度稳定型

$0.625\text{ZrTiO}_4\text{-}0.375(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{TiO}_4$ 陶瓷介电常数 42.5, Qf 高达 43,520 GHz;

K75~83: 通过组分调整 $\text{BaO-Ln}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 基微波陶瓷, 可以得到一系列介电常数分布于 75~83 范围内的微波陶瓷, 此系列为广泛使用的商用经典配方, 申请人实验室制备的 $\text{Ba}_{6-3x}(\text{Sm}_{0.85}\text{Nd}_{0.15})_{8+2x}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$ 系列微波介质陶瓷在介电常数 78.9 附近时其 Qf 高达 9,860GHz;

K75~85: 通过不等价复合离子取代的方式, 将 $(\text{Li}_{1/2}\text{Bi}_{1/2})^{2+}$ 、 $(\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2})^{2+}$ 等复合离子引入 BiVO_4 , 获得了一系列介电常数介于 75~85 之间的白钨矿型微波介质陶瓷, 其中 $x\text{Bi}(\text{Fe}_{1/3}\text{Mo}_{2/3})\text{O}_4\text{-(1-x)BiVO}_4$ 系列最高介电常数可达 75, 其 Qf 高达 13,000GHz, 这是迄今为止介电常数高于 70 的微波介质所能企及的最高值;

K85~88: 在 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$ 三元体系中开发出一系列复合陶瓷, 其介电常数介于 85~88, 其中温度稳定型 $0.45\text{BiVO}_4\text{-}0.55\text{TiO}_2$ 陶瓷的介电常数 86.2, 其 Qf 高达 9,500GHz, 该性能已经超过的前面所述商用 Ba-Sm-Nd-Ti-O 体系。

表 1 中 K、高 K 值高品质因数微波介质陶瓷性能列表

Composition	ST (°C)	ϵ_r	Q	Qf (GHz)	f (GHz)	TCF (ppm/°C)
(Mg _{0.7} Zn _{0.3})TiO ₃ -CaTiO ₃	1300	23.0	7520	86,250	8.81	+0.2
Li(Zn _{0.5} Ti _{1.5})O ₄ -TiO ₂	1100	24.2	11700	87,000	7.4	-1
Li(Zn _{0.5} Ti _{1.5})O ₄ -Li ₂ TiO ₃	1160	27.5	11400	94,000	8.25	+1
BaZn _{2(1-x)} Ti ₄ O _{11-2x} (x=0.6)	1280	32.7	9700	53,000	5.5	-6
0.7CaTiO ₃ -0.3NdAlO ₃	1450	45.3	8905	45,900	5.156	+2.8
Bi(Fe,Mo,V)O ₄	820	74.8	3350	13,000	3.879	+20
Ba _{6-3x} (Sm _{0.85} Nd _{0.15}) _{8+2x} Ti ₁₈ O ₅₄	1350	78.9	2560	9,860	3.54	-5.3
0.45BiVO ₄ -0.55TiO ₂	900	86.2	2750	9,500	3.45	-8

三、技术成熟度

K45 配方已经在相关企业完成技术转化，2018 年度基于该配方制作的介质谐振器及滤波器产值突破 500 万元。

四、合作方式

☒ 联合研发
 ☒ 技术入股
 ☒ 转让
 ☒ 授权（许可）
 ☐ 面议

19. 智能安全检测监测技术

负责人: 马登龙

依托单位: 中国西部质量科学与技术研究院

所在学院: 机械工程学院

一、背景介绍

目前国内化工化工安全事故形势严峻。2018 年全国事故 176 次, 死亡 223 人; 2019.1-6 月, 全国化工事故 817 起, 死亡 409 人, 超过 2018 全年总和。其中, 装备的不安全状态和人的不安全行为是引发安全事故的主要原因, 同时存在智能安全检测监测面临准确性、有效性、快速性难以兼顾的问题, 智能安全检测监测技术亟待发展。课题组基于上述情况, 面向智能安全检测监测需求开发了一系列的技术和方法。

二、技术特点及应用

1. 基于人工智能嗅觉系统的挥发性介质检测识别

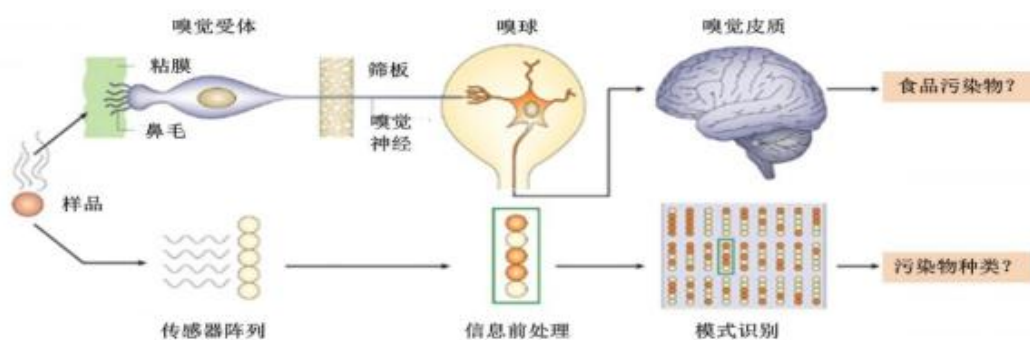


图 1 人类嗅觉与人工嗅觉系统工作原理

基本原理: 模拟动物嗅觉对未知多组分进行检测识别

解决问题: 单组分、多组分微量挥发性分或气体定性定量识别。

技术特点: 克服传统单点传感器交叉响应、选择性差、误报高的缺点; 气体组分适应选择性好、检测气体灵敏度高、操作简单成本低; 利用同一模块识别不同的组分; 对于多组分混合状态整体识别具有优势。

