

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.07

# 特种传感器发展及趋势

王劲松<sup>1</sup>, 迟晓珠<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第四十九研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:** 特种传感器在国家重大工程中不可或缺, 本文介绍了国际上主要国家在特种传感器方面的发展计划和策略, 总体描述了我国在该领域的发展水平及与国外的差距, 分别从高温压力传感器、微位移传感器、量子磁传感器、振动传感器、湿度传感器等几个方向, 对比了国内外主要研究单位、主要产品的水平, 并对我国特种传感器的发展趋势提出了预判与建议。

**关键词:** 传感器; 压力; 微位移; 磁

**中图分类号:** TB9; TP336

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2019)04-0057-07

## Development Trend of Special Sensors

WANG Jinsong<sup>1</sup>, CHI Xiaozhu<sup>2</sup>

(1. The 49th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Haerbin 150001, China;

2. China Meteorological Administration Meteorological Observation Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Special sensors are indispensable in major national projects. The paper first introduces the development plans and strategies of major countries for the special sensors, and then describes the development of China in this field and the gap with foreign countries. The level of major research units and major products at home and abroad are compared from the direction, such as high temperature pressure sensor, micro-displacement sensor, quantum magnetic sensor, vibration sensor and humidity sensor, etc. And the development trend of special sensors in China is predicted and suggested.

**Key words:** sensor; pressure; micro-displacement; magnetic

## 0 引言

特种传感器是指采用新原理、新技术、新材料、新工艺, 具有特种功能用途, 能感受被测量并转成可用信号输出的器件, 甚至把信息获取、处理、通信等通过微纳加工和微组装等先进技术进一步集成, 形成智能化传感器。

特种传感器使用环境恶劣, 技术指标、质量和可靠性要求高, 研制生产难度大, 已成为一项基础性、战略性、前瞻性的高新技术, 是大数据和信息获取的关键。

## 1 特种传感器的重要作用及发展趋势

美国 F-22 战机装备了新型的多谱传感器系统, 实现了全被动式搜索与跟踪, 可在诸如雾、烟或雨等各种恶劣天气情况下使用, 并可全天候作战, 提高了隐身能力。

F35 战机监控系统中的特种传感器, 能进行故障

诊断、预测与准确定位, 避免重大安全事故的发生, 作战返回即可快速检修, 大大缩短维修时间, 增加升空作战架次, 充分提高了武器系统的作战效能。

海湾战争中, 美军使用的基于高冲击加速度传感器具有识别层数功能, 钻地弹击中“阿德里亚”地下多层防空洞。JDAM、制导炮弹等需要大量低成本、高精度 MEMS 惯导传感器。

在军事领域中, 为适应信息战、网络中心战需求, 特种传感器正向微型化、集成化、智能化、无线化、系统化、网络化方向发展。

微米/纳米、光纤、超导、仿生、网络通信以及新型材料等高新技术的迅速发展对传感器技术研究产生巨大的推动作用, 特种传感器技术不断地发展、交叉和深化, 从原先单一的敏感元件发展到阵列集成传感器、智能传感器, 直到最新的无线网络传感器等。

## 2 国外发展动向

各发达国家把传感器技术特别是特种传感器技术

列为国家重点关键技术大力发展。

美国从 20 世纪 90 年代开始就特别重视军用传感器与微系统的发展，多次列入专项计划，突出了传感器的重要作用。1991 年美国国防部将无源传感器列为 21 项关键技术之一，研究经费最多，为 20 亿美元；1996 年，美国国防部将特种传感器列为国防技术领域计划中十个重要技术领域之一；2000 年，美国国防部再次将特种传感器列为国防技术领域计划中 10 个重要技术领域之一，同时，美国空军提出的 15 项有助于提高 21 世纪美国空军作战能力的关键技术中，传感器技术名列第二；2006 年，《美国国防部发展中关键技术清单(DSTL)》将传感器技术列为需要重点关注和发展的关键技术(第 11 大类)；2013 年美国首先提出“万亿传感器革命”计划，年使用万亿只传感器。

