

物理学研究与微电子科学技术的发展^{*}

王阳元[†] 康晋锋

(北京大学微电子研究所 北京 100871)

摘要 回顾了微电子学的诞生和微电子技术的发展历史,展望了微电子技术未来的发展趋势.在微电子技术诞生和发展过程中具有一些里程碑式的发明,如晶体管、集成电路、集成电路平面工艺、MOS器件、微处理器、光刻技术、铜互连工艺的发明等,其中物理学研究和突破起了关键的基础作用.在社会需求、物理学研究和科技进步的推动下,微电子技术一直并将继续以特征尺寸缩小、集成度提高的模式,按摩尔定律预测的指数增长率发展.微电子技术的发展,不仅为物理学研究提供了崭新的技术基础,而且为物理学研究展现了更为广阔的空间.但随着器件特征尺寸逐渐缩小并逼近其物理极限,微电子技术的发展将受到来自于材料、工艺和物理基础等方面的挑战,并呈现出多维发展的趋势,这些挑战涉及了微电子学与物理学的共同理论基础,需要二者互相契合,期待新的突破.

关键词 微电子学,集成电路,摩尔定律,物理限制

PHYSICS RESEARCH AND THE DEVELOPMENT OF MICROELECTRONICS

WANG Yang-Yuan[†] KANG Jin-Feng

(*Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract We review the birth and development of microelectronics. There are many historical milestone inventions such as transistors, integrated circuits, the planar process, metal-oxide-semiconductor transistors, microprocessors, lithography and copper interconnect technology in which physics theories and achievements played a key role. The future development of microelectronics is also overviewed. Under the drive of social demand and advances in physics and technology microelectronics has been and will continue developing according to Moore's Law with shrinking size but increasing integration. On the other hand, the developments in microelectronics not only provide a strong technology base but also open up new research areas for physics research. As device feature size approaches its physical limit, microelectronics will face new challenges involving material, technology and basic physics, and will develop in a multi-dimensional fashion. As these challenges involve the common theoretical basis of microelectronics and physics, close interaction of the two fields is acquired for future new breakthroughs.

Key words microelectronics, integrated circuits, Moore's Law, physical limitation

1 微电子技术是 21 世纪信息社会发展的技术基础

信息与材料、能源、基因一起构成人类社会发展的最重要的资源.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,而基因在一定意义上也是信息的一种特殊形态.信息包括信息的采集、处理、传输、存储、执行或显示等过程,每一环节的突破,都将对社会进步和发展做出重要贡献.当前以数字化和网络化为特征的、以计算机为基础的信息技术正以极强的渗透性和基础性,渗透和改造着各种产业和行业,

改变着人类的生产和生活方式,改变着经济形态和社会、政治、文化等各个领域的面貌.这一切都源于微电子技术的诞生和发展.以计算机为例,在 1945 年,当世界上第一台电子计算机 ENIAC 问世时,它俨然是一个庞然大物:由 18000 个电子管组成,占地 150m²,重 30t,耗电 140kW,而且价格昂贵,其成本为 40 万美元,但运算速度仅 5000 次/秒,存储容量只有千位,而且性能还不可靠,平均稳定时间才几分钟.试设想,这样的计算机能进入办公室、家庭、以至个人携带吗?以至于在当时有科学家认为全世界只要

^{*} 2002-01-31 收到

[†] 通讯联系人. E-mail: yyw@ime.pku.edu.cn

4 台 ENIAC 就够了。然而,在今天,一台体积仅为笔记本大小的笔记本电脑其运算速度为每秒数亿次,重量不足两公斤,功耗微乎其微,可以稳定、高可靠性地工作数十年,而成本仅为千美元量级,且可以随身携带,完成各种功能。正是在微电子技术的推动下,以计算机为基础的信息技术才能取得如此巨大的成就,使得人类社会在 21 世纪成为信息的社会。

那么,什么是微电子学呢?简言之,微电子学即微型电子学,它是脱胎于电子学和固体物理学的一门交叉性的技术学科,其主要任务是研究在固体(主要是半导体)材料上构成微小型化电子电路、子系统及系统的学科。以微电子学为基础发展起来的微电子技术包括半导体材料及器件物理,集成电路及系统的设计原理和技术,芯片加工工艺、功能和特性的测试技术等重要的组成部分,其核心是集成电路技术。所谓的集成电路就是将晶体管等有源元件和电阻、电容等无源元件,按照一定电路“集成”在一起,完成特定的电路或系统的功能,它不仅表现在体积减小上,而且反映在制造工艺技术上有着内在的必然联系,可以一次加工完成。微电子技术发展经历了诞生和飞速发展的两个阶段。目前正在经历一个新的发展阶段,一方面它将面临着来自于技术、材料和基础理论等限制的挑战,另一方面,期待着新的飞跃,这一飞跃可能对材料、技术和基础物理理论等多方面带来革命性的变革。

