

PEKING
UNIVERSITY

北京大学院士文库

王阳元文集



北京大学出版社

北京大学院士文库

王 阳 元 文 集

王阳元 著

北 京 大 学 出 版 社
北 京

内 容 提 要

本书收集作者 80 年代以来各个时期代表性论文 46 篇,反映了他近 40 年来在微电子领域辛勤耕耘的部分成果,共有六个部分组成。第一部分是关于 VLSI 中多晶硅薄膜氧化动力学和电学性质的研究;第二部分是深亚微米集成电路中硅化物及多晶硅/硅化物复合结构的研究;第三部分是新型 SOI 结构器件和电路的研究;第四部分是 MOS 绝缘层物理和小尺寸器件以及互连的可靠性研究;第五部分是关于多晶硅发射极超高速电路和若干新器件的研究;最后,第六部分是关于微电子产业战略研究和发展综述报告。

全书就微电子科学技术发展中新工艺、新器件和新结构电路的一些机理问题进行了系统、深入的研究,就“物”讲“理”,着重于规律性的探讨。内容丰富、逻辑严谨、文章流畅。使读者不仅在科学内容上有所裨益,而且在科学研究的方法论上也会有所启迪。

图书在版编目(CIP)数据

王阳元文集/王阳元著. —北京:北京大学出版社,1998.9

ISBN 7-301-03805-4

I. 王… I. 王… III. ①半导体技术-文集 ②微电子学-文集 IV. TN3-53

书 名: 王阳元文集

著作责任者: 王阳元

责任编辑: 沈承凤

标准书号: ISBN 7-301-03805-4/TP·412

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

电 话: 出版部 62752015 发行部 62559712 编辑部 62752032

排 印 者: 北京大学印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787×1092 16 开本 26.875 印张 471 千字

1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月第一次印刷

定 价: 58.00 元



王阳元院士



北京大学王阳元教授（左）与晶体管发明人之一诺贝尔
奖金获得者肖克莱（右）在一起，中立者为亨利夫人

北京大学资源集团出版基金资助出版

谨以此书献给北京大学校庆 100 周年

《北京大学院士文库》编委会名单

主 任：陈佳洱

副主任：王义道

委 员：（按姓氏笔画为序）

王 选 甘子钊 巩运明

侯仁之 赵亨利 姜伯驹

徐光宪 翟中和

序

最近,北京大学出版社告诉我,北京大学资源集团设立出版基金,资助出版一套《北京大学院士文库》,为北京大学的中科院院士和工程院院士每人出一本学术专著或学术论文集,以记载他们为祖国的科学技术事业所作出的贡献。北大出版社邀我为这套书写个序。

考虑到我较长时间在中国科学院工作,为科学家树碑立传,把他们的伟业记载下来并留传给后人,自然是我应该大力支持的事情。同时,我也曾在北大学习过,这些院士中有的就是我过去的老师,他们对我精心培育的情景,使我终生难忘;有的曾是我的同学或同事,我们之间有着非常深厚的友谊,他们为科学事业无私奉献的精神,给我留下了极为深刻的印象,至今历历在目。无论从工作上考虑还是从师生、同事情义出发,我都愿意为这本书写个序。

我认为,北京大学出版社出版《北京大学院士文库》这套书,是一件非常有意义的事。

首先,《北京大学院士文库》将为我国科学技术文献宝库增添新的内容。北京大学是我国一所著名的高等学府,也是世界上一所有影响的大学。它不仅为国家培养了大批栋梁之材,而且为国家提供了大批重要的科技成果,成为我国一个重要的科学中心。在这所大学里聚集了一批我国最著名的专家和学者,其中仅就自然科学而言,就有中科院院士和工程院院士 30 人。他们中既有学识渊博、造诣精深、蜚声中外的老专家、学者,也有一批成绩卓著,近年来为祖国科学技术事业作出过重大贡献的中年学者。他们在我国科学技术发展史上占有重要的地位,是我国科技大军中的中坚力量。现在,北大出版社把他们的科学技术著作收集起来,集中出版,无论是他们当年成名之作,还是新发表的学术专著和学术论文,都将为我国科学技术文献宝库增添重要的内容。

