

王阳元文集

(第二辑)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书汇集了王阳元院士在 1998 年到 2004 年期间发表的重要论文和论述,内容涉及微电子学科的发展战略研究、发展前沿综述、学术论文、科学研究方法论、产业建设和人才培养等多个方面。在此期间里,他与合作者以及研究生共同发表了 70 余篇学术论文。本书从中精选了发表在国内外重要学术刊物上的有关 SOI/CMOS 器件与电路、超深亚微米器件研究、MEMS 研究和电路研究等方面的 36 篇有代表性的学术论文。这些论文和论述在国内外微电子领域的学术界、教育界和工业界产生了深刻影响,推动了我国微电子科学技术和产业的发展,反映了王阳元院士作为一位“仁智双馨”的战略科学家的风貌。

本书可作为高等学校信息技术及微电子专业师生的参考书,也可供相关领域的技术人员、科研人员及科技管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

王阳元文集(第二辑)—北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-016340-0

I.王… II.①王阳元-文集 ②微电子技术-文集 III. TN4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 116366 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲/责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平/封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006 年 1 月第一次印刷 印张:45 插页:8

印数:1—1 200 字数:923 000

定 价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《王阳元文集》(第二辑)编委会

顾 问 韩汝琦 郑敏政 汤小川 李佑斌 武国英
张利春 谭长华 吉利久 徐雅文 严晓浪
郝 跃

主 任 张 兴

副主任 郝一龙 黄 如 张天义 张大成 刘 越
赵宝瑛 李志宏 康晋锋 王永文

委 员 (以姓氏笔画为序)

万新恒	王兆江	王新安	石志宏	刘永进
刘晓彦	李 婷	余敦山	张 威	张海霞
张盛东	陈中建	金玉丰	金海岩	洪秀花
倪学文	徐文华	魏 玲		

编辑出版说明

20 世纪 90 年代由北京大学出版社组织出版了一套“北京大学院士文集”。作为文集中的一本,《王阳元文集》于 1997 年出版了第一辑。在这本文集中收集了王阳元院士从 1978 年到 1997 年的主要论述。从 1998 年到 2004 年 12 月 31 日,又过去了六年多的时间,在这个时期,王阳元院士在微电子发展战略研究、微电子科学前沿发展分析、人才培养等方面又有许多重要论述;在国内外重要学术期刊上,他与所指导的博士研究生、博士后研究人员和合作者共同署名发表了 70 余篇学术论文。这些论文在我国和国际学术界、产业界产生了不同程度的重要影响。

这一时期,正是我国微电子产业迅速发展的时期,相应的科学技术也得到了迅速发展。王阳元院士作为我国微电子领域的战略科学家,一方面他与国际同行共同策划,创建了具有世界先进水平的中芯国际集成电路制造公司,建设了我国第一条 12 英寸¹⁾ 纳米级集成电路生产线,并将科学研究与生产实践相结合,攻克 65~90nm 集成电路大生产技术;另一方面,以 2001 年 2 月 27 日在国务院科教领导小组上讲述“微电子科学技术与集成电路产业”为标志,北至东北工业重镇的沈阳和津京塘地区的天津、北京,东到长江三角洲地区的上海、杭州、无锡,南至福州、厦门、广州、深圳、珠海,在大江南北,讲演关于微电子产业和科学技术发展战略的研究与思考,不仅引起了国内外同行的高度关注,而且他提出的许多战略思想和措施也被各级政府和相关企业领导所采纳,从而从理论和实践两个方面推动了我国微电子产业及其科学技术的发展。我们从诸多演讲稿中选择了 7 篇战略研究和 7 篇关于产业建设的文章,分别构成了本文集的第一部分:战略研究和第五部分:产业建设。在此期间,他还发表了一系列论述微电子科学技术发展前沿的综述性论文,对我国微电子科学技术的发展有重要指导意义。我们从中选择了 8 篇作为本文集的第二部分:发展前沿综述。

这一时期,他在教学与科学研究岗位上,致力于超深亚微米新器件、新工艺和新结构电路研究的同时,又开辟了一个新的研究方向——微机电系统(MEMS: Micro Electro-Mechanical System)。在国家有关领导部门的支持下,在北京大学微电子研究院设立了国家微米/纳米加工技术重点实验室,从基础层次上(工艺与设计)提升了我国 MEMS 研究水平。我们从他与他的博士研究生、博士后研究人员和合作者们在 SOI/CMOS 器件与电路研究、超深亚微米器件研究、MEMS 研究、RFIC 和电路设计四个方面发表的 70 多篇论文中选择了有代表性的 36 篇论文构成本文集的第三部分:

1) 1 英寸(in)=2.54 厘米(cm)。下同。

学术论文。第四部分:科学研究方法论则是有关科学研究方法论方面的研究和论述,这也是王阳元院士科学活动的一个重要方面,是他在长期科学研究活动中凝炼出来的宝贵哲理。文集最后一部分是教书育人篇,其中包括了 20 多年前他在加州伯克利大学(U. C. Berkeley)做访问学者时对如何培养博士生的调查研究报告。该报告是第一次公开发表,虽然写在 20 多年前,但今天读起来仍有重要的启发作用和指导意义。

我们将上述论述编辑出版,作为对王阳元院士七十寿诞的纪念。本文集编辑过程中特别请了北京大学许智宏校长写序,作为本书的“序一”。同时,作为他的学生,我们编委会的正副主任写了“序二”,其内容主要参照了为中国科学技术协会撰写的“王阳元院士传略”。

本文集中的论文大多数已在国内外各种学术期刊或著作中发表。这次汇集出版,在结构形式、风格等方面基本未作改动。

本书的出版得到北大青鸟集团的资助,在此表示由衷的谢意。

我们希望《王阳元文集》能随着他的教学、科学研究和产业建设活动的不断进行,每隔若干年出版一辑新的文集,以飨读者。

《王阳元文集》编委会

2005 年 2 月 16 日

序一

古人云“智者乐，仁者寿”，王阳元院士仁智双馨，堪称楷模。作为智者，他在学界德高望重，不仅是我校微电子学科的奠基人，我国集成电路产业的开拓者，更是享誉国际微电子学界的学术大师，是我国微电子领域的战略科学家；作为仁者，他胸怀家国天下，积极投身国家经济建设，响应国家重大需求，积极推进产学研相结合，为我国国家的经济建设、科技进步、社会发展都作出了重要贡献。我就任北京大学校长后曾多次参与过王阳元院士与北京、上海、深圳、无锡等地的合作研发工作的讨论，均为他的战略胆识以及对学科发展的把握而深受感动。王阳元院士以“得人才者得天下，集人心者集大成”的胸襟，培养和造就了一代又一代学术骨干和青年学科带头人；他以卓越的战略眼光和领导才能创建并引领了北京大学微电子学科，使之不断发展壮大。40多年来，王阳元院士把全身心都献给了学校，献给了他所热爱的事业，对我国微电子研究和信息技术的发展，对微电子学科的建设做出了重要的贡献。

在王阳元院士刚过七十寿辰之时，欣闻《王阳元文集》（第二辑）即将出版，十分高兴，是为序。



2005 年春

序二 我国微电子领域的战略科学家

——记我们心目中的王老师

王阳元院士是我国著名的微电子学家,也是我们敬仰的老师。在近半个世纪的教学科研生涯中,他培养了一批又一批的学生,目前他们大都活跃在世界各地的微电子研究和开发领域。每当同学聚会,不论是在祖国各地还是在海外学府,学生们都十分关心王老师的科研教学情况。值此王老师 70 岁生日之际,我们几个目前还在王老师身边工作的学生和同事,回顾王老师 40 多年在微电子领域耕耘与探索的历程,撰写此文,作为送给王老师的生日礼物,也是对关心老师的海内外学友的一个书面汇报。

王阳元老师 1953 年 8 月考入北京大学物理系学习,1956 年 11 月加入中国共产党,1958 年 8 月毕业后留校,在黄昆院士领导的半导体教研室任教。1958~1961 年从事半导体器件和锗晶体管的研究工作,1962 年从事半导体 PN 结器件物理的研究,1969 年从事硅高速开关晶体管、PIN 天线开关管和硅数字集成电路研究。1971 年开始研究硅 MOS 存储器,1975 年主持研究成功三种类型(硅栅 P 沟道、铝栅 N 沟道和硅栅 N 沟道)1024 位 MOS 动态随机存储器,开发成功成套硅栅 N 沟道技术并在半导体行业推广,使我国 MOS 集成电路技术进入一个新的阶段,是我国硅栅 N 沟道技术的开拓者之一,1978 年获全国科学大会奖。1978 年担任北京大学微电子研究室主任,1980 年晋升副教授。

