

基于 MEMS 技术的智能传感器系统 （“智能灰尘”）

张紫辰,董恺琛,张益源,王建中,赵嘉昊,尤 政

(精密测试技术及仪器国家重点实验室,微纳制造器件与系统协同创新中心,清华大学精密仪器系,北京 100084)

摘 要: 基于机电系统(MEMS)技术的智能传感器系统(“智能灰尘”, Smart Dust)是体积小、能耗低、具备多功能传感与探测、信息处理与存储、双向无线通信、能源自供给与管理等功能的集成系统.它既可以独立工作也可以多系统协同工作.本文首先明确智能灰尘的基本概念及应用领域;随后介绍智能灰尘集成系统的设计方法和结构组成;通过综述智能灰尘技术的发展历程与趋势,以及国内外相关技术的发展现状,最后总结智能灰尘系统关键的技术难点与重点,并明确今后 MEMS 工艺及集成技术突破的可行性方案.

关键词: MEMS (micro electro mechanical systems); 智能灰尘; 无线通信; 复合能源

中图分类号: TP212.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)10-2095-15

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.032

MEMS-Based Smart Sensing System (“Smart Dust”)

ZHANG Zi-chen, DONG Kai-chen, ZHANG Yi-yuan, WANG Jian-zhong, ZHAO Jia-hao, YOU Zheng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Collaborative Innovation Center for Micro/Nano Fabrication, Device and System, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: MEMS-based smart sensing system (“Smart Dust”) with ultra small size and low power consumption is integrated by multi-functional sensors including information detection, process and interexchange, it also contains the composite energy system with energy harvesting system and power management programs. Such device therefore is able to work either autonomously or collaboratively. This paper is to clarify fundamentals and applications of smart dust technology, followed by its architecture design of such device. And then, focus will be given on several critical issues and technical difficulties by the development trajectory and inter-related technologies of smart dust. Finally, the feasibility to achieve such integrated multi-function sensing system with MEMS manufacturing engineering techniques will be addressed.

Key words: MEMS(micro electro mechanical systems); smart dust; composite energy; information process

1 引言

近年来,由于多种表面加工工艺、体加工工艺等机电系统(MEMS)关键制造技术的突破和进步,加之MEMS传感、通信、能源采集等器件集成技术的日新月异,使得基于MEMS技术的智能传感器系统(即“智能灰尘”系统)的实现成为可能.

智能灰尘概念是一种立方毫米尺寸量级的传感与通信平台,它最早由美国加州大学伯克利分校的Kristofer Pister教授提出^[1,2].在Pister教授的构想中,它属于一种分布式传感器网络系统,包含由多个智能灰尘组成的数据接收器,其中每一个智能灰尘系统构成了千

百个传感网络中的传感器节点.在Pister教授的构想中,由智能灰尘组成的传感节点随机且大量的投放到目标环境当中(密度大约为每平方公里数千个节点),随后,通过具备温度、加速度、磁场等传感功能的智能灰尘传感器对周边环境进行监测,从而实现追踪目标环境中物体的位置;最后,通过无线网络的进行有效的接力通信,从而最终使得整个目标环境的信息统一发送到接收器中进行高效的分析与精确的处理.

近年来,随着微纳技术的迅速发展,人们对智能灰尘系统的研究也逐渐深入.从目前的研究结论和社会需求来看,智能灰尘未来的应用领域主要有五个方面:工业与农业生产,智能家居与智能电网,医疗卫生,灾害监

控,科学研究.

(1)工业与农业生产

大规模工业生产对广域实时监控的要求很高,急需一种低成本、高可靠度的实时工业监控系统.智能灰尘技术可以很好地投入到这类应用之中.例如一些远距离输气管道需要经过大范围面积的无人区域,难以采取人力监控方法来检查整条管道的运行情况.如果沿管道路线部署智能灰尘系统,监控中心就可以对整条输气管线进行监控,其造价和维护成本远低于传统技术.

此外,智能灰尘系统还可以应用到农业生产领域.由于农业对气候状况十分敏感,因此用于天气预测和实时天气监视的智能灰尘系统可以帮助农民安排劳作时间和农活顺序.另外,低成本智能灰尘系统非常适用于对温室的实时监控^[3,4].

(2)智能家居与智能电网

使用智能灰尘的智能家居系统,可以有效降低安装和维护的成本.此外,米粒大小的智能灰尘占用空间极小且不易被发现,可以有效减小智能家居系统的体积.例如,在厨房的水阀使用智能灰尘可以监视用水情况,如果短时间内有大量用水情况就会发出警报;在房间地板使用智能灰尘可以用于监测住户的位置,并自动控制照明装置的开闭^[5].

此外,通过开发合适的传感器,智能灰尘技术还可以应用到智能电网(Smart Grid)中^[6,7].智能电网系统可以侦察电力供应状况,以及一般家庭的用电情况,并凭借这些信息调整家电器件的耗电量,以此达到降低能耗、节约能源的目的.目前,加州大学伯克利分校已开展此类研究,并宣布制造出 MEMS 电流传感器,如图 1 所示^[8].该传感器的主要结构为氮化铝(AlN)压电悬臂梁,与其尖端的聚合物磁体.通电电线附近存在磁场.当传感器被放置到电线附近时,悬臂梁尖端的磁体受到磁场的作用,带动压电悬臂梁弯曲,输出电信号.这样就可以通过测量该压电结构输出的电信号,计算附近电流的强度.

(3)医疗卫生

智能灰尘的体积非常小、功能全、功耗低,具备人体内工作的绝大部分条件.进行化学检测工作.一方

面,经过生物兼容设计的智能灰尘可以制作成药丸的形式并监测人体的身体参数,如糖尿病患者的血糖含量监测等^[9];另一方面,智能灰尘可以作为便携式体外测量仪使用,用于替代传统的测量装置,例如传统的动态心电图(Holter)设备的便携性不足,使用者的日常行动和休息十分不便^[10],使用智能灰尘技术可以大幅度减小设备体积并实现无线数据采集功能,可以提高使用者的舒适程度.

(4)灾害监控

智能灰尘系统非常适合进行广域无人区域的监测,例如:在容易发生森林大火的林区布置监测温度的智能灰尘系统,就可以实时监视整片森林,并及时发出火警警报并记录火源位置.这样就可以第一时间发现并扑灭火灾,有效减少损失^[11].

智能灰尘在防灾领域的相关研究已取得一定进展.2009年宾夕法尼亚州立大学的 Alexey E. Kovalev 等人宣布制作出了具有远程检测爆炸物潜力的智能灰尘样机^[12].

(5)科学研究

体积小、可以无线传输数据的智能灰尘系统可以应用在多领域科学研究之中.

在生物医学领域,智能灰尘系统可以用于神经电信号或者生物电势的检测,如脑电图(electroencephalogram, EEG)等^[13],并通过通信线缆或者无线射频信号上传数据以进行分析^[14~17].

智能灰尘同样可以应用于动物学研究中^[18].动物学家将智能灰尘系统埋设到动物的巢穴之中,或者把微小智能灰尘节点附着到动物的体表,这样就可以实现对巢穴内部情况或者动物群落的迁徙路线的监视.

综上所述,智能灰尘系统将应用在包括生产与生活、医疗卫生、科学研究等众多领域之中.随着未来“智能灰尘”关键技术的突破,将促使以 MEMS 技术为代表的微米纳米技术向着高密度三维集成方向的再次进步,这不仅提升 MEMS 单项工艺水平,更提升 MEMS 技术整体和系统级技术水平.这些进步将必然作用于其他基于微米纳米技术的智能微系统之中,实现更大的发展与突破,对整个社会带来巨大的经济和社会效益.

2 智能灰尘的概念与模块化设计

2.1 基本概念

根据 Pister 教授对智能灰尘的最初构想,本文定义智能灰尘(Smart Dust)系统是一种立方毫米尺寸量级的无线多功能传感微系统,它具备环境传感与探测、信息处理与存储、无线通信、能源自供给与管理等功能,可以单独或者大范围布撒工作.根据定义智能灰尘应该具备以下四个主要特点:(1)智能灰尘系统的功能是对

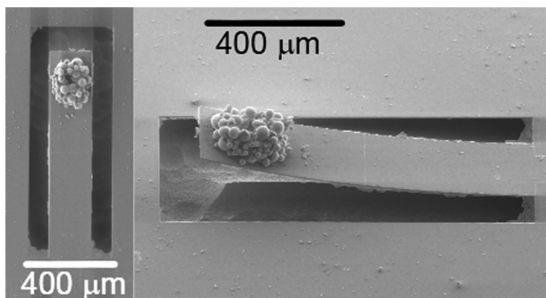


图1 加州大学伯克利分校研制的MEMS交流电传感器

目标环境的感知——声音、可见光与红外光、温度、湿度、磁场、震动等信息的单一或组合探测;(2)智能灰尘系统具备数据传输功能——它既可以实现与特定目标点对点通信,也可以若干器件同时工作构成无线传感、感知的通信网络,使得智能灰尘系统具备实时或准实时的数据交换能力,从而保证了信息及时、快速、准确的传输,有力支持了环境检测和跟踪目标的需求;(3)智能灰尘系统体积小、功耗低的特点使其携带便捷、安装方便;(4)智能灰尘系统具有复合能源采集、能源自供给系统——保证其工作寿命。

