

一、项目名称：小尺寸低漏率微传感器封装技术

二、提名意见

提名者	中国电子学会		
通讯地址	北京市西长安街13号C410室	邮政编码	100804
联系人	高鹏飞	联系电话	15011087073
电子邮箱	gaopengfei@miit.gov.cn	传真	010-68205242
<p>提名意见：</p> <p>项目组长期致力于微传感器封装的研究，创立了多场多尺度多步工艺力学理论框架、提出了先进封装和可靠性快速评估方法，取得了多项原创性成果，获得了多项国际奖项，是国际微传感器封装领域的开拓者及最有影响力的项目组之一。</p> <p>项目组在提高微传感器封装及系统品质（低应力、低温漂/时漂等）、提升微传感器系统寿命、降低封测成本等关键技术上，进行了长期研究，取得了以下主要创新成果：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 发明了用于封装材料和结构的力学测试技术、光测技术及系列装备，首次获得与温湿度、应变率相关的本构关系，首创工艺力学理论框架，解决了微传感器因温度、湿度和时间引起的成品率低以及性能不稳定的难题。2. 发明了带缓冲腔的真空封装结构并推广至晶圆级真空封装，研制了国内首台电阻熔焊真空封装设备，首创微腔内实时监测真空度的方法，根本上解决了真空保持度和长寿命要求的业内难题，并成功地应用于军用红外探测器和陀螺仪的研发。3. 发明了超薄高分子膜封装结构，完美解决了封装密闭性等问题，研发出低应力/低翘曲晶圆级芯片尺寸封装技术，并大批量应用于国内领军企业加速度计、指纹传感器和图像传感器等产品。 <p>由中国电子学会组织的包括三位院士在内的鉴定专家组一致认为该项目整体技术达到同类技术国际先进水平，其中带缓冲腔的真空封装技术达到国际领先水平，其研究成果的产业化提升了我国微传感器封装产业能力。提名该项目为国家技术发明奖二等奖。</p>			

三、项目简介

微传感器是国家战略新兴产业，也是物联网的关键部件，对高铁、汽车、家电、智能终端等民用行业及国防意义重大。微传感器封装成本占整个系统成本高达 50%-95%，其封装技术通常被视为跨国公司的高度机密。微传感器封装技术涉及多种材料、多步工艺、多能域（光、热、电、力学和化学等）、多表面/界面交互作用，约束条件多，难以实现多目标优化（一致性/重复性/可靠性/耐久性好、高成品率、低应力等）。迫切需要自主开展系统性发明创造，突破微传感器封装涉及的一系列基础技术、材料和工艺方面的技术瓶颈。

项目成员在国家自然科学基金、“973”计划、“02”专项、“863”计划、美国国家基金委及半导体研究公司(SRC)支持下，历经 24 年攻关，在提高微传感器封装及系统品质（小尺寸、低漏率、低温漂/时漂）、提升微传感器系统寿命等关键技术上取得发明成果：

1、发明了用于封装器件和材料的六轴万能测试技术、光测技术及系列装备，首次获得与温湿度、应变率相关的本构关系，首创工艺力学理论框架，构建了贴片、打线、键合、灌胶等典型工艺的分步工艺变形/应力模型，从而解决了微传感器因温度、湿度和时间引起的成品率低和性能退化的难题，研制的微压力传感器寿命远超过军标要求。

2、发明了带缓冲腔的真空封装结构，首创微腔内实时监测真空度的方法，根本上解决了真空保持度和长寿命要求的业内难题，并成功地应用于军用红外探测器和陀螺仪的研发。

3、发明了高致密超薄高分子膜封装结构，完美解决了封装密闭性等问题，开发了低应力/低翘曲晶圆级芯片尺寸封装技术，大批量应用于国内领军企业加速度计、指纹传感器和图像传感器等产品。

该项目取得的成果有：获授权发明专利 41 项（其中美国专利 12 项），SCI 收录论文 67 篇，出版英文专著 1 本（国际上第一本微传感器封装相关专著）。项目第一完成人获得美国电子电气工程师协会（IEEE）杰出技术成就奖等多项国际奖项。项目成果形成了具有国际竞争力和自主知识产权的微传感器封装技术体系。近 3 年累计为 7 家微传感器及系统企业实现新增销售额 184517 万元，新增利润 22271.36 万元，社会经济效益显著。