在硅栅 N 沟道工作基础上,他针对硅栅和 N 沟道两个技术难点,分别开展多晶硅薄膜物理和 MOS 绝缘层物理的系统研究工作。在国际上提出了多晶硅薄膜氧化动力学的“应力增强氧化”模型、特征参量和应用方程,提出了多晶硅薄膜载流子迁移率和掺杂浓度的关系,其相应成果于 1991 年获国家教委科技进步一等奖。在 MOS 绝缘层研究方面,他先与吉利久教授等合作,提出了 MOS 绝缘层中可动离子输运和分布的新的计算和测量方法,并在工厂推广;继则与谭长华教授和许铭真教授合作,在国际上首次完成 MOS 绝缘层三个基本参量(能级、面密度和俘获截面)的独立测量方法,成果于 1990 年获国家发明三等奖。1982 年 3 月至 1983 年 6 月,他作为交流教师在美国加州伯克利分校(University of California at Berkeley)做访问学者。从事硅薄膜固相外延的研究工作,发现了磷掺杂对硅固相外延速率的增强效应。1983 年回国后,他继续担任北京大学微电子研究室主任,建立了新型 SOI(Silicon On Insulator)器件研究室,从事新型 SOI 器件研究,带领研究生和博士后研究人员,提出了 SOI 器件浮体效应模型和通过器件参量抑制浮体效应的工艺和设计技术,扩充了 SPICE 模型,研制成功了抗辐照(10^6 Rads)SOI 电路和相关新器件,在工业部门推广应用。1992 年

和1999年分别获得光华科技基金一等奖和信息产业部科技进步二等奖。1985年晋升教授。1986年建立北京大学微电子研究所,他任所长。

1986~1989年和1989~1992年,他分别应邀到电子工业部和机械电子工业部兼任微电子局副局长和微电子与基础产品司副司长。任全国ICCAD专家委员会主任、全国ICCAT专家委员会主任和全国集成电路产品开发专家委员会主任,领导研制成功了我国第一套大型集成化的、具有自主知识产权的ICCAD(集成电路计算机辅助设计)系统,使我国成为继美国、西欧和日本之后能独立开发大型ICCAD系统的国家,并开始走向国内外市场;他还领导开发了百多种适应市场要求的新的集成电路,为我国集成电路设计业的发展奠定了重要的技术基础。该项目分别于1992年和1993年获机械电子工业部和国家科技进步一等奖。他分别参与组织和组织领导了我国“七·五”、“八·五”两个五年计划中的国家微电子科学技术攻关计划的制定和实施。1987年起先后任电子工业部、机械电子工业部和信息产业部科技委(电子)委员,中国电子学会(CIE)常务理事,1988年当选CIE Fellow。1990年到2002年担任特种微电子专业组组长,从1998年起担任科技委兼职委员,直接参与制定了国家军用微电子预先研究计划。对我国微电子科学技术研究系统的建立起了积极的推动作用。1990年北京大学微电子学科建立了博士授予点,他任博士生导师,并担任了《半导体学报》编委、副主编,《电子学报》(英文版)副主编,《中国科学》(F辑)编委,《微电子丛书》主编。1996年起任国务院学位委员会电子科学技术学科评议组成员。在国家“七·五”、“八·五”两个五年计划期间,他分别在CMOS集成电路和双极集成电路两个领域开展了研究工作。在CMOS方面,他在研究多种硅化物薄膜的基础上,研究了亚微米和深亚微米CMOS电路的硅化物/多晶硅复合栅和自对准复合栅结构及其应力分布,提出了相关工艺技术;在双极集成电路方面,他指导研究生建立了多晶硅发射极晶体管新的解析模型,成为国际上该研究领域的重要模型之一,他与张利春教授、倪学文教授合作开发了成套的超高速多晶硅发射极电路工艺。二者都对我国独立自主发展大规模集成电路有重大意义,获得了国家计委、科委和财政部的科技攻关突出成果奖和先进个人奖。1995年他被遴选为中国科学院院士。2000年当选为英国IEE Fellow,由于他在微电子研究和教育方面的成就,同年又当选为美国IEEE Fellow。

1996年他敏感地抓住国际上微机电系统发展的新态势,在相关领导部门支持下,在北京大学建立了国家级微米/纳米加工技术重点实验室,并出任主任。他从基础层次入手提升我国MEMS系统的研发能力,主持开发成功了五套具有自主知识产权的硅基MEMS加工工艺技术并发布了我国第一套MEMS计算机辅助设计系统,使该重点实验室成为国际上有影响的MEMS研究基地。2002年获得北京市科技进步一等奖。

2000年以后,随着新世纪的到来,他科学地分析了微电子科学技术发展趋势,积极提出了SOC中新工艺、新器件国家重大基础研究工作,与年轻一代学者一起开展亚45nm各种新结构器件和工艺技术的研究,研制成功了多种非经典的CMOS器件,成为在国际上有影响的研究小组。他大力推动科技成果与工业界的结合,作为指导小组组长,组织承担了90~65nm大生产技术“863”重大项目的研究工作。

48年来,他亲身经历了我国半导体与微电子发展的风雨历程,深感发展我国微电子产业的战略重要性。2000年作为发起人之一,他与海外同行共同创建了中芯国际集成电路制造有限公司 SMIC(Semiconductor Manufacturing International Cooperation),并出任中芯国际集成电路制造公司的董事长。推动我国集成电路产业进入 12 英寸硅片、纳米集成电路的时代。2002 年在他倡议和推动下建立了北京大学微电子研究院和微电子学系,他任第一届院长和系主任。2002 年获何梁何利科学技术成就奖,2004 年获中国集成电路行业协会 IC 设计分会颁发的终身成就奖。

1986 年起至今与海内外同事共同创办了两个集成电路方面的系列国际会议在中国举办,一个是 ICSICT(International Conference on Solid State&Integrated Circuit Technology);另一个是 ASICON(Asic Design International Conference)。前者已举办了七届,后者已举办了五届,他任历届的大会主席、程序委员会主席或顾问委员会主席。1986~2000 年他任世界无线电联盟电子与光电子委员会中国委员会主席。1987 年至 2002 年他任国际固态电路会议(ISSCC;International Conference on Solid State Circuits)远东程序委员会委员。1998 年起任北京市科学技术协会副主席,2003 年起任中国电子学会副理事长。

在微电子领域,王阳元老师取得了 18 项重大科技成果,荣获 17 项国家级和部级奖励。发表论文 230 余篇,出版著作 6 部,专利 9 项,培养了 70 多名硕士、博士和博士后研究人员。

开拓硅栅 N 沟道 MOS 技术

王阳元老师是建国后我国自己培养的第一批半导体专家。1958 年毕业后留校任教,一直从事半导体器件和器件物理研究。长期以来他思考着一个问题,即选择什么样的课题才能对我国微电子发展有更大的贡献?经过认真调研与讨论,认为硅栅 N 沟道 MOS 技术将在(20 世纪)70 年代至 80 年代成为集成电路具有核心竞争力的技术,很有可能在未来 10 年改变我国 MOS 集成电路技术的落后面貌,从而他选择了 1024 位 MOS 动态随机存储器作为突破口。作为领导小组组长,他带领科技人员经历了 6 年坚韧不拔的奋斗,在版图设计方面,采用多种途径解决了当时看似不可能解决的掩模版制造难题;在工艺研制方面,从创造工艺环境、安装调试专用设备开始,面对 100 多道工序,从一项项单项工艺实验开始,一次次实验分析,在无数次失败的基础上总结科学规律,终于先后克服了多晶硅薄膜生长、 Na^+ 离子的沾污与 MOS 绝缘层可动离子的控制、金属化技术和性能与参数测试等多个技术难题,于 1975 年研制成功我国第一块三种类型(硅栅 P 沟道、铝栅 N 沟道和硅栅 N 沟道)1024 位 MOS 动态随机存储器,独立自主地开发出了全套硅栅 N 沟道技术,成为我国 MOS 集成电路技术和产业发展中具有里程碑意义的事件。它只比 Intel 公司研制的同类存储器晚 4 年。这个团结战斗的集体,在当时没有净化工作室,没有进口的先进设备的条件下,不分昼夜,“片到人到,人到责任到”,他们奋斗的艰难和牺牲精神在我国集成电路发展史上留

下了浓浓的一笔。王老师曾总结说:“首先必须承认人类认识的局限性,即承认失败的极大可能性,同时善于用各种理性的方法分析失败的原因,找到突破口,使每一次失败都向成功迈进一步,胜利往往产生于再坚持一下的努力之中”。为了促进我国 MOS 集成电路技术和产业的发展,他们又决定将全套设计和工艺技术无偿转让给 20 多个集成电路研制单位和生产单位,为此还办了三期培训班,培训各研制和生产单位的技术骨干,并多次派出了小分队去相关研究所和工厂进行现场讲授和技术指导。使我国 MOS 集成电路技术上上了一个新的台阶。