其次,《北京大学院士文库》还将为我国科学技术事业的发展提供宝贵的经验。这套学术文库不仅完整地记载了这些学术大师的发明和

创造,而且还生动地描绘了他们在不同历史时期为科学事业奋斗的历程。他们以亲身的经历,丰富的史料,独特的见解,深奥的思想,总结了科学技术发展的规律。例如,科学家最需要什么样的支持,在什么样的条件下最容易出成果等。这里既有成功的经验,也有失败的教训;既有成功的喜悦,也有受挫的苦恼。有的院士还从他们的切身感受出发,对我国科技人才的培养,科技体制的改革提出了很好的建议。这些都为我们科技管理部门和科技管理工作,特别是为我国制定有关的科技政策,提供了很好的经验和借鉴。

第三,《北京大学院士文库》不仅是一套科学技术著作,而且是一套富有教育意义的人生教科书。这套文库详细地记载了这30位科学家的学术成就,也如实地记载了他们的人生经历。他们不仅学问好,而且人品好。他们的一生是在爱国主义旗帜下,为科学事业奋斗的一生。他们通过自己的勤奋努力,走了一条成功之路。他们的成功经验无论对年轻人,还是对一切有志于献身科学事业的人,都有极好的教育意义。

最后,我向这30位院士为祖国科技事业作出的贡献表示衷心的感谢!对《北京大学院士文库》的出版表示热烈的祝贺!也希望能有更多的科学家的学术著作和传记问世,因为科学是推动我们社会发展的强大动力。

中国科学院院长

周光召

1996年10月

序

北京大学出版社决定编辑出版《北京大学院士文库》，这件事情很有意义，我非常赞成。

从世界高等教育的发展看，教师是大学的核心，他们构成学校的基调。世界一流大学都具有很强的教师阵容，拥有一批世界公认的学术权威和知名学者。正是他们能够培养出世界公认的优秀人才。其中一部分毕业生能够成为当代世界政治、经济、文化、科学领域里的杰出代表。同时，他们能够取得重大的科研成果，特别是在基础研究方面，能取得具有划时代意义的科研成果。

在中国科技、教育界，院士是最高学术水平的象征。他们对国家科学技术的发展起着相当重要的作用。北大是拥有院士最多的大学，北大人一直为此而自豪。北大的几十位院士可分为两部分，一部分是老院士，他们在中国科学院成立之初就因为各自取得的成就而成为最早的一批院士（当时称学部委员）。这些老院士德高望重、学风严谨、蜚声国内外，为北大乃至中国的科学技术和文化事业的发展作出了奠基性贡献。他们当中有理科的王竹溪、叶企孙、江泽涵、许宝騄、周培源、胡宁、段学复、饶毓泰、黄昆、张青莲、黄子卿、傅鹰、汤佩松、李继侗、张景钺、陈桢、乐森珥等教授。北大的盛名，在很大程度上是与这些堪称大师的第一代院士的名字联系在一起的。这一长串院士名单，奠定了北大在中国学术界、科学界的地位。谈起他们，像我这样的后辈无不怀有敬仰之情。他们像一块块强力磁铁，吸引着一代代中华学子到燕园求学，在他们的教诲、指导、影响下，新中国急需的大批优秀人才源源不断地从北大培养出来，成为社会主义建设的栋梁之材。当院士文库推出的时候，这些老院士当中已有不少人离开了我们，但他们为北大、为国家建立的功勋，他们的英名将永远为人们铭记！

北大的学术生命是长青的，继第一批院士之后，80年代、90年代，北大又一批理科教师，其中许多是建国以后培养出来的，成为中国科学院院士和中国工程院院士，他们可以说是北大那些与新中国风雨同

舟、不畏清贫、不怕艰险、为教育和科学事业执着奉献的中年教师的代表，是今日北大的骨干依靠力量、学术中坚。

人类就要进入 21 世纪，北大也即将迎来建校 100 周年，当此世纪交替之际，北大雄心勃勃地提出：到 21 世纪初叶建成世界一流的社会主义大学。这是一个需要为之付出极其艰苦努力的、振奋人心的目标。以院士为代表的一流教师队伍是我们实现这一目标在学术上的最重要依托。有这样一支老年、中年教师队伍，再加上我们正在迅速成长起来的生气蓬勃、富有想象力和创造力、奋发向上、成为北大未来希望所在的青年教师，我们的目标是一定能够达到的。

