

专栏

编者按：“2016 年先进导航、制导与控制技术研讨会”成功举行。会议得到了国内从事空天防御的军方、军工单位、科研院所、高校等的积极响应和大力支持，共征集到论文 40 余篇，经过专家评审选出优秀论文 10 余篇进行了会议交流。《现代防御技术》特开辟专栏陆续刊登此次会议的优秀论文，供读者参考。

MEMS 技术发展现状及未来发展趋势^{*}

秦雷 谢晓瑛 李君龙

(北京电子工程总体研究所 北京 100854)

摘要：MEMS 技术作为一门多学科高度交叉的前沿学科领域，在近些年得到迅速发展，在航空、航天、生物技术等领域都有广泛的应用。该技术可实现优质高产低耗，大大提高系统的可靠性和智能化功能，已经成为电子领域活跃的发展方向之一。论述了 MEMS 微系统技术的重要性，从微感知与微控制、微流动控制、微惯性测量装置、微型飞行器、可穿戴和可植入式装备、纳机电谐振器、扫描隧道显微镜等七大方面分别论述 MEMS 微系统技术发展现状，并对该技术进行了展望，以期对未来发展并应用该技术具有借鉴意义。

关键词：微机电系统；微感知；微控制；微型飞行器；纳机电系统；惯性测量装置

doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2017.04.001

中图分类号: TJ765.1; TP271+.4 文献标志码: A 文章编号: 1009-086X(2017)-04-0001-05

Development Status and Future Development Trend of MEMS Technology

QIN Lei, XIE Xiao-ying, LI Jun-long

(Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: As a multidisciplinary integration forward field, micro-electro-mechanical system (MEMS) technology has been rapidly developed in recent years. It has been widely used in many fields such as aviation, aerospace and biological technology. The technology can achieve high quality, high yield and low cost, has greatly improved the reliability of system and intelligent function and has become one of active development directions in the electronic field. The importance of MEMS technology is discussed. Seven aspects including micro perception and micro control, micro flow control, micro inertial measurement unit, micro air vehicle (MAV), wearable and implantable equipment, nano-electro-mechanical resonator, scanning tunneling microscope have been discussed to explore the development status of MEMS technology respectively. The future development trend of MEMS technology is given, which has certain

* 收稿日期: 2016-08-30; 修回日期: 2017-04-12

基金项目: 有

作者简介: 秦雷 (1987-) 男, 吉林长春人。工程师, 博士, 主要研究方向为飞行器导航、制导与控制。

通信地址: 100854 北京市 142 信箱 30 分箱 E-mail: 351879610@qq.com

reference significance to the future development and application of the technology.

Key words: micro-electro-mechanical system(MEMS) ; micro perception; micro control; micro air vehicle(MAV) ; nano-electro-mechanical system(NEMS) ; inertial measurement unit(IMU)

0 引言

微系统^[1-4]对国防科技的发展有着革命性的影响,是未来增强国防实力的重要支撑技术。随着飞行器多功能化、微型化、结构智能化以及无人机、微型飞行器的发展,未来航空机载设备和武器系统将更加依赖高集成度的封装器件,并将广泛采用可以执行各种功能的微系统器件来改善其性能,实现轻量化、小型化、精确化。

微系统是指特征尺度在微米和纳米 2 个邻接微小领域,以集成电路加工工艺派生发展,融入微机械、微光学、微能源、微流动等各种技术,并采用先进封装工艺,实现功能集成的综合性前沿技术。美国国防部先进研究项目局(defense advanced research projects agency, DARPA) 将微系统技术列为近 10 年来大力发展的现代前沿技术,并资助了大量微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS) 项目,大力发展小型惯性测量装置、微全分析系统、RF 传感器、网络传感器、无人值守传感器等项目,应用于导弹、单兵携带、战场实时监测、毒气以及细菌检测、武器安全、保险和引信、弹道修正、敌我识别系统等方面,在军用设备中应用日渐广泛。