揭示新器件和新工艺的物理机理

“物理、物理,就是以物讲理,物穷其理”,只有掌握了理论才能提高自觉性。王阳元老师在总结硅栅 N 沟道 1024 位 MOS 随机存储器研制经验基础上认为,有两个关键技术,即硅栅技术和 N 沟道技术,我们对它的科学规律还没有充分理解与掌握,这就直接导致了他对多晶硅薄膜物理和 MOS 绝缘层物理两个课题的系统研究。在多晶硅薄膜研究方面,他首先抓住了多晶硅薄膜氧化层增强氧化现象对集成电路成品率和性能影响这一关键因素进行研究,当时微电子领域的许多论文中公认的观点是:磷掺杂增强了多晶硅薄膜晶粒间界的氧化现象。这个观点正确与否,将对集成电路工艺实践有重要导向作用。王老师对此提出了质疑。为此,他系统地组织实验研究,在 700~1300℃ 宽广的温度范围内,对 P 型、N 型杂质掺杂和非掺杂的多晶硅薄膜进行了氧化特性研究,结果发现:这种增强氧化现象,不仅在磷掺杂多晶硅薄膜中存在,在 P 型掺杂杂质(硼掺杂)和非掺杂的多晶硅薄膜中也同样存在。根据大量实验数据,王老师认为这种氧化增强现象不是掺杂杂质的影响,他抓住多晶硅薄膜的物理特征——晶粒间界的存在,提出是晶粒间界在氧化过程产生的应力导致了氧化增强现象。这个理论是否正确还需要进一步用实验证明。根据粘滞流理论,如果确系应力增强所致,那么在氧化温度高于 1000℃ 时就应释放应力,即不再有增强氧化现象,TEM 实验也证明了这个结论。王老师总结提出了“应力增强氧化”模型,并据此推导出了指导多晶硅薄膜氧化的工程方程和特征参数。这个结果被国际同行认为:“对许多微电子领域工作者都有重要意义”,他在美国、日本的大学和产业界讲学时,这项研究被认为是“对实际研究与开发工作有十分重要的指导意义”。同样,在对多晶硅薄膜电学性质的研究中,发现文献报道的结果有相互矛盾之处,王老师在分析他们实验数据基础上,从多晶硅薄膜晶粒和晶粒间界这一特征出发,正确地指出了“在中等掺杂范围内有载流子迁移率极小值的同时,在高掺杂端有一极大值”,并以多晶硅晶粒大小和晶粒间界面态密度为参变量导出了多晶硅薄膜载流子迁移率与掺杂浓度的关系,这一结果不仅得到了实验证实,而且科学地解释了文献报道中互相矛盾的结果。在研究多晶硅发射极晶体管理论模型时,他指出了现有理论模型的不足之处,并指导博士生,抓住了多晶硅薄膜晶粒间界面态这一特征问题,发展了新的理论模型,科学地解释了多晶硅发射极晶体管的温度特征,该模型从而被国际同行列为是一个代表性的模型。他总结多晶

硅薄膜研究成果,与美国研究多晶硅薄膜的著名专家 T·凯明斯博士合著的《多晶硅薄膜及其在集成电路中的应用》一书,被认为“总结是卓越的,论述是杰出的”,是这一领域科研人员和研究生的一部重要的参考书。

在 MOS 绝缘层物理研究方面,他始与吉利久教授等合作,发展出了一个在现有测试方法基础上的新的计算方法,并在工厂实践中推广应用,可以检测出各种可动离子在 MOS 绝缘层中的浓度分布和界面特性;继则与谭长华教授和许铭真教授合作,发展出了可独立检测绝缘层中电荷陷阱三个基本物理量(能级、面密度和俘获截面)的驰豫谱方法。

探索新型集成电路

“总结发展规律,敏锐地抓住发展动向,提出新的研究课题”是王老师科学研究的一贯作风。早在 20 世纪 80 年代初,他在分析 SOI/CMOS 的基本物理特征后就指出,这是一个有发展潜力的新型集成电路,特别是到超深亚微米阶段以后,它有许多独特(包括功耗低、抗辐照性能好等)的优点。为此,他立即着手组织了研究室,并指导博士生和博士后研究人员开展了系统的研究工作。与研究多晶硅薄膜物理时一样,他首先抓住 SOI 有绝缘夹层这一基本物理特点,由此出发分析了其本质优点和存在的问题——浮体效应。开展了如何抑制浮体效应的设计技术和工艺技术的研究,为了指导实践,提出了基于物理机理分析的新的 SOI/CMOS 器件的物理模型,扩充了 SPICE 模型,研究成功了新型 SOI/CMOS 电路,并在有关单位推广试用。谢希德院士在国际会议特邀报告中称王阳元是我国 SOI/CMOS 技术的“Pioneer”。王老师带领的研究组也是我国最早开展硅化物薄膜研究,特别是 CoSi₂ 系统研究,是与国际上相应研究工作同步的研究组。他们在系统的研究硅化物薄膜的理化特性和氧化特性基础上,将 CoSi₂ 用于亚微米、深亚微米 CMOS 电路和超高速双极集成电路上,研究了复合栅和自对准复合栅结构的 CMOS 电路的应力分布,提出了可指导生产实践的栅结构;在将 CoSi₂ 用于 SOI/CMOS 电路研究中发现了 CoSi₂ 有增强抗辐照效应。在多晶硅发射极超高速双极集成电路研究上则与合作者一起开发了全套具有自主知识产权的超高速集成电路新工艺和新结构。在亚微米、深亚微米 CMOS 电路和双极集成电路两个方面都作出了重要的贡献,专家评审认为“对我国独立自主发展超大规模集成电路具有重要意义”。

主持研制我国第一个大型集成化 ICCAD 系统

20 世纪 80 年代初,我国加大了发展集成电路产业的力度,为此首先要发展设计业。谁掌握集成电路计算机辅助设计,谁就掌握了主动权。基于当时我国的技术水平,政府曾试图通过技术引进方法解决软件工具的源程序问题,但西方国家对此实行禁运,引进谈判经过多方面的努力都未能成功,促使我们下决心自己组织力量来开发大规模集成电路计算机辅助设计系统。这是一项战略性的任务。时任电子工业部部

长的李铁映同志专门致函北大党委书记王学珍同志和校长丁石孙同志,邀请王阳元教授出来担纲挂帅。1986年王老师在关键时刻受命担任全国 ICCAD 专家委员会主任和全国 ICCAT 专家委员会主任。他首先着手组织总体组,亲自主持制定了目标、战略和技术路线。目的就是要拿下具有自主知识产权的集成化的、实用化的大型 IC-CAD 系统,以满足产业发展和国防建设的需要;具有与世界先进国家平等对话的水平和能力。采用的战略就是将全国包括高等院校、中国科学院和工业研究部门各单位从事 ICCAD 软件工具开发研究与应用的优秀人才组织起来,以当时的电子工业部设计中心(中国华大公司前身)为基地,集中时间,集中力量,采用优惠政策,联合攻关,集中开发。同时,由各单位优秀的学术带头人组成全国 ICCAD 专家委员会,实行统一领导和指挥。在技术路线上则确定以软件工程的方法进行研发工作,以全定制数字电路设计工具系统为核心,将半定制(门阵列)电路和模拟电路设计工具开发列为模块,并行组织力量攻关,中间留下接口,以便今后集成。同时组织力量,引进国外先进技术和人才,聘请连永君博士为总设计师实行国内外相结合。王老师在全国联合攻关会上多次强调:“祖国需要是我们科技人员报效祖国的良好机遇。我们一定要科学分析,分析困难和难点,采用正确的路线,锲而不舍,集中力量打歼灭战,不解决问题,死不瞑目”。联合攻关中遇到了各种各样的困难,王老师都依靠国家有关部委支持和电子工业部的领导,亲自组织,予以妥善处理。同时,领导 ICCAD 专家委员在技术上充分分析,提出解决方案和措施,例如全定制与半定制的接口、ICCAD 与 ICCAT 的接口都是在他的主持下解决的。经过 6 年的奋斗,我国第一个按软件工程方法开发的大型集成化的超大规模集成电路计算机辅助设计系统研制成功了。它的研制成功使我国继美国、西欧、日本之后进入到能自行开发大型 ICCAD 系统的先进国家行列。这不仅打破了西方国家对我国实行的禁运,而且为我国集成电路设计业奠定了重要技术基础。这一成果使我国微电子界扬眉吐气,从此能够在平等基础上与西方国家谈国际合作与交流。1992 年,江泽民等中央领导听取成果汇报时,时任机电部副部长的曾培炎同志亲自将李铁映同志请到该系统的展台上指着王阳元对李铁映说:“你当年把他请出来主持这项工作,现在他圆满地完成了任务”。1993 年王老师离别这个岗位时给三级系统提出的要求是:“上要顶天,下要着地,加强系统集成功能;你中有我,我中有你,走向国内国际市场。”1990~1995 年在他担任全国集成电路产品开发专家委员会主任期间,他又组织研制成功了上百种新的集成电路,为我国集成电路设计业的发展推波助航。前后近 10 年的奋斗历程中,王老师学术上的战略决策、战术指挥的才能发挥得淋漓尽致,同志们把他称为“我国微电子领域中的帅才”,“人才难得,帅才更难得”。

突破微机电系统加工和设计技术

20 世纪 90 年代,微机电系统(MEMS)得到发展。这是一门多学科交叉的新兴学科,涉及微电子、精密机械、光电子、微细加工、医学、系统与控制等技术学科和物理、化学、力学、光学、生物学等基础学科,它所具有的多学科交叉融合的特点和多领域应用