院士们的工作成就，有很多都是在相当困难的条件下取得的，他们的奋斗精神和他们的成果一样，都是我们建设世界一流大学的宝贵财富和源泉。为院士出版文集，将他们的代表性学术成果或成名之作结集出版，是对院士们成就的肯定，也将使人们从他们的奋斗足迹中，得到某种启迪和鼓舞。院士文库将为我校的学术宝库增添重要的内容，成为哺育青年学生成长的极好教材。

北大出版社的决定得到了北大资源集团的热情支持，他们出资建立北大资源集团出版基金，资助院士文库的出版。我作为北大校长和一个院士、一个教师，要向北大出版社和北大资源集团为学术专著的出版和学校建设所作的努力表示敬意！

北京大学校长
中科院院士

陈佳洱

1997 年 1 月

王阳元小传

王阳元,1935年1月1日出生于浙江宁波。1953年从浙江宁波第一中学毕业后进入北京大学物理系学习,1958年大学毕业后留北京大学物理系任教。1969年—1978年,他任北京大学电子仪器厂课题组组长、科技组组长。在他的主持下,成功地研制出了我国第一块三种类型(硅栅N沟道、硅栅P沟道、铝栅N沟道)1024位MOS动态随机存储器。这项成果有力地促进了我国MOS集成电路技术和产业的发展,并荣获全国科学大会奖。被认为是我国硅栅N沟道MOS集成电路技术开拓者之一。

从80年代至今,王阳元教授一直致力于我国微电子事业的发展。在他的领导下,北京大学于1983年成立了微电子学研究室,1987年改制为微电子学研究所,组成了一支由较高学术造诣专家为学术带头人、中青年科技人员为骨干的、朝气蓬勃的、团结的科研队伍。作为微电子所所长,王阳元教授高瞻远瞩,对国际微电子学技术研究和产业的发展趋势能及时把握和预见,对学术方向不断地改进、创新以适应社会发展当前和长远的需要。在他的领导和直接参与下,北京大学微电子学研究所出色地完成了多项国家重点科技攻关任务和国防重点预研任务,为我国集成电路事业的发展做出了重要的贡献,也使北京大学微电子学研究所成为我国集成电路技术研究、开发和高级人才培养的重要基地之一。

1980年,王阳元同志晋升为副教授,1982年4月到1983年7月在美国加州伯克利大学(U. C. Berkeley)进行访问研究,1985年晋升为教授,1990年被批准为博士生导师,1995年当选为中国科学院院士。1987年1月至1993年7月,他先后应邀兼任电子工业部微电子局副局长和机械电子工业部微电子与基础产品司副司长。现任北京大学微电子学研究所所长、国防科工委科技委兼职委员兼军用微电子专业组组长、电子工业部科技委委员、国家计委科技司集成电路产品开发专家委员会主任、中国电子学会常务理事、半导体与集成电路技术学会副主任委员、北京市电子学会副理事长、北京市科协副主席、《半导体学报》和《电子学报》(英文版)副主编、《微电子学丛书》主编、国际无线电联盟(URSI)半导体委员会中国委员会主席等职。

王阳元教授在大规模集成电路新工艺、新器件和新结构电路及其应用基

础理论领域开展了系统性的、富有开创性的研究工作。80年代,在大规模集成电路多晶硅薄膜氧化动力学研究方面,他以实验为依据提出了“应力增强”氧化模型,并应用该模型导出了在增强氧化条件下多晶硅薄膜的氧化动力学特性,提出了多晶硅薄膜氧化的特征参量和工程应用方程;并结合粘滞流理论解释了不同氧化条件下多晶硅/多晶硅 SiO_2 界面形貌不同的原因。在电学性质研究方面,基于晶粒间界陷阱模型,提出以晶粒大小为参量,载流子迁移率随掺杂浓度变化的统一关系。为多晶硅薄膜氧化条件的选取和掺杂浓度的选择提供了科学依据,被认为“对微电子领域的许多工作者都有很大重要性”。获国家教委科技进步一等奖。

从80年代至90年代中期,他在研究 NbSi_2 , TaSi_2 , TiSi_2 和 CoSi_2 等硅化物基础上,研究了用于亚微米器件和电路的硅化物/多晶硅复合栅和自对准复合栅结构及其应力分布,提出复合栅结构中多晶硅优选厚度及相关工艺途径。被认为:“所取得的多项成果和大量实验数据对我国独立自主地发展微米和亚微米集成电路技术具有重要意义。”