1 MEMS 微系统技术重要性

1.1 MEMS 微系统技术是未来实现导弹小型化的关键技术

当前,在导弹内部,电子器件占据了很大部分的空间和质量,包括导引头、惯性测量装置、弹上计算机、指令应答机等。这些功能模块往往来自于不同的厂家,在导弹组装时集成在一起。这些功能模块内部各自成一个系统,往往包含相同的组件,如电池等,从而带来了导弹质量的增加。另外,导弹中多个功能模块之间相互独立使得电路板和芯片封装体的数量较多,占据了大量空间和质量。

微系统技术中的系统级封装(system in a package, SiP) 技术是解决导弹功能模块分立,降低电子器件体积和质量的重要途径。系统级封装是将包

括多块功能芯片集成在一个封装体内,从而实现一个基本完整的功能的技术。通过 SiP 技术可以将当前导弹中各功能模块中采用的多块芯片封装在一个封装体内,从而提高封装效率。此外,采用了功能集成后,原功能模块内部的相同组件可以缩减,例如电源可以采用弹上统一的电源供电,从而对减小体积和质量具有重要意义。

片上系统(system on chip, SoC) 是微系统技术发展的另一重要方向,该技术将不同功能的电路设计和制造在一块芯片上,芯片本身即能完成原本需要多块芯片完成的功能。在未来导弹上,通过芯片处理功能的整合,缩减芯片的数目同样能够减小电子部件的体积和质量。

另外,利用微系统技术发展的微惯性测量装置、原子钟等部件本身即具有体积小、成本低、质量轻、抗振动、抗冲击能力强和集成化程度高等优点,对于实现导弹小型化发展具有重要意义。国外研制的部分微型惯性测量装置已经具有战术级精度。例如,美国诺斯罗普·格鲁曼公司制造的 SiACTM 加速度计,具有战术和导航 2 种级别的精度,已经在“先进中空空空导弹”、“制导多管火箭系统”以及指挥直升机上得到应用。

1.2 MEMS 微系统技术是未来实现导弹性能提升的关键技术

导弹的作战空域和机动性能很大程度上取决于推进剂比冲和导弹携带燃料的质量。在电子部件占据较大体积和质量的情况下,导弹携带燃料的质量被压缩。通过微系统技术缩减电子部件质量,为燃料存储留出空间,可以很大程度拓展导弹的性能。另外,燃料的研制是一项长周期的研究任务,且其性能在地面验证困难,相反,电子元器件性能在地面较容易验证,因此通过微系统技术,压缩电子部件质量,是未来提升导弹性能的重要技术途径。

此外,在当前导弹内部各模块相互独立的情况下,各部件之间采用总线实现信息交互,难免存在一定的延迟,对导弹的性能带来了不利的影响。在实现功能整合,并采用系统级封装或片上系统技术后,信

息传输长度大大缩减,延迟将显著降低。延迟降低对未来导弹对付高速高机动目标具有重要的意义。

1.3 MEMS 微系统技术是未来实现导弹智能化感知的关键技术

导弹全寿命周期健康状态监测能够为军队作战和战备提供大量的信息支持,同时也能够为了了解导弹在全寿命周期内的性能变化提供数据,从而能够促进设计改进,提升导弹性能提供参考。微系统技术能够为此提供技术支撑。微系统是微纳尺度元件,在微测量和微感知方向具有较大的优势。如在燃料箱内部安装微压力传感器可以了解该部件的状态。在导弹的一些关键部位可以安装微应力传感器,了解该部位的健康状况。

微系统的另一个优势是其低功耗的特点,使其可以在较小的能量消耗情况下长时间运行,从而为长期监测感知导弹健康信息提供了可能性。

总的来说,微系统技术^[5]通过将多种先进技术高度融合,实现将传统各自独立的信息获取、处理、命令执行等系统融为一体,能够促进导弹微型化和智能化,对于加速导弹系统性能的全面提高,有效降低尺寸、重量与成本等具有革命性的影响。

2 MEMS 微系统技术发展现状

2.1 微感知与微控制

微感知^[6-11]主要是指利用微传感器对环境或流体的压力、速度、温度等进行感知,微控制主要是指利用微致动器实现微喷射、微执行等局部或微位移的控制任务。微传感与微控制目前最主要的应用是微流动控制和健康与使用状态监控,在飞机、直升机、无人机、发动机上都有案例,且得到了 DARPA 等机构的广泛支持。