四、客观评价

1、学术评价：

发明了用于封装材料和结构的力学测试技术和、光测技术及系列装备，首次获得与温湿度、应变率相关的本构关系，首创工艺力学理论框架，解决了微传感器因温度、湿度和时间引起的成品率低以及性能不稳定的难题。

1) 提出的粘弹性-粘塑性-损伤-断裂统一理论 (Journal of Electronic Packaging: 121(3)(1999), 162-168), 被德国弗赖贝格工业大学机械与动力研究院主任 Kuna 教授评价, “第一批统一形式的先进模型被率先提出”。美国机械工程师协会会员 (ASME Fellow)、密歇根大学 C. L. Chow 教授指出该工作为 “成功地处理了不同方面的循环热机械行为”。

2) 揭示困扰工业界的炸裂失效机理的工作 (IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A: 18(3)(1995), 634-645), 被新加坡国立大学 Li Cheng 教授评价为 “该工作揭示了模塑冷却, 湿气吸收, 波峰焊诱导蒸发过程中的水汽-热-机械相互作用”。

3) 通过实验获得微电子封装领域首个界面断裂起始和扩展的关系, 得到界面韧性与相角之间的关系 (树脂/铜) (IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A: 18(3)(1995), 618-626), 被 ASME/IEEE 会士、新加坡国立大学 A. A. O. Tay 教授评价为 “刘等人将最近发展的界面断裂力学理论应用到了电子封装和可靠性领域”。

4) 首次建立了倒装焊和下填料分步工艺力学非线性模型, 发现此方法得到的残余变形和应力比传统一步模型分别低 25%和 20%(Journal of Electronic Packaging: 120(3)(1998), 309-313), 被台湾成功大学 Wen-Miin Hwang 教授评价为 “建立了倒装焊和下填料分步工艺力学非线性有限元框架…发现非工艺力学模型得到的残余变形和应力低于工艺力学模型”。

5) 结合六轴热万能实验机和高密度光栅研究倒装焊封装件 3 点弯曲下界面断裂演变行为, 首次获得无预制裂纹的界面钝化硅/填充料的断裂韧性和相角 (IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B: Advanced Packaging: 21(1)(1998), 79-86), 被普公司主管 Roesch 评价为 “王等人利用断裂演变方法表征了填充料到芯片钝化层的界面断裂现象”。

发明了带缓冲腔的真空封装结构并推广至晶圆级真空封装, 研制了国内首台电

阻熔焊真空封装设备，首创微腔内实时监测真空度的方法，根本上解决了真空保持度和长寿命要求的业内难题，并成功地应用于军用红外探测器和陀螺仪的研发。

6) 分析密封泄漏率、真空压力与寿命的相互关系；首创带真空缓冲腔的真空封装结构，提升真空保持寿命 20 倍以上，根本上解决了器件级金属真空封装真空保持度难题 (Sensors and Actuators A: Physical: 149(1) (2009), 159-164)，英国南安普顿大学 Himsworth 教授评论提出的原创的双腔体封装结构为“一种降低漏率的简单方法，能降低等效漏率几个数量级以上”；该项工作也被电化学学会会长主席、美国乔治亚理工学院 Kohl 教授多次引用。

2、科技成果鉴定：

2018 年 4 月 23 日，中国电子学会在北京对由华中科技大学等单位完成的“小尺寸低漏率微传感器封装技术”科技成果进行了技术鉴定。以北京航空航天大学房建成院士（主任）、中科院微电子所刘明院士（副主任）、清华大学戴琼海院士（副主任）、中科院声学所李红浪研究员、中科院电子学所组成王军波研究员、中电十三所高岭研究员、北京控制工程研究所刘淑芬研究员、北京长城航空测控技术研究所张梅菊研究员和太原理工大学桑胜波教授组成的专家组对该项目创新性给予了充分肯定，总体鉴定意见为：“整体技术达到同类技术国际先进水平，其中带缓冲腔的真空封装技术达到国际领先水平。”