从80年代至今,他在绝缘衬底上生长硅单晶薄膜(Silicon On Isulator-SOI)和 TFSG/CMOS 电路研究中,发现了磷掺杂对固相外延速率的增强效应以及 CoSi_2 栅对器件抗辐照特性的改进作用。在 SOI/CMOS 器件模型和电路模拟工作方面,提出了 SOI 器件浮体效应模型和通过改变器件参量抑制浮体效应的工艺设计技术。扩充了 SPICE 模拟软件。

由于在新器件及其物理基础研究方面的成果,获光华科技基金一等奖。

在 MOS 小尺寸器件物理及其失效机制的研究方面,他与谭长华、许铭真教授等合作提出了新的热激发离子电流(TSIC)的计算方法和场辅助热激发离子电流分析方法(FATSIC),在此基础上提出一种磷硅玻璃钝化度的分析方法;VLSI/ULSI MOS 结构陷阱电荷弛豫谱的分析方法,分离了 MOS 绝缘层内原生陷阱电荷和高场诱导陷阱电荷,首次在国际上实现了有关陷阱电荷三个基本参量(俘获截面、面密度和矩心)的直接测量和在线检测,获国家发明三等奖。

进入90年代,王阳元教授与张利春、倪学文教授等合作开展了“多晶硅发射极超高速电路研究”。对多晶硅发射极超高速电路进行了理论和工艺的深入研究,在理论上提出了一个新的、能够更准确反映多晶硅发射极晶体管物理特性的解析模型。在工艺制备技术上,通过采用先进工艺和进行工艺改进创新,使多晶硅发射极超高速电路平均门延时达到了 $30\sim 50\text{ps}$,这项成果

的取得使我国双极集成电路技术迈上了一个新的台阶,对改变我国双极集成电路技术落后面貌有着重要的意义。1996年,获得国家计委、国家科委和财政部颁发的国家“八·五”重大科技攻关成果奖。

王阳元教授还一直主张要自主发展我国集成电路产业,要摆脱受制于人的落后局面。80年代以来,他不仅在我国著名的报刊、杂志上发表了一系列有关我国集成电路产业发展战略的研究,受到了国家有关领导部门的重视;而且直接参与了我国微电子产业与科学技术发展战略与规划的制订工作。其中一篇关于大学在发展微电子生产中的作用的论文,经国务院科技领导小组负责同志批示后,成为规划中关村产业技术开发区倡议的理论之一。1987—1991年,他作为全国 ICCAD 专家委员会主任,组织领导了 ICCAD 科技攻关,研制成功了具有自主知识产权的我国第一个集成化 VLSI ICCAD 系统(三级系统),使我国继美国、西欧、日本之后进入能自行开发大型 ICCAD 系统的先进国家行列。为我国集成电路设计业的发展打下了重要技术基础。该成果1993年获国家科技进步一等奖。

作为一名大学教育工作者,王阳元教授十分重视人才的培养。近几年来,他先后培养出了几十名硕士、博士和博士后研究人员。他努力为年轻人创造良好的教育、科研和生活环境。在工作中,他特别重视启用年轻有为的博士、硕士,努力给他们创造机会,让他们勇挑重担,担负起教学、科研中的重要任务,正因为如此,北京大学微电子学研究所聚集了一大批年轻有为的博士、硕士,使各方面的工作都充满了生机和活力。

由于王阳元教授在科学研究上的突出贡献,他取得了16项重大研究成果,获得了14项国家和部委级奖励;共发表著作和译著五部,论文130余篇。

目 录

王阳元小传

第一部分 VLSI/ULSI 中多晶硅薄膜的研究 (1)

The Oxidation Kinetics of Thin Polycrystalline Silicon Films

(多晶硅薄膜氧化动力学) (3)

集成电路中多晶硅薄膜的载流子迁移率的实验研究和理论模型 (20)

The Enhanced Oxidation at Grain Boundaries of Thin Polycrystalline
Silicon Films for ULSI Applications

(用于 ULSI 的多晶硅薄膜晶粒间界的增强氧化) (30)

第二部分 POLYSIDE 和 SALICIDE MOS 器件结构的研究 ... (39)

A Submicrometer Cobalt Salicide Process for VLSI

(用于 VLSI 的亚微米 CoSi_2 Salicide 结构的工艺研究) (41)