的可能性,深深吸引了王老师,他认为这个综合的新兴学科特别适合在北京大学发展,他敏锐地抓住了这一点,将北京大学微电子学研究所一个研究室建制地转为 MEMS 研究室,经多方努力,1996 年国家主管部门在北京大学设立了国家级微米/纳米加工技术重点实验室,王老师任主任。实验室建设之初,王老师对它的定位是“我国已有不少研究 MEMS 的单位,但力量比较分散,且以研发具体器件为主,作为基础的关键工艺技术和设计技术并未解决,从而成为发展的瓶颈。我们必须从基础层次上提升我国 MEMS 科研开发水平,解决瓶颈问题。而关键的工艺技术和设计技术是买不来的,必须自主研发。”他从调研方向、确立课题、改造实验室、考察购置关键设备到组织人力,亲自在第一线指挥,并且指导博士研究生和科技人员在工艺技术和设计技术上攻关突破。与主持研制我国第一个大型集成化 ICCD 系统一样,又是经过 6 年多努力,这个实验室建立了我国第一个与集成电路兼容的 MEMS 设计与加工平台,开发了 5 套具有自主知识产权的工艺加工技术,发布了我国第一套 MEMS CAD 设计软件,有 6 项创新,申请和获得了 20 多项发明专利。实验室实行开放式运行,已为国内外 30 多个研究开发单位和 40 多位包括兄弟院校在内的博士生提供条件到这个实验室进行创新性研究。利用这一平台,可以加工深槽刻蚀等立体图形,已与兄弟单位合作研制成功了 20 多种 MEMS 器件。其加工工艺已达到国际先进水平。美国第一大汽车零部件制造厂在与实验室合作研究的课题结题后致信说:“你们卓越地解决了(深槽刻蚀和复杂三维结构)难题,你们的工作效率和成果是出乎我们意料的。”由北京大学 MEMS 实验室主持开发的硅加速计、压力计、硅陀螺和射频开关等 10 多种器件已开始得到实际应用。

创建世界水平集成电路芯片制造公司

王阳元长期以来一直致力于研究中国微电子产业的发展战略,1997 年以后曾有不少精辟论述发表,参与 2000 年 2 月由国务院科教领导小组主持给国务院领导讲课的讲稿是他研究心得的一个集中体现。发展中国微电子产业,使我们自立于世界民族之林是他终生夙愿。1999 年,在党中央国务院政策的鼓舞下,他一手抓优先发展设计业,一手策划要在中国建设一个世界先进水平的集成电路芯片制造厂。正好这一理想与海外同行张汝京博士、虞华年等先生的意愿不谋而合,于是决定共同创建中芯国际集成电路制造有限公司 SMIC。SMIC 于 2000 年 8 月在上海浦东破土动工,历时仅 13 个月,2001 年 9 月 25 日即建成投产。2003 年,中芯国际一厂被世界知名的《半导体国际》评为全球最佳半导体厂之一(另一个是 Intel 公司的 12 英寸厂),《半导体国际》评价说:“中芯国际把中国与全球权威者的差距由原来的 4~5 代缩小到仅剩 1~2 代。”2002 年 9 月我国第一个 12 英寸厂在北京兴建,仅两年时间,2004 年 9 月 25 日,12 英寸纳米级的集成电路制造厂已正式投产。今年,中芯国际 8 英寸片的产量已达 12 万片/月,占我国大陆地区 8 英寸集成电路产量的 50% 以上,全年盈利 1 亿多美元。北京 12 英寸厂已开始生产 100nm 和 90nm 的集成电路,明年即可盈利,成为真正世界级

的芯片制造厂,在全世界 Foundry 业中排名第三。凡参观考察过中芯国际工厂的国内外专家与领导无不赞叹其建厂之神速,水平之先进。从 1969 年王老师研究第一块硅集成电路开始到中芯国际的创建成功,王老师被业界誉为“我国微电子发展的战略科学家”。

致力于纳米集成电路的研究

“发展未有穷期,奋斗永不言止”,这是王阳元给中国科学院微电子研究所的题词。集成电路也如同各种事物一样,都有其发生、发展和消亡的过程。46 年来集成电路一直按摩尔定律在发展,即 18 个月集成度翻一番。随着特征尺寸的日益缩小,进入纳米量级并越来越接近器件物理的极限时,如何解决这些制约因素?摩尔定律还能在多长时间内存起作用?之后将会是什么样的器件和电路出现?这是一个极具挑战性的问题。王阳元根据科学发展的规律,分析认为,21 世纪头 30 年与 20 世纪 30 年代有着类似的情况,面临着科学上的突破。为此,他进行了两方面工作:一方面与其他院士共同发起了国家重大基础研究课题(“973”课题)——SOC 中新工艺与新器件研究,致力于 5~10 年以后的下一代集成电路研究,与年轻一代学术带头人一起,面对特征尺寸小于 45nm 集成电路、特征尺寸按比例缩小(scaling down)后各种器件物理的制约因素,提出了针对性的解决方案,包括高 K 与金属栅材料,加大载流子迁移率的表面传输层的新材料,加强栅控能力、减小功耗的多栅结构和垂直栅结构,以及浅结等工艺的计算机辅助设计(TCAD)。提出了多种有发展前景的非经典 CMOS 电路,发表了一系列论文,引起了国内外同行的重视。与此同时,部署力量开展基于原子分子自组装技术基础上的(bottom up)量子器件、碳纳米管集成电路的探索研究。高度关注两个渠道的汇合点和突破点,聚焦于集成化技术和减小功耗技术的突破。另一方面,则与其他同事一起积极推进研究工作和大生产的结合,作为指导小组组长,与其他高等学校、中科院微电子所和 SMIC 合作,共同承担国家高技术计划(“863”计划)重大课题研究。成功地开发出了 90nm 的成套技术,开始用于大规模生产;突破了 65nm 的关键技术,为 2~3 年后的规模生产做好了技术储备,大大加快了我国集成电路产业掌握自主核心技术的步伐。

人生贵在执著

王老师早在中学时代就立志成为一名对祖国和人民有贡献的科学家,并孜孜不倦地奋斗。他从不惧怕困难和逃避困难,而是分析困难,解决困难。他认为胜利往往产生于再坚持一下的努力之中。在“1024”位 MOS DRAM 研究过程中,多晶硅薄膜往往“长毛”(实则是“晶须”),得不到光滑均匀的薄膜;而 N 沟道往往反型,控制不好 Na^+ 离子的沾污;这些问题相当长一段时间困扰着他。但他坚信科学规律是可以被掌握的,问题是要在实验基础上充分分析,排除一个个未被认识的难点,越是困难,越要坚持。他与同事们一起经过多次实验以后,掌握了多晶硅薄膜生长温度、气体成分、分

压与工艺程序等参数。然后又针对上百道工艺工序,逐个分析 Na^+ 离子的沾污来源,一个个排除后,终于找到钨丝蒸发是最重要的沾污源,他们一方面努力解决电子束蒸发台(当时属于新型设备),另一方面用钼丝来代替,终于控制了 Na^+ 离子沾污程度,使 N 沟道器件正常工作。接下来,由于净化条件不好,“1024 位”经常缺几“位”,他们发动群众,人人把关,减少沾污,硬是把“1024 位”拼下来了。接着国家有关主管部门主动拨物、拨款,用于建设净化实验室。1024 位研发成功后,任务和困难一个接一个,SOI/CMOS 器件研究,亚微米深亚微米电路研究,超高速双极集成电路研究,ICCAD 三级系统开发,MEMS 重点实验室的建设,直到世界水平 12 英寸纳米集成电路大生产厂的建设,每一项任务都遇到了一系列困难,但王老师把完成每一项接受的任务都与祖国发展、民族振兴联系在一起。他认为这就是人民和历史给予的机遇,机遇不是巧取豪夺来的,机遇只给那些随时准备着为祖国服务的人。在 ICCAD 三级系统研制过程中有不少人多次怀疑过是否能拿下来,但他从不怀疑,他认为,只要科学分析问题,找出矛盾,集中力量,一定可以解决。难怪科技人员总说,“王老师总是喜欢困难,喜欢大家七嘴八舌地发表各种意见,然后集中归纳,提出解决思路与意见,永远保持着乐观的精神”。2004 年 9 月 25 日,在北京的我国大陆地区第一条 12 英寸纳米级集成电路大生产线投产典礼上,王阳元论述经历的苦难后说:“人生的意义就在于享受克服困难后的喜悦,克服的困难越大,成果就越丰硕,喜悦之情就越激越,对人生哲理的理解也就越深刻。”