应用场景: 容器管道挥发组分泄漏; 环境污染物释放; 危险物质释放; 材料热致状态检测(电气热致故障); 物料品质检测(比如食品掺假、油品质量劣化)。

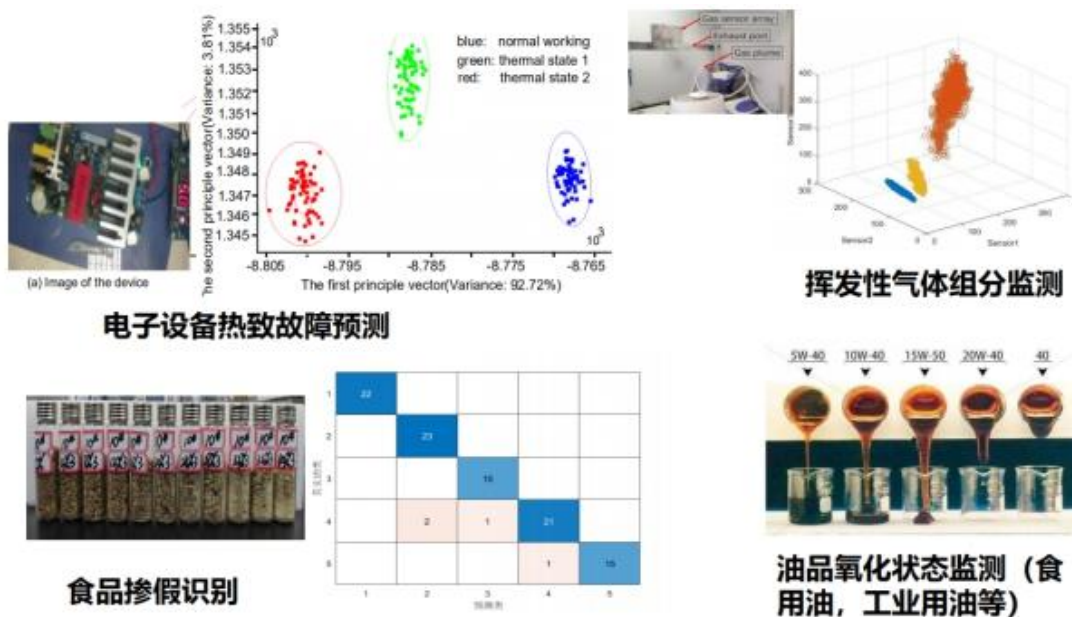


图 2 人工嗅觉系统应用场景

2. 容器管道设备全周期多场耦合泄漏检测监测方法

解决问题: 为管道容器泄漏前腐蚀状态监测—早期泄漏痕迹监测—明显泄漏可视化监测全周期提供精细化检测监测。

技术原理: 导波超声检测技术对腐蚀缺陷检测；人工嗅觉对早期痕迹气体进行检测；利用增强辐射红外成像技术对气体泄漏进行可视化监测。

应用场景: 材料和构建的腐蚀、缺陷检测监测；介质泄漏检测监测。

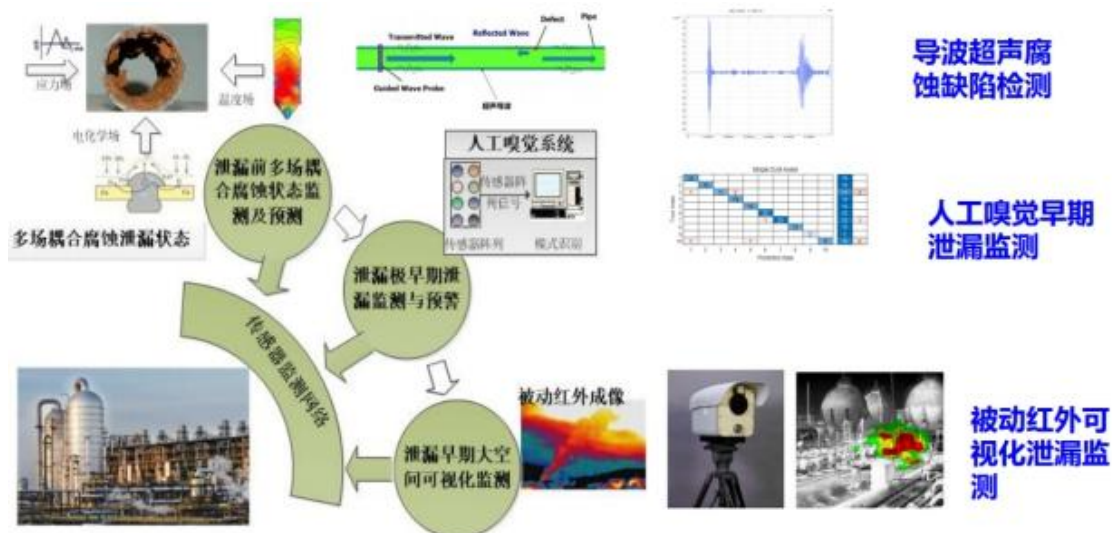


图 3 容器管道监控过程和主要技术手段

3. 泄漏监测及反演溯源方法和装置

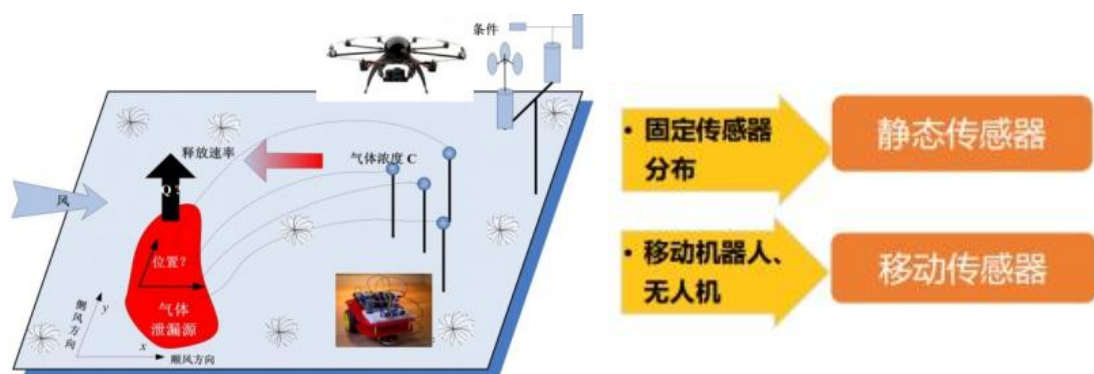


图4 泄漏监测及反演溯源解决方案

解决问题：未知泄漏释放源的辨识确定。

基本原理：利用静态传感器分布或移动机器人，结合溯源算法实现泄漏溯源。

技术特点：根据监测浓度和大气信息反演泄漏源信息；定位精度高；可估计释放泄漏速率等源项信息；可同时固定分布传感器和移动机器人。

应用场景：大型危险介质生产、储存、运输、生产厂园区、边境口岸、环境领域危险物释放辨识溯源。

4. 智能安全信息感知与安全行为识别技术装置和系统

解决问题：站场园区安全状态、人的安全行为自动监测和识别。