2.2 工作原理

首先、传感器模块将采集的环境信号传输到数据处理模块进行信号的分析;其次、经分析的数据信息通过通信模块与外界进行发送与接收;最后、根据无线组网需求,进行智能灰尘系统之间的通信协作,或者单独对智能灰尘系统下达启动/休眠指令。智能灰尘系统的能源模块由薄膜太阳能电池、固态电池和超级电容器等部件组成。为了节省能源的供给,智能灰尘系统还应该具有休眠功能。智能灰尘的工作原理如图 2 所示。

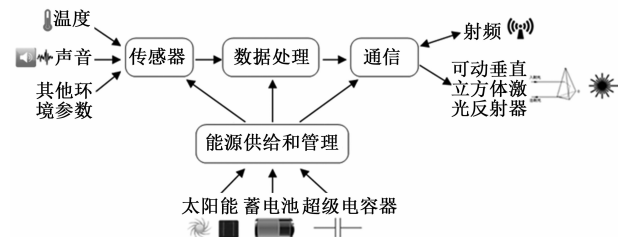


图2 智能灰尘系统的工作原理图

2.3 模块划分

作为一个综合系统,智能灰尘系统个架构设计需要考虑其任务功能、封装体积、系统功耗、能源采集与管理策略等多方面综合因素。为了有效提高研究人员工作效率并缩短研发周期,本文从智能灰尘的功能,将系统划分为四个部分:传感器模块、控制电路模块、通信模块与能源供给模块。

2.3.1 传感器模块

作为智能灰尘系统中传感器模块的任务是收集环境信息并将其转换为电信号,一般包括声音传感器、温度传感器、振动传感器、红外传感器等。在实际工作中,单个的智能灰尘系统可以对环境信息进行采集与监控;多个智能灰尘系统可以进行协同工作,对一定范围内的环境情况进行检测。从目前的技术看来,基于微纳制造技术和 MEMS 加工技术的传感器模块普遍存在。无论是体积还是功耗,基本符合智能灰尘系统的要求。

2.3.2 控制电路模块

控制电路模块是整个智能灰尘系统的数据处理与

运算的部分,其功能包括:第一、对传感器输出的电信号进行解析或存储;第二、通过调整通信模块中收发装置对数据信号进行发射与接收(可动反射镜或无线);第三、在特定情况下还可以对整个智能灰尘系统的休眠状态进行应急处理。控制电路模块通常以微控制器作为内核,包括核心处理器、数模/模数转换器、时钟存储器或者闪存、硬件接口、稳压电路等。

目前,国外最新的智能灰尘样机大多采用 ARM 构架的芯片作为控制电路模块的微处理器。这主要是因为 ARM 架构的自定义处理器具备功耗低、体积小、性能良好等优点比较适合智能灰尘系统。

2.3.3 通信模块

通讯模块负责智能灰尘节点和其他节点或者基站之间的信息交互,理论上至少应该在十米到数十米范围内里保证稳定的数据传输。到目前为止,国际上所研制的智能灰尘样机的通信模块主要由两种技术实现:

(1)基于 MEMS 技术的射频通信系统,其主要功能是智能灰尘系统间的数据交互,具有无导向性、可以实现全方位的通信、不受到小体积的障碍物影响、无机械可动结构等优点。

(2)基于 MEMS 微镜技术的激光通信系统,其主要功能是智能灰尘系统的远程通信与定位,具有传输距离远、工作能耗低、不易受外界干扰等特点。目前基于 MEMS 微镜技术的激光通信系统又可分为被动式和主动式两种。其中被动式激光通信系统由可动垂直立方体激光反射器构成,其核心结构为三块互相垂直的平面反射镜。主动式激光通信系统由激光器和可动微镜构成,可以通过控制微镜角度对出射激光的方向进行控制。

射频通信和激光通信技术二者各有优缺点,如表 1 所示。

表 1 射频通信和激光通信特点比较

	射频通信	激光通信
导向性	无	有
障碍物影响	低	高
机械可动结构	无	有
能耗	高	低
通信速率	高	低
传输距离	较近(受能耗所限)	远
抗干扰能力	弱	强
保密能力	弱	强
加工难度	易	难

综上所述,射频通信和激光通信各有优缺点,需要根据具体工作环境选择一个更优的通信方式:射频通信适用于绝大部分短距离组网应用,而激光通信一般只用在超远距离身份识别和数据传输上。

2.3.4 能源模块

能源模块的主要目的是为智能灰尘系统供能,以维持系统正常的工作.为了有效延长智能灰尘的工作寿命,智能灰尘系统应该具备能源收集能力.因此,能源模块包涵能源采集和能源存储两个部分.

能源采集部分包括太阳能薄膜电池板或者振动能收集器件等,这些方法各有优缺点.例如,太阳能薄膜电池体积小且收集能量效率较大(室外 $10\text{mW}/\text{cm}^2$,室内 $10^{-2}\text{mW}/\text{cm}^2$ ^[19]),但是需要在具备足够光强的条件下才能稳定工作;振动能收集器件吸收的频率特定且带宽较窄,但其性能受微加工、微装配与微封装技术限制,因此比较适用于具有稳定振动频率下的监控系统.

能源存储部分可以使用锂电池、固态电池、燃料电池以及同位素电池等方案.锂电池具有能量密度高、技术发展比较成熟、形状设计较为灵活、温度工作区间较广、安全性强等优点,比较适用于大多数场合;一些固态电池基于硅片上的微加工工艺制作,集成度较高,体积小;微型化的燃料电池和同位素电池具有良好地发展前景,但是由于目前大量研究工作还在进行之中.

2.4 模块化设计

从目前国际上对类智能灰尘系统的研究方式来看,很多研究机构采用模块化设计来减小设计难度并提高研发效率.随着现在科学技术的迅猛发展,模块化设计方法已经应用在包括智能灰尘、材料加工^[20]、控制程序^[21]在内的各种工程产品的研发工作中.在此基础上进行产品模块化设计,更可以有效地实现产品多样化^[22,23].智能灰尘的设计应该具备模块化设计的一般特点:①设计中功能域与物理结构域之间的映射和相似程度影响模块化的程度;②产品的物理结构之间互相影响程度应该做到最小化^[24].

综合上述原则,智能灰尘的系统设计方案应该遵循三个基本要求:系统划分模块化、构架组成层次化、总线接口规范化.

①系统划分模块化:根据应用方向的需求,智能灰尘系统各个部件的功能应该划分成各个基本组件或系统.

②构架组成层次化:由于传感、能源、通信、控制模块的加工工艺和器件结构的不同,集成不同应用方向的智能灰尘系统的系统构架设计和加工步骤是不同的.以四大基本模块单元为基础,将不同性质的部件分布集成到系统中的不同层,最后进行整个系统的统一封装.

③总线接口规范化:规范化设计各个模块之间的电气接口和总线协议.这种规范化设计允许设计者根据智能灰尘的应用需求和使用背景,自由替换不同设计的同一模块,完成智能灰尘系统的不同工作要求.

3 智能灰尘系统技术发展的三个阶段

智能灰尘技术的发展路线图大致可以分为三个阶段:商用元件集成样机, MEMS 元件高集成度样机,基于 MEMS 技术的一体化设计以及加工、集成样机系统.

3.1 商用元件样机阶段

这一阶段的发展源自加州大学伯克利分校的 Pister 教授提出的 Smart Dust 技术开发路线,利用商业化微小器件搭建一个实验性质的“商用灰尘”(Commercial Off-The-Shelf Dust, COTs Dust),其目的是从总体上解决技术可行性问题,并且通过实地组网实验以验证智能灰尘网络的可行性.这一阶段中,大部分智能灰尘样机的搭建都是基于商用元件及印刷电路板(Printed Circuit Board)技术.

这个阶段搭建的智能灰尘样机体积普遍很大,这主要源于以下几个原因:第一、商用元件的体积和功耗普遍较高;由于印刷电路板的尺寸较大,且受原理所限无法进一步缩小;第二、必须采用商用(纽扣)锂电池进行供电,同时由于不具备从收集能量功能,因此能源模块体积很大,否则无法保证系统的长时间工作.受到上述因素所限,此类样机的体积基本都在数百立方厘米以上,虽然还无法称为真正的“智能灰尘”,但是大多数已经具备智能灰尘的基本功能,包括:采集环境信号、处理与存储实时信息、发送无线信号等.

这一阶段的代表性系统包括:使用射频通信并集成多种传感器的“无线射频微粒(RF Mote)”,以及使用激光完成远距离光通信实验的“激光微粒(Laser Mote)”^[25].