在系统的科学研究过程中必将有所发现有所发明

现在大家都在谈论“创新”,王老师认为创新是在针对客观发展需要,组织开展系统科学研究工作中取得的。科学发现与技术发明往往有其偶然性,但这种偶然性是寄寓于系统科学研究的必然性之中的,必然性通过偶然性来实现。问题是要善于发现矛盾,提出问题。爱因斯坦说:“提出一个问题往往比解决一个问题更重要。提出新的问题,需要有创造性的想象力,这标志着科学的真正进步。”在从事多晶硅薄膜物理的研究时,王老师就质疑把磷掺杂作为引起增强氧化的主要因素,因为如果是这样,那将是对集成电路工艺过程一个重要的制约因素。系统的实验研究否定了这一认识,并且导致了多晶硅氧化动力学新模型和工程方程的提出;同样,他在指导研究生对多晶硅发射极晶体管模型研究时,世界著名大学的一位研究人员曾劝他:“这个问题已经被做得很成熟了,不必再做了”,但他在仔细研究了多种模型以后发现,他们并不能完全解释实验现象,多晶硅发射极晶体管的温度特性是十分重要的特性,为什么他们的模型不能解释呢?而且他进一步发现,多晶硅氧化层与硅之间的界面态被人们所忽略了,而这恰恰是本质因素之一。系统计算的结果导致了一个新的更为综合的模型,结果很好地解说了多晶硅发射极晶体管的温度特性。这个模型被列为国际上该领域的代表性模型之一,同是上述这所世界著名大学的一位资深教授曾对王阳元教授说:“我正要求我的研究生根据你们提出的模型进行模拟计算。”

20 世纪 80 年代初,他在系统研究 SOI 薄膜材料固相外延生长和 90 年代初他在指导博士生将硅化物用于 SOI/CMOS 电路以提高器件集成度和速度的研究过程中,正是通过持之以恒的系统研究,分别发现了磷掺杂对硅固相外延薄膜速率的增长效应和 CoSi_2 薄膜可以提高器件与电路的抗辐照作用,对后来的研究工作都产生了重要的指导作用。

在组织开展系统研究工作时一定要善于总结科学发展的规律,根据发展规律善于抓住新的学科发展方向和课题,这是王老师研究工作的一个重要特点。正是由于他能敏锐地基于科学发展规律提出新的课题,才引导北京大学的微电子研究工作一步步走向前沿。从 1978 年成立微电子研究室,到 1986 年建立微电子研究所,2002 年以 100% 支持率通过国家重点学科认定。王阳元院士是北大微电子学科的奠基人和开拓者。2002 年建立微电子研究院和微电子学系,预计再用 10 年左右时间,一定能将北京大学的微电子学研究水平推向世界前沿。

得人才者得天下,集人心者集大成

王老师的一生也是培育年轻人的一生。许多其他单位的同志经常问我们北大微电子研究院的年轻同志,是不是北大有什么特殊的待遇给你们?不然北大为什么能留下这么多年轻人呢?年轻的同事回答说:“没有什么特殊的待遇,但王老师的魅力使我们愿意集合在他的周围做事。北大宽松的学术环境、团结的集体和王老师的领导使我们能充分发挥自己的才能,虽然物质条件差一点,我们也都乐于奉献。”王老师以“得人才者得天下,集人心者集大成”为座右铭。带领一个团结的领导班子,信任年轻人,放手让年轻一代去肩负重担,在克服困难的历程中磨炼成长,并随时对他们提出严格要求,指导他们的工作,从而在微电子研究院形成了“团结奋斗、严谨求实、锐意进取、志在创新、目标一流”的教学科研集体。

王老师已培养了 70 多名硕士研究生、博士研究生和博士后研究人员。他对学生的要求是“必须要有好的综合素养;在学术上基础要扎实,对问题要理解透,善于分析问题和解决问题;研究工作中的实验数据要可靠,要尊重实验数据,要志在创新;在工作中要善于团结人,要有团队工作的精神”。他鼓励青年人要终生奋斗,“终生努力,便成天才”,要“青出于蓝而胜于蓝”。他常常引用韩愈在《师说》一文中的论述“孔子曰,‘三人行则必有我师。’是故,弟子不必不如师,师不必贤于弟子,闻道有先后,术业有专攻,如是而已。”现任的北大微电子研究院院长、微电子学系系主任、“973”课题的首席科学家、“863”课题组长都是一批近年来经他培育成长起来的年轻学者。

回顾在微电子学领域 40 多年的耕耘与奋斗,王老师说出了自己对人生意义的理解:“‘人生易老天难老’,从 18 岁进入北大,如今已过花甲之年,可是未名湖依旧。人生总是苦短,再伟大的人物也不能不服从自然规律,何况我们呢?虽然‘老骥伏枥,志在千里,烈士暮年,壮心不已’,但终究力不从心了,未来要靠年轻人了。本来微电子事业就是年轻人的事业。回顾以往岁月,有成功也有失败,有喜悦也为有

许多错误而遗憾和内疚。但无论如何,将一生与祖国的兴旺、民族的发达联系在一起,并为此而终生奋斗在自己的岗位上,是最有意义不过的了,这也就是‘战地黄花分外香’吧。”

作为王阳元老师的学生和同事,整理、编辑《王阳元文集》第二辑是我们又一次的学习过程,也是心灵上的一次净化。在我们的眼中,他永远是年轻的,因为他有一颗年轻的心。我们相信,在王老师的指导和带领下,我们的微电子研究将再创辉煌。我们期待着几年之后《王阳元文集》第三辑的出版。

张 兴 郝一龙 黄 如 张天义 张大成
刘 越 赵宝瑛 李志宏 康晋锋 王永文

2005 年 1 月

目 录

编辑出版说明

序一

序二 我国微电子领域的战略科学家——记我们心目中的王老师

战 略 研 究

■ 微电子科学技术和集成电路产业	3
■ 历史机遇与我国微电子发展之路	46
■ 2020 年,把我国建成微电子强国	58
■ 不到长城非好汉	61
■ 今日长缨在手,何时缚住苍龙	77
■ 建设产前技术研发联盟,自主创新、增强核心竞争力	86
■ 附录:知识产权是微电子产业建设的关键	94

发展前沿综述

■ 21 世纪的硅微电子学	99
■ 日新月异的微电子技术	106
■ Technology Innovation and Talent Cultivation(技术创新与人才培养)	112
■ 面向产业需求的 21 世纪微电子技术的发展	121
■ 硅集成电路光刻技术的发展与挑战	142
■ 超深亚微米集成电路中的互连问题	165
■ 微电子芯片技术发展对材料的需求	185
■ 微机电系统	204

学 术 论 文

第一部分 SOI/CMOS 器件与电路研究

■ A High-Performance SOI Drive-in Gate Controlled Hybrid Transistor (一个高性能 SOI 退火推进型栅控混合晶体管)	213
■ Comprehensive Analysis of The Short Channel Effect in The SOI Gate Controlled Hybrid Transistor	

(SOI 栅控混合晶体管短沟效应的全面分析)	220
■ The Behavior of Narrow-Width SOI MOSFET's with MESA Isolation (采用 MESA 隔离的窄宽度 SOI MOSFET 器件的特性)	235
■ 采用 CoSi ₂ SALICIDE 结构 CMOS/SOI 器件辐照特性的实验研究	248
■ Hot Carrier Induced Degradation in Mesa-Isolated n-Channel SOI MOSFETs Operating in a Bi-MOS Mode (工作在 Bi-MOS 模式下 MESA 隔离的 n 沟 SOI MOSFET 的热载流子 导致的退化)	253
■ 全耗尽 SOI MOSFET 辐照导致的阈值电压漂移模型	263
■ 一个适用于模拟电路的深亚微米 SOI MOSFET 器件模型	269
■ 适用于数模混合集成的 SOI MOSFET 的失真分析	276
■ 一个解析的适用于短沟 SOI MOSFET's 的高频噪声模型	284
■ A Two-Dimensional Physically-Based Current Model for Deep- Submicrometer SOI Dynamic Threshold-Voltage MOSFET (用于深亚微米 SOI 动态阈值电压 MOSFET 的一个基于物理机制的二维 电流模型)	292
■ A Novel Idea: Using DTMOS to Suppress FIBL Effect in MOSFET with High- k Gate Dielectrics (一个新的用 DTMOS 抑制 MOSFET 的 FIBL 效应的方法)	306
■ Distortion Behavior for SOI MOSFET (SOI MOSFET 的失真行为)	315
■ Design Guideline of an Ultra-Thin Body SOI MOSFET for Low-Power and High-Performance Applications (高速低功耗超薄体 SOI MOSFET 的设计方法)	320
第二部分 超深亚微米器件研究——模型, TCAD, High- K	
■ Effect of Grain Boundary on Minority Carrier Injection into Polysilicon Emitter (晶粒边界对少数载流子注入多晶硅发射极的影响)	327
■ The Influence of Tunneling Effect and Inversion Layer Quantization Effect on Threshold Voltage of Deep Submicron MOSFET (隧穿效应和反型层量子化效应对深亚微米 MOSFET 的影响)	338
■ Computer Simulation on Low Energy Ion Implantation Based on Molecular Dynamics Methods (基于分子动力学方法的低能离子注入的计算机模拟)	347
■ 3~6nm 超薄 SiO ₂ 栅介质的特性	357
■ Threshold Voltage Model for MOSFETs with High- K Gate Dielectrics (高 K 栅介质 MOSFETs 的阈值电压模型)	362
■ Interfacial and Structural Characteristics of CeO ₂ Films on Silicon with	