3、查新报告：

教育部科技查新工作站查新结论：“综上所述，在检出的国内外文献中，未见与查新项目进行的研究内容及达到效果相同的文献报道”。

4、检测报告：

1) 多款压力传感器通过了权威机构的鉴定及认可，通过了机械振动，机械冲击、1000 小时高温带电耐久试验、电磁干扰 (EMI) 测试、静电放电 (ESD) 测试等多项可靠性试验。

2) 发明的进气歧管压力传感器在压力、温度范围 (5kPa~115kPa, -40°C~125°C)，精度为 0.44%Vdd，比德国 Bosch 公司产品 (0.66%Vdd) 高 34%，比美国 SENSATA 公司产品 (1.9%Vdd) 提升 75%。

3) 武汉高德红外股份有限公司非制冷红外焦平面探测器，型号规格 GST817 VM 800×600@17um，经权威机构国家红外及工业电热产品质量监督检验中心检测，检

验结论: 经检验, 送检样品所检项目符合 Q/WGD01-2014《非制冷红外焦平面探测器》标准要求, 符合国家有关标准。

4) 苏州晶方半导体科技股份有限公司(中国最大的晶圆级 MEMS 封装公司)研制的图像传感器, 经权威第三方检测, 检测结果: 图像传感器顺利通过 1000 小时高温试验、1000 小时高温高湿试验及 1000 个热冲击循环试验。

5、用户评价:

真空封装技术打破跨国公司技术垄断, 已为多家军用陀螺仪和红外器件研发单位提供技术服务。

东南大学评价: “……东南大学研制的硅微陀螺仪采用了华中科技大学微系统研究中心提供的金属真空封装结构、真空封装设备与工艺, ……共计 11 个硅微陀螺仪样品。经测试, 其中五个陀螺仪的品质因数(Q 值)从大气环境下的 150 提高到 2000-9300 不等”。

南京理工大学评价: “……南京理工大学研制的硅微机械陀螺仪采用了华中科技大学微系统研究中心提供的金属真空封装管壳, 真空封装设备与工艺, ……共计 12 个微机械陀螺仪样品。经测试, 其中 7 个陀螺仪的 Q 值从大气环境下的 200 提高到 1200~2400, 经过 60 天的实时测试, 陀螺仪的 Q 值仍保持不变”。

航天九院时代光电公司: “航天九院时代光电公司采用华中科技大学微系统研究中心真空封装技术对硅微陀螺仪的敏感结构进行真空封装。封装后, 测量陀螺仪敏感结构的 Q 值……真空封装后, 陀螺敏感结构的 Q 值明显提高, 经过五周的测试, 有三只样品的 Q 值保持较好, 可以认为真空保持很好”。

6、行业影响:

第一完成人刘胜 2009 年获器件封装与制造技术学会(IEEE CPMT)杰出技术成就奖(“For his pioneering work on multi-physics and multi-scale modeling for manufacturing process modeling and reliability qualification coupled with the development of various validation tools”); 第一完成人刘胜 2009 年获 CIE-EMPT(中国电子学会电子制造与封装技术分会)电子封装技术特别成就奖(“为推动中国电子封装技术领域的学术和工业发展做出了巨大贡献”); 第一完成人刘胜 1995 年获美国总统教授奖; 2009 年入选 ASME Fellow(因在包括微传感器及系统封装在内的电子封装方面的杰出成就); 2014 年入选美国电子电气工程师协会会员

(IEEE Fellow); 项目第一完成人现为 IEEE 电子封装会刊副主编,《科学通报》(Science Bulletin) 副主编, Microsystems and Nanoengineering (Nature 合作办理刊物) 编委。

7、媒体评价:

2009 年 7 月 5 日《科技日报》在头版报道第一完成人刘胜获 IEEE CPMT 杰出技术成就奖,指出“这是中国大陆科学家首次在该领域获奖”;科学网专题报道刘胜教授入选 IEEE Fellow;中央电视台东方之子、新华社每日电讯、人民日报海外版、科技日报、光明日报、中华英才、国际人才杂志封面人物等多家媒体先后对第一完成人刘胜进行了专题报道。(1996 年 2 月-6 月)

8、成果奖励:

第一完成人因此于 2009 年获 IEEE CPMT 杰出技术成就奖,于 2009 年获 CIE-EMPT (中国电子学会电子制造与封装技术分会) 电子封装技术特别成就奖,于 1995 年获美国总统教授奖,2009 年中国物流与采购联合会科技发明一等奖。

五、应用情况

应用单位名称	应用技术	应用的起止时间	应用单位联系人/电话	应用情况
武汉飞恩微电子有限公司	微传感器的工艺开发、验证以及可靠性测试评估	2005 年-至今 (此前在上海飞恩)	易海珍 15827394023	近三年新增销售额 8727.74 万, 新增利润 267.04 万
武汉高德红外股份有限公司	微传感器封装技术在红外焦平面探测器中的应用研究	2011 年-至今	高健飞 15071289720	近三年新增销售额 66211.58 万, 新增利润 2825.3 万
苏州晶方半导体科技股份有限公司	微加速度计、触觉传感器及图像传感器 WLCSP 封装工艺的开发	2006 年-至今	段佳国 13771733473	近三年新增销售额 53385 万, 新增利润 12171 万

武汉菱电汽车电控系统股份有限公司	微传感器及发动机电喷系统的匹配	2009年-至今	高战霞 15807158769	近三年新增销售额 29100 万, 新增利润 4230 万
山东安乃达电子科技有限公司	微传感器在汽车电子油门踏板	2012年-至今	王爱丽 13305319113	近三年新增销售额 3754.1 万, 新增利润 371 万
武汉元丰汽车技术发展有限公司	微传感器在 CNG 电喷系统中应用	2012年-至今	王贵 18674050730	近三年新增销售额 8284 万, 新增利润 1656 万
东风汽车电子有限公司	微传感器在汽车刹车系统中应用	2004年-至今	程桂祥 15671267876	近三年新增销售额 15054 万, 新增利润 751 万

六、主要知识产权和标准规范等目录

知识产权(标准)类别	知识产权(标准)具体名称	国家	授权号	授权日期	权利人	发明人
发明专利	一种微机电系统的圆片级真空封装方法	中国	ZL200910061898.2	2011年03月30日	华中科技大学	汪学方, 黎黎, 张卓, 刘川, 甘志银, 张鸿海, 刘胜
发明专利	Wafer Level Chip Size Package For MEMS Devices And Method For Fabricating The Same	美国	US7781250B2	2010年08月24日	China Wafer Level CSP LTD(苏州晶方半导体科技股份有限公司)	Wang Zhiqi, Yu Guoqing, Xu Qinqin, Wang Wei
发明专利	无线汽车轮胎安全监测系统	中国	ZL200410018355.X	2009年06月17日	上海飞恩微电子公司	刘胜, 王小平, 李青侠, 冷毅, 陈斌

发明专利	一种微机电系统的圆片级真空封装工艺	中国	ZL200910061897.8	2011年04月20日	华中科技大学	汪学方, 黎黎, 张卓, 刘川, 甘志银, 张鸿海, 刘胜
发明专利	Image Sensor Package Structure and Method	美国	US9299735B2	2015年05月21日	China Wafer Level CSP LTD (苏州晶方半导体科技股份有限公司)	Zhiqi Wang, Qiong Yu, Wei Wang
发明专利	一种基于投影莫尔原理的共面度测量系统	中国	ZL201010548868.7	2013年03月20日	华中科技大学	朱福龙, 宋劭, 张伟, 刘胜, 王志勇, 张鸿海
发明专利	带有通孔电镀铜凸点的硅圆片减薄夹具及减薄工艺方法	中国	ZL201110457992.7	2015年11月18日	刘胜	刘胜, 陈照辉, 汪学方, 王宇哲
发明专利	汽车排放在线自动诊断远程监控系统及其方法	中国	ZL201210486534.0	2014年10月15日	武汉市菱电汽车电子有限公司	王和平, 余俊法
发明专利	微机电系统的晶圆级芯片尺寸封装结构及其制造方法	中国	ZL200710131491.3	2010年11月03日	苏州晶方半导体科技股份有限公司	王之奇, 俞国庆, 徐琴琴, 王蔚
发明专利	一种塑料封装的压力传感器的制作方法	中国	ZL201310390339.2	2015年09月30日	武汉飞恩微电子有限公司	刘胜, 付兴铭, 王小平