美国发展计划和组织管理现状如图 1 所示。

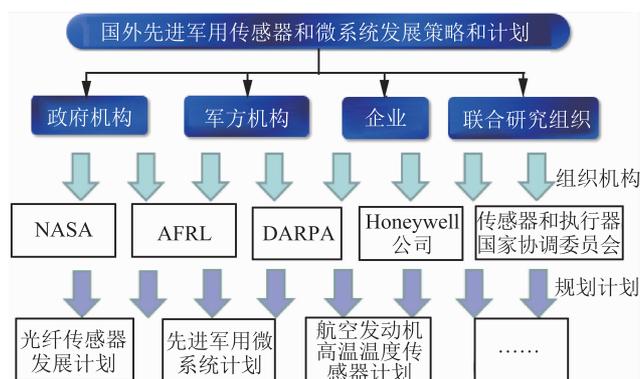


图 1 美国发展计划和组织管理现状

欧盟、俄国、日本对传感器技术也都相当重视，并且列为国家重点发展的核心技术之一。正是由于各国的普遍重视和投入开发，传感器发展迅速，近十几年来其产量及市场需求量年增长率均在 10% 以上。目前的“万亿传感器革命”和物联网将进一步促进传感器研发和应用的跨越发展。

### 3 国内外主要传感器研究现状

#### 3.1 高温压力传感器发展现状

高温压力传感器按照使用材料，通常可分为 SOI、SiC、蓝宝石、光纤等。

SOI 传感器采用氧化层绝缘对压敏电阻进行隔离，国外典型代表是美国库力特(Kulite)公司产品，采用背面刻蚀技术(BESOI, Back-etching SOI)开发出了高温压力传感器(XTEH-10LAC-190 系列)，此传感器使用无引线封装技术，可在 480 °C 下长期稳定工作。

2009 年，马里兰大学巴尔迪默分校的 Guo Shuwen 等人提出了一种基于极薄膜重掺杂工艺的压阻式 SOI 高温压力传感器。此传感器短时间工作温度可达 600 °C；在 500 °C 高温下连续工作 50 h 后，满量程输出偏差小于 0.1%。

SiC(Silicon Carbide)具有优良的抗辐照特性、热学性能、抗腐蚀性。SiC 晶体形态较多，在高温压力传感器中通常采用  $\alpha$  型的 3C-SiC 和  $\beta$  型的 4H, 6H-SiC，其中  $\beta$ -SiC 在 1600 °C 时仍能保持良好的机械强度。SiC 压力传感器多采用压阻式原理，影响其工作温度的因素有：①外延 6H-SiC 薄膜的压阻效应在高温时降低，如 600 °C 的压阻系数约为室温下的 50%；②SiC 欧姆接触膜系的长期使用温度均不高于 800 °C。

1997 年，德国柏林工业大学的 Zeirmann 等人在硅基底上外延 3C-SiC 薄膜，并利用压阻效应实现压力测量，工作温度达到 450 °C。美国 NASA 格伦研究中心研制出应用于发动机状态检测的 6H-SiC 压阻式压力传感器，率先实现了全 SiC 结构的压敏芯片，压力敏感结构以 6H-SiC 作为基底，利用同质外延掺杂、干法刻蚀技术形成 PN 结和压阻结构，再使用 Ti/TaSi/Pt 膜系实现欧姆接触，最高工作温度达 750 °C。

国内典型代表是西安交通大学研制的 SOI 高温压力传感器，清华大学研制的 6H-SiC 压阻式高温压力传感器，工作温度均小于 400 °C，中北大学研制的陶瓷基无线无源高温压力传感器，工作温度为 800 °C。

蓝宝石主要成分是  $Al_2O_3$ ，具有良好的光学特性和绝缘性，熔点为 2040 °C，在 1500 °C 时仍保持良好机械性能，是制备高温传感器的理想材料。目前基于蓝宝石的高温压力传感器主要有基于 SOS(Silicon on Sapphire)压阻式压力传感器和基于蓝宝石光纤的高温压力传感器。