2.2 微流动控制

微流体力学^[12-17]是指特征尺度在 $1\ \mu\text{m} \sim 1\ \text{mm}$ 量级的流体流动,研究处理极小量流体的器件的原理、设计、制作和应用的工程学科。这里,“微流体”可以有 4 种理解方式:“微”量流体的控制,例如微升、纳升,甚至是皮升;“微”尺寸的流体处理器件,例如尺寸在毫米量级的微型给药(剂量, dosage)系统;“微”功耗,例如可以控制流速达到 $100\ \text{L/min}$ 的功耗在毫瓦的微阀;“微”效应,例如毛细力在液体的传输中的利用,以及小尺度下的迅速的热交换

在增加化学反应产量的利用。

随着 MEMS 技术的发展,有能力制作微米尺度的结构,特别在微全分析系统(micro total analysis systems, μTAS)和芯片实验室(Lab on a chip)概念的提出以及生物技术的发展等需求牵引下,微流体控制技术得到了快速发展。目前具备处理极小量(μl , nL 乃至 pL 量级)流体技术,具有样品需用量少、反应时间短、功耗低、微型化、集成度高等优点。未来,可以想见微流体(microfluidics)是 MEMS 中最重要、最活跃和最具市场潜力的分支之一,目前已经商业化的 MEMS 产品中,微流体器件占了大多数,如喷墨打印头和生物芯片等。

2.3 微惯性测量装置

惯性测量装置(inertial measurement unit, IMU)^[18-22]一般由陀螺、加速度计和信号处理电路等组成,目前正在向单芯片上集成,提供位置、高度和速率数据。目前 MEMS 加速度计的性能已经接近军用系统的要求, MEMS 器件巨大的成本优势、更小的尺寸与功率使它具有广泛的使用潜力。DARPA 资助了多项 MEMS IMU 的研究,比如 BAE 系统公司开发的海军增程制导弹药上的 MEMS IMU SiIMU02;空军曾进行将 MEMS IMU 集成进风修正弹药布散器的飞行验证。法国泰雷兹(Thales)航电公司开发了双差动石英谐振悬臂梁加速度计,用于法国赛峰集团的一款军用 IMU 中;泰雷兹还在开发硅微陀螺,使用大厚度绝缘体上硅和 DRIE 工艺。

DARPA 和 AFRL(美国空军研究实验室)共同资助美国 CMU(卡耐基梅隆大学)学院开发了 CMOS-MEMS 工艺用于 MEMS 加速度计和陀螺的制造。该工艺能够把传感器和电路集成在单个芯片上,实现常规 CMOS 工艺和 MEMS 微加工工艺的结合, MEMS 工艺可以在标准 CMOS 工艺之前(前 CMOS)、过程之中(中间 CMOS)、之后(后 CMOS)完成。CMU 学院开发了 2 种后 CMOS 工艺,薄膜 CMOS-MEMS 工艺和 DRIE CMOS-MEMS 工艺,后者将薄膜 CMOS-MEMS 工艺、德国 Bosch 公司先进硅刻蚀工艺(属于深硅刻蚀)和背面刻蚀结合起来,能针对特殊的设计进行工艺优化。

2.4 微型飞行器

微型飞行器(micro air vehicle, MAV)^[23-30]是美欧最先开始研究的一种未来新概念飞行器,通过在

微尺寸的飞行器中集成各种微任务载荷,或者利用功能结构一体化等技术,使其具有比无人机更好的狭小地区隐秘侦察与监视功能。MAV 主要包括固定翼、旋翼、扑翼 3 种布局,可以做到只有几厘米大小,且上面还要具备动力、能源、导航、传感、通信等系统,这对制造和集成提出了很高的要求,利用 MEMS 技术成为实现多功能微型化的首选。

2.5 可穿戴和可植入式设备

目前可穿戴式设备大量使用 MEMS 技术,主要在谷歌智能隐形眼镜、可穿戴显示、智能传感 T-Shirt、可穿戴织物、智能手环、脉搏传感器智、可穿戴太阳能电池、智能尿布大量应用。

