

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8874.2012.01.022

· 课程建设 ·

我校微机电系统与纳米技术 系列课程建设探索

董培涛, 吴小梅, 吴学忠

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

[摘要] 我校于2009年对本科生和研究生的培养方案和课程标准进行了重新修订, 以此为契机, 我校的微机电系统与纳米技术系列课程体系与内容也进行了重新规划与建设, 本文对此作了简单的总结、回顾与思考。在对比分析并借鉴参考国内外名校相关领域对本系列课程设置的基础上, 介绍了我校新的微机电系统与纳米技术系列课程的体系建设、内容建设、课程实验及条件建设。

[关键词] 微机电系统; 纳米技术; 课程

[中图分类号] G643 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-8874(2012)01-0074-04

About the Serial Courses of MEMS and Nano-technology

DONG Pei-tao, WU Xiao-mei, WU Xue-zhong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The offering of serial courses of MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) and Nano-technology is summarized, reviewed and considered, which results from the redaction of the 2009 New Training Plan and Course Standard. The schemes of courses in correlative areas of the famous overseas and domestic universities are analyzed. The system, content, experiment settings and equipment of the serial course are introduced.

Key words: micro-electro-mechanical-systems; nano-technology; course

一、引言

“提高人才培养质量, 增强自主创新能力”是我校学习实践科学发展观的主题。为有效履行新世纪新阶段我军历史使命, 适应高等教育改革发展趋势, 加强高素质新型军事人才培养, 经过长时间的深入调研、广泛发动和周密准备, 学校于2008年启动了新一轮人才培养方案的制定工作。目前, 新培养方案已经在实施之中。现阶段对课程标准制定工作及新课程体系与内容建设工作进行一些回顾与思考, 对于新培养方案的实施与教学工作的积极开展意义重大。

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical-System, 简称MEMS)与纳米技术是我校机械工程学科的重要发展方向, 也是多学科交叉的前沿研究领域。它集中了多个学科领域的高科技成果, 涉及机械、微电子、物理、化学、材料、仪器科学与技术等多个学科领域。随着科技的不断发展与进步, 微机电系统与纳米技术在军事领域有了更加广阔的应用, 可以有效地减小武器装备的重量和体积。微型地面探测器、微纳军事卫星、微型飞行器、微型智能攻击器等微纳武器装备有极高的侦察隐蔽性和适应能力, 而其

攻击也具有突然性和高效性, 同时微纳惯性器件等传感器可实现武器装备的低成本和高可靠性, 将在未来局部战争中发挥日益重要的作用。随着武器装备微小化和精确化水平的不断提高, 军用机电工程及纳米技术在国防军事领域中所发挥的作用也必将日益显著。因此, 建设好微机电系统与纳米技术系列课程, 使学员具备本领域较为完备的知识体系结构, 对培养适应国防和军队现代化建设的大批高层次创新型军事人才将发挥重要的作用。

课程是教学的基本单元, 也是培养学生知识、能力、素质的重要载体。为作好微机电系统与纳米技术系列课程的建设工作, 笔者对国内外一些著名院校相关课程的体系、内容等作了深入的调研工作, 并在本文中进行了较为详细的对比分析, 同时对我校微机电系统与纳米技术系列课程的体系建设、内容建设及实验条件建设等工作作了简单回顾与思考。