SOS 压力传感器起源于 20 世纪 80 年代，以蓝宝石作为压力应变结构，采用异质外延的单晶硅薄膜制作压敏电阻，工作温度可达 350 °C。国外以 Omega 等公司为代表，国内中国电子科技集团第四十九研究所的 SOS 压力传感器系列量程为 2 ~ 100 MPa，误差小于 0.1%，水平与国外相当。

法布里-珀罗(Fabri-Perot)干涉光纤传感器具有测量准确度高、抗电磁干扰、抗辐射、工作温度高等优点，适合应用于燃气轮机、航空/航天发动机等高温恶劣环境，是高温压力传感器的热门研究方向。F-P 干涉光纤式高温压力传感器原理如图 2 所示，激光在通过 F-P 腔时形成多束反射光，通过反射光的干涉条纹可以

检测出腔长, 由于不同的压力会引起感压膜不同的变形量(即引起腔长的变化), 根据腔长与压力的关系得到压力值。

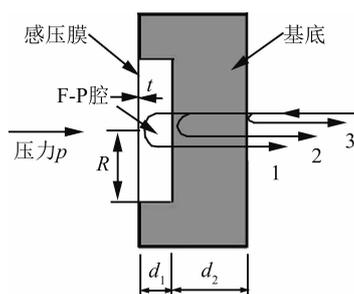


图2 法布里-珀罗干涉光纤传感器原理图

英国 Oxsensis 公司研制了基于蓝宝石敏感芯片的光纤压力传感器, 工作温度可达  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 短期工作可达  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

美国 Virginia 理工大学的 Wang Anbo 等人利用蓝宝石的 ICP 干法刻蚀及蓝宝石的热压键合工艺, 制作了全蓝宝石结构的 F-P 腔, 该传感器的最高使用温度可达  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 如图 3 所示。



图3 Virginia理工大学的高温压力传感器

北京理工大学的江毅教授、中国电子科技集团公司第四十九研究所制作的蓝宝石压力传感器耐受温度可达  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.2 微位移传感器发展现状

随着微电子技术的蓬勃发展, 对微位移量高精度测量的需求逐渐增加, 且要求微型化、高分辨力、较大检测量程以及抗干扰等, 纳米级分辨力的测量技术已经成为超精加工领域的发展趋势。

高精度微位移测量的主要原理有: 电容检测、激光干涉以及光栅检测等。

基于电容法的微位移传感器发展最为迅速, 目前美国和德国在高精度的电容位移传感器测量领域已处于领先地位。美国 Lion Precision (LP) 公司的电容传感器分辨力为  $0.05\text{ nm}$ 、误差小于为  $0.5\text{ nm}$ ; 德国 Physik Instrument (PI) 公司的 D-510 系列电容传感器在  $10\text{ }\mu\text{m}$  测量范围内分辨力达到  $0.4\text{ nm}$ ; 英国 Queensgate 公司

的 Nano-sensor 型电容传感器在  $500\text{ }\mu\text{m}$  测量范围内分辨力为  $0.1\text{ nm}$ 。国内天津大学、北京密云机床研究所等高校和科研机构也有相关研究。电容式位移传感器的优点在于结构简单、灵敏度高并且是非接触式测量, 其主要缺点是量程小、输出为非线性、寄生电容易对测量产生干扰、系统极为复杂、成本较高。

基于激光干涉原理的位移检测仪有: 英国雷尼绍公司 ML10 系列, 测量速度快 ( $60\text{ m/min}$ ), 分辨力高 ( $1\text{ nm}$ ), 量程达到  $1\text{ m}$  的级别, 远远大于电容式微位移传感器的量程; 北京镭测科技有限公司生产了 LY1000 非接触式激光干涉仪。激光干涉仪在位移测量时, 对测量环境要求较高、体积较大、不便于集成。

以光栅条纹为测量原理的光栅测微仪与电容式传感器相比, 成本较低、量程较大。例如, 德国海德汉公司生产的 LC 系列光栅尺最小分辨力可达  $1\text{ nm}$ , 准确度等级  $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ , 量程为  $270\text{ mm}$ , 远大于电容式位移传感器微米级别的量程, 英国雷尼绍的光栅位移传感器的分辨力为  $10\text{ nm}$ 。国内以长春光机所和广州信和的光栅位移传感器为代表。