RF Mote 上面集成了温度、湿度、气压、光强、位置、振动以及磁场传感器等;通信方式为无线电波通信,工作频率 916MHz,传输速度 4800bps,有效距离是 20m,如图 3 所示^[25].通过电池供电,RF Mote 可连续工作一周左右.为了提高工作时间,研究小组设计了一种特殊的

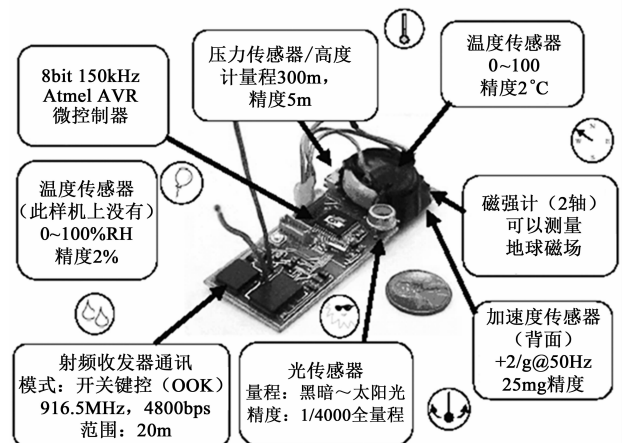


图3 RF Mote组成示意图

工作模式:通过有计划地控制 RF Mote 在绝大多数空闲时间里进入“休眠”状态(即关闭所有不需要电路的低功耗模式),来有效延长整个系统的工作寿命。

伯克利的研究小组对 RF Mote 进行了实验验证,如图 4 所示.该实验的主要内容是将远程 RF Mote 采集到的信息通过无线射频通信发送到电脑上.在实验中一共有两种不同的 RF Mote:为采集环境参数而独立工作的漂浮微粒(Floating Mote);与电脑通过串口直接连接的基站微粒(Base Mote).工作时,漂浮微粒将传感器信息通过射频信号发送给基站微粒,基站微粒再借助串行线将信息发送至电脑并显示出来.这次实验的网络结构虽然简单,但是已经具有了概念中智能灰尘网络的基本雏形。

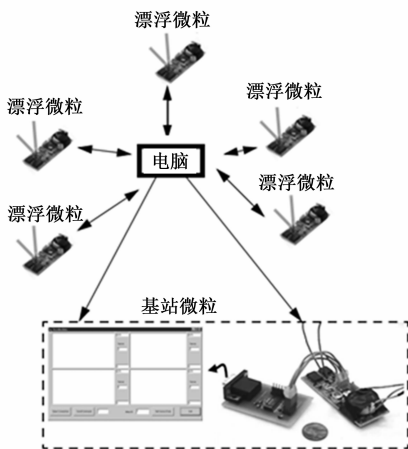


图4 RF Mote功能验证实验

Laser Mote 也是借助市场上可以买到的元器件搭建而成的,其中包括温度、气压、湿度、光强传感器和一个微处理器.Laser Mote 使用激光指示器作为通信手段,通信速率 4bps,取代了传统的无线通信模块,如图 5 所示。

设计上 Laser Mote 的主要工作是测量本地的环境信息并通过激光远距离传输测量结果.研究小组在旧



图5 Laser组成示意图

金山海峡的实验验证了 Laser Mote 的通信能力,证明了这种系统可以将传感器采集到的信息,通过激光发送到 20km 以外的基站处,如图 6 所示。



图6 在Marina District和Berkeley之间的San Francisco海峡所作的Laser Mote实验

经过几个样机的实验发现当时的操作系统难以满足智能灰尘的系统要求和组网应用.因此智能灰尘对新操作系统提出了四点要求^[26]:

资源受限 智能灰尘系统的体积、功耗、成本都十分有限,因此操作系统不能占用过多的物理资源。

实时反应 智能灰尘工作时可能需要同时进行传感器信息读取、本地数据处理、远程通信等工作.因此需要一种能够实时高效管理多进程的新系统。

便于升级 由于智能灰尘技术更新换代很快,因此新操作系统不仅应该能够直接投入应用,还应该采用模块化设计技术,让硬件和软件之间相互独立,使得该系统便于技术更新。

超低功耗 新操作系统不仅具有极低的功耗,同时还可以运行多种能源管理和任务周期策略。

根据这四方面的需求,研究人员开始了 Tiny OS 嵌入式处理器系统的研究.Tiny OS 是 DARPA 资助的嵌入式网络系统技术(NEST)研究计划的一个子课题,承担单位是 UC Berkeley,研究人员有 Jason Hill, Robert Szewczyk, Alec Woo, David Culler 等,合作单位有 Crossbow Technology Inc.(负责 COTS Dust 微粒的硬件部分制造)等公司。

Tiny OS 系统基于“软件组件(software component)”架构,为诸如传感、驱动、存储等常见的抽象概念创建了接口和组件.2001 年,伯克利的研究人员开发出 0.6 版本的 Tiny OS,并且将 Tiny OS 系统成功应用于智能灰尘样机“Mica”上.作为商用元件样机阶段最成熟的技术,装备有 Tiny OS 系统的 COTs 在多项实验中均获得了成功。

除了 RF Mote、Laser Mote 和 Mica,伯克利的智能灰尘研究人员还搭建了很多由不同商用器件组合而成的实验用智能灰尘,部分商业微粒及其参数见表 2 所示^[27]。

表2 部分实验用商业微粒参数一览

样机年份	WcC 1998	René 1999	René 2 2000	Dot 2000	Mica 2001	Mica2Dot 2002	Mica 2 2002	Telos 2004																																																						
微控制器	<table border="1"> <tr> <td>类型</td> <td colspan="2">AT90LS8535</td> <td colspan="2">ATmega163</td> <td colspan="2">ATmega128</td> <td colspan="2">TI MSP430</td> </tr> <tr> <td>程序内存 (KB)</td> <td colspan="2">8</td> <td colspan="2">16</td> <td colspan="2">128</td> <td colspan="2">60</td> </tr> <tr> <td>RAM (KB)</td> <td colspan="2">0.5</td> <td colspan="2">1</td> <td colspan="2">4</td> <td colspan="2">2</td> </tr> <tr> <td>工作功率 (mW)</td> <td colspan="2">15</td> <td colspan="2">15</td> <td colspan="2">8</td> <td colspan="2">33</td> </tr> <tr> <td>休眠功率 (μW)</td> <td colspan="2">45</td> <td colspan="2">45</td> <td colspan="2">75</td> <td colspan="2">75</td> </tr> <tr> <td>唤醒时间 (μs)</td> <td colspan="2">1000</td> <td colspan="2">36</td> <td colspan="2">180</td> <td colspan="2">180</td> </tr> </table>								类型	AT90LS8535		ATmega163		ATmega128		TI MSP430		程序内存 (KB)	8		16		128		60		RAM (KB)	0.5		1		4		2		工作功率 (mW)	15		15		8		33		休眠功率 (μW)	45		45		75		75		唤醒时间 (μs)	1000		36		180		180	
类型	AT90LS8535		ATmega163		ATmega128		TI MSP430																																																							
程序内存 (KB)	8		16		128		60																																																							
RAM (KB)	0.5		1		4		2																																																							
工作功率 (mW)	15		15		8		33																																																							
休眠功率 (μW)	45		45		75		75																																																							
唤醒时间 (μs)	1000		36		180		180																																																							
不可变存储	<table border="1"> <tr> <td>芯片</td> <td colspan="2">24LC256</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">AT45DB041B</td> <td colspan="2">ST M24M01S</td> </tr> <tr> <td>连接形式</td> <td colspan="2">I²C</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">SPI</td> <td colspan="2">I²C</td> </tr> <tr> <td>容量 (KB)</td> <td colspan="2">32</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">512</td> <td colspan="2">128</td> </tr> </table>								芯片	24LC256				AT45DB041B		ST M24M01S		连接形式	I ² C				SPI		I ² C		容量 (KB)	32				512		128																												
芯片	24LC256				AT45DB041B		ST M24M01S																																																							
连接形式	I ² C				SPI		I ² C																																																							
容量 (KB)	32				512		128																																																							
通信	<table border="1"> <tr> <td>无线电</td> <td colspan="2">TR1000</td> <td colspan="2">TR1000</td> <td colspan="2">CC1000</td> <td colspan="2">CC2420</td> </tr> <tr> <td>数据率 (kbps)</td> <td colspan="2">10</td> <td colspan="2">40</td> <td colspan="2">38.4</td> <td colspan="2">250</td> </tr> <tr> <td>调制方式</td> <td colspan="2">OOK</td> <td colspan="2">ASK</td> <td colspan="2">FSK</td> <td colspan="2">O-QPSK</td> </tr> <tr> <td>接收功率 (mW)</td> <td colspan="2">9</td> <td colspan="2">12</td> <td colspan="2">29</td> <td colspan="2">38</td> </tr> <tr> <td>0dBm发送功率 (mW)</td> <td colspan="2">36</td> <td colspan="2">36</td> <td colspan="2">42</td> <td colspan="2">35</td> </tr> </table>								无线电	TR1000		TR1000		CC1000		CC2420		数据率 (kbps)	10		40		38.4		250		调制方式	OOK		ASK		FSK		O-QPSK		接收功率 (mW)	9		12		29		38		0dBm发送功率 (mW)	36		36		42		35										
无线电	TR1000		TR1000		CC1000		CC2420																																																							
数据率 (kbps)	10		40		38.4		250																																																							
调制方式	OOK		ASK		FSK		O-QPSK																																																							
接收功率 (mW)	9		12		29		38																																																							
0dBm发送功率 (mW)	36		36		42		35																																																							
能耗	<table border="1"> <tr> <td>最小功率电压 (V)</td> <td colspan="2">2.7</td> <td colspan="2">2.7</td> <td colspan="2">2.7</td> <td colspan="2">1.8</td> </tr> <tr> <td>总功耗 (mW)</td> <td colspan="2">24</td> <td colspan="2">27</td> <td colspan="2">44</td> <td colspan="2">89</td> </tr> </table>								最小功率电压 (V)	2.7		2.7		2.7		1.8		总功耗 (mW)	24		27		44		89																																					
最小功率电压 (V)	2.7		2.7		2.7		1.8																																																							
总功耗 (mW)	24		27		44		89																																																							
编程和传感器接口	<table border="1"> <tr> <td>扩展</td> <td>无</td> <td>51-pin</td> <td>51-pin</td> <td>无</td> <td>51-pin</td> <td>19-pin</td> <td>51-pin</td> <td>10-pin</td> </tr> <tr> <td>通信</td> <td colspan="7">IEEE 1284 (编程) 和 RS232 (需要额外硬件)</td> <td>USB</td> </tr> <tr> <td>集成传感器</td> <td>否</td> <td>否</td> <td>否</td> <td>是</td> <td>否</td> <td>否</td> <td>否</td> <td>是</td> </tr> </table>								扩展	无	51-pin	51-pin	无	51-pin	19-pin	51-pin	10-pin	通信	IEEE 1284 (编程) 和 RS232 (需要额外硬件)							USB	集成传感器	否	否	否	是	否	否	否	是																											
扩展	无	51-pin	51-pin	无	51-pin	19-pin	51-pin	10-pin																																																						
通信	IEEE 1284 (编程) 和 RS232 (需要额外硬件)							USB																																																						
集成传感器	否	否	否	是	否	否	否	是																																																						

3.2 MEMS 元件高集成度样机阶段

第一阶段的商用元件样机在原理上实现了智能灰尘的功能.但是受制作工艺和商用元件自身的限制,商用元件样机无法从根本上减小体积和功耗.