二、国内外高校相关课程体系与内容

微机电系统与纳米技术是一个交叉性很强的领域, 所以在不同的院校, 其所依托的单位也不同。机械、微电子、仪器等多个专业领域都有专家学者在进行研究, 其开设的

[收稿日期] 2011-10-30

[作者简介] 董培涛(1979-), 男, 山东平阴人, 国防科学技术大学讲师, 博士, 主要从事微机电系统与纳米技术领域的教学和科研工作。

课程也各有侧重。本节对国内外各高校相关课程体系设置与讲授内容进行简单介绍与对比分析，以此作为对我校微纳领域课程体系与内容建设的参考。

1. 国外高校相关课程体系设置

目前，国外在微纳研究领域研究水平较高的主要科研机构有美国加州大学伯克利分校、麻省理工学院、斯坦福大学、乔治亚理工学院等。以加州大学伯克利分校为例，该校的微纳技术研究主要依托于伯克利传感器与执行器研究中心 (Berkeley Sensors and Actuators Center, BSAC)，该中心是一个综合性的研究机构，由十二位来自计算机与电子学院和机械学院的教授联合负责管理。该校在 MEMS/NANO 领域的课程分为核心课程和重点课程等，其核心课程包括“纳米科学与技术介绍 (Introduction to Nanotechnology and Nanoscience)”，“MEMS 技术介绍 (Introduction to MEMS)”，“MEMS 设计介绍 (Introduction to MEMS Design)”等，其余重点课程则包括：“集成电路工艺 (IC Processing)”，“集成电路器件 (Integrated - Circuit Devices)”，“微制造技术 (Microfabrication Technology)”，“集成电路工艺与布局 (Advanced IC Processing and Layout)”，“微纳生物技术介绍：生物 MEMS (Introduction to Micro and Nanobiotechnology: BioMEMS)”，“MEMS、微传感器、微执行器高级专题 (Advanced Topics in Mems, Microsensors, and Microactuators)”等系列课程。国外其它高校对该领域课程的设置与此类似。

从加州大学伯克利分校微纳领域课程的设置可以看出有几个比较显著的特点：一是有比较明显的微电子学研究背景，相当一部分课程是集成电路工艺与器件的内容；二是课程内容的深度由浅入深，既有入门知识的介绍，又有高级专题，可以适应不同层次学生的学习需要；三是重视学科交叉领域知识的传授，如专门开设有“生物 MEMS”等课程介绍 MEMS 在生物等交叉领域的应用。

2. 国内高校相关课程体系与内容

国内对微纳领域研究起步比较晚，但经过最近一二十年的发展，也取得了长足的进步。国内在微纳领域研究水平比较高的单位主要有北京大学、清华大学、复旦大学、东南大学、西北工业大学、中科院上海微系统所、中电集团 13 所、中电集团 55 所等单位。后三个单位为科研院所性质，基本不开设课程；前面五个单位为高等院校，在微纳领域开设了相应的系列课程。

清华大学是国内在本科阶段最早设置微机电系统专业的院校之一，其本科生课程主要有专业核心课“微电子工艺技术”、专业限选课“MEMS 与微系统”、新生研讨课“微小器件与系统及微型化方法”等；研究生课主要有“微米/纳米技术物理”、“微机电系统 (MEMS)”、“微系统设计与系统集成技术”、“微米纳米测试技术”、“微米/纳米技术概论”、“微执行器与微传感器技术”等。可见，该校也构建了体系较全的微纳领域课程，基本涵盖了从设计到工艺、从测试到应用、从概论到理论等方面。

在课程内容方面，清华大学的本科生专业核心课程“微电子工艺技术”，其授课目的是使学生掌握微电子制造的各单项工艺技术，以及亚微米 CMOS 集成电路的工艺集成技术，主要讲授微电子制造工艺各单项工艺的基本原理

(包括氧化、扩散、离子注入、薄膜淀积、光刻、刻蚀、金属化工艺等)，并介绍常用的工艺检测方法和 MEMS 加工技术、集成电路工艺集成技术和工艺技术的发展趋势等问题，另通过计算机实验，可学习氧化、扩散、离子注入等工艺设备的简单操作和模拟。

在研究生课程方面，清华大学的研究生课“微米/纳米技术物理”内容主要有有关制作微米/纳米器件及结构的各种技术及其物理原理，包括抗蚀性原理，光学光刻，离子束、电子束、X 射线的形成及其与物质的相互作用的物理过程，干法及湿法刻蚀原理。与本科生专业核心课程“微电子工艺技术”的讲授内容相比，虽然都是有关微纳加工技术的课程，但本科生课程更侧重于基本知识的介绍，而研究生的课程更侧重于物理原理的讲解，两门课程在内容上由浅入深并有所衔接。