可植入式器件是指埋置在生物体或人体内的器件,主要用来观察和测量生命体内生理生化参数的长期变化,诊断、治疗某些疾病,实现在生命体自然状态下体内的直接测量和控制功能,也可用来代替功能已丧失的器官。

可植入器件具有如下优点:实时测量、控制生理状态下的生理、生化参数;方便对器官、组织直接调控;治疗传统医学无法治愈的疾病等。美国 Purdue 大学肿瘤辅助治疗氧气发生器,针对糖尿病、青光眼等疾病发明了电化学微泵,2010 年美国南加州大学的 Ellis Meng 小组提出了一种可植入电化学给药。目前在压力传感器、人工耳蜗、眼压测试系统、人工视网膜植入得到广泛应用。

2.6 纳机电谐振器

谐振器在无线通信、高灵敏度生化传感器等领域具有重要应用;与 MEMS 谐振器相比,纳机电系统(nano-electro-mechanical system, NEMS)谐振器利用了纳米核心结构的尺度效应使器件性能获得了显著提升,通过谐振结构的等比例缩小,器件频率显著提高,甚至可以达到 GHz;具有超高频率、低能耗、高灵敏度等优点。美国 Connell 大学在纳机电谐振器方面有所突破,在碳纳米管与底电极之间加载交流电,相互之间就会有周期性变化的静电力作用,由碳纳米管位置变化导致电容发生变化。

2.7 扫描隧道显微镜

被誉为“通往微观世界的三扇门”之一的扫描隧道显微镜,是一种利用量子理论中的隧道效应探测物质表面结构的仪器,它于 1981 年由格德及海因里希在 IBM 位于瑞士苏黎世的苏黎世实验室发明,

它具有比同类原子力显微镜更加高的分辨率,在低温(4K)下可以利用探针尖端精确操纵原子。

3 结束语

目前微系统技术已经在各行各业得到了广泛的应用,带动军用及民用产业快速发展,助力相关产业转型升级。目前微系统已经逐渐从“三高”向“三微”方向转变,即从高精度、高速度、高质量向微型化、微细化、微纳化方向发展,可以预想未来有两大发展趋势:

(1) 执行器与传感器功能集成和一体化:包含结构集成、自感知执行器 2 个层次,具有减小体积、降低重量、结构紧凑、实现真正同位控制等优点,实现在器件的致动过程中提取出独立于任何执行器控制信号的待检测信号。

(2) 向物性型发展:新的功能材料和智能材料不断发展:未来非铅系列压电陶瓷、纳米压电材料,以 Cu-Al-Ni 为代表的多种形状记忆合金材料,超磁致伸缩材料,仿生-智能材料,以 Si, Ge 为代表的功能半导体材料将应用于微系统,成为促进微系统向“三微”方向转型的重要技术基础。

参考文献:

- [1] 韩颖. MEMS 航空微时代[J]. 航空兵器, 2013(5): 18-21.
HAN Ying. MEMS Era of Aviation[J]. Aero Weaponry, 2013(5): 18-21.
- [2] 文苏丽, 张冬青. MEMS 技术的弹载应用[J]. 战术导弹技术, 2012(4): 1-8.
WEN Su-li, ZHANG Dong-qing. Applications of MEMS Technology to Missile Systems[J]. Tactical Missile Technology, 2012(4): 1-8.
- [3] 任子西. MEMS 技术将会为战术导弹带来一场革命[J]. 战术导弹技术, 2010(1): 1-8.
REN Zi-xi. MEMS Technology will have Revolutionary Effect on Tactical Missiles[J]. Tactical Missile Technology, 2010(1): 1-8.
- [4] 张紫辰, 董恺琛. 基于 MEMS 技术的智能传感器系统[J]. 电子学报, 2015, 43(10): 2095-2109.
ZHANG Zi-chen, DONG Kai-chen. MEMS-Based Smart Sensing System[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10): 2095-2109.
- [5] 洪艳. 微小型智能导弹[J]. 战术导弹控制技术.