技术原理：利用固定式检测装置、智能头盔搭载危险气体、视觉、温度、湿度等传感器，无线远程监测相关安全信息，并传至监测系统。利用智能算法对危险状态（气体泄漏、高温等）和不安全行为（安全帽佩戴、防护装备穿戴、违规抽烟、打手机等）进行自动识别。

应用场景：化工厂区巡检、矿区作业巡检、危险作业安全监测、特殊作业（有限空间、动火、高处作业等）危险行为监测、作业规范识别；可拓展至其它可视化危险因素识别。

三、技术成熟度

☐概念验证 ☒原理样机 ☐工程样机 ☐中试 ☐产业化

四、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☐授权（许可） ☒面议

20. 基于热电材料的无线无源温度传感器

负责人：何海龙

所在学院：电气工程学院

一、项目简介

本项目提供一种应用于有稳定热源、不方便布设电缆、需长期监测、电池不易更换或者易燃易爆等特定场合温度检测的无线无源温度传感器。基于热电材料的热电型传感器是基于热电材料的热电效应，利用器件内部载流子运动实现热能和电能直接相互转换。当器件两端存在温差时，热场驱动器件内的载流子定向运动，从而产生温差电流，用于热电型传感器系统的供电。

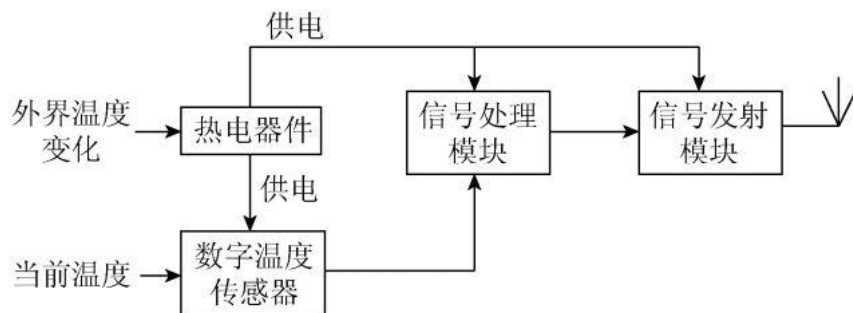


图 1 基于热电材料的无源传感器工作原理图

图 1 给出了热电型无源温度传感器的基本工作原理图，可以看出：外界温度变化触发内部热电器件，由热电器件为各个模块供电。内置的数字型温度传感器测量外界温度值，并将温度信号传给信号处理模块，再将温度数据发送。