国内其他高校的课程设置与内容也与此基本类似。如东南大学的硕士生课程设置较多，分类较细，有：微系统设计、硅微机械加工技术、微执行器导论、固体传感器与系统、微电子机械系统、微传感器与系统、硅微纳制造技术、RF MEMS、MEMS CAD、微系统封装、纳机电系统导论等。

虽然各高校的具体课程体系与内容有所差别，但在课时充足的情况下，基本会将设计和工艺分别开设课程讲授，并从概论、导论到理论由浅入深针对不同层次的学生开设不同深度内容的课程。还有的学校会根据自己的科研方向和发展重点，开设不同交叉领域的一些课程，如 RF MEMS、BioMEMS 等。

三、我校微机电系统与纳米技术系列课程建设实践

我校的 MEMS 方向最初成立于 2001 年，在“十五”和“十一五”期间，先后得到了国家“211”、军队“2110”和国家“985”科技创新平台建设经费的支持，建立了两百平米的超净实验室并购置了一批先进的工艺、测试设备，从而逐渐发展起来。建设初期，仅在硕士研究生中开设了“微机电系统与纳米技术”一门课程，主要以美国 Maluf 教授所编著的《An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering》一书作为讲义，所讲授的知识也以工艺和 MEMS 器件的应用为主，对深入的理论知识则涉猎较少。该课程在当时满足了给学生介绍 MEMS 技术基础知识、激发学生学习兴趣的要求，为本领域的发展培养了一大批研究生。

随着学科建设发展和学科研究水平的提高，这种单一课程已不能适应新形势对培养适应国防和军队现代化建设的大批高层次创新型军事人才的要求。以学校 2009 年新培养方案的修订为契机，笔者对微机电系统与纳米技术领域的课程设置与内容作了新的调整。其目的就是以军用微机电技术为背景，促进机械工程、仪器科学与技术、控制科学与工程等学科的交叉融合，建立国内一流的人才培养环境，完善机械工程学科的博士、硕士、本科等多层次人才培养体系，促进高层次人才的全面素质和创新能力的培养。

1. 课程体系建设

参考国内外名校相关领域课程设置与内容并结合我军

特色及我校实际情况,微机电系统与纳米技术课程体系分为本科、硕士研究生和博士研究生共三个阶段,每个阶段分别开设一门课程,其中本科生阶段课程为“微机电系统与纳米技术”,硕士生课程为“微机电系统分析与设计”,博士生课程为“微机电系统与纳米技术高级专题”。

本科生课程“微机电系统与纳米技术”是机械工程及其自动化专业工程技术类的专业选修课,同时也是测控技术与仪器专业的学科基础选修课程,课程均安排在第三学年春季学期。该课程是在本科学员掌握相关的专业基础知识之后,进行专业应用拓展的一门课程,内容涉及到机械、仪器、微电子、物理、化学、材料、生物等多学科交叉和前沿领域,在民用和军事领域有广泛的应用背景。学习本课程,可使学员本科阶段所学知识及能力得到综合训练和提高,为后续各专业课程的学习及毕业后从事相关领域的工作打下坚实的基础。

硕士生课程“微机电系统分析与设计”是机电工程学科硕士生的专业基础课。课程的作用是使学生了解微传感器与微执行器等微机电系统的基本原理,掌握其分析、设计方法与基本的加工工艺,为学生从事微机电系统领域内的科学研究打下扎实的理论工程实践基础。课程的任务是介绍微机电系统的定义、分类等概念性问题并讲授微机电系统研究领域内的力学知识、气体阻尼、驱动与检测方法等相关内容,并通过实例分析、课堂讨论及实验进一步加深学生对所学知识的理解和掌握。

