

航天领域微纳米技术发展前景

张洪立 张绍武

(中国海鹰机电集团 北京 100074)

文 摘 介绍了微纳米技术的基本含义和国内外主要进展,讨论了该技术在航天技术领域的应用情况和发展趋势,提出了我国发展该项技术应重视的主要问题。

关键词 微机电技术,纳米技术,航天,微卫星,惯性技术

Development of MEMS and Nano-technology in Aerospace

Zhang Hongli Zhang Shaowu

(China Hawk-eagle Group Beijing 100074)

Abstract Basic concept and development of micro electro mechanical system (MEMS) and nano-technology is introduced. Applications and development of this technology in aerospace industry are discussed and several issues are presented with emphasis on developing this technology.

Key words MEMS ,Nano-technology ,Aerospace ,Micro-satellite ,Inertial technology

1 概述

1.1 微米技术

微米技术主要指微机械或微机电技术 (Micro Electro Mechanical Systems ,MEMS)^[1,2],是在微电子工艺的基础上发展起来的多学科交叉的前沿研究领域,涉及电子工程、机械工程、材料工程、物理学、化学以及生物医学等学科与技术^[3~5]。

MEMS从广义上包含了毫米和微米尺度的机械,并非单纯宏观机械的微小化,而是指可以批量制作的,集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路,直至接口、通讯和电源等于一体的微型机电系统,通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统,开辟一个新的科学技术领域和产业;它们可完成大尺寸机电系统所不能完成的任务,例如,尖端尺寸为 $5\mu\text{m}$ 的微型摄子可以夹

起一个红血球;在 100mm 尺寸范围内可以造一台复杂的质谱仪等。

MEMS的应用领域有生物医学、航空航天、国防、工业、农业、交通、信息以及家庭等,诸如细胞操作、精细外科手术、排除人体血管的血栓、定位定量施药,微卫星中的微惯导装置、微型仪表,分布式战场传感器网络,狭窄空间及特殊工况下的维修微机器人,农业基因工程,汽车自动驾驶及安全保障系统,袖珍式通讯和计算设备等。

1.2 纳米技术

目前的微米级信息技术(线宽 $0.13\mu\text{m}$)10年后会受到物理局限而走到尽头。器件尺度小于 100nm 时,量子效应会发挥重要作用,需要用全新的理论和方法来构建器件,这将产生巨大影响:计算速度更快,存储密度更高,能耗大大减少,会突破物理瓶

收稿日期:2001-09-03;修回日期:2002-01-07

张洪立,1966年出生,高级工程师,主要从事惯性仪表制造及复合材料技术研究工作
宇航材料工艺 2002年 第5期

颈,带动一场新的工业革命,该技术的发展也会对生命技术、环境、能源等等很多方面都会产生重大影响。纳米技术的标志是纳米机器的出现,预计20年后能够实现。

2 国内外进展

2.1 MEMS 技术

(1) 微结构的理论研究

从探索微型机构基础技术中,发现了与常规尺寸机械有许多差异的特征需要从理论上加以研究。例如,力的尺寸效应和表面效应。在微小尺寸领域,与特征尺寸 L 的高次方成比例的惯性力、电磁力 (L^3) 等的作用相对减小,而与尺寸的低次方成比例的粘性力、弹性力 (L^2)、表面张力 (L^1)、静电力 (L^0) 等的作用相对增大,这是微型机械常用静电力制动的理由。随着尺寸的减小,表面积 (L^2) 与体积 (L^3) 之比相对增大,因而热传导、化学反应等加速;表面间的摩擦阻力显著增大。在微流体力学中,美国、日本的初步实验表明,当微管道直径小至微米量级,液体运动特性会偏离 Navier-Stokes 方程。

(2) 微系统建模与仿真

微系统建模与仿真需考虑的因素较多且复杂,如利用有限元和静电边界条件分析在静电作用下机械结构的运动特性,利用有限元进行微激磁器的磁场分析,微悬臂阀在流体中的静动态特性及流体特性分析,非理想状态(如有应力、弯曲、过腐蚀、对准不佳等)的谐振器谐振频率分析、微型构件力学和热学状态模拟、微电路设计仿真等。