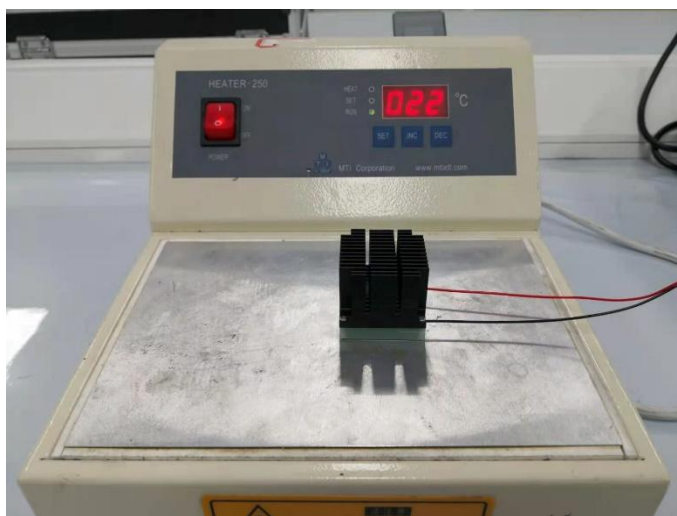


图 2 温差供能模块（传感器供电部分）

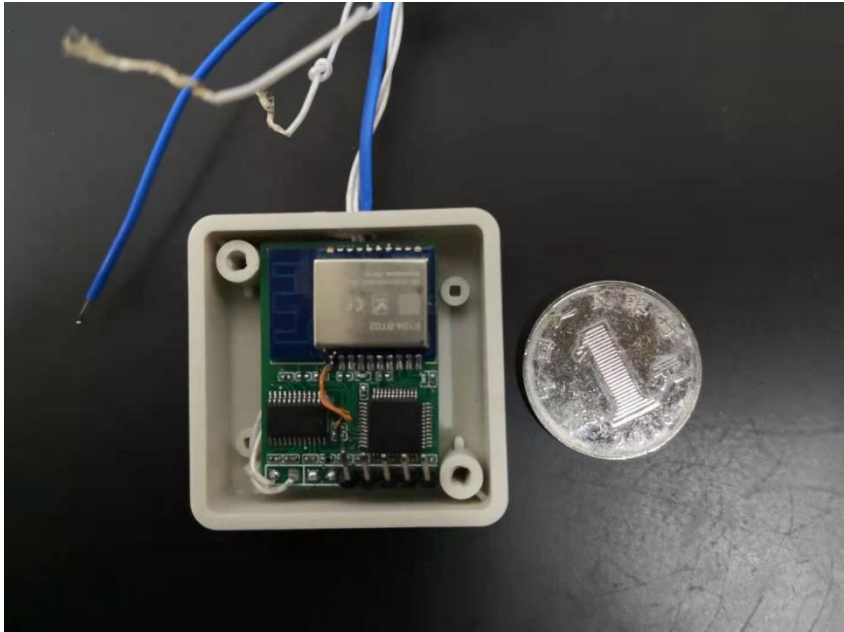


图 3 传感器电路模块（含无线发射部分）

二、技术指标（性能参数）

该项目中的关键技术为热电材料研发、热电器件制作及信号发射模块设计。

主要指标参数：

指标名称	目前	目标	备注
传感器尺寸	40*40*40 mm3	30*30*30 mm3	目前优于 ABB
最小工作温差	20℃	10℃	目标与 ABB 相当
传感信号 发射距离	>8m(空旷条件)	>8m(空旷条件)	目前与 ABB 相当

三、市场前景及应用

按供能方式可以将微型传感器分为两种：有源和无源传感器。前者由于采用电池或电缆供电，传感距离非常远，可采用各种电路，控制处理方便灵活，目前已被广泛应用。然而，对于许多不方便布设电缆、需长期监测、电池不易更换或者易燃易爆等危险场合（如冶金、建材行业中关键设备回转设备温度测量，现场条

件复杂，回转设备以一定速度旋转）的应用，必须采用无线无源温度传感器来实现测量。此外，在无线传感器物联网应用中，由于节点数量多和分布范围大，电池更换问题也难以解决。因此，能够自供能的无线无源传感器具有广泛的应用前景，也是目前国内外研究的热点，本项目中基于热电材料的无线无源温度传感器便是其中重要的一员。