博士生课程“微机电系统与纳米技术高级专题”是机械工程专业博士研究生的专业前沿课程。通过该课程的学习和研讨,使学生了解微机电系统与微纳制造领域的最新进展,把握微机电系统与微纳制造技术的发展方向,为博士课题的选题和研究打下坚实的基础。

与原有的课程体系相比,新课程体系具有以下特点:(1)由原来的仅有硕士研究生一门课程扩展到本科、硕士、博士阶段各有一门课程。虽然与国内外一些名校相比,课程设置和教学时数还是相对偏少,但也已经形成了内容由浅入深、可以适应不同层次学员学习要求的教学体系,教学内容上既有衔接,又各有侧重点。(2)大幅提高了实践性教学和研讨教学比例。本科生课程仅30个学时,其中设计了2个学时的研讨课程和4个学时的实验课程,在两次实验课程里面,分别要完成典型MEMS传感器的设计、分析与工艺和硅的湿法腐蚀工艺实验。在硕士生课程里面增设了三个课程实验,分别要完成光刻工艺、溅射与蒸镀等薄膜沉积工艺及典型MEMS器件的特性测试与信号检测实验。在博士生课程里面设置了一批高级讲座与研讨内容,充分发挥研究生的主体作用。(3)对课程教学内容的深度和广度做了系统设计和全面规范,尊重学科专业和课程体系发展的实际、相关知识的内在联系、学员学习认知规律,合理构建了课程教学内容体系。对此在下文中作了详细介绍。(4)优先选用国际一流大学教材、国家级规划教材、军队统编教材、教育部推荐教材、学科专业建设委员会或课程建设指导委员会推荐教材、省部级重点建设教材等高水平教材,积极选用外文教材和近3年出版印刷的新教材。在本科生课程中,以美国专家Chang Liu所著、东南大学MEMS领域著名专家黄庆安教授翻译的《微机电系统基础》

作为主要教材,以科瓦奇所著、张文栋翻译的《微传感器与微执行器全书》等高级教材为辅助教材;硕士生课程则以Minhang Bao教授所著、Elsevier出版社出版的英文原版书《Analysis and Design Principles of MEMS Devices》作为主要教材;博士生课程则结合了Journal of Microelectromechanical Systems、Journal of Micromechanics and Microengineering、Sensors and Actuators等本领域的顶级期刊杂志进行研讨。(5)进一步深化考核改革,改革课程考核的内容、标准和形式,既反映学员学习的结果,也兼顾对学习过程的监控,将平时测验、综合作业、期中考核、期末考核等按一定比例计入课程成绩,避免考核方式单一化和一次考核定成绩的现象。

2. 课程内容建设

微机电系统与纳米技术是一门崭新的前沿学科,正处于技术高速发展并处于向大规模应用转化的阶段,因而其内容既要体现基础性、普遍性和一致性,同时又要积极跟踪世界范围内的研究发展,体现多样性和学科的交叉性。

对于本科生课程“微机电系统与纳米技术”,自主学习能力和创新能力的培养应当是本课程应该体现的特点。该课程共30学时,其中讲授24学时,实践4学时,考核2学时。从授课内容上来看,本课程主要讲述微机电系统和纳米技术的基础知识,内容贯穿“设计-制造-检测-应用”这样一条主线。主要有以下几部分:(1)微机电系统设计方法,介绍尺度效应问题、多尺度及多物理问题、力学问题、气体阻尼问题、驱动与检测方式及设计仿真环境等,包括Ansys、ConventorWare、L-Edit等设计软件的使用;(2)微制造技术,介绍材料知识包括硅、石英、硅化物及各种薄膜材料等;微制造技术各单项工艺方法、原理及基本理论,包括光刻、氧化、溅射、蒸镀、硅的湿法腐蚀、干法刻蚀、表面微机械工艺、LIGA等单项工艺;典型器件工艺流程设计等;(3)微传感器与微执行器,分类介绍各种应用领域的典型器件及其基本原理,如力学传感器与执行器、光学传感器与执行器、热传感器与执行器、磁传感器与执行器、化学和生物传感器与执行器、微流体器件等;(4)纳米技术与纳米制造,介绍纳米结构、纳米器件的基本原理及制造方法,如自组装技术、纳米压印技术、微纳融合的纳米制造技术等;(5)各种微纳米测量技术,如MEMS器件几何结构特征参数测量、表面微观形貌测量、MEMS材料机械特性的测试、光学显微测量技术、光干涉测量技术、激光扫描显微测量技术、扫描电子显微镜技术、原子力显微镜技术等。由于该课程信息量较大,因而在有限的课堂教学之外,充分利用小作业和大作业结合以及实践环节的补充,充分发挥学生自主学习的主动性和能动性,充实本课程的学习内容。