(3) 微细加工技术^[6]

微型机械对高深宽比的三维微细结构的需求,除从硅平面工艺发展了体硅工艺外,20世纪80年代末期以来在 LIGA(同步光源刻蚀+电铸+制模)加工、准 LIGA 加工、微细电火花加工、超声波加工、等离子体加工、激光加工、离子束加工、电子束加工、快速成形等高深宽比三维微细加工工艺方面也取得了进展。

(4) 微细检测与装配

微细检测与装配主要采用光学放大测量(如光切法)和 SEM 法,装配技术则报道不多,主要有堆装、静电键合等。

(5) 微型元器件与微传感器

美国研制出转子直径为 50 μm 的静电电机,日

本研制出外径尺寸 2 mm 压电电机和 0.8 mm 电磁电机。美、日、德研制的微泵尺寸在厘米以下,输出量为每分钟微升至毫升量级。日本用切削加工和线切割方法研制出模数为 0.01 mm~0.03 mm 的微齿轮等。

微传感器包括微型物理量传感器、化学量传感器、光电传感器以及生物传感器等。其中微型压电传感器与加速度传感器已大规模生产,甚至制作出机电一体的集成传感器。美国 Northrop 公司批量生产的音叉式微硅陀螺随机漂移达到 10^9 h,过载达 10^2 g;Rockwell 公司 1993 年研制出石英晶体陀螺随机漂移达到 5^9 h,测量范围 100^9 s。美国 CSDL 公司开发出量程为 10^5 g 的炮弹用微加速度计^[7,8];德国 Karlsruhe 微技术研究所研制成功 2.6×10^4 g 的中精度振梁式加速度计。

(6) 微型机电系统

微系统中有构造简单的集成微系统,也有宏微结合的微机械系统,可以小到微型集成传感器,大到研制的微机器人和微米卫星。微量流体控制系统趋于成熟,有巨大产业前景的微型仪器(如微型光谱仪、液相和气相色谱仪、干涉仪、血样分析仪、血压计、微细外科作业器械、生物芯片以及微转镜显示系统等)正在开发之中。美国、德国已分别研制出用于炮弹和车辆导航的微惯性测量单元(MIMU)。国外精度为 5^9 h~ 10^9 h 的微陀螺和 10^{-4} g 的微加速度计已实现批量生产,用于战术导弹制导、卫星天线姿态稳定等,低精度仪表用于炮弹制导、汽车安全保护系统等^[9]。国外对 MEMS 的发展有不同重点:美国侧重军民两用技术,尤其是微导航系统;日本重点研究微机电医疗技术等。

我国开展 MEMS 研究起步于 20 世纪 80 年代,先后研制出静电、电压和电磁式的微电机、微泵与微阀、压电与形状记忆合金微夹钳以及微操作系统、生物芯片模型等,在基础理论(微运动学、微动力学、微摩擦学等)、基础工艺(IC、LIGA、EDM 和小机械加工等)及基础材料等方面也做了一些工作。建立了两个微加工基地(IC、LIGA)和一个项目研究中心。

清华大学、东南大学、哈尔滨工业大学等,开发出梁式微硅加速度计、微硅振动陀螺(轮式、双框架式及音叉式),清华大学采用进口元件研制出微惯性测量单元(MIMU)样机(80 mm × 80 mm × 80 mm,美

宇航材料工艺 2002 年 第 5 期

国达到 20 mm ×20 mm ×20 mm)。

2.2 纳米技术

纳米技术的基础是材料。目前国内外基本上是做成纳米粉体掺进其他物体中获得一些优异性能^[7]。我国现有十几条纳米生产线,大部分是生产具有抑菌、自洁能力的纳米粉体材料,有两家生产纳米金属粉。国内做出了最细、最长(0.5 nm ×20 mm)的纳米碳管,还可见做出强度和韧性都比原有的材料(如钢)强 10 倍以上而质量又轻的材料,将带来很多的工业应用和革命。如铝是制造航天器的基本材料,纳米铝强度提高很多,将大大减轻质量、节省燃料;纳米碳管具有优异的吸波及电性能,可用于武器隐形、电磁屏蔽、制成超级电池驱动车辆等。