- 2010 27(3):24-30.
- HONG Yan. The Discuss about Design of Micro and Intelligent Missile[J]. Control Technology of Tactical Missile 2010 27(3):24-30.
- [6] 张冬至,胡国清. 微机电系统关键技术及其研究进展[J]. 压电与声光 2010 32(3):513-520.
- ZHANG Dong-zhi, HU Guo-qing. Key Technologies of Micro-Electromechanical System and Its Recent Progress[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics 2010 32(3):513-520.
- [7] 刘军营, 楮金奎, 朱向荣, 等. 微机电系统的发展[J]. 山东理工大学学报 2003 17(1):107-110.
- LIU Jun-ying, CHU Jin-kui, ZHU Xiang-rong, et al. Development of Micro Electromechanical System[J]. Journal of Shandong University of Technology 2003 17(1):107-110.
- [8] 陈丽洁, 史鑫, 栾剑, 等. 基于微光机电系统的微感知技术[J]. 中国电子科学研究院学报 2010 5(6):599-604.
- CHEN Li-jie, SHI Xin, LUAN Jian, et al. The Micro Perception Technology Based on Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology 2010 5(6):599-604.
- [9] 胡明朗, 魏瑞轩, 邹凌云. 微型飞行器的仿生感知与控制[J]. 传感器与微系统 2007 26(5):8-11.
- HU Ming-lang, WEI Rui-xuan, ZOU Ling-yun. Biomimetic Sensing and Control for Micro Air Vehicle[J]. Transducer and Microsystem Technologies 2007 26(5):8-11.
- [10] 陈卫, 杨忠, 夏玉亮, 等. MEMS 加速度传感器在微型特种机器人中的应用[J]. 传感器与微系统 2009 28(7):110-113.
- CHEN Wei, YANG Zhong, XIA Yu-liang, et al. Application of MEMS Accelerometer on Micro-Robots[J]. Transducer and Microsystem Technologies 2009 28(7):110-113.
- [11] SRINIVASAN M V. An Image Interpolation Technique for the Computation of Optic Flow and Egomotion[J]. Biological Cybernetics 1994 71(5):401-415.
- [12] WARSOP C. Active Flow Control Using MEMS[R]. RTOE N-AVT-105 2003.
- [13] XU Y. Flexible MEMS Skin Technology for Distributed Fluidic Sensing[D]. California: California Institute of Technology Pasadena 2002.
- [14] GROSJEAN C, LEE G B, HONG W, et al. Micro Balloon Actuators for Aerodynamic Control[C]//IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS 98), 1998:166-171.
- [15] WARSOP C. AEROM EMSII: a European Research Effort to Develop MEMS Based Flow Control Technologies[R]. AIAAPaper 2004-2209 2004.
- [16] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998:294-297.
- ZHANG Zhao-shun, CUI Gui-xiang. Hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998:294-297.
- [17] 丁祖荣. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社 2003:136-146.
- DING Zu-rong. Hydrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press 2003:136-146.
- [18] 刘俊, 石云波, 李杰. 微惯性技术[M]. 北京: 电子工业出版社 2005.
- LIU Jun, SHI Yun-bo, LI Jie. Micro Inertial Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005.
- [19] DAVIS B S. Using Low-Cost MEMS Accelerometers and Gyroscopes as Strapdown IMUs on Rolling Projectiles[J]. Aerospace & Electronics Systems Society, 1998, 594-601.
- [20] Saurabh Godha. Performance Evaluation of Low Cost MEMS Based IMU Integrated with GPS for Land Vehicle Navigation Application[D]. Calgary, Alberta: MASTER Dissertation 2006.
- [21] Shin Eun Hwan. Estimation Techniques for Low Cost Inertial Navigation[D]. Calgary, Alberta: Doctor Dissertation 2005.
- [22] 郝永平, 肖长, 王磊. 一种新型微惯性测量组合布局误差模型的建立与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2010 22(10):2407-2410.
- HAO Yong-ping, XIAO Chang, WANG Lei. Establishment and Simulation Analysis of a New Type of MEMS-IMU Error Model[J]. Journal of System Simulation, 2010 22(10):2407-2410.
- [23] 迟鹏程, 张卫平, 陈文元. 基于 MEMS 技术 SU-8 仿昆虫微扑翼飞行器设计及制作[J]. 机器人, 2011 33(3):366-370.
- CHI Peng-cheng, ZHANG Wei-ping, CHEN Wen-yuan. Design and Fabrication of an SU-8 Biomimetic Flapping-Wing Micro Air Vehicle by MEMS Technology[J]. Robot 2011 33(3):366-370.