四、技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

五、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☒面议

21. 一种基于压力波的管道泄漏检测技术

团队负责人：邓建强

所在学院：化学工程与技术学院

一、项目简介

流体管路输运是工业、农业、城市供排水等领域的关键流程,目前约有 50% 的地下管道的管龄已超过 30 年。全国油气输运管道总里程已超过 12 万公里,到 2025 年,将达 24 万公里,绕地球 6 圈。城市供水管网平均漏失率超过 14%,因漏失导致的年损失水量超过 60 亿 m^3 ,折合人民币 180 亿。西气东输、南水北调、西油东送等资源跨区域管道输运通道建立,油气管道泄漏事故,还将威胁群众生命安全、危害周边环境。

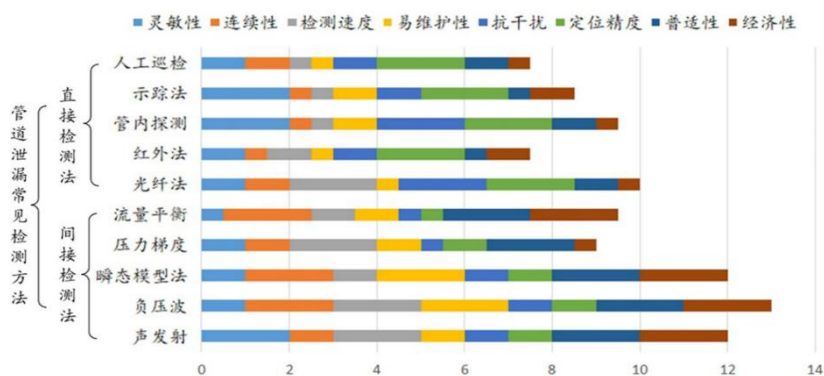


图 1 现阶段管道泄漏常见的检测方法

目前负压波法检测管道泄漏属于主流,本项目基于压力波的管道泄漏检测技术具有负压波法的优点,同时能够检测出管道的微小泄漏,预测管道发生的畸变,应用性、经济性较好。

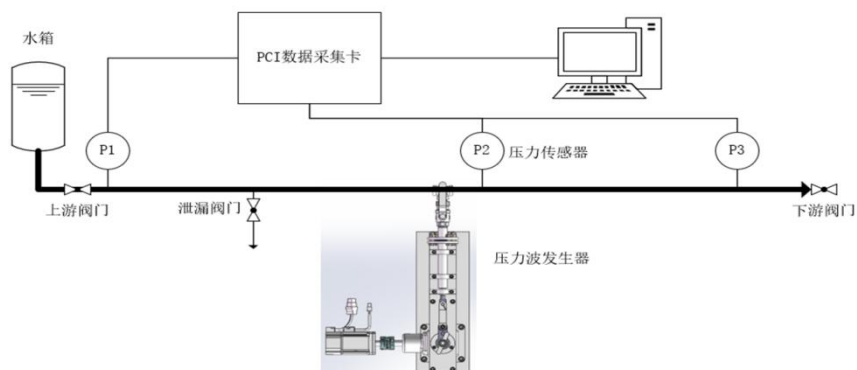


图 2 压力波发生器工作原理示意图

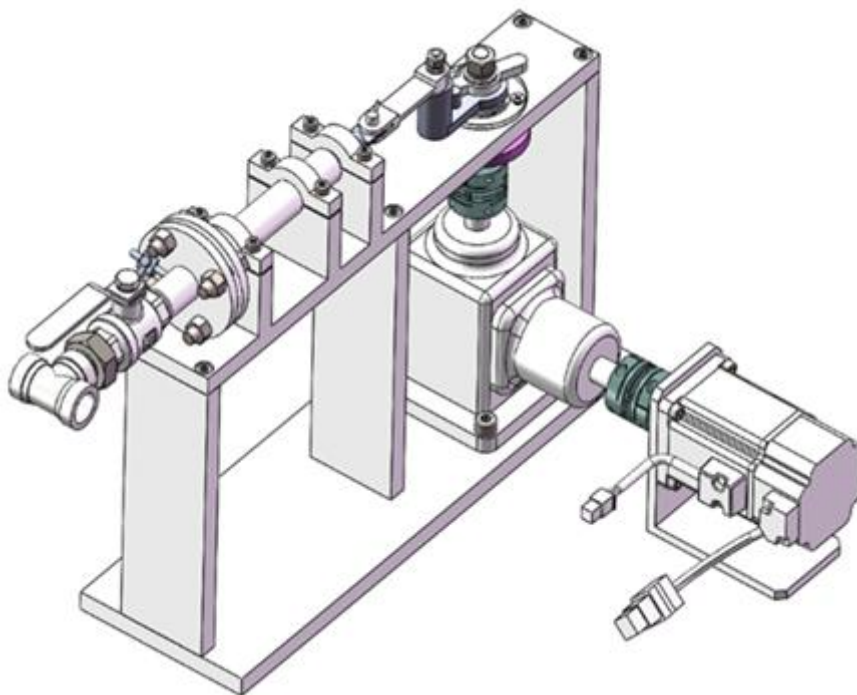


图 3 压力波发生器三维设计图



图 4 压力波发生器实物图

发生泄漏时，压力波产生器产生的压力波，经过泄漏处发生变化，传感器采集到的压力信号进行幅频分析与不发生泄漏时的信号进行比较。从而推测出泄露的大致方位。

目前团队已经实现工程样机研发，经实测最大测试误差为 1.83%，可以满足工程定位要求。

二、产品性能优势

1. 本项目涉及关键技术

(1) 主动式压力波发生器：本项目自主开发的压力波发生器，可以主动产生所需要的压力波信号，并且信号强烈，随时检测管道的泄露和畸变；

(2) 小波变换技术：对于含有噪声的负压波信号的奇异点位置，采用小波变换技术精确压力波到达传感器端的时刻，减小定位误差；

(3) 经过训练的神经网络：借助反馈型神经网络，开展不同泄漏工况下的网络训练和预测，利用经过训练的神经网络对所选取的泄漏点进行定位预测，提高定位的准确度。

2. 产品优势

(1) 自主研发的压力波发生器，装置的结构简单，不易受外界条件影响；

(2) 本技术的压力波具有负压波的优点，同时信号更加强烈，能够检测出管道的微小泄漏；

(3) 预测管道发生的畸变，预报泄漏。

(4)

三、市场前景及应用