日本利用 CO₂ 激光法研制出在毫米、厘米波段吸收性能良好的硅/碳/氮复合吸波剂^[1,2];法国研制出的钴镍纳米材料与绝缘层构成的复合结构吸收波段为 0.1 GHz ~ 18 GHz^[3];美国利用纳米石墨对雷达波的吸收率达到 99 %^[4]。日本大阪煤气公司兴建了一座日产 1 kg 碳纳米管的小型工厂,并开始向电子设备制造商和汽车制造商提供新一代显示器场发射所需电极材料和燃料电池所需的储氢材料,标志着日本的碳纳米管研究已经从实验室进入实际应用。

哈尔滨工业大学、成都电子科技大学等研制的纳米粒度复合吸收剂及金属粉吸收波段达到了 10² GHz ~ 10⁴ GHz 及 2 GHz ~ 18 GHz^[5]。碳纳米管的批量制备方面,中科院成都化学所的沸腾床催化裂解法在碳纳米管的批量制备上有了较大突破,采用移动床催化裂解反应器可实现设计尺寸碳纳米管的小批量连续制造。现在用扫描探针技术可对原子和分子进行观测和操纵,但目前效率很低,无法大量地用于制造过程,仅限于研究。

纳米器件制造途径有:(1)用现有的微电子技术不断地缩小器件;(2)通过化学和生物学方法研制分子计算机、DNA 计算机,用分子开关、DNA 开关来进行计算;(3)量子的方法,量子器件通过量子力学进行计算和设计,由量子元件组成。

3 微纳米技术对航天领域的影响

如同其他高技术一样,微纳米技术将首先应用于航天工业等领域。在飞机和载人航天器(如飞船、空间站和航天飞机等)上应用的各种传感器数量很

大,若采用微型集成传感器,体积、质量、耗电功率将减少很多。为提高可靠性,飞机上的大气数据系统和惯性导航系统都采用双套。航天飞机上的大气数据传感器采用 4 套,惯性导航系统用 3 套。未来采用 MEMS 相应的系统,仪表设备舱都可做他用。对航天器来说,仪表系统的体积质量大大减少后,效益将非常可观。

MEMS 技术首先将促进航天器内传感器的微型化、节能、降低成本和大幅度提高系统可靠性(单晶、多晶硅和石英材料微观缺陷很少,品质因数很高),如用于运载火箭和导弹上的微型温度传感器、压力计等,由于体积和能耗很小,可大量分布,使系统进行更精确的控制(欧洲阿里安娜火箭已采用);微机电惯性仪表将推动惯导技术一场新的革命。根据文献[7,8],在 2005 年后,微机电惯性仪表将应用于短程导弹的自动驾驶仪和捷联惯导系统并逐步占领战术导弹市场。

微机电惯性仪表体积为立方毫米级,质量为数克,能耗一般小于 2 W,过载大(一般为 10³ g 以上),启动时间约 1 s,成本低(批量生产时可控制在 10 \$ 以内,工作寿命长达 10⁵ h,易于实现数字化和智能化等优点,可进行微惯性系统集成(陀螺、加速度计、控制线路和计算机部件等全集成,体积可控制在 20 mm ×20 mm ×5 mm 量级,质量仅 5 g)。

现有战术导弹用的捷联惯性系统(400 mm ×250 mm ×200 mm,质量 15 kg)在上述指标上远远落后,成本高,体积、质量、能耗大得多,寿命不超过 100 h。不仅如此,现有惯性系统还无法装备微型飞机、微卫星等。目前用于小卫星的光纤陀螺惯性测量系统体积、质量大且寿命短,采用 MIMU 后可减轻质量 10 kg,可靠性大大提高,极大降低发射成本。而且在小、微卫星上可采用冗余式惯性测量,装置多套 MIMU,提高其可靠性。

MEMS 技术可直接用于纳米卫星上,集 GPS + MIMU(全球定位系统 + 微惯性系统)、微型摄影器、信息接收与发射、数据处理、姿态控制等微装置为一体的全硅型卫星,质量仅几百克。大量分布于外太空的低成本纳米卫星,由于实现了全方位观察组网,可更精确及时地完成海洋、地貌及气象监测。美国已成功发射了此类纳米卫星。