硕士生课程“微机电系统分析与设计”的内容与本科生课程相比,在内容深度上有所加深,更侧重于原理介绍和理论分析。该课程有36个学时,其中课堂讲授28学时,实验6学时,讨论2学时。讲授内容主要有:(1)微机电系统制造技术,包括微机电系统器件的典型工艺流程及光刻、湿法腐蚀、干法刻蚀、溅射、蒸镀等薄膜沉积工艺、表面微机械加工工艺等;(2)微机电系统中的力学问题,包括应力与应变、振动频率分析、梁的振动模态与屈曲、

受迫振动与阻尼振动、薄膜的力学特性等；(3) 微机电系统阻尼特性分析，包括压膜阻尼、滑膜阻尼、稀薄空气中的阻尼以及带孔板的气体阻尼等；(4) 微机电系统静电驱动，包括静电力、机械执行器的静电驱动、阶跃和交流电压驱动等；(5) 电容检测与压阻检测，包括电容位置传感技术、电容位置传感电路、系统设计与分析、硅晶体的压阻效应、二阶张量的坐标变换、压阻系数的坐标转换等；(6) 典型 MEMS 器件实例研究。

博士生课程“微机电系统与纳米技术高级专题”有 8 个学时，设置了两个讲座内容：一是微传感器研究进展，内容为力学传感器、光学传感器、热学传感器、生物传感器、化学传感器及电离辐射传感器等微传感器的最新研究进展与应用；二是微纳制造技术的最新研究进展，如扫描探针显微镜在纳米加工和制造中的应用、分子自组装技术、基于 MEMS 工艺的微纳融合纳米制造技术及其它前沿微纳制造技术等。

3. 课程实验与条件建设

课程实验是培养学员动手能力的一项重要实践性教学环节，在 2009 新培养方案中得到了加强。在微机电系统与纳米技术系列课程中，博士生课程“微机电系统与纳米技术高级专题”课时少，并且是讲座与研讨性质的课程，未开设实验教学环节。本科生课程和硕士生课程均开始了多个课程实验。

本科生课程的两个实验围绕设计和工艺两大重点教学内容开展。实验一要求学生对照世界上知名学府如 MIT、UCBerkeley、Caltech、UCLA、UIUC 的 MEMS 研究小组进行调研，把握本领域的研究前沿，同时学会查阅文献，在对 Journal MEMS, JMM, Sensors and Actuators 等本领域专业学术期刊的资料检索的基础上，提出一种新颖 MEMS 器件，分析其工作原理，建立其理论模型，并采用 Ansys 软件对其进行仿真分析，采用 L-Edit 软件完成其版图和工艺流程设计。这是一个综合性实验，既锻炼了学员对本领域前沿技术的把握能力，又使本科学员学会了文献检索并提高了他们的创新设计能力。实验二围绕微纳制造技术中最基本的硅基湿法腐蚀工艺实验展开，使学员通过实验了解涂胶、前烘、光刻、显影、后烘等基本光刻工艺流程和 SiO₂ 的湿法腐蚀技术，掌握 (100)、(110)、(111) 三种硅片的各向同性与各向异性湿法腐蚀工艺，探索腐蚀液类型、温度、浓度等不同工艺参数对不同类型硅片腐蚀工艺的影响。通过实验二增加学员对微纳制造技术的感性认识。