该技术主要应用于油气管路、市政工程中供暖、供水管道的检测领域。2014 年-2017 年，我国仅油气管道新增检测长度年平均增长 0.6 万公里，现有存量检测长度自 2015 年起突破 10 万公里，每年保持约 1 万公里增速。城市供水管网平均漏失率超过 14%，因漏失导致的年损失水量超过 60 亿 m^3 ，折合人民币 180 亿。随着国家在油气工程、市政工程逐年投入，以往的管道相继出现老化，市场将持续保持旺盛需求，存量市场规模也将逐步扩大。本项目技术较主流技术不仅可以做到高精度的泄露位点检测，还可以做到泄露位点预测，在技术上占有一定优势，后期推向市场可以该点作为卖点去和已有的技术竞争市场份额。

四、技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☐中试 ☐产业化

五、合作方式

☐ 联合研发 ☐ 技术入股 ☐ 转让 ☐ 授权（许可） ☒ 面议

22. 垂直结构固态光源技术产业化

负责人：云峰

所在学院：电信学部电子科学与工程学院

一、项目简介

本项目是基于垂直结构特种半导体照明芯片核心技术的大功率 LED 产品。采用更适合大电流密度驱动的独特外延技术，采用先进的晶元键合，激光剥离技术将生长在不导电、不导热的蓝宝石衬底上的外延晶圆转移到导热、导电性优异的金属衬底上，并配以光提取效率达到 90%以上的超级出光结构，形成单颗最大 14mm² 的大尺寸芯片。

二、产品性能优势

大功率垂直结构芯片工艺，其主要特点是将外延和蓝宝石衬底分离，键合到另外一个导热性更好的衬底上，电极被置于芯片两侧，非出光面的衬底整面都可以当做电极。垂直结构芯片结构克服了水平、倒装结构由于电流拥堵，散热不均匀等一系列问题。在大功率 LED 芯片制备中，通过纳米空气腔结构，提高了光提取效率。通过芯片键合和激光剥离工艺实现了 LED 芯片衬底转移，从而解决了大功率 LED 的散热问题。本系列产品首先探索出大功率 LED 垂直结构芯片提高出光效率、电光转换效率。研发采用 tracepro 和 DIALUX 等光学设计软件，使得光源能够有效利用。结合不同的应用场景，制定出不同 LED 照明和消杀灯具，避免了光源浪费，提高了光源利用效率，降低了生产成本。

三、市场前景及应用

根据其高功率点光源的特点，可适用于需要大尺寸强光源的产品中，如车灯等大功率。其高分辨和准直的特性可以应用于 Micro-LED 投影显示等；其中的深紫外芯片技术能够大幅提高深紫外 LED 的出发光效率，适用于医疗行业、家电行业、空气净化等。

未来三年，将围绕垂直结构大功率 LED 芯片产业化项目的开发建设，从通用照明开始，逐渐开发汽车照明和商务投影使用的大功率蓝、绿以及白光 LED 芯片。开发适用于工业级 3D 打印技术和 UV 固化、杀菌的大功率紫外芯片。立足自身发展规划，做好技术开发 专利池建设，大力开展推广工作。围绕提升芯片亮度、辐射通量和可靠性开展技术攻关。开发出 180lm/W 以上发光效率的垂直结构大功率 LED 芯片产品，并保持每年 20%左右的提升速度。不断采用新技术升级产线，降低生产成本，扩大生产规模。使国产大芯片完全替代进口，满足应用市场需求。在国家政策的扶持下，实现垂直结构大功率 LED 芯片核心技术国产化应用，占据国内垂直结构大功率 LED 芯片市场 20%以上份额，并参与国际合作与市场竞争，产品进入欧美市场。