### 3.3 量子磁传感器发展现状

美国的 Borna A 等人研制了一种基于原子磁力仪的多通道脑磁图仪, 成功对大脑的脑磁信号进行了成像, 并与以超导量子干涉磁力仪为基础的脑磁图仪进行了比较, 得到了一致的效果<sup>[1]</sup>。

美国的 Cooper R J 等人利用原子磁力仪阵列对亚硝酸钠中的氮原子核四极共振现象进行了探测, 并获得了不错的结果, 其原子磁力仪灵敏度达到了  $1.7\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[2]</sup>。核四极共振探测装置如图 4 所示。

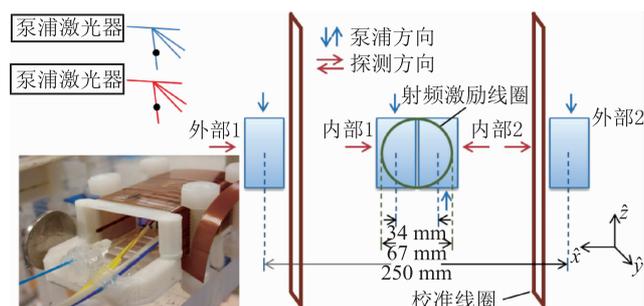


图4 核四极共振探测装置

德国的 Wickenbrock A 等人和英国的 Deans C 等人利用原子磁力仪进行了电磁感应成像方面的研究<sup>[3-4]</sup>。

美国的 Kim Y J 等人利用原子磁力仪提出了一种磁显微成像的方法。其成像的磁性微粒尺寸可以达到  $10\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>。

美国的 Korth H 等人研制了微型化的铷 87 原子磁力仪, 如图 5 所示, 其重量小于 500 g, 功耗小于 0.5 W, 灵敏度达到  $15 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  [6]。