硕士生课程开设了三个课程实验。由于微纳传感器与执行器的设计内容以课程作业的形式完成，所以该课程的三个实验围绕微纳制造技术与测试技术开设，但比本科生课程的工艺实验划分更细、内容更多。实验一为光刻工艺，熟悉光刻工艺的基本原理与基本流程，了解匀胶机、烘箱、热板等工艺设备的功能与使用方法；完成匀胶、前烘、光刻、显影以及后烘等工艺流程；实验二为溅射、蒸镀等薄膜淀积工艺，需要学员熟悉溅射、蒸镀等薄膜淀积工艺的基本原理与基本工艺流程，了解溅射机与蒸镀设备的操作

方法，掌握影响薄膜溅射速率与溅射质量的关键因素，学会薄膜质量的分析评价方法与手段；实验三为 MEMS 器件的特性测试与信号检测实验，需要学员熟悉 MEMS 器件的特性测试方法，了解各种测试仪器（台阶仪、原子力显微镜、高倍测量显微镜等）的基本功能与操作方法，掌握 MEMS 器件机械特性的电学测试方法，利用现有实验设备，设计并组建测试系统，测试典型 MEMS 器件的主要电学性能与机械性能。

实验条件建设是保证课程实验顺利开展的必要条件。目前，我校机电工程与自动化学院微系统实验室融教学试验条件建设和科研条件建设为一体，以科研水平的提高促进教学水平的提高，在国家“211”、军队“2110”和国家“985”科技创新平台建设经费的支持下，建立了百级超净实验室三十平方米，万级超净实验室两百平方米，购置了国际主流 MEMS 设计软件 CoventorWare、双面光刻机、超声清洗机、匀胶机、磁控溅射台、ICP 刻蚀台、PECVD 沉积台、磁力搅拌器、氧化炉、键合机、划片机、引线机等工艺加工设备，以及膜厚测试仪、三维体视显微镜、原子力显微镜、动态信号分析仪、微弱信号分析仪等测试设备，建成了一条完整的微机械加工工艺线，具备了微机电系统设计、工艺开发及器件封装测试能力，完全可以为课程实验的开展提供必要的条件支撑和保障。

四、结束语

对我校微机电系统与纳米技术系列课程的建设作了简单的总结、回顾与思考。在对比分析并借鉴参考国内外名校相关领域对本系列课程设置的基础上，介绍了我校新的微机电系统与纳米技术系列课程的体系建设、内容建设、课程实验和保障条件建设。与原有的单一硕士课程体系相比，现在的微机电系统与纳米技术系列课程共设置有三门，形成了内容由浅入深、可以适应不同层次学员学习要求的教学体系。该课程体系在教学内容上也更为充实，实践教学环节也得到增强。现阶段该课程体系与标准已在实施当中，在教学实践中取得了良好的教学效果，对培养适应国防和军队现代化建设的大批高层次创新型军事人才发挥了重要作用。

[参考文献]

- [1] 颜洽茂,金娟琴,谢桂红.课程建设和精品课程建设项目的实践与思考[J].中国大学教学,2004(8):6-7.
- [2] 董相廷.浅谈理工科大学生开设纳米科技课程的必要性[J].长春光学精密机械学院学报(社会科学版),2001,14(4):81-82.
- [3] 吴晓平,卢素改,周新建.关于高校课程建设的思考与认识[J].合肥工业大学学报(社会科学版),2002,16(5):27-30.
- [4] 刘晓明,刘民岷,徐尚龙,杨平.微机电系统课程的实践教学与方法研究[J].实验科学与技术,2008,6(1):89-91.

(责任编辑:卢绍华)