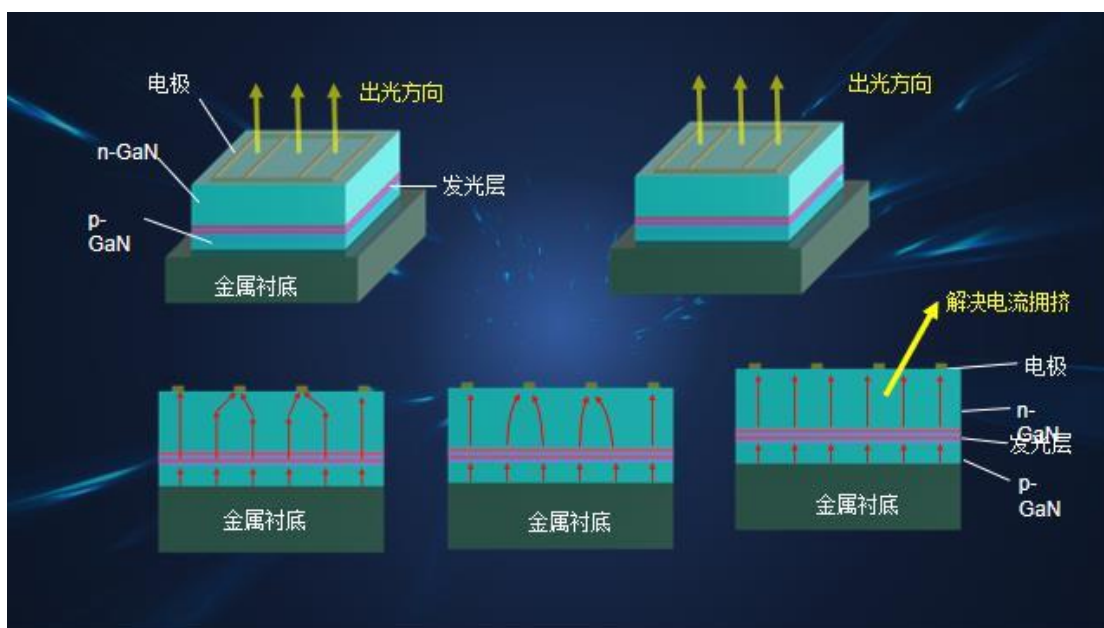
四、技术成熟度

●概念验证 □原理样机 □工程样机 ●中试 ☒产业化

五、合作方式

●联合研发 ●技术入股 □转让 ●授权（许可）☒面议

附图



23. 高密度 MRAM 电子设计自动化（EDA）软件与设计流程

团队负责人：闵泰

所在学院：材料科学与工程学院

一、项目简介

磁随机存储器（MRAM）技术采用磁性隧道结（MTJ）作为基本存储单元，并采用全新的自旋量子调控物理机制，利用电子自旋调控磁矩取向来进行存储，具有体积小、功耗低、访问速度快、非易失性、近无限次读/写操作和抗辐射能力强等优点，特别适合空间科学技术和特殊领域的应用。虽然 STT-MRAM 已经产业化，但 MRAM 技术仍然存在一些重要的问题亟待解决。例如，小尺寸（亚 7 纳米）STT 磁矩进动翻转引起的在亚纳秒区间电流（功耗）随翻转时间缩短而指数增长；下一代基于自旋轨道力矩（SOT）技术的高密度磁随机存储器（SOT-MRAM）的关键性垂直翻转限制等。现阶段业界尚无有效解决此类器件设计问题的自旋量子器件电子设计自动化（EDA）软件和设计流程。

本项目开发一套适用于 MRAM 器件仿真设计的 EDA 软件与设计流程，包括第一性原理材料参数仿真计算提取，第一性原理非平衡格林函数（NEGF）量子输运仿真，复杂几何结构通用多尺度 MTJ 微磁/宏磁模拟，器件流片数据高性能统计分析，人工智能增强的紧凑模型建立与多参数提取等，全流程 MRAM 器件设计功能，为 MRAM 电路设计提供技术设计支持。

二、产品性能优势

1. 多尺度模拟：

超过 20k 原子计算能力的第一性原理材料计算及参数提取，与原子尺度的微磁动力学模拟方法、传统连续介质模型相结合，适用微纳小尺寸的 MRAM 器件仿真，使能高可靠性新型器件设计创新。

2. 大体系复杂几何结构微磁/宏磁模拟：

大规模有限元/有限差分计算技术，对于任意器件结构、复杂几何边界均可

进行精确求解。

3. 高性能、高精度的 MRAM 紧凑模型：

兼容现有 CMOS 电路仿真平台。基于超过 5k 原子计算能力的第一性原理量子输运计算，多尺度微磁/宏磁模拟，构建优化算法的微观紧凑模型，在准确描述量子效应及保证仿真精度的前提下，仿真速度可接近传统半导体器件紧凑模型指标，提高 MRAM 核心器件及 CMOS 驱动电路联合仿真设计效率。

4. 大规模测试数据自动化分析：

人工智能驱动的 MRAM 紧凑模型参数提取。支持多种格式、多类型性能参数测试数据的自动化统计分析，并借助人工智能算法利用实时测试数据进行紧凑模型参数优化拟合，提供高精度工程模型，实时反应当前工艺状态，提高 MRAM 电路设计优化迭代速度。