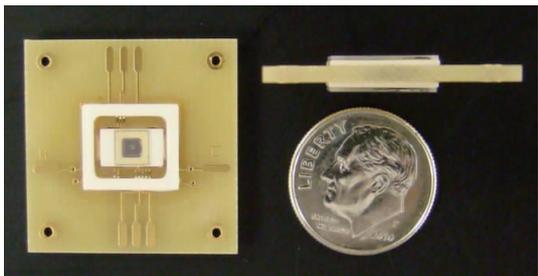


图 5 微型化铷 87 原子磁力仪实物

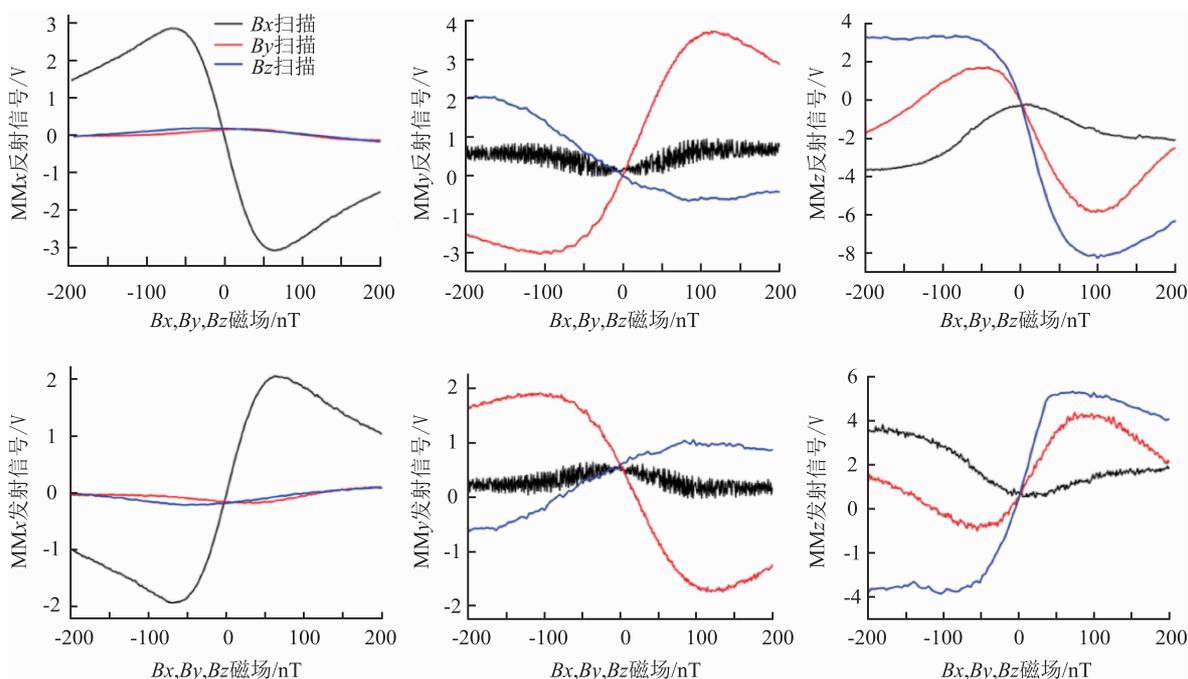


图 6 不同方向磁场变化下的三轴响应

哈尔滨工程大学的孙伟民教授小组开展了全光矢量原子磁力仪的研究, 并获得了  $80 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  的磁场灵敏度和  $0.1(^{\circ})/\sqrt{\text{Hz}}$  的角度分辨力 [10]。

北京航空航天大学房建成院士小组提出了一种利用原子磁力仪测量氙-129 的自旋极化率的测量方法, 并与国外的测量数据进行了较好的匹配 [11]。

中国电科 49 所提出了一种小型高灵敏度全光矢量磁暗态原子磁传感器方案, 在 10000 nT 条件下, 实现  $50 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  的总场检测灵敏度, 正在开展各轴矢量测量技术研究。该方案将磁子能级间的量子相干引入到光泵磁共振信号检测中, 可有效地避免光泵原子磁力仪的工作盲区, 并具有矢量测量的能力。

意大利的 Bevilacqua G 等人研制了能在非屏蔽环境下工作的多通道原子磁力仪, 该装置通过差分方式消除外界干扰, 最终达到  $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  的灵敏度水平 [7]。

德国的 Schultze V 等人提出了一种光频移散射式的 Mz 光泵磁力仪, 通过两个 Mz 光泵信号的差分信号, 得到较高的信噪比, 从而得到了  $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  的噪声极限 [8]。

印度的 Pradhan S 利用椭圆偏振光提出了一种三轴矢量原子磁力仪的方案, 通过不同方向磁场对偏振光的偏振方向的影响, 最终利用偏振探测的方式实现三轴磁场测量 [9], 如图 6 所示。

### 3.4 高温振动传感器发展现状

高温振动传感器主要应用于发动机的状态监测, 国内外已经开展了一些高温振动传感器的研究, 主要集中在压电式、压阻式、光纤式等方面。

美国 Endevco 公司(型号 6233C-10, 6233C-50, 6233C-100 等)、美国 PCB 公司、丹麦 B&K 公司(型号 8324, 8347-C 等)、瑞士 VM 公司等国外主要高温压电振动传感器生产商均采用铋层状结构  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  改性的压电陶瓷材料, 能够在  $482^{\circ}\text{C}$  高温下正常工作。美国 Endevco 公司的 6237M70 型以及美国 PCB 公司的 357C90 型压电振动传感器工作温度更是达到  $650^{\circ}\text{C}$ 。

美国北卡罗莱纳州立大学应用  $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  压电

晶体实现了 1000 °C 高温环境下的振动测量。J. Borinski 等研制了将 MEMS 工艺与光纤技术结合的传感器,应用于高温环境下的振动测试,采用法布里-珀罗干涉仪作为信号处理装置,该传感器在 1.6 kHz 以内信号响应不低于 0.4 dB。美国 NASA 利用 6H-SiC 制作了压阻式高温振动传感器,工作温度 600 °C。美国美捷特公司的 CA901 压电式高温振动传感器,工作温度为 650 °C。北京航空工艺研究所的 SHQ-80 型整体式耐高温振动传感器,选用钛酸锶铋压电陶瓷制造传感器的敏感元件,工作温度为 400 °C。