为了解决体积和功耗问题,第二阶段利用 MEMS 技术以及微米纳米加工工艺研制出高集成度的微型“灰尘”.不同于第一阶段商用元件的拼接,第二阶段研究的关键是以 MEMS 基本技术为核心,通过微纳米加工技术的完善,在传感、通信、能源、计算等关键技术的集成上取得突破.其主要目的是研制出体积约为立方毫米级别的、高度集成的微型化原型样机.

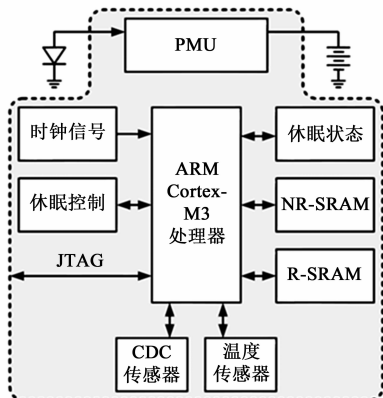


图7 密歇根大学2010年智能灰尘的结构框图

目前,国际上关于智能灰尘的最前沿的研究均属于第二阶段,代表性研究单位是美国的密歇根大学安娜堡分校.其设计制作的智能灰尘节点是目前国际上出现的最理想、最接近理想目标的智能灰尘器件之一.

在 2010 年,密歇根大学的研究人员设计并制作了一个 8.75mm^3 体积的智能灰尘实验样机.该样机采用分层设计思路,主要包含了以下部件:180nm CMOS 技术加工的太阳能电池;用来储存能量的 $12\mu\text{Ah}$ 容量的薄膜锂电池;ARM 公司生产的 Cortex-M3 微处理器;低电压 SRAM 和能量管理单元;温度传感器等.借助降低处理器运算速度、低泄露的 SRAM 设计、睡眠模式和高效的能量管理单元等设计,该智能灰尘样机理论上可以工作数年以上.样机的框图如图 7 所示,实物如图 8 所示.[28].

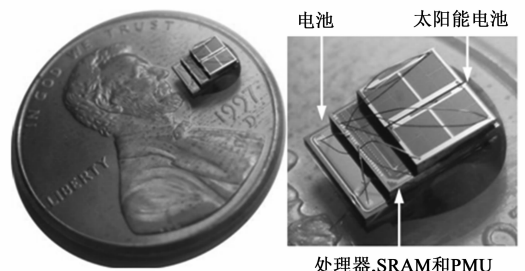
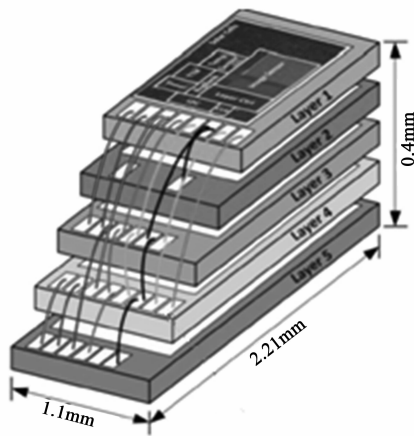


图8 密歇根大学2010年智能灰尘样机

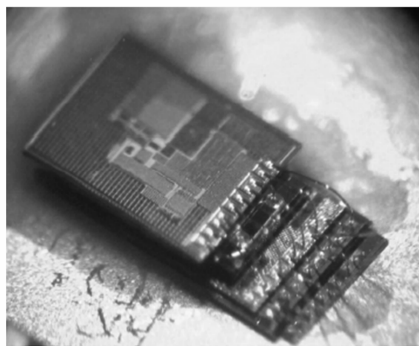
在 2011 年,密歇根大学的研究人员又设计出了一个体积仅为 1.5mm^3 ($2\text{mm} \times 1.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$) 的系统,整个器件分为 4 层,最上面一层包含有太阳能电池以及无线通信天线,第二层包含 AD 转换器、储存器以及处理器,第三层使用 Cymbet 公司的 Enerchip 电池板为系统供电,最后一层则为一个压力传感器,如图 9 所示^[29]. 该系统的搭建最初被定义为能够自供能的无线压力传感器,但是实际上这种思路是和智能灰尘完全一致的. 而这种分层设计的结构也是今后智能灰尘在设计时值得借鉴的.

到了 2012 年,密歇根大学再一次发表了他们的成果,本次智能灰尘是使用 ARM Cortex-M0 为控制核心,并由 180nm 的 CMOS 技术完成. 该智能灰尘的尺寸不足 1mm^3 ($1.1\text{mm} \times 2.21\text{mm} \times 0.4\text{mm}$),能够完成 RF 通信,如图 10 所示. 作为一个无线传感节点,其射频收发器启动时的工作电流仅 $> 10\mu\text{A}$,而作为一个智能灰尘,在传感平台上搭建了图像和温度传感器,在全工作状态下系统功耗可以控制在 $100\mu\text{W}$ 以内^[30]. 这次的智能灰尘同样使用分层式结构,并且系统具有两种不同的型号. 第一种型号是将信息采集和太阳能收集、电池板、数字信号处理器以及系统控制模块分别蚀刻在不同的层面上. 这时系统能够完成图像采集和处理,但是由于不包括无线通信模块,不能算是一个完整的智能灰尘. 而第二种型号则是将其中的数字信号处理层替换为了 RF

通信层. 这时能够完成 RF 通信,更加贴近智能灰尘. 从中可以看出,在今后的设计发展中,势必会出现集成更多种类的传感器、同时具有 RF 通信功能的超小体积智能灰尘出现. 由于本系统使用的是 ARM 核,处理能力更强,具有能够实现组网甚至搭载执行器的潜力,所以它可以作为一个基础平台,相比于密歇根大学 2011 年制造的无线传感器系统,它的发展前景更加广阔.

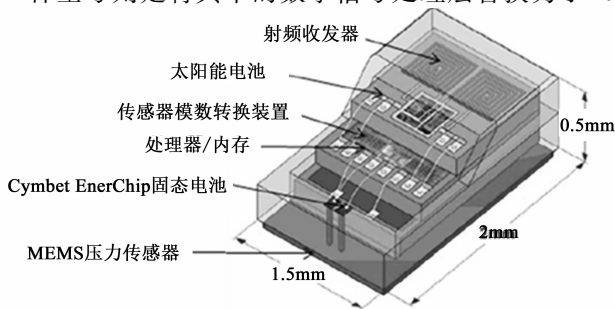


(a) 密歇根大学2012年智能灰尘样机的概念图

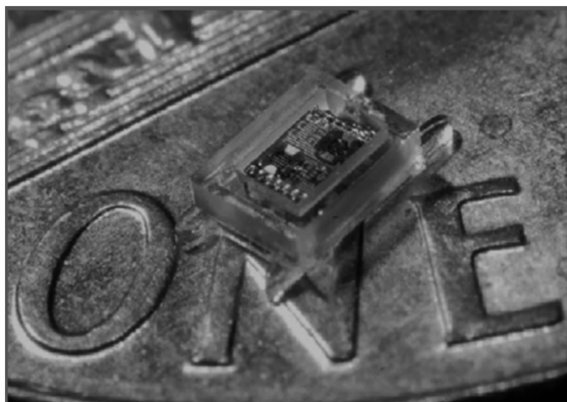


(b) 密歇根大学2012年智能灰尘样机的实物图

图10



(a) 密歇根大学2011年智能灰尘样机的概念图



(b) 密歇根大学2011年智能灰尘样机的实物图

图9

随着近年来发展迅速的 MEMS 及微米纳米加工技术,完整功能、低功耗智能灰尘的体积将在不久的将来缩减到立方毫米的量级. 凭借 μAh 或者 mAh 超小型电池进行正常工作. 但是需要指出的是,这一阶段研制的毫米尺寸智能灰尘样机从通信能力、寿命和鲁棒性上均无法达到实用水平,甚至难以进行类似于商用器件阶段完成的实地实验. 可以说,高集成度样机阶段的研究很好地验证了制造毫米量级超低功耗智能灰尘的可行性,但是还无法将智能灰尘概念投入实际应用.