a Nitrided Interface Formed by Nitrogen-Ion-Beam Bombardment (采用氮离子来轰击形成的硅上 CeO_2 的氮化物界面层的表面和结构特征)	368
■ Influences of H^+ and He^+ Co-implantation into Silicon on Electric Characteristics of MOSFETs (氢氦联合注入硅对 MOSFET 电性能的影响)	378
■ Atomistic Simulation of Defects Evolution in Silicon During Annealing After Low Energy Self-Ion Implantation (原子模型模拟硅离子注入硅衬底的退火过程中的缺陷演化)	386
■ Highly Scaled CMOS Device Technologies with New Structures and New Materials (采用新结构和新材料高度等比例缩小 CMOS 器件技术)	396
第三部分 微机电系统(MEMS)研究	
■ Silicon-Glass Wafer Bonding with Silicon Hydrophilic Fusion Bonding Technology (采用硅亲水熔融键合技术实现硅/玻璃键合)	418
■ A Bulk Micromachined Vibratory Lateral Gyroscope Fabricated with Wafer Bonding and Deep Trench Etching (利用圆片键合和深刻蚀技术制造的体硅横向振动陀螺)	424
■ An Improved TMAH Si-Etching Solution Without Attacking Exposed Aluminum (一种不腐蚀 Al 的 TMAH 硅腐蚀液)	433
■ A Small Equipment of Q study of Microgyroscope (陀螺品质因子小型测试系统)	445
■ An Experimental Study on High-Temperature Metallization for Micro-Hotplate-Based Integrated Gas Sensors (基于微热板的集成化学传感器高温金属化实验研究)	451
■ 硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究	466
■ Fabrication of Keyhole-Free Ultra-Deep High-Aspect-Ratio Isolation Trench and Its Applications (无空洞超深高深宽比隔离槽制造技术及应用)	483
■ Simulation of The Bosch Process with a String-Cell Hybrid Method (采用线-单元混合模型进行 BOSCH 仿真)	497
■ Integrated Bulk-Micromachined Gyroscope Using Deep Trench Isolation Technology (采用深槽刻蚀技术的集成体硅陀螺)	513

第四部分 RF 与电路研究

■ Numerical Calculation of Electromigration Under Pulse Current with Joule Heating
(考虑焦耳热的脉冲直流下电迁移数值计算) 520

■ Dependence of Electromigration Caused by Different Mechanisms on Current
Densities in VLSI Interconnects
(VLSI 互连中不同机制下电迁移特性与电流密度的关系) 535

■ 多晶硅发射极超高速集成电路工艺 548

■ Study on a Lateral-Electrical-Field Pixel Architecture for FLC Spatial
Light Modulator with Continuously Tunable Grayscale
(可连续调节灰度的 FLC 光谱调节器的横向电场像素结构研究) 557

■ 基于单元故障模型的树型加法器的测试 566

科学研究方法论

■ 贵在执著,重在分析,在系统的科学研究工作中必将有所发现、有所发明 ... 579

■ 诺贝尔奖离我们并不遥远 586

■ 物理学研究与微电子科学技术的发展 596

产 业 建 设

■ 建设 8 英寸 0.25 微米集成电路生产线项目建议书 609

■ 论信息化与微电子产业 616

■ 北京要建设先进的集成电路芯片制造厂 633

■ 关于建设深圳微电子芯片制造厂的建议 637

■ 如何把国家集成电路设计上海产业化基地做强,做大 650

■ 关于专用设备产业建设的意见 663

■ 在中芯国际 12 英寸投产典礼上的讲话 667

教书育人

■ 从美国加州伯克利大学研究生的培养看我国研究生制度的改革 671

■ 创新与人才培养 676

■ 在迎接 2002 年理科和文科新生会上的讲话 687

■ 立大志,常为新,成大器 689

■ 学校教育帮助我树立了一生的抱负 691

战略研究

微电子科学技术和集成电路产业¹⁾

一、引言

中央关于国民经济和社会发展第十个五年计划建议中指出：“大力推进国民经济和社会信息化，是覆盖现代化建设全局的战略举措。以信息化带动工业化，发挥后发优势，实现社会生产力的跨越式发展。”加强微电子技术创新，发展集成电路产业乃是实现生产力跨越式发展的基础。江泽民主席在国际工程科技大会上指出，“一部近代世界社会生产力的发展史也是科学发现、技术革命、产业革命相互推进的历史。”集成电路发明和发展的历史正是这一科学论断的最好例证。

1.1 微电子和集成电路的定义及其研究范围^[1]

微电子学，简而言之，微型电子学。其核心是集成电路。

集成电路(IC: Integrated Circuit)，是通过一系列特定的加工工艺，将晶体管、二极管等有源器件和电阻、电容等无源元件，按照一定的电路布局进行互连，“集成”在一块半导体单晶(如硅或砷化镓)片上，封装在一个外壳内，执行特定的电路或系统功能。

随着集成电路技术的发展，使整机、电路与元件、器件之间的明确界限被突破，器件问题、电路问题和整机系统问题已经结合在一起，体现在一小块硅片上，这就形成了固体物理、器件工艺、电子学与计算机科学技术等相交叉的新技术学科——微电子学。

对微电子学的研究涉及系统和电路的设计与设计理论、测试技术及与之相关的数学基础研究；新的制造工艺技术及其理化基础研究；新材料的研究；系统装配和封装技术的研究；器件物理、集成电路新结构及相关的介观物理的研究等诸多方面。随着集成电路技术向相关领域的广泛渗透和延拓，微电子学将成为一个更为广泛的边缘性学科。它将包括：计算机系统(芯片计算机)；设计自动化(EDA)软件；芯片操作系统(OSC)及软件与硬件的协同设计；微电子学与机械电子学相结合的微机电系统(MEMS)将涉及到微型机械学、力学、热学、摩擦学和光学等；与生物学结合的生物芯片等则涉及到生命科学；与各种信息处理系统相结合时则又涉及各种信息系统的理论和技术(如语音识别、数字音视频技术)。至于芯片武器系统等则有更为广泛的含义。

1) 2001年2月在国务院科教领导小组的讲稿，后刊载于《科技知识讲座文集》(北京：中共中央党校出版社，2003年3月)。

本文主要讨论集成电路产业和微电子科学技术的战略地位、国际集成电路市场和产业结构的发展规律、21 世纪硅微电子技术发展的主要趋势和方向、我国集成电路产业和微电子科学技术发展的历史机遇和目标、发展我国集成电路产业和微电子科学技术的战略措施等几个方面。制造集成电路的材料有硅、锗等Ⅳ族元素及Ⅲ-V 族、Ⅱ-VI 族等化合物半导体,由于篇幅所限,本文只讨论关于硅的微电子科学技术和硅集成电路产业方面的问题。

1.2 集成电路设计与制造的主要流程

集成电路的设计流程如图 1 所示。集成电路的设计过程实质上是“设计创意+仿真验证”的过程。

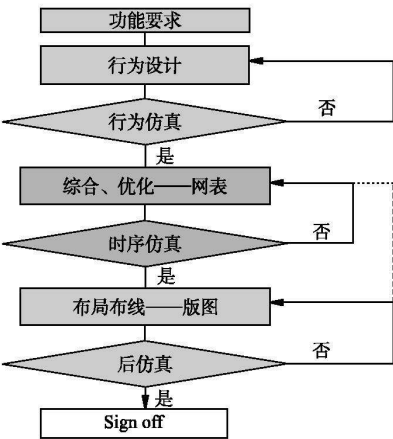


图 1 集成电路芯片设计过程框架图
(资料来源：吉利久提供)

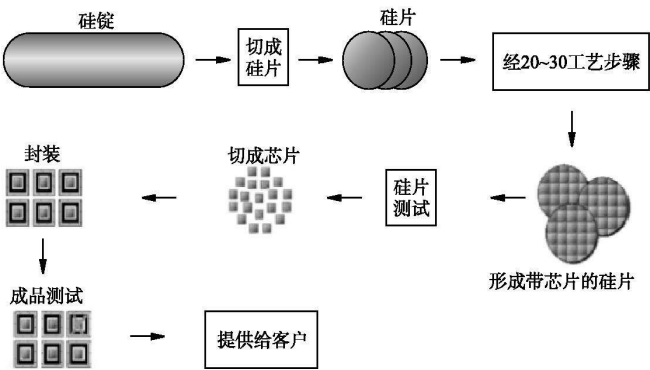


图 2 集成电路制造加工过程
(资料来源：程旭)

集成电路的主要制造过程参见文前彩图 1。其制造工艺过程为:将电路(或系统)设计转换为物理级的布图设计,制成一系列的掩模版。再将掩模版上的图形通过光刻工艺转移到硅片上或用特定工艺形成的薄膜上,制备出有源器件、无源元件,并进行互连,从而形成符合设计功能的电路或系统。集成电路芯片的加工工艺框架示于文前彩图 2。集成电路芯片的加工工艺过程如图 2 所示。图 3 所示为用于集成电路加工的硅单晶片。图 4 则是加工好的集成电路芯片的照片。图中所示为 8 英寸硅片(wafer),内有 457 个集成电路芯片(chip 或 die),每个芯片面积为 57mm^2 ,内含 1.34 亿只晶体管。芯片加工完成后需要进行封装和测试,图 5 示出了各种封装形式的集成电路。