北京理工大学江毅<sup>[12]</sup>利用飞秒激光加工制作了微纳高温振动传感器,其结构如图 7 所示。通过熔接形成单模光纤—空芯光纤—单模光纤的结构,利用单模光纤和空芯光纤在熔接面形成的菲涅尔反射,构成外腔式法布里-珀罗干涉仪(EFPI)。用飞秒激光烧蚀空芯光纤,形成悬臂梁结构。末端的单模光纤作为质量块,在受到振动时带动悬臂梁振动,使悬臂梁产生微弯,进而使 EFPI 腔长发生变化。工作带宽为 20 ~ 300 Hz,在 100 Hz 时,加速度分辨力为  $5 \times 10^{-4} g$ ,加速度响应灵敏度为 129.6 nm/g。传感器受温度影响小,腔长的温度交叉响应仅为 0.225 nm/°C,工作温度可达 950 °C。

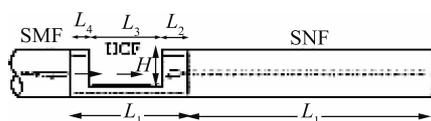


图 7 光纤振动传感器结构

国防科技大学的肖定邦<sup>[13]</sup>提出一种基于 V 形梁的双差动扭力微加速度计,采用四个质量块组成,分成两组,通过差动算法可以提高其灵敏度、环境鲁棒性和偏置稳定性。谐振频率和品质因子分别为 1485 Hz 和 28.02。测量范围  $\pm 15 g$  的灵敏度和非线性分别为 0.14 mV/g 和 0.22%。 $x$  轴和  $y$  轴的横轴误差分别为 0.04% 和 0.69%。加速度计的 1 G 偏置稳定性 1 h 为 0.11 mg, Allan 偏差为 8.7  $\mu g$ 。在  $-40 \sim +60$  °C 的全温范围内,标度因子的温度敏感度为  $49.9 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ,而补偿温度后的偏移温度系数为 0.22 mg/°C。

土耳其中东科技大学的 Akin Aydemir<sup>[14]</sup>设计了三轴电容式 MEMS 加速计,尺寸为 2.7 × 4.2 mm,垂直轴加速度计的静止电容设计为 8.8 pF,侧轴加速度计为 10.2 pF。利用分别集成到各轴的模拟读出电路,得到了系统的性能结果。 $X$  轴和  $Y$  轴加速度计显示的噪声下限和偏置不稳定性分别等于或高于  $13.9 \mu g / \sqrt{Hz}$

和 17  $\mu g$ ,而  $Z$  轴加速度计显示的是  $17.8 \mu g / \sqrt{Hz}$  噪声下限和 36  $\mu g$  偏置不稳定性值。

压电振动传感器相对比较成熟,难点主要在于高温工作,国内的生产单位主要有中国电子科技集团公司第四十九研究所、航空工业苏州长风航空电子有限公司和成都凯天电子股份有限公司等,目前工作温度能够达到 482 °C,美国 Endevco 和 PCB、丹麦 B&K、瑞士 VibroMeter 等少数几家公司,其产品最高工作温度已达到 760 °C。高温压电陶瓷材料的生产单位主要集中在中国科学院上海硅酸盐研究所、四川大学、电子科技大学、山东大学等几家研究机构。

### 3.5 温度传感器发展现状

国内外目前使用的温度测量方法,主要可以分为接触式和非接触式两大类。目前的接触温度传感器典型产品包括:采用铂热电阻(Pt1000)的电阻温度计,可达到  $-200 \sim 600$  °C;采用钨铼热电偶的温度传感器,可达到 2300 °C(时间较短);基于石英光纤的温度传感器,工作温度一般不超过 800 °C;蓝宝石光纤高温传感器,可达到 1500 °C,但其价格高昂、互换性差,只能用于特殊场合。非接触式温度传感器主要为红外线温度传感器及目前还处于研究阶段的黑体空腔高温计,美国 Omega 公司的红外线温度传感器的测量范围  $-18 \sim 538$  °C;黑体空腔高温计最高测量温度为 1600 °C;浙江大学研究的蓝宝石黑体腔光纤传感器的测量范围 600 ~ 1800 °C。