3.3 基于 MEMS 技术一体化设计系统阶段

商用元件样机阶段验证了系统原理和组网应用, MEMS 高集成度样机阶段借助微米纳米加工与制造技术为后续微型化、智能化的基于 MEMS 技术一体化设计系统发展打下了良好基础.

利用统一的微米纳米加工工艺集成整个智能灰尘:包括微型固态电池、超级电容器等微型复合能源器件;声音、可见光与红外光、温度、湿度、磁场、震动等微

型传感器;RF 通信系统、主动和被动激光通信微系统;以及相关的处理电路等(图 3 所示)。

表 3 部分(类)智能灰尘发展情况

系统名/研究单位	年份	尺寸/mm	能源模块	整体能耗/mW	传感器
WeC ^[25,27,62]	1998	约 38 × 38 × 13	3V 23mm 锂离子纽扣电池	24	光敏、温度
RF Mote ^[25]	1999	约 76 × 25 × 13	3V 锂离子纽扣电池	N/A	2 轴磁强计, 2 轴加速度计, 光敏, 湿度, 气压, 温度
Rene ^[27,62]	2000	N/A	2 节 AA 电池	24	外接环境监控传感器电路板
亚琛工业大学 ^[31]	2000	25 × 10 × 5	1.4V 助听器电池	N/A	神经电信号
Dot ^[27,62]	2001	N/A	锂电池	24	外接环境监控传感器电路板
Mica ^[27,62,65]	2002	57 × 31.8 × 6.4	2 节 AA 电池	27	外接环境监控传感器电路板
Mica2Dot ^[27,63]	2002	25 × 6	3V 纽扣电池	44	外接环境监控传感器电路板
UCLA ^[32]	2002	约 10 × 10 × 3	无线供能	13.8	神经电信号
Mica2 ^[27,61]	2003	58 × 32 × 7	AA 电池	89	外接环境监控传感器电路板
密歇根 ^[33]	2003	18 × 13 × 1.6	2 节小型 1.5V 电池	< 2.5	神经电信号
Telos ^[27,64,65]	2004	约 45 × 20 × 5	电池	41	外接环境监控传感器电路板
杜克 ^[34]	2004	51 × 81 × 124	可充电锂离子纽扣电池	4000	神经电信号
UCLA ^[13]	2005	58 × 32 × 15	电池	96.9	神经电信号
密歇根 ^[15]	2005	2.2 × 2.2 × 2	2 节 1.5V 电池	2.05	神经电信号
UCLA ^[17]	2006	25 × 25 × 10	3V 电池	66	神经电信号
密歇根 ^[28]	2010	2.5 × 3.5 × 1	薄膜锂电池/太阳能	约 0.02	温度、CDC
密歇根 ^[29]	2011	1.5 × 2 × 0.5	EnerChip 固体电池/太阳能	约 0.01(平均)	MEMS 压力
密歇根 ^[30]	2012	1.1 × 2.21 × 0.4	薄膜锂电池/太阳能	< 0.1	温度、图像(其中一个型号)

4 智能灰尘相关技术发展现状

智能灰尘是一个具有传感、通信、数据处理、能源管理与存储等功能的综合系统.因此,智能灰尘技术,实际上囊括了低功耗无线通信技术、复合能源技术、IC 技术、MEMS 制造技术和微纳集成技术等子技术.目前直接进行智能灰尘系统级研究的单位极少,大多数相关科研机构主要着眼于智能灰尘单一模块的研究.

4.1 通信模块

4.1.1 射频通信

从最早期的 COTs 开始,智能灰尘的相关研发人员就开始尝试使用射频作为通信手段.射频通信虽然具有无导向性、不易收到一些障碍物阻断等优点,但是其通信距离与工作功率正相关的特性成为了其投入实际应用的最大阻碍:研究人员必须尝试尽可能优化射频模块,并且在功耗与通信距离之间进行权衡.

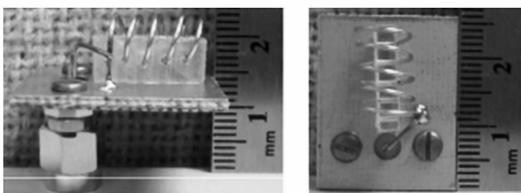


图11 2009年马里兰大学研制的微型天线

2009年,美国马里兰大学的 Bo Yang 等人针对智能灰尘无线网络应用,研发了一系列超小型天线和接收器,其中的代表性产品为一种新型 916MHz 的倒 F 紧凑天线(FICA).包括基板在内,该天线的体积仅有 8mm × 20mm × 25mm.其辐射效率 48.53%,最大增益 -1.38dBi,实物图如图 11 所示^[35].此外,Bo Yang 等人还提出了一种新的低噪声放大器设计优化算法^[36].

2011-2012年,美国亚利桑那大学开发出一系列近场谐振寄生平面天线.其中方形天线的面积大约 25.4mm × 25.4mm 见方,基底厚 31.0mil,工作效率最高可达成约 73.9%,如图 12 所示^[37].

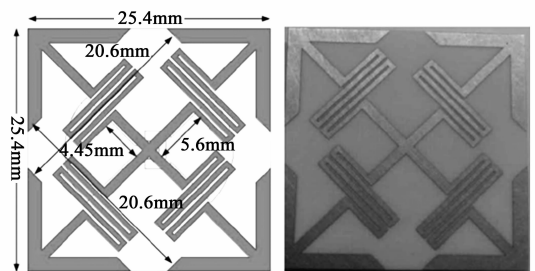


图12 亚利桑那大学研发的平面微小天线

亚利桑那大学的研究人员计划将这种天线作为智能灰尘的封装外壳使用,以搭建一种高通信效率的智能灰尘,其概念图如图 13 所示^[38].

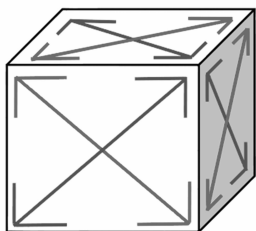


图13 基于平面微型天线的智能灰尘节点概念图

4.1.2 激光通信

基于 MEMS 技术的激光通信系统也可以作为实现相互通信的方法,这主要是因为激光通信系统具有以下三个优点:(1)传输频带宽,通信容量大;(2)传输距离远、线路损耗低;(3)抗干扰能力强。近年来由于多种平面加工工艺、体加工工艺等 MEMS 关键制造技术的突破和进步,以及 MEMS 器件体积小、低功耗趋势明显,使得基于 MEMS 生产制造技术的微型激光通信系统的实现成为可能。

目前微型激光通信系统分为主动式和被动式两种。主动式光学系统的工作原理是:智能灰尘配置的激光器发射连续信号(激光半径在毫米级别),再通过可调角度的镜面反射系统,进行二进制信号的传输。被动式的工作原理为:使用镜面反射系统,通过调整反射光强度,以二进制信号调试方式将承载信息的反射光发回基站。由于主动式激光通信需要研制激光器且功耗相对较大,现在的研究主要集中于被动式激光通信。

最早尝试使用 MEMS 技术搭建小型化激光通信智能灰尘的研究单位是美国加州大学伯克利分校。2002 年,Pister 教授等人研制的角锥棱镜(CCR)通过调整底面镜片角度实现反射光“0”与“1”的变化。该器件体积大小为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 。这个角锥棱镜通信速率大约为 400bps,功耗 40nJ/bit ,平均能耗为 $16\mu\text{W}$,通信距离 180m。实物图如图 14 所示^[39~42]。

英国牛津大学于 2009 年发表了激光通信的研究成果及其在智能灰尘上的应用。和伯克利的 CCR 通过偏转底面镜片角度调制反射光强不同,牛津大学的角反射器没有可动结构,仅依靠一个液晶滤光片调制光强。研究人员通过给液晶施加不同的电压改变其光透过

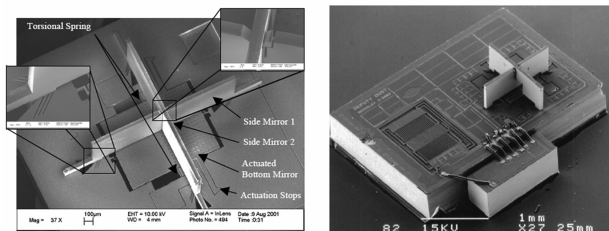


图14 伯克利大学研制的CCR实物照片

率,借此实现被动光通信“0”和“1”的调制。据估计其功耗为 16pJ/bit ,在 0.4V 电压工作的电流为 100nA (即 40nW 功率)。其通信距离大约为 10m 量级。牛津大学智能灰尘的通信模块概念图如图 15 所示。角反射镜的实物图如图 16 所示^[43]。