(下转第23页)

- the Air [EB/OL]. (2015-10-12) [2016-08-02]. <http://tech.sina.com.cn/it/2015-10-12/doc-ifxirmqc5044942.shtml>.
- [13] 环球网. 韩国研究人员研制声波武器 可击落无人机 [EB/OL]. (2015-08-08) [2016-08-02]. <http://mil.huanqiu.com/world/2015-08/7225049.html>.
Huanqiu. Korean Researchers Develop Acoustic Weapons to Shoot Down UAV [EB/OL]. (2015-08-08) [2016-08-02]. <http://mil.huanqiu.com/world/2015-08/7225049.html>.
- [14] 网易网. 大疆推出无人机自我拦截系统 [EB/OL]. (2016-01-03) [2016-08-02]. <http://tech.163.com/16/0103/09/BCD6J483000915BF.html>.
Netease. Dajiang Launched UAV Self Interception System [EB/OL]. (2016-01-03) [2016-08-02]. <http://tech.163.com/16/0103/09/BCD6J483000915BF.html>.
- [15] 环球网. 法国开发无人机拉网拦截技术 [EB/OL]. (2015-02-11) [2016-08-02]. <http://mil.huanqiu.com/gt/2015-02/2763312.html>.
Huanqiu. The Development of Net Interception Technology of UAV in France [EB/OL]. (2015-02-11) [2016-08-02]. <http://mil.huanqiu.com/gt/2015-02/2763312.html>.
- [16] 环球网. 荷兰警察训练老鹰捕捉违法的无人机 [EB/OL]. (2016-02-02) [2016-08-02]. <http://uav.huanqiu.com/yye/2016-02/8489276.html>.
Huanqiu. Holland Police Training Eagle to Capture the Illegal UAV [EB/OL]. (2016-02-02) [2016-08-02]. <http://uav.huanqiu.com/yye/2016-02/8489276.html>.
- [17] 环球网. 肩扛式反无人机装置将上市,似受蜘蛛侠启发 [EB/OL]. (2016-03-07) [2016-08-02]. <http://tech.huanqiu.com/original/2016-03/8665763.html>.
Huanqiu. Shoulder Fired Anti-UAV Device Will Be Listed, Inspired by Spider Man [EB/OL]. (2016-03-07) [2016-08-02]. <http://tech.huanqiu.com/original/2016-03/8665763.html>.

(上接第 5 页)

- [24] WOOD R J. Liftoff of a 60mg Flapping-Wing MAV [C] //IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1889-1894.
- [25] WOOD R J. Design, Fabrication, and Analysis of a 3DOF 3cm Flapping-Wing MAV [C] //IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1576-1581.
- [26] DARGENT T, BAO X Q, GRONDEL S, et al. Micromachining of an SU-8 Flapping-Wing Flying Micro-Electro-Mechanical System [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(8): 573-581.
- [27] Del Campo A, GREINER C. SU-8: A Photoresist for High-Spect-Ratio and 3D Submicron Lithography [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(6): 81-95.
- [28] LORENZ H, DESPONT M, FAHRNI N, et al. SU-8: A Low-Cost Negative Resist for MEMS [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1997, 7(3): 121-124.
- [29] LORENZ H, DESPONT M, FAHRNI N, et al. High-Aspect-Ratio, Ultrathick, Negative-Tone Near-UV Photoresist and Its Applications for MEMS [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 64(1): 33-39.
- [30] KARPELSON M, WEI G Y, WOOD R J. Milligram-Scale High-Voltage Power Electronics for Piezoelectric Microbots [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 2217-2224.