由 Juan Kang, Xinyong Dong 等人提出应变和温度同时测量的内接光纤光栅的 Sagnac 干涉仪。其准确度可达到  $6.4 \times 10^{-2} dB / \mu \varepsilon$  和 0.65/°C。

### 3.6 湿度传感器发展现状

湿度传感器主要以高分子有机薄膜测量原理为主,其它还有红外吸收法、露点法等。高分子感湿膜吸收空气中的水分子,使得感湿膜的介电常数发生变化,引起敏感芯片的容值变化,通过检测敏感芯片的容值即可得到空气湿度。国际上几家知名的湿度传感器公司分别为芬兰维萨拉(VAISALA)、奥地利益加义(E+E)、罗卓尼克(ROTRONIC)、盛思锐(SENSIRION),国内研究湿度传感器的主要单位是中国电科 49 所。

维萨拉公司代表产品 HMP45D, HMP155 等均具有世界领先水平,准确度(包括非线性度、迟滞和重复性)可达:  $-20 \sim 40$  °C 时,  $\pm 1.7\% RH$ ;  $-40 \sim -20$  °C 时,  $\pm (1.0 + 0.008 \times \text{读数})\% RH$ ;  $40 \sim 60$  °C 时,  $\pm (1.2 + 0.012 \times \text{读数})\% RH$ 。维萨拉在高湿环境以及盐雾等环境下均能保证较好品质。

罗卓尼克是一家大型温湿度及相关参数的传感器技术制造公司, 主要从事各种测量和校准相对湿度、温度、露点、水分活度等仪器仪表的研制。

奥地利益加义(E+E)电子有限公司主要从事高精度传感器的开发和研究, 特别是薄膜测量技术方面。产品具有可互换、耐恶劣环境的特点, E+E 被指定为“奥地利国家标准湿度实验室”。

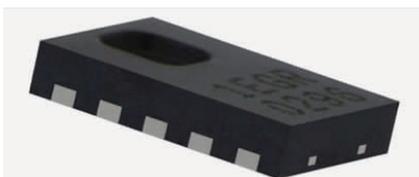


图 8 E+E 公司数字温湿度传感器 EEH210

敏感膜上采用表面防护专利技术预防灰尘和腐蚀, 典型产品数字式温湿度传感器 EEH210 具有 I2C, PWM, PDM 和 SPI 数字接口, 湿度准确度为  $\pm 2\%$  RH, 温度准确度为  $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

瑞士盛思锐公司主要产品是集成化温湿度传感器、温湿度变送器等, 典型产品集成温湿度传感器 SHTC3, 温度测量范围为  $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 准确度为  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 湿度测量范围为  $0\sim 100\%$  RH, 准确度为  $\pm 2\%$  RH; 采用 DFN 封装, 体积为  $(2\times 2\times 0.75)\text{ mm}^3$ 。

中国电科 49 所在湿度传感器领域, 具有敏感芯片设计技术、有机薄膜成膜技术、金属薄膜技术等, 现有湿度敏感芯片产品包括 MSR-3A 型、MSR-3B 型、MSR-4 型, 具有加热功能元件、高稳定湿敏元件、快速响应湿敏元件, 准确度为  $\pm 3\%$  RH, 产品具有湿滞小、稳定等特点。

#### 4 结束语

目前, 我国传感器行业发展落后, 2017 年我国传感器销售额突破 1300 亿元, 但其中传感器进口占 60%, 传感器芯片进口占 80%。由于我国传感器研发和保障能力严重不足, 在特种传感器领域, 所需的中高端特种传感器产品绝大部分依赖进口。准确度、稳定性等方面的指标, 我国生产的传感器与国际先进水平差距仍然比较大。

传感器研制周期长, 需要长期的技术积累, 且其关键是工艺技术和条件, 由于长期以来缺少总体规划和专门计划, 投资少且分散, 条件保障投入严重不足, 没有成体系的建设, 我国的传感器生产工艺装备与国际水平有很大差距, 研制条件差、技术水平低, 与美