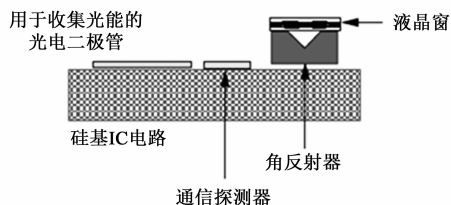


图15 牛津大学通信模块概念图

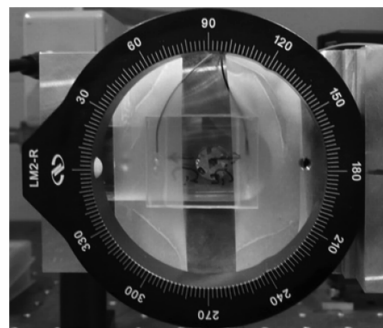


图16 角反射镜实物图

4.1.3 射频/激光混合通信

2013 年,英国牛津大学的 Dominic O'Brien 对智能灰尘系统的射频与激光通信形式进行了分析。Dominic O'Brien 认为,未来智能灰尘的通信形式比较可能是射频/激光的混合通信:当智能灰尘节点和基站之间有光通信的直线通路时,使用激光通信;如果智能灰尘节点无法“看到”基站,那么则使用射频通信进行节点之间的互联与无线网络的组建^[44]。根据此前建模分析得到的结果,在相同条件下,射频/激光混合通信方式比仅用射频通信的工作寿命长^[45,46]。

4.2 能源模块

符合要求的能源模块是实现智能灰尘实用化和小型化的关键。现在很多高校和科研机构都在进行微型化复合能源的研究。

2010 年,法国国家科学研究院和中国科学技术大学合作研制出一种利用了相变材料的热电型太阳能收集装置。其单个工作单元的输出功率最大可达 0.8mW 。其实物图如图 17 所示^[47,48]。

2011 年,哈尔滨工业大学的研究人员发表了对微型甲醇燃料电池的研究,其最大能量密度分别达到了 65.66mW/cm^2 (40°C)和 115.0mW/cm^2 (80°C)。其实物图如图 18 所示^[49]。

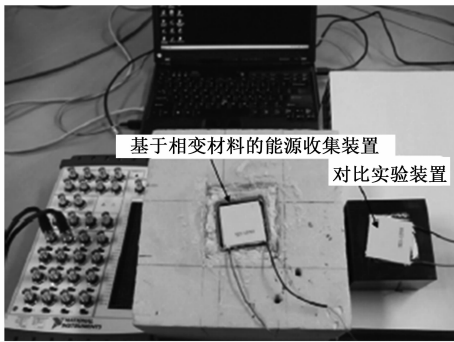


图17 热电型太阳能收集装置实物图

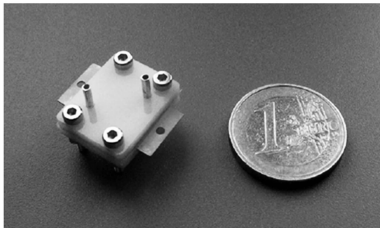


图18 哈尔滨工业大学的微型燃料电池实物图

美国加州大学伯克利分校传感器和执行器中心 (BSAC) 的研究人员于 2011 年发表了一种新型氮化铝 (AlN) MEMS 振动能收集装置, 如图 19 所示. 该装置可以在 $0.25g$ 的加速度下输出 $92mV$, $4.9nW$ 的能量^[50].

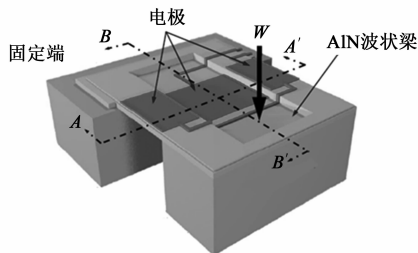


图19 伯克利AlN振动能收集装置

上海交通大学也在对压电厚膜 MEMS 能量采集器进行研究. 基于键合和减膜技术的高性能压电厚膜制备及其图形化方法, 研究人员制作出的铜梯形结构的实验样机可在 $1g$ 加速度、 $1010Hz$ 的振动激励下, 实现 $1.43\mu W$ 的最大输出负载功率, 相应的功率密度大约

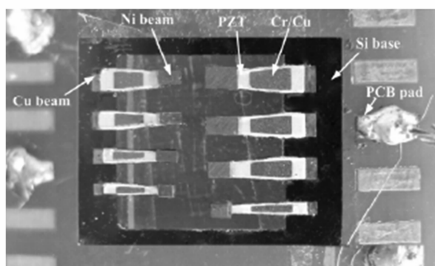


图20 上海交通大学研制的铜梯形振动能收集装置

$7889.7\mu W/cm^3$. 其实物图如图 20 所示^[51].

此外, 一些机构正在研究从射频通信或者激光通信中收集能量的方法. 2013 年荷兰埃因霍温理工大学发表了从无线射频通信中收集能量的建模分析^[52]. 2014 年, 英国牛津大学、中国广启高等理工研究院、中国科学院深圳先进技术研究院联合发表了应用于智能灰尘系统的, 可以从接收到的激光中收集能量的光学接收前端, 其输出电压大约为 $0.45V \sim 0.8V$. 基于这个技术, 可以开发出既可以用于接收基站发射的激光通信信号, 又可以从此激光中获取能量的智能灰尘光学前端^[53].

4.3 控制电路模块

智能灰尘对控制电路模块的要求为体积小、功耗低、工作稳定可靠. 这些要求同时也是目前 IC 电路研究人员的主要研究目的之一. 其中, 低功耗模数转换器是控制电路模块中比较有代表性的器件.

2005 年, 加州大学伯克利分校的 Pister 教授研发出一种为智能灰尘设计的模数转换器. 根据 Pister 教授等人的分析, 适用于智能灰尘的模数转换器应该具有以下性能参数:

- ① 8bit 采样率, 单次采样能耗不高于 $1nJ$;
- ② 具有低功耗待机模式;
- ③ 供电电压 $1V$ 左右, 可以依靠太阳能电池直接供电.

Pister 教授等人最终研制出的模数转换器件仅需 $1V$ 电压供电, 有 8bit 采样率, 每次采样耗能 $31pJ$. 不工作时, 其等待功率仅有 $70pW$, 满足智能灰尘系统的要求, 系统实物图如图 21 所示^[54].

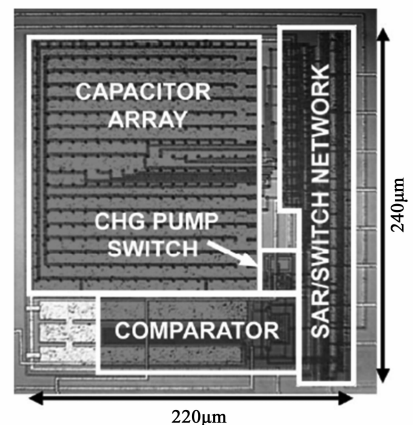


图21 Pister教授研制的低功耗模数转换器

瑞典林雪平大学在 2011 年也提出了为智能灰尘开发的模数转换器, 其功耗低、体积小的优点, 非常适合于低功耗无线组网的应用^[55].

4.4 传感器模块及集成工艺

随着 MEMS 技术的发展, 低功耗、小体积的 MEMS

传感器目前正在受到无线传感器网络研究人员越来越多的重视。

对于智能灰尘系统而言,在功耗和数据处理能力允许的条件下,搭载的传感器越多,其可以实现的功能就越丰富.因此在体积极端受限的智能灰尘上,如何尽可能地集成更多传感器就成为了传感器模块设计人员首要关心的任务.从目前的研究来看,最有可能实现这个目标的方法是可以将复数 MEMS 传感器集成在同一块硅片上的一体化加工技术。

目前,在多传感器一体化加工方面较为突出的研究单位为美国斯坦福大学和 HP 公司.2012 年,这两所研究机构共同发表了在 MEMS 一体化加工领域最新的研究结果,并完成了在一个硅片上加工包括温度、湿度、风速、三轴加速度等十个传感器的实验,如图 22 所示^[56,57].这标志着 MEMS 设备正在逐渐进入一体化加工与封装的时代,这对于进一步提高 MEMS 设备的集成度、减小智能灰尘的体积有着重要的意义。

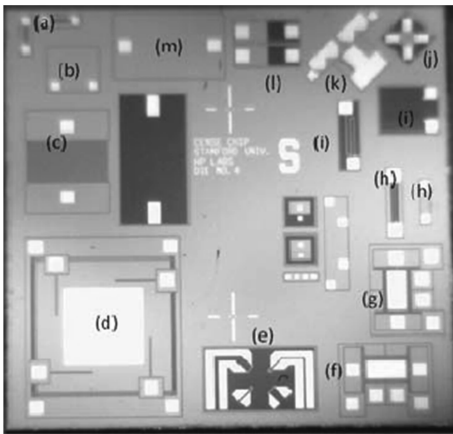


图22 多传感器集成实物图

表 4 图 22 中的传感器一览

传感器功能	图	工作原理
温度	<i>h, i</i>	电阻温度探测器
	<i>l</i>	带隙温度传感器
湿度	<i>c</i>	聚合物的电介质变化
光强	<i>m</i>	光电二极管
压强	<i>b</i>	参杂电阻光探测器
	<i>e</i>	薄膜应力
风速-x	<i>a</i>	热线式风速计
风速-y	<i>a</i>	热线式风速计
加速度-x	<i>f</i>	静电梳齿
加速度-y	<i>g</i>	静电梳齿
加速度-z	<i>d</i>	静电梳齿
磁场	<i>k</i>	压阻悬臂梁
	<i>j</i>	霍尔效应传感器

5 智能灰尘系统关键技术分析

5.1 超小电源供给与管理技术

对于无线传感节点而言,除了需要尽可能降低功耗,改良能源供给技术也同样重要^[58].尤其是对于体积极端受限的智能灰尘系统更是如此。

研究发现,在一定的系统体积限制下,即使功能部件的耗电量可以控制到亚毫瓦级别,实现长时间稳定的电源供给仍然具有巨大的难度.因此,小体积高性能的能源模块的实现,以及能源管理方法的优化,对于智能灰尘系统极为重要。