七、主要完成人情况

1. 姓名: 刘胜, 排名: 1, 行政职务: 动力与机械学院院长, 技术职务: 教授, 工作单位: 武汉大学, 完成单位: 华中科技大学, 对本项目主要科技创新的创造性贡献: 项目负责人, (1) 构建了贴片、打线、键合、灌胶等典型工艺的分步工艺变形和应力模型, 发明了用于封装器件和材料的六轴万能测试机技术和光测技术及系列装备, 解决了国产微传感器因温度、湿度和时间引起的成品率低和性能退化难题,

创立飞恩微电子有限公司进行产学研合作；(2) 发明了带缓冲腔的真空封装结构，并扩展至带缓冲腔的晶圆级真空封装，在三家惯性器件研制单位得到应用；(3) 发明了超小型加速度计的典型封装结构。主持和参与完成国家、省部级项目 6 项，获授权发明专利 25 项，发表相关学术论文 82 篇。该项目工作量占完成人工作量 50%。

2. 姓名：王小平，排名：2，行政职务：首席执行官，技术职务：高级工程师，工作单位：武汉飞恩微电子有限公司，完成单位：武汉飞恩微电子有限公司，对本项目主要科技创新的创造性贡献：发明点 1，(1) 完成了微传感器的工艺开发、验证以及可靠性测试评估，实现了多能域封装工艺的优化及批量应用，组织队伍积极开拓市场；(2) 解决了多输出类型的数据采集、调理及测试的准确性等技术难题，包括数模混合电路干扰及隔离、传输线多点接地误差补偿、宽温度补偿等技术难题；(3) 完成了多载荷微传感器耐久性测试平台的搭建，解决了多类型微传感器耐久性测试平台的通用性及准确性技术难题；开发了胎压的无线检测系统软件和硬件；研制的微压力传感器寿命远超过军标要求， $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 热循环寿命达到 300 万次。

3. 姓名：王之奇，排名：3，行政职务：技术总监，技术职务：技术员，工作单位：苏州晶方半导体科技股份有限公司，完成单位：苏州晶方半导体科技股份有限公司，对本项目主要科技创新的创造性贡献：(1) 参与贴片胶的样品制作和胶的力学性能的测量；(2) 完成了 12 英寸影像传感器晶圆 3D TSV WLCSP 封装工艺和全新的指纹识别芯片扇外型晶圆级芯片尺寸封装工艺的开发，验证及可靠性评估，封装的产品良率超过 98%，成功实现产业化；完成了加速度计微机电系统(MEMS)的 WLCSP 封装工艺的开发，验证及可靠性评估，封装的产品良率超过 98%，成功实现产业化；开发了全新的 MEMS 产品封装结构，解决了微机电系统封装中的气密性问题，封装的客户片通过了 JEDEC2 要求的信赖性测试和客户要求的指标测试。

4. 姓名：高健飞，排名：4，行政职务：探测器中心主任，技术职务：高级工程师，工作单位：武汉高德红外股份有限公司，完成单位：武汉高德红外股份有限公司，对本项目主要科技创新的创造性贡献：(1) 发明点 1，参与微传感器的结构开发和可靠性测试；(2) 发明点 2：主要负责微传感器封装技术在红外焦平面探测器中的应用研究，主持或参加了高德红外公司非晶硅 $400\times 300@25\mu\text{m}$ 非制冷红外探测器、氧化钒 $400\times 300@17\mu\text{m}$ 非制冷红外探测器、氧化钒 $400\times 300@25\mu\text{m}$ 非制冷红外探测器及氧化钒 $800\times 600@17\mu\text{m}$ 非制冷红外探测器的研制项目，主要负责其中微传感器的设计与开发，主要贡献在提高整体探测器芯片的性能，研究芯片与封装的相互作