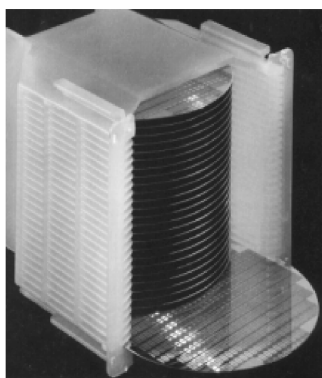


图 3 用于加工的硅单晶片

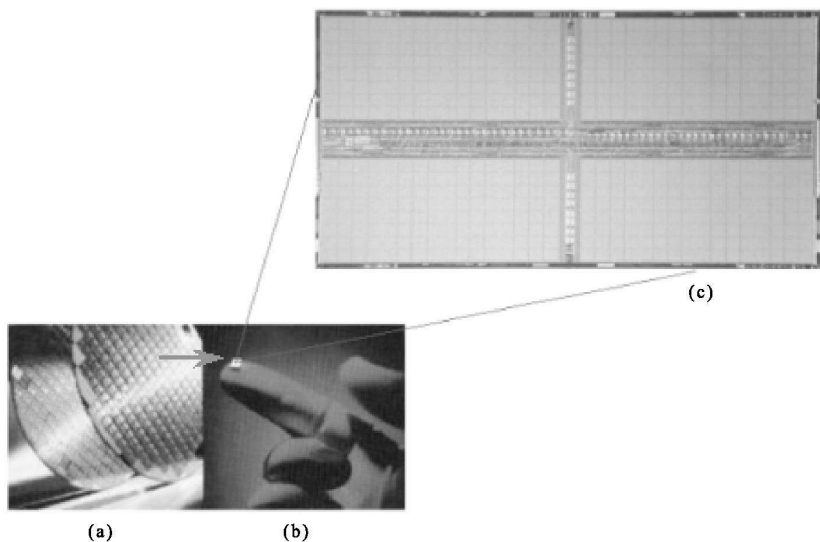


图 4 加工好的集成电路芯片照片。(a) 加工好的硅片;(b) 加工好的单个集成电路芯片;
(c) 64M 位 SDRAM 集成电路芯片的显微照片(华虹 NEC 公司制造)

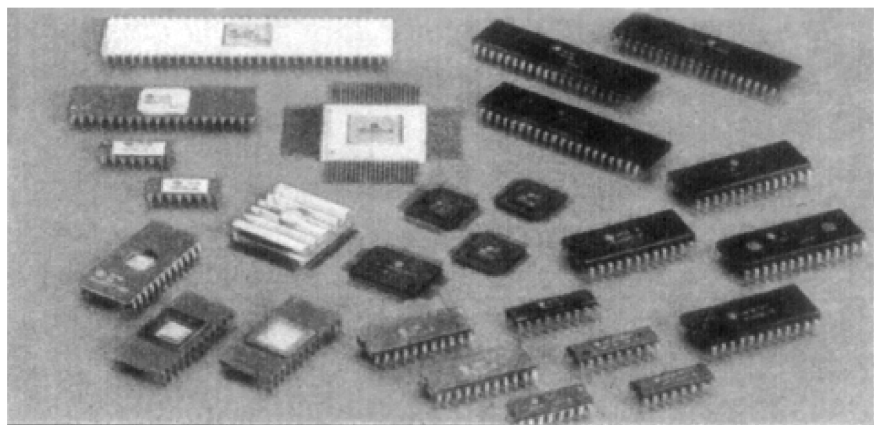


图5 各种封装形式的集成电路

二、集成电路产业和微电子科学技术的战略地位

2.1 信息社会经济发展的基石^[2]

19 世纪末,现代物理学的一系列发现(包括 1895 年德国科学家伦琴(W. K. Röntgen)发现 X 射线,1896 年贝克勒尔(A. H. Becquerel)发现放射线,1897 年英国科学家汤姆孙(J. J. Thomson)发现电子,1898 年居里(P. Curie)和居里夫人(M. S. Curie)发现镭,1900 年普朗克(M. Planck)量子论的建立及 1905 年和 1915 年,爱因斯坦(A. Einstein)分别提出的狭义相对论和广义相对论)揭示了微观世界物理的基本规律,使海森堡·薛定谔(E. Schrödinger)建立了量子力学的体系。20 世纪 30 年代建立的现代物理学成为现代电子信息技术革命的理论基础。

到第二次世界大战结束时,诸多半导体方面的研究成果为晶体管的发明作好了理论和实践准备,特别是二战时期雷达等应用中出现的检波器可靠性问题更触发了对半导体表面理论的深入研究。正是在这种背景下,1946 年 1 月,贝尔(Bell)实验室建立了有多学科科学家参加的研究组,在系统研究的过程中于 1947 年 12 月正式演示观察到点接触晶体管的放大现象。第二年 1 月,肖克莱(W. Shockley)提出了结型晶体管理论,并于 1951 年制备出结型晶体管(1956 年,J. Bardeen, W. Brattarn 和 W. Shockley 三人获得了诺贝尔物理奖)。1958 年,德州仪器公司(TI; Texas Instruments)的 J. Kilby 发明了第一块集成电路(2000 年获得了诺贝尔物理学奖),从而拉开了人类信息时代的序幕。

自然界和人类社会的一切活动都在产生信息。信息是客观事物状态和运动特征的一种普遍形式,它是维持人类的社会、经济活动所必需的重要资源。社会的各个部

分通过网络系统(Internet, Intranet)和通讯系统连接成为一个整体,由高速大容量光纤通讯和通讯卫星群以光速、宽频带方式传输各种信息。像人的神经系统运行于人体一样,信息网络系统把社会各个部分连接在信息网中,从而使社会走向信息化、网络化、数字化。

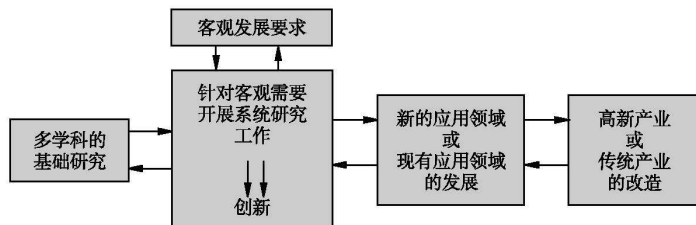


图6 科技创新与基础研究和高新产业的关系

实现社会信息化的网络及其关键部件无论是各种计算机和/或通讯电子装备,其基础都是集成电路。1946年2月在美国莫尔学院研制成功的第一台名为电子数值积分器和计算器(ENIAC: Electronic Numerical Integrator and Computer)的计算机是一个庞然大物,它由18 000个电子管组成,占地 150m^2 ,重30吨,耗电140kW,足以发动一辆机车。然而它的运行速度只有5000次每秒、存储容量只有千位,而且稳定运行时间才7分钟。试想,这样的计算机能够进入办公室、车间、部队和家庭吗?以至于当时有的科学家认为全世界只要4台ENIAC就够了,可是现在全世界计算机不包括微机在内就有几百万台。这只有在1948年Bell实验室的科学家们发明了晶体管(微电子技术发展中第一个里程碑),特别是1958年硅平面工艺的发展和在TI公司的集成电路的发明之后(这可以认为是第二个里程碑),才有可能出现今天这样的以集成电路技术为基础的电子信息产业。1962年,Wanlass和C. T. Sah发明了CMOS技术,这种形式的集成电路在现在集成电路产业中占95%以上;1967年,Kahng和S. M. Sze非易失性存储器的发明,1968年Dennard单晶体管动态随机存储器(DRAM)的发明,特别是1971年Intel公司微处理器的问世,均是微电子技术发展史上的里程碑。1998年,微机在全世界已有4.35亿台,人均占有率为6.6%,在美国,每年由计算机完成的工作量超过4000亿人一年的工作量。

可以毫不怀疑地说,集成电路和软件是信息社会经济发展的基石和核心。正如最近美国工程技术界评出20世纪世界最伟大20项工程技术成就中第五项电子技术时谈到:“从真空管到半导体,集成电路已成为当代各行各业智能工作的基石。”集成电路是最能体现知识经济特征的典型产品之一。这是由其本质所决定的:社会信息化的程度取决于对信息的掌握、处理能力和应用程度,而集成电路正是集信息处理、存储、传输于一个小小的芯片中。当前,微电子技术发展已进入集成系统芯片(SOC: System On Chip)的时代,可将整个系统或子系统集成在一个硅芯片上。进一步发展,可将各种物理的、化学的和生物传感器(执行信息获取功能)和执行器与信息处理系统集成

在一起,从而完成从信息获取、处理、存储、传输到执行的系统功能,这是一个更广义上的集成系统芯片。可以认为,这是微电子技术又一次革命性变革。如图 7 所示,集成电路和集成系统芯片不仅具有“电路”和“系统”功能,而且可以低成本、高效率的大批量生产,可靠性好,耗能少,从而可以广泛方便地应用于国民经济、国防建设乃至家庭生活的各个方面(在日本,每个家庭平均约有 100 个芯片)。从而势必大大地提高人们处理信息 and 应用信息的能力,大大地提高社会信息化的程度。它已如同细胞组成人体一样,成为现代工农业、国防装备和家庭耐用消费品的细胞。