为了在有限的体积下提高能源模块的工作性能,很多研究机构开展了有关复合能源系统的研究.复合能源系统是一种包含多种能量源的供能系统,目前复合能源的概念被广泛应用于微系统^[59]、电动车^[60]等研究领域.在复合能源领域,具有实际应用潜力的电池模块包括:锂电池、燃料电池、同位素电池等;针对智能灰尘的应用背景,可以用作能源收集部分的器件包括:振动能收集装置、薄膜太阳能电池板、射频能源收集单元等;增强复合能源工作性能的相关技术包括超级电容器等.但是到目前为止,真正适合立方毫米量级的智能灰尘系统体积,并且可以在野外较为恶劣环境下稳定工作,电量储备充足的复合能源模块尚未出现.这同时也是微能源研究人员的研究重点。

为了实现微型复合能源系统在智能灰尘系统中的应用,首先应该在应用需求的牵引下简化系统内各部分器件的组成,合理分布系统结构;其次优先设计高效率的能源采集装置,配合微型电池的使用,作为长期供电的一个来源;最后设计包含休眠状态的工作模式以及多元化的能源管理方式,支撑智能灰尘系统的长期应用。

5.2 低功耗数据处理和无线通信技术

智能灰尘系统的组网功能需要依靠低功耗的数据处理和无线通信系统实现,例如:在智能灰尘的广域监控任务中,如果要扫描整个被监控区域的情况,需要该区域的所有智能灰尘系统把监控结果经过数据处理,通过无线通信方式发送至基站。

数据处理模块普遍需要对功耗、体积和性能之间进行权衡.因此研究人员需要以提升智能灰尘系统的实时工作性能为目标,在物理资源有限的条件下尽可能提升数据处理能力.在现有的无线通信方式中,射频通信受能耗所限,只能用于近距离智能灰尘节点之间的通信;激光通信受光路所限,只能用于没有光学遮蔽物的节点之间进行通信.因此,需要开发一种具有射频/激光复合通信功能的低功耗无线通信系统,由智能灰尘系统根据实际情况自动选择合适的通信方式。

综上,低功耗的定制数据处理模块、低功耗多功能集成传感模块与低功耗无线通信技术的同时实现是智能灰尘技术难点之一.受到系统体积、供电电压与供电电流的限制,必须有针对性地对通信模块进行功能设计、电路设计、天线设计,并完成加工与系统集成,才有可能实现通信模块与系统资源的高效匹配,实现低功耗无线通信的目的.

5.3 MEMS 一体化设计与仿真技术

虽然智能灰尘系统中的每一个器件都有其对应的设计和仿真方法.但是因为整个系统的组成部件众多、结构功能复杂,而且需要遵循“架构层次化”、“结构模块化”、“接口规范化”的实用化设计准则,有必要深入研究一体化设计与加工方法.

具体而言,对智能灰尘系统进行一体化的功能布局、结构设计、加工工艺设计、电气连接设计,并对系统进行力、热、电磁及功能仿真,不仅可以为系统研制和应用提供依据,还有对后续的微加工过程有一定指导意义.因此,必须 MEMS 工艺的特点,在系统层面对微小数据核心、微型超低功耗射频通信模块、微型 MEMS 复合能源模块、声音、温度、振动等传感器部件进行一体化设计与仿真才能够提高设计效率,并且确保智能灰尘系统最终的性能符合要求.

6 结论

自从 1998 年美国加州大学伯克利分校的研究小组开始对智能灰尘技术进行探索以来,智能灰尘系统在科学研究、目标定位、环境传感等领域得到了广泛的应用.时至今日,虽然研究人员已经取得了很多阶段性成果,但是智能灰尘的技术水平仍然没有达到 Pister 教授最初提出的目标,有很多核心技术难题有待解决.目前,包括美国的密歇根大学、中国的清华大学等研究单位都在开展智能灰尘系统技术的研究.本文综述了智能灰尘的基本概念、应用领域和模块化设计方法;进一步分析了智能灰尘技术的三个发展阶段,归纳了每一个发展阶段的主要特点和技术路线,并对即将到了的实用化发展阶段进行了有根据的预测;针对智能灰尘相关技术的发展现状进行了总结;最后,本文指出了智能灰尘技术发展面临的三个关键问题,包括具有实用能力的复合微能源系统,低功耗的数据处理和无线通信技术,以及适用于智能灰尘的一体化设计与仿真技术.解决这些问题,将极大地促进智能灰尘技术的进步,并为智能灰尘的实用化奠定坚实的基础.

参考文献

[1] Pister K S J. Smart Dust[OL]. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/presentations/dust-annot/index.htm>

- [2] Pister K S J. Smart Dust[OL]. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/SmartDustBAA97-43-Abstract.pdf>
- [3] Patil P, Vidya H, Patil S, et al. Wireless sensor network for precision agriculture [A]. 2011 Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN 2011)[C]. Piscataway: IEEE, 2011. 763 – 766.
- [4] Lee C H. Wireless sensor network for precision agriculture [D]. Malaysia: Universiti Tunku Abdul Rahman, 2011.
- [5] Chris Edwards. Smart Dust [J]. Engineering & Technology, 2012, 7(6): 74 – 77.
- [6] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1 – 7.
CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, et al. Survey on Smart Grid Technology [J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1 – 7. (in Chinese)
- [7] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1 – 8.
YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart Grid and Its Implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1 – 8. (in Chinese)
- [8] Paprotny I, Leland E, Sherman C, et al. Self-powered MEMS sensor module for measuring electrical quantities in residential, commercial, distribution and transmission power systems [A]. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010-Proceedings [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2010. 4159 – 4164.
- [9] Jenny Hope, Claire Bates. On sale, smart pill with 'edible microchip' that tells you and your doctor when the next dose is due [OL]. <http://www.dailymail.co.uk/health/article-2087275/New-smart-pill-tells-patients-dose-due.html>
- [10] 宋含. 心电 Holter 系统的无线数据传输设计 [D]. 湖南: 中南大学, 2009.
- [11] Paul Eng. Smart and Tiny Forest Fire Detectors [OL]. <http://abcnews.go.com/Technology/CuttingEdge/story?id=97905>
- [12] Kovalev A E, Bray M G, Hernandez-Pagan E A, et al. Smart dust infrared sensors for standoff explosives detection [A]. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering [C]. Bellingham: SPIE, 2009. 73041A1-73041A8.
- [13] Farshchi S, Nuyujukian P H, Pesterev A, et al. A tinyos-based wireless neural sensing, archiving, and hosting system [A]. 2005 2nd International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering [C]. Piscataway: IEEE, 2005. 671 – 674.
- [14] Obeid I, Nicolesis M A L, Wolf P D. A multichannel telemetry system for single unit neural recordings [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2004, 133(1): 33 – 38.
- [15] Mohseni P, Najafi K. A battery-powered 8-channel wireless FM IC for biopotential recording applications [A]. 2005 IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Piscataway:

- IEEE, 2005. 560 – 617.
- [16] Farshchi S, Mody I, Judy J W. A TinyOS-based wireless neural interface[A]. Conference Proceedings. 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society[C]. Piscataway: IEEE, 2004. 4334 – 4337.
- [17] Farshchi S, Nuyujukian P H, Pesterev A, et al. A TinyOS-enabled MICA2-Based Wireless neural interface[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53 (7): 1416 – 1424.
- [18] Kumagai J. Life of birds [wireless sensor network for bird study][J]. IEEE Spectrum, 2004, 41(4): 42 – 49.
- [19] Vullers R J M, van Schaijk R, Doms I, et al. Micropower energy harvesting[J]. Solid-State Electronics, 2009, 53(7): 684 – 693.
- [20] 王日君, 张进生, 张明勤, 等. 产品模块化设计中接口信息模型研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 226 – 229.
Wang Rijun, Zhang Jinsheng, Zhang Mingqin, et al. Interface Information Model of Modular Design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 226 – 229. (in Chinese)
- [21] 樊陈, 倪益民, 窦仁晖, 等. 智能变电站顺序控制功能模块化设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 67 – 71.
Fan Chen, Ni Yimin, Dou Renhui, et al. Modularization design for sequence control function in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 67 – 71. (in Chinese)
- [22] 侯亮, 唐任仲, 徐燕申. 产品模块化设计理论, 技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 56 – 61.
Hou Liang, Tang Renzhong, Xu Yanshen. Review of theory, key technologies and its application of modular product design [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(1): 56 – 61. (in Chinese)
- [23] 童时中. 模块化原理设计方法及应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [24] Ulrich K. Fundamentals of product modularity[M]. Berlin: Springer Netherlands, 1994.
- [25] Hollar S E A. Cots dust[D]. America: University of California, Berkeley, 2000.
- [26] Levis P, Madden S, Polastre J, et al. TinyOS: An operating system for sensor[M]//Emile Aarts, Reiner Wichert. Ambient intelligence. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 115 – 148.
- [27] Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Cory Sharp, et al. The Mote Revolution: Low Power Wireless Sensor Network Devices [OL]. webs. cs. berkeley. edu/papers/hotchips-2004-motes. ppt
- [28] Chen G, Fojtik M, Kim D, et al. Millimeter-scale nearly perpetual sensor system with stacked battery and solar cells[A]. Digest of Technical Papers-IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2010. 288 – 289.
- [29] G. Chen, H. Ghaed, R. Haque, et al. A cubic-millimeter energy-autonomous wireless intraocular pressure monitor[A]. 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Piscataway: IEEE, 2011. 310 – 311.
- [30] Lee Y, Kim G, Bang S, et al. A modular 1mm³ die-stacked sensing platform with optical communication and multi-modal energy harvesting[A]. Digest of Technical Papers-IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2012. 402 – 404.
- [31] A. Nieder. Miniature stereo radio transmitter for simultaneous recording of multiple single-neuron signals from behaving owls [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2000, 101(2): 157 – 164.
- [32] Irazoqui-Pastor, I. Mody, and J. W. Judy. Transcutaneous RF-powered neural recording device [A]. Conference Proceedings. Second Joint EMBS-BMES Conference 2002. 24th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society [C]. Piscataway: IEEE, 2002. 2105 – 2106.
- [33] P. Mohseni and K. Najafi. A wireless FM multichannel microsystem for biomedical neural recording applications [A]. 2003 Southwest Symposium on Mixed-Signal Design [C]. Piscataway: IEEE, 2003. 217 – 222.
- [34] I. Obeid, M. A. L. Nicoletis, P. D. Wolf. A multichannel telemetry system for single unit neural recordings [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2004, 133(1 – 2): 123 – 135.
- [35] Yang B, Shao X, Balzano Q, et al. 916 MHz F-Inverted Compact Antenna (FICA) for Highly Integrated Transceivers [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009(8): 181 – 184.
- [36] Yang B. Ultra Small Antenna and Low Power Receiver for Smart Dust Wireless Sensor Networks [D]. America: University of Maryland, 2009.
- [37] Jin P, Lin C C, Ziolkowski R W. Multifunctional, electrically small, planar near-field resonant parasitic antennas [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012(11): 200 – 204.
- [38] Ziolkowski R W, Jin P, Lin C C. Planar, multi-band, linear and circular polarized, electrically small, near field resonant parasitic antennas and their smart dust applications [A]. 2011 International Workshop on Antenna Technology (iWAT 2011). Small Antennas, Novel Structures and Innovative Metamaterials [C]. Piscataway: IEEE, 2011. 21 – 24.
- [39] Zhou L, Pister K S J, Kahn J M. Assembled corner-cube retroreflector quadruplet [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems

- (MEMS)[C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2002. 556 – 559.
- [40] Kahn J M, Katz R H, Pister K S J. Next century challenges: mobile networking for “Smart Dust”[A]. MobiCom’99. Proceedings of Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. New York: ACM, 1999. 271 – 278.
- [41] Brett A. Warneke, Kristofer S. J. Pister. Exploring the Limits of System Integration with Smart Dust[A]. 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition [C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2002. 621 – 625.
- [42] Zhu X, Hsu V S, Kahn J M. Optical modeling of MEMS corner cube retroreflectors with misalignment and nonflatness[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(1): 26 – 32.
- [43] O’Brien D, Liu J, Faulkner G, et al. Design and implementation of optical wireless communications with optically powered smart dust motes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1646 – 1653.
- [44] O’Brien D. Architectures for future sensor networks[A]. 2013 IEEE Photonics Conference [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013. 505 – 506.
- [45] D. C. O’Brien, S. Sivathanan. Optical wireless sensor networks,” in Advanced Optical Wireless Communication Systems[M]//Shlomi Amon, John Barry, George Karagiannidis, et al. Advanced Optical Wireless Communication Systems. England: Cambridge University Press, 2011. 369 – 387.
- [46] S. Sivathanan and D. O’Brien. Radio Frequency/Free Space Optical and Radio Frequency-only Wireless Sensor Networks: A Comparative Study of Performance[J]. IETE Journal of Research, 2010, 56(1): 52 – 61.
- [47] Agbossou A, Zhang Q, Sebald G, et al. Solar micro-energy harvesting based on thermoelectric and latent heat effects. Part I: Theoretical analysis[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 163(1): 277 – 283.
- [48] Zhang Q, Agbossou A, Feng Z, et al. Solar micro-energy harvesting based on thermoelectric and latent heat effects. Part II: Experimental analysis[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 163(1): 284 – 290.
- [49] Zhang Y, He H, Yuan Z, et al. Effect of design and operating parameters on dynamic response of a micro direct methanol fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(3): 2230 – 2236.
- [50] Yen T T, Hirasawa T, Wright P K, et al. Corrugated aluminum nitride energy harvesters for high energy conversion effectiveness[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(8): 085037.
- [51] 唐刚. 基于压电厚膜的 MEMS 振动能量采集器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- Tang Gang. Research on MEMS energy harvester based on piezoelectric thick film. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [52] Wu Y, Linnartz J P, Gao H, et al. Modeling of RF energy scavenging for batteryless wireless sensors with low input power[A]. 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C]. Piscataway: IEEE, 2013. 527 – 531.
- [53] Liu J, Zhou Y, Faulkner G E, et al. Optical receiver front end for optically powered smart dust[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications (2014), DOI: 10.1002/cta.1974.
- [54] Scott M D, Boser B E, Pister K S J. An ultralow-energy ADC for smart dust[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(7): 1123 – 1129.
- [55] Manyam V N, Chhetri D, Wikner J J. Clockless asynchronous delta modulator based ADC for smart dust applications[A]. 2011 IEEE/IFIP 19th International Conference on VLSI and System-on-Chip [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2011. 331 – 336.
- [56] Roozeboom C L, Sim J Y, Wickeraad D, et al. Multi-functional integrated sensors for the environment[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)[C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2012. 144 – 147.
- [57] Roozeboom C L, Hopcroft M A, Smith W S, et al. Integrated Multifunctional Environmental Sensors[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22(3): 779 – 793.
- [58] 杜冬梅, 何青, 张志. 无线传感器网络能量收集技术分析[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(7): 430 – 433.
- DU Dong-mei, HE Qing, ZHANG Zhi. Technique Analysis of Energy Harvesting for Wireless Sensor Network[J]. Micro-nano-electronic Technology, 2007, 44(7): 430 – 433. (in Chinese)
- [59] Gao, Yong-Feng, Zhang, Gao-Fei, Wang, Xiao-Feng, et al. A miniature composite energy harvesting system for wireless sensor nodes [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 10(4): 327 – 331.
- [60] 徐剑鸣, 康龙云, 温懋勤, 等. 电动汽车复合能源系统设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 60 – 64.
- XU Jianming, Kang Longyun, Wen Maoqin, et al. Design of Hybrid Power System of Electric Vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 60 – 64. (in Chinese)
- [61] Crossbow Technology. Mica2 [OL]. <http://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>
- [62] Ing. D. Brunelli. An Overview on Wireless Sensor Networks [OL]. <http://www-micrel.deis.unibo.it/sitonew/research/>

Ami/doc/wsnAccademicheCommerciali.pdf

- [63] Crossbow Technology. Mica2Dot [OL]. <http://www.eol.u-car.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2dot.pdf>
- [64] Polastre J, Szewczyk R, Culler D. Telos: enabling ultra-low power wireless research [A]. Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics

Engineers Computer Society, 2005. 364 – 369.

- [65] J. Polastre. nterfacing Telos (rev B) to 51-pin Sensor Boards [OL]. <http://www.tinyos.net/hardware/telos/telos-legacy-adapter.pdf>
- [66] Crossbow Technology. Mica [OL]. <http://web.sensor-ic.com:8000/jpcgqz/download/Crossbow/%E6%97%A0%E7%BA%BF%E4%BC%A0%E6%84%9F%E5%99%A8%E7%BD%91%E7%BB%9C/MICA.pdf>

作者简介



张紫辰 男, 1983 年 10 月出生, 北京市人, 2011 年剑桥大学电气工程系获得博士学位, 目前是清华大学精密仪器系博士后. 主要从事 MEMS 智能传感器集成技术及硅基液晶器件技术等研究工作.

E-mail: zz241@tsinghua.edu.cn



王建中 男, 1974 年 11 月出生, 江苏如东人. 博士研究生. 1996 年、2007 年分别在南京大学、华中科技大学获理学学士、工学硕士. 现为清华大学精密仪器系博士研究生, 主要从事微传感系统设计和仿真等方面的研究工作.

E-mail: jianzhong-w@163.com



董恺琛 男, 1989 年 6 月出生, 黑龙江哈尔滨人. 2012 年在清华大学获得学士学位, 现为清华大学精密仪器系博士研究生. 主要从事微机电系统技术方面的研究工作.

E-mail: dk0622@126.com



赵嘉昊 男, 1977 年 11 月出生, 天津市人. 2006 年清华大学材料系获得博士学位, 现为清华大学精密仪器系副教授. 主要从事 MEMS 技术、智能微系统技术等研究工作.

E-mail: falxon@tsinghua.edu.cn



张益源 男, 1991 年 5 月出生, 陕西宝鸡人. 博士研究生. 2013 年在清华大学获得学士学位. 现为清华大学精密仪器系博士研究生. 主要从事智能微系统方面的研究工作.

E-mail: zyy91507@126.com



尤政 男, 1963 年 12 月出生, 江苏扬州人. 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 长江学者. 现为清华大学机械工程学院院长、清华大学精密仪器系主任, 主要研究领域为微米/纳米技术、微光机电系统集成、微纳卫星技术.

E-mail: yz-dpi@tsinghua.edu.cn