用，促进非制冷红外探测器的产业化。

5. 姓名：王和平，排名：5，行政职务：董事长、总经理，技术职务：高级工程师，工作单位：武汉菱电汽车电控系统股份有限公司，完成单位：武汉菱电汽车电控系统股份有限公司，对本项目主要科技创新的创造性贡献：（1）完成了微传感器及发动机电喷系统的匹配，并成功应用于涡轮增压缸内直喷（TGDI）汽油机，成功搭载到国内多款车型进行了整车高温、高原、高寒及其他整车驾驶性能试验，充分验证了微传感器及系统在复杂环境及复杂工况下的性能一致性和稳定性；（2）完成了整车的十万公里搭载耐久试验，并通过了国家车辆的型式核准级公告认证工作，实现了微传感器及系统的批量应用。

6. 姓名：汪学方，排名：6，行政职务：无，技术职务：副教授，工作单位：华中科技大学，完成单位：华中科技大学，对本项目主要科技创新的创造性贡献：建立了器件级真空封装微腔体真空状态下的气体流动、吸附、渗透与扩散理论模型；提出了腔内实时监测真空度的方法；发明了带缓冲腔的真空封装结构，封装真空保持度满足长寿命要求。（1）参与开发了高性能真空封装技术，细化了一种具有真空缓冲腔的新型真空封装设计，从而解决真空封装中真空度保持问题，成功实现十年以上真空保持度的金属外壳真空封装；（2）研究平衡真空度、有效泄漏率和真空维持寿命之间的关系，建立真空封装寿命模型。

八、完成人合作关系说明

该项目完成人共6位。其中，刘胜/1、汪学方/6属于华中科技大学（刘胜/1现工作单位为武汉大学，同时依然是华中科技大学的教授）；王小平/2属于武汉飞恩微电子有限公司；高健飞/3属于武汉高德红外股份有限公司；王之奇/4属于苏州晶方半导体科技股份有限公司；王和平/5属于武汉菱电汽车电控系统股份有限公司。

完成单位和完成人依托承担的科研项目开展合作研究。完成人之间的合作形式包括论文合著、共同立项、产业合作、共同获奖、联合指导研究生等，是集基础研究、技术研发、工程应用与人才培养于一体的长期、深度和多方位合作。

刘胜/1为武汉飞恩微电子有限公司（以下简称飞恩）的创始人，华中科技大学于2003年与飞恩开展产学研合作，联合申请国家项目，从事微传感器封装技术研发与产业化。王小平现担任飞恩执行总经理，是飞恩付费委托华中科技大学代培的工程博士。其中飞恩3个工程师（吴登峰等人）是飞恩在华中科技大学代培的工程硕

士。飞恩与华中科技大学等合作单位联合申报国家“十一五”863 专项课题“汽车胎压微传感器及系统”，获得国家 863 专项资金 400 万元的资助。

因为武汉菱电汽车电控系统股份有限公司（以下简称菱电）与 Bosch 博世/联合电子在发动机控制方面是竞争关系，因此 Bosch 拒绝供应菱电任何传感器。从菱电 2005 年成立之初，飞恩微电子与菱电就开展全面合作，为菱电提供压力类传感器和应用解决方案。王和平/2 是菱电法人代表和创始人。

刘胜/1 与武汉高德红外股份有限公司于 2012 年签署技术合作协议，就压力传感器和红外探测器所需芯片、真空封装设计、工艺、散热和长期可靠性一直进行长期的合作。

刘胜/1 与苏州晶方半导体科技股份有限公司（以下简称苏州晶方）于 2008 年进行产学研合作，并就基于 TSV 在微传感器系统封装设计、工艺和测试系列平台建设及应用制定了详细的技术方案，并在 02 专项第一轮中胜出。刘胜一直是苏州晶方的技术顾问。同时，晶方的王之奇/4 研发总监也是刘胜所在大学团队的工业顾问。

刘胜/1 是汪学方/6 的博士共同导师，一直有良好的合作关系；刘胜/1 是王小平/2 的工程博士导师。

在上述合作研究的基础上，由包括刘胜/1、汪学方/6 在内的研究团队，经过多年的联合攻关形成技术成果“小尺寸低漏率微传感器封装技术”，于 2018 年由中国电子学会组织了科技成果鉴定。鉴定委员会一致认为：整体技术达到同类技术国际先进水平，其中带缓冲腔的真空封装技术达到国际领先水平。