The Effects of Stress in TiSi_2 Polycrystalline Silicon Structure

on the Si/SiO_2 Interface and Properties of MOSFET

(TiSi_2 /多晶硅结构中应力对 Si/SiO_2 界面和 MOSFET 性能的影响)

..... (54)

自对准硅化物 CMOS/SOI 技术研究 (66)

The Morphology and Characteristics of TaSi_2/Si Films Oxidized
at High pressure

(高压氧化 TaSi_2/Si 膜的形貌和特征) (74)

第三部分 SOI 结构器件和电路的研究 (83)

The Influence of Ion Implantation on Solid Phase Epitaxy of

Amorphous Silicon Deposited by LPCVD	
(离子注入对 LPCVD 淀积的非晶硅层固相外延的影响)	(85)
薄膜 SOI/CMOS 的 SPICE 电路模拟	(97)
通用薄膜双栅 SOI MOSFET 电流模型	(106)
适于器件及电路分析的全耗尽短沟道 LDD/LDS SOI MOSFET	
器件模型	(114)
短沟道 CMOS/SIMOX 器件及电路的辐照特性研究	(126)
Note Analytical Modeling for the Collector Current in SOI	
Gate-Controlled Hybrid Transistor	
(SOI 栅控混合管集电极电流解析模型)	(132)
薄膜深亚微米 SOI MOSFET 的瞬态数值模拟	(141)
低压高速 CMOS/SOI 器件和电路的研制	(149)
SOI MOSFET 浮体效应与抑制的研究	(155)
第四部分 MOS 绝缘层物理和器件及互连可靠性的研究	(167)
The Kinetics Behavior of Mobile Ions in SiO ₂ studied with TSIC	
and TVS Measurements	
(用 TSIC 和 TVS 方法研究 SiO ₂ 中可动离子的动力学性质)	(169)
磷硅玻璃钝化度和可动离子界面陷阱能级分布的研究	(178)
Field-Assisted Thermally Stimulated Current of Mobile Ions in	
a Dielectric Layer of a Metal-Oxide-Semiconductor Structure	
(MOS 结构介电层中可动离子的场致热激发电流)	(190)
Oxide Current Relaxation Spectroscopy in Tunneling Metal-Oxide	
-Semiconductor Structure under High Field Stresses	
(MOS 结构高场应力下的氧化层电流弛豫谱)	(208)
A New Technique for Determining the Capture Cross Section of the Oxide	
Traps in MOS Structure	
(一种决定 MOS 结构氧化层陷阱俘获截面的新技术)	(224)
高场势垒调制效应及其对陷阱测试分析的影响	(231)
Measuring and Modeling Stresses in Al Metallization	
(Al 金属化中的应力测量及模型)	(240)

第五部分 多晶硅发射极器件及新器件的研究 (247)

An Analytical Model for Determining Carrier Transport

Mechanism of Polysilicon Emitter Bipolar Transistors

(多晶硅发射极双极晶体管载流子输运机制的解析模型) (249)

Note Analytical Relations Pertaining to Collector Current Density

and Base Transit Time in Bipolar Transistors

(关于双极晶体管集电极电流密度和基区渡越时间的解析关系) (273)

Note Analytical Model of Collector Current Density and Base

Transit Time Based on Iteration Method

(基于迭代法的集电极电流密度和基区渡越时间的解析模型) (280)

可用于 GeSi/Si 应变异质结结构应变和应力分布的模型研究 (287)

Propagation Characteristics of High-Tc Superconducting Interconnect

for VLSI Packaging Predicted by a Generalized Two-Fluid Model

(基于推广二流体模型的 VLSI 系统高温超导互连的传输特性) (296)

第六部分 发展综述 (313)

面向 21 世纪的硅深亚微米集成电路若干科学技术问题 (315)

硅微电子技术物理极限的挑战 (326)

第七部分 战略研究 (347)

谈谈充分发挥大学在建设微电子工业中的作用 (349)

遵从科学规律,把握历史机遇,加速发展我国集成电路产业 (356)

发展微电子产业,促进社会信息化 (364)

第八部分 科学研究方法论 (383)

针对客观需要,开展系统科学研究,必将有所发现,有所发明

——纪念晶体管发明 50 周年 (385)

发表著作及论文总目录 (397)

后 记 (407)