三、市场前景及应用

MRAM 独特的优点契合企业存储和 IOT、穿戴市场的需求，针对高密度 MRAM 器件全流程设计的完全自主知识产权 EDA 软件有着广阔的应用前景。MRAM 技术对于提高军用电子设备速度和集成度也有重要作用。本项目产品将推动自主知识产权 MRAM 技术发展及其在军、民领域的应用。

四、技术成熟度

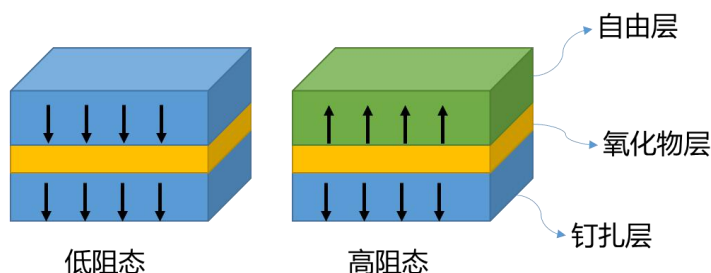
☒ 概念验证 ☒ 原理样机 ☐ 工程样机 ☒ 中试 ☒ 产业化

五、合作方式

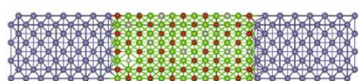
☒ 联合研发 ☒ 技术入股 ☐ 转让 ☒ 授权（许可） ☒ 面议

附图

磁隧道结 (MTJ)



原子级MTJ 量子输运、材料计算



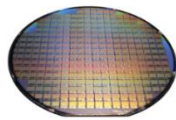
多尺度微磁/宏磁模拟



3D器件设计



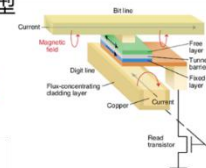
测试数据自动化分析



人工智能紧凑模型



MRAM电路设计



高密度MRAM电子设计自动化（EDA）软件及设计流程

24. 高速光电子集成芯片

负责人：李丹

所在学院： 电信学部微电子学院

一、 项目简介

随着 5G, 大数据, 人工智能, 云计算, 高清视频的普及, 人们对带宽的诉求已远大于计算, 且成指数形式增加。在目前的各种高速通信场景中, 光纤通信为各种高带宽场景提供了高速率基础设施。其中, 光纤通信芯片则决定了网络的传输速率, 为其关键所在。

本项目立足于开发用于接入网的光纤通信芯片, 面向千兆入户的亿级应用场景。目前已完成第一版芯片流片验证, 实现了 Class C+ 产品级性能。第二版 Class D 产品级芯片正在研发中, 预计 2021 年秋流片。

二、 产品性能优势

1. 本项目通过采用廉价 CMOS 工艺, 芯片制造成本较现有 SiGe 产品降低一个数量级。同时, CMOS 流片周期为 2 个月, 较 SiGe 流片时间(6 个月)缩短 3 倍, 极大加速产品研发及迭代时间。目前市场已有产品均基于 SiGe 工艺, 不但成本高、制造周期长, 而且国内无高速 SiGe 芯片代工厂。业界有公司尝试采用 CMOS 进行此类产品设计, 目前均未有成功报道。

2. 基于课题组 10 余年的研发积累和深度产学研合作, 通过独有的芯片设计技术和努力, 首次在 CMOS 平台突破了低噪声、快速突发相响应、大动态突发输入范围、低功耗等技术难关, 芯片整体性能较同类产品有明显优势。测试结果表明, 芯片实现了 10G PON Class C+ 级性能。

三、 市场前景及应用

随着光纤接入网等快速发展, 千兆入户已开始大规模商用。今年工信部印发的《“双千兆”网络协同发展行动计划 2021-2023 年》, 进一步加速了 10G PON 网络的快速部署, 中国电信等运营商已开始进行海量采购。2021 年一季度, 市场同比增长 400%。预计未来 10 年, 市场将持续高速增长。根据测算, 我国每年 OLT PON 端口增量约 500 万/年, ONU PON 端口增量约 2000 万/年, 按 100 元/套片计算, PON 芯片每年市场规模在 25 亿元人民币。

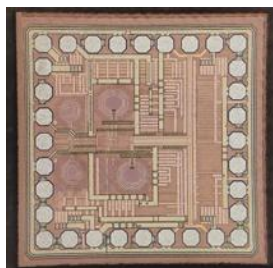
四、 技术成熟度

●概念验证 ⚙原理样机 □工程样机 ●中试 ●产业化

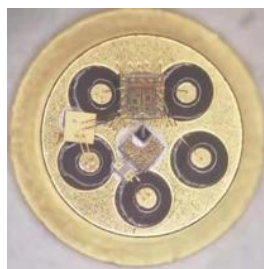
五、 合作方式

●联合研发 ●技术入股 □转让 ●授权（许可） ⚙面议

附图



芯片照片



芯片封装照片