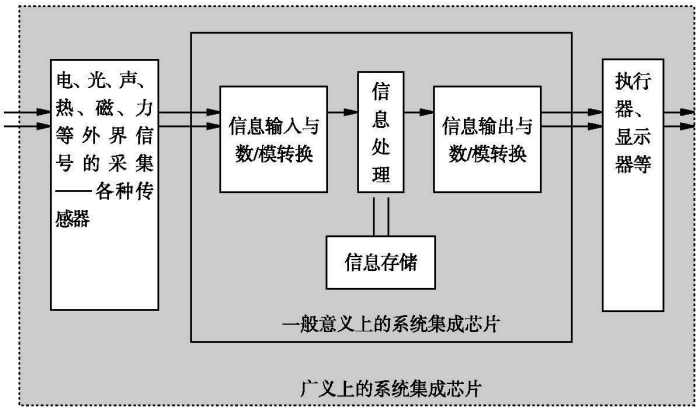


图 7 集成系统芯片(SOC)

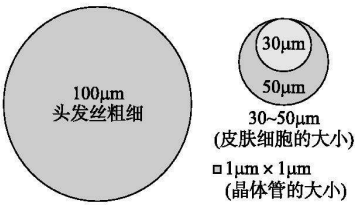


图 8 集成电路中晶体管大小与人类头发丝粗细、皮肤细胞大小的比较

图 8 示出了人体细胞与 20 世纪 90 年代的集成电路加工尺度的比较。现在硅超高速集成电路(VHSIC)的门延迟时间达到皮秒(ps)级,砷化镓 VHSIC 可以更快。目前 IC 的功耗已达到微瓦级,每门速度和功耗乘积(开关能量)已低到 0.005 皮焦[耳],这比人脑神经活动一次所需的能量低 40 倍。目前 IC 的失效率已达到 10^{-10} / (元件·时),如果按照绝对值计算,其寿命值达 100 万年,这比人脑神经细胞的平均失效率低

1000 倍。集成电路产业的产值以年增长率 $\geq 15\%$ 的速度发展,在技术上,集成度以年增长率 46%的速度持续发展,世界上还没有一个产业能以这样的速度持续地发展。1990 年,日本以集成电路为基础的电子工业产值已超过号称第一产业的汽车工业而成为第一大产业。2000 年,以集成电路为基础的电子信息产业成为世界第一大产业。

集成电路的主要原料是地球上除氧以外含量最丰富的元素——硅,原始材料为硅石(silica),这样一块黑褐色小硅片,肉眼看上去,没有任何令人注意的地方,但经过人们的创新设计和一系列创新工艺技术的加工制造,成为集成电路芯片,将人类的智慧与创造固化在硅芯片上,因而这个小硅片就成了知识创新的载体,价值千金。这是典

型的“点石成金”。它如水银泼地,无处不在,改变着社会的生产方式和人们的生活方式,不仅成为现代产业和科学技术的基础,而且正在创造着代表信息时代的硅文化(silicon culture)。因此有科学家认为,人类继石器、青铜器、铁器时代之后现正进入硅石(silica)时代(参见图 9)。一般认为硅石时代从 1968 年开始的,这是因为,在这一年对硅的学术研究成果发表论文数开始超过对钢铁的研究论文数(参见图 9)^[3]。

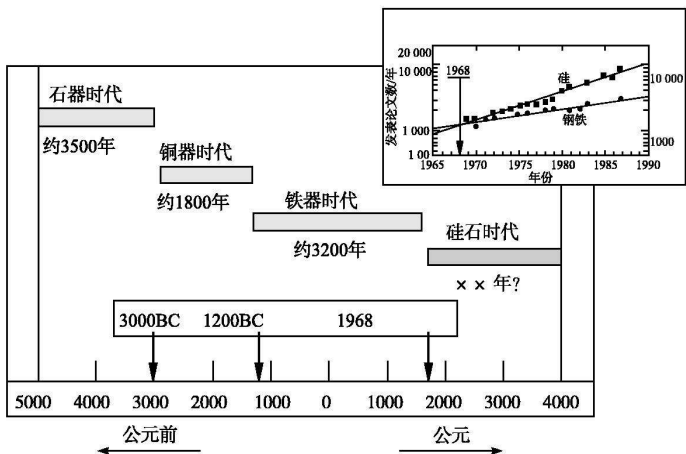


图 9 历史年代划分示意图
(资料来源: S. M. Sze)

集成电路产业对国民经济的战略作用首先表现在当代的“食物链关系”上。现代经济发展的数据表明,GDP 每增长 100 元,需要 10 元左右电子工业产值和 1~2 元集成电路产值的支持,而且,这个数字随着经济的发展而变化。据美国半导体协会(SIA)预测,到 2012 年,集成电路全行业产值将达到 6000 亿美元(修正值),它将支持 6 万~8 万亿美元的电子装备和 30 万亿美元的信息服务业,后者相当于 1997 年全世界 GDP 的总和(参见图 10)。那时世界 GDP 总值将达到 50 万亿美元。

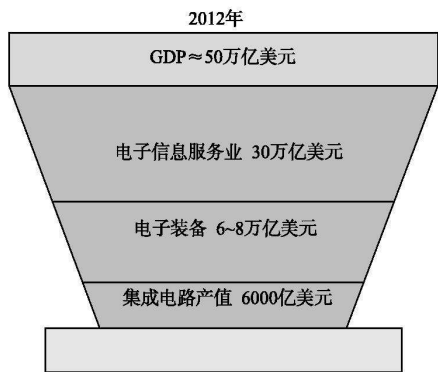


图 10 GDP 与电子工业及集成电路的关系

其次,据 IMF 预测和我们对美国、日本、韩国和我国 GDP、电子工业和集成电路增长率的数据统计^[5]表明,发达国家在发展过程中都有一条规律,即集成电路产值的增长率(R_C)高于电子工业产值的增长率(R_{EI}),而电子工业产值的增长率又高于 GDP 的增长率(R_{GDP})。如图 11 所示, $R_C \approx (1.5 \sim 2) R_{EI}$, $R_{EI} \approx 3 R_{GDP}$ 。我国在 20 世纪 90 年代的实际情况也符合这一规律。

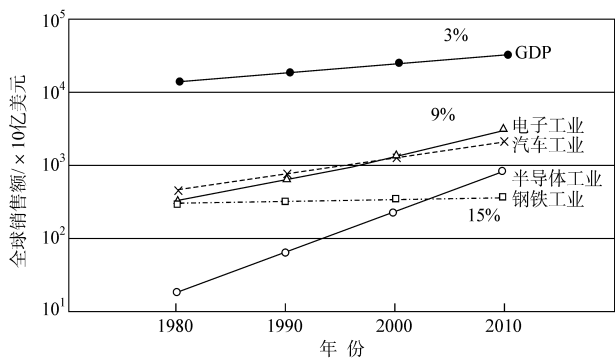


图 11 1980~2010 年 GDP、电子工业和半导体工业的统计值和预测表^[4]

第三,21 世纪的未来经济是信息经济,目前发达国家信息产业产值已占国民经济总产值的 40%~60%,国民经济总产值增长部分的 65%与集成电路有关。因此,抓住了集成电路产业发展,就能促进国民经济的高速发展,这里举两个例子:

(1) 1985~1990 年间,日本公司在世界半导体市场所占份额从 39%上升到 50%,而相应地,北美公司则从 51.4%下降到 37.9%。1986 年日本公司所占世界市场份额为 46%,超过美国居世界首位。在此期间,日本人均 IC 产值年增长率、人均电子工业年增长率和人均 GDP 年增长率分别比美国高出 2.2、1.1 和 0.1 个百分点。20 世纪 80 年代后期至 90 年代初,美国采取了一系列增强微电子技术创新和集成电路产业发展的措施,重新夺回领先地位。20 世纪 90 年代以来,美国经济持续高速发展,主要得益于 IT 产业的发展,而它的基础是微电子技术。与美国成对比的是,近些年来,日本经济增长率很低。相应地,日本集成电路在世界市场中所占份额也连年下降。

(2) 我国台湾地区。20 世纪 60 年代后期人均 GDP 不过二三百美元(1967 年为 267 美元)。但 70 年代和 80 年代大力发展集成电路产业和 IT 业,导致 90 年代的经济高速发展,1997 年人均 GDP 达到 13559 美元。

图 12 示出了 1980 年至 2000 年期间世界集成电路产值增长率与世界 GDP 增长率的比较。从图中可以看出,世界 GDP 的涨落,从总体趋势看,是与集成电路涨落相一致的。只有 1985 年和 1996~1998 年有所例外。造成 1985 年集成电路产值下降的原因主要是 1984 年 DRAM 供不应求使 PC 制造商害怕买不到电路,因而订购储备过多;1996 年则是因 DRAM 产能过剩,使其价格从 1995 年的 16.49 美元下降到 1998 年的 4.10 美元所造成的,1998 年的情况与亚洲金融风暴有关。