纳米技术的发展对航天领域的影响更大:纳米

材料具有极高的力学性能,节能节材,使航天器质量大大降低,成本显著下降;纳米材料具有的超强吸波能力可用于导弹、飞机和卫星的隐身涂料,大大提高武器系统的生存能力;纳米材料的优异导电特性可用于高质量电磁屏蔽、制做电路部件(电机、导线等)及用于卫星、导弹及火箭的高性能电池等;纳米加工技术将使信息传输、处理和存储能力产生全新革命,对航天技术具有深远影响。可以预见,未来航天器体积小而功能密度大,效率高,成本低,可大量使用。

4 我国航天领域微纳米技术发展方向

(1) 微传感器

国内已研制出 $1 \times 10^{-3} g$ 的加速度计,但工艺不成熟,微硅陀螺则刚研制出性能不稳定的样机。东南大学针对炮弹用大动态微惯性仪表进行了深入研究。以此为基础进行协作和工程研究,可望在“十五”后实现在航天器上应用。

(2) 微机电系统

微机电惯性测量系统将应用于制导炮弹及战术导弹、微卫星、车辆导航、机器人、工业设备姿态稳定等领域。集微导航、微通讯及微观测系统于一体的纳米卫星是一个很好的发展方向,可大量分布于太空执行通讯、地貌观测、军事侦察等任务。

(3) 隐身技术

纳米吸波剂具有吸收频带宽、兼容性好、质量轻及厚度薄等特点,可大幅度提高导弹突防能力,有良好的发展前景,是较可能首先进入工程应用的技术之

一。

(4) 电磁屏蔽及高性能电池技术

纳米金属具有很高的屏蔽特性,如制成特定形状的产品,可用于高精度电子仪表的抗电磁干扰。目前国内纳米晶金属制备具备一定基础,应尽快进行产品研制;用碳纳米管作贮氢材料的小体积高效电池对火箭、卫星、导弹等产品总体性能提高有很大帮助。

参考文献

- 1 Suzuki M. Synthesis of silicon carbide-silicon nitride composite ultrafine particles using a CO₂ laser. J. Am. Ceram. Soc., 1993; (5): 195
- 2 Suzuk M. Preparation of Sic ultrafine particles by using a CO₂ laser. Seramikkusu Ronbunshi, 1989; (4): 972
- 3 张卫东,冯小云. 国外隐身材料研究进展. 宇航材料工艺, 2000; (3): 28
- 4 张立德,牟季美. 纳米材料科学. 沈阳:辽宁科技出版社, 1994: 25
- 5 张卫东,吴玲芝. 纳米雷达隐身材料研究进展. 宇航材料工艺, 2001; (3): 35 ~ 36
- 6 苑伟政,马炳和. 微机械与微加工技术. 西安:西北工业大学出版社, 1998: 161 ~ 236
- 7 白春礼等. 创新者的报告. 北京:科学出版社, 2000: 35 ~ 106
- 8 Elwell J M. Inertial sensor for commercial and military applications. Institute of Navigation, 1993: 380 ~ 385
- 9 Sitomer J. Silicon micromachined IMU integrated electronics development. Institute of Navigation, 1993: 620 ~ 630

(编辑 李洪泉)

铁基合金调幅分解研究

本成果首次在 10Ni 和 18Ni 马氏体时效钢时效组织中发现了调幅组织,并研究证实了马氏体时效钢中存在调幅分解。首次提出该合金时效初期首先发生调幅分解,均匀相分解成富 Fe 相和富 Mo 相,在此基础上富 Mo 区以原位形核方式析出第二相金属间化合物来强化合金。

本成果开拓了调幅分解相变研究的新领域,为调幅分解特征的研究提供了新途径;丰富了铁基合金调幅分解理论,具有重要的学术价值。为充分挖掘该合金强韧性潜力提供了新途径,对搞清该合金时效强化机理、综合性能的调整具有重要的应用价值。

· 李连清 ·