国传感器巨头的硬件相比, 差距巨大。因此传感器领域中高端产品的发展一直滞后于国外, 满足不了国计民生的需求。

同时, 我国传感器基础能力和核心技术研究薄弱, 自主创新不足, 与发达国家相比有很大差距, 整体落后约 15~20 年。

建议一方面从敏感材料、敏感芯体入手, 提高稳定性、环境适应性等, 加快赶超世界先进水平; 另一方面, 积极采用智能化技术, 克服材料芯体的自身短板, 提高传感器测量准确度。

#### 参 考 文 献

- [1] Borna A, Carter T R, Goldberg J D, et al. A 20 - channel Magnetoencephalography System Based on Optically Pumped Magnetometers [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2017, 62(23): 8909 - 8923.
- [2] Cooper R J, Prescott D W, Matz P, et al. Atomic Magnetometer Multisensor Array for rf Interference Mitigation and Unshielded Detection of Nuclear Quadrupole Resonance [J]. *Physical Review Applied*, 2016, 6(6): 064014.
- [3] Wickenbrock A, Leefer N, Blanchard J W, et al. Eddy Current Imaging with an Atomic Radio-frequency Magnetometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(18): 89.
- [4] Deans C, Marmugi L, Hussain S, et al. Electromagnetic Induction Imaging with a Radio-frequency Atomic Magnetometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(10): 1126.
- [5] Kim Y J, Savukov I, Huang J H, et al. Magnetic Microscopic Imaging with an Optically Pumped Magnetometer and Flux Guides [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(4): 043702.
- [6] Korth H, Strohbahn K, Tejada F, et al. Miniature Absolute Scalar Magnetometer Based on the Rubidium Isotope  $87\text{Rb}$  [J]. 2012, 1980: 1026.
- [7] Bevilacqua G, Biancalana V, Chessa P, et al. Multichannel Optical Atomic Magnetometer Operating in Unshielded Environment [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(4): 1 - 9.
- [8] Schultze V, Schillig B, Ijsselsteijn R, et al. An Optically Pumped Magnetometer Working in the Light-shift Dispersed Mz Mode [J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 561.
- [9] Pradhan S. Three Axis Vector Atomic Magnetometer Utilizing Polarimetric Technique [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(9): 596.
- [10] Sun W M, Huang Q, Huang Z J, et al. All-Optical Vector Cesium Magnetometer [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(5): 058501.
- [11] Liu J H, Jing D Y, Wang L L, et al. The Polarization and

the Fundamental Sensitivity of 39 K (133 Cs)- 85 Rb- 4 He Hybrid Optical Pumping Spin Exchange Relaxation Free Atomic Magnetometers[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 6776.

- [12] 张柳超, 江毅, 王素梅, 等. 基于飞秒激光加工的微纳高温光纤振动传感器[J]. 光学技术, 2017, 43(4): 334 - 338.
- [13] Dingbang Xiao, Qingsong Li, Zhanqiang Hou, etc. A Double Differential Torsional Micro-accelerometer Based on V-shape Beam[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 258: 182 - 192.
- [14] Aydemir A, Terzioglu Y, Akin T. A New Design and a Fabrication Approach to Realize a High Performance Three Axes Capacitive MEMS Cccelerometer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 244: 324 - 333.

### 作者简介



王劲松(1968 -), 男, 研究员, 博士, 中国电子科技集团公司首席专家, 中国电子科技集团公司第四十九研究所副总工程师。1990年毕业于哈尔滨工业大学电子精密机械专业。全国气象仪器与观测方法标准化技术委员会委员、中国气象学会大气探测与仪器委员会委员、黑龙江省仪器仪表学会常务理事、黑龙江省自动化学会常务理事。

先后参加完成 30 余项国防重点型号课题以及军事预先研究、国防基础科研、公益性行业(气象)科研专项等项目, 其中任负责人完成十余项, 达国际水平或国际先进的近十项。发表文章 30 余篇, 编著一部, 获国防科技进步三等奖一项, 获省科技进步三等奖一项, 获集团科技进步三等奖一项。