微电子技术是在应用需求的推动下,依靠一系列的创新,包括原始创新、技术创新和应用创新等建立发展起来的。近几十年来,微电子技术一直是按照摩尔定律的指数增长规律发展的。摩尔定律是 Intel 公司的创始人之一,时任美国仙童公司(Fairchild)研究部主任的 Gordon E. Moore 于 1964 年在总结集成电路发展趋势的基础上^[1],对未来集成电路的发展趋势而做的预测。其基本内容是,在集成电路的单个芯片上集成的元件数,即集成电路的集成度,每 18 个月增加一倍,即集成度每三年翻两番,特征尺寸缩小 $\sqrt{2}$ 倍,而且集成电路芯片的需求量也以相同的速度增加,在集成电路性能提高的同时价格下降。微电子技术和产业的这种指数率是惊人的。举一个形象的例子,如果汽车工业和航空工业能够以同样的速度发展,那么,目前一辆最先进的高级轿车只需要几美分,而一架大型波音 747 客机,仅需数百美元。微电子技术已经成为整个信息社会发展的基石,这是由集成电路的本质所决定的。信息社会的进步取决于人们对信息的掌握和利用程度,而集成电路恰恰

是将信息的获取、传递、处理、存储、交换等功能集成在一个小小的芯片上,而这种芯片又可以低成本、高可靠性、大批量地生产出来,且功耗低、体积小,从而可在前所未有的广度和深度上得到推广应用,成为现代工农业、国防和科学技术的技术基础。

综观微电子的发展史,微电子学是在物理学发展和突破的基础上建立起来的,而微电子技术的每一步发展都是以物理学研究的成果为基础的;反过来,微电子技术的发展推动和促进了物理学的研究和发展,并为物理学的研究开辟了更为广阔的空间。下面,我们将就在微电子学发展过程中起到重要作用的创新成果及物理学在其中所起的作用进行介绍,同时还将介绍微电子技术所面临的挑战及其与物理学研究的关系。

2 微电子学诞生于物理学的突破之中

微电子学的诞生是以半导体晶体管的发明为标志的。晶体管是人类历史上最伟大的发明之一,是固体物理、半导体物理、材料科学等取得一系列重大突破后的必然结果^[2]。

19 世纪末,现代物理学的一系列发现揭示了微观物理世界的基本规律,为海森伯和薛定谔建立现代物理学的基础——量子力学体系奠定了基础。20 世纪 30 年代建立的以量子力学为基础的现代固体物理学的成熟和完善,为晶体管的发明奠定了理论基础。对于晶体管的发明,有两个基础研究工作需要特别提及。其一是量子力学的建立和有关电子与物质结构研究的迅速发展。1924 年衍射实验证实了电子的波动性概念;1928 年提出了电子的费米-狄拉克统计理论;1931 年,威尔逊(A. H. Wilson)提出了固态半导体的量子力学理论,与固体 X 射线实验相结合,奠定了今天固体能带论的基础。其二是将霍尔效应应用到半导体材料研究之中。该方法的引入,使得人们可以深入研究半导体的导电性质,把半导体与金属区别开来,并发现了半导体中有两种载流子。

在这两个基础理论与实验的指导下,肖特基(Schottky)和莫特(Mott)于 1939 年第一次提出了空间电荷区理论,B. Davidor 提出了不同半导体之间也可以有整流效应,并提到了半导体中的一个关键概念——少数载流子的重要性,只是限于当时的科学水平,这样一个重要概念并未得到应有的发展和重视。

半导体材料研究方面取得的进展,也是晶体管物理

发明的一个必要基础. 半导体研究的高潮是源于实际需要的触发. 当时以真空电子管技术为基础的无线电技术已经非常成熟, 但由于更短波长的无线电检波需要, 很快发现真空管是无济力胜任的, 必须要有新型的检波器. 为此, 曾经被研究但由于性能不稳定而被放弃的硅晶体检波器重新引起人们的注意. 基于改进晶体检波器的需要, 希望得到更纯的硅, 由此促进了半导体材料研究工作的进展. 随着 p 型和 n 型半导体材料的获得, 很快发现 p-n 结是很好的整流器, 并具有光生伏特效应. 在与真空管的类比中, 人们很自然地想到能否在 p-n 结上加一个控制栅极, 从而做成一个固体放大器. 第二次世界大战以后, 贝尔实验室集中了一批科学家, 其中有物理学家、化学家、冶金学家, 共同组成了半导体组, 针对当时提出的一些令人费解的问题, 开展系统的基础研究工作, 力图搞清楚其中的一些基本规律. 由于基础材料研究工作的进展, 获得了完整性比较好、纯度比较高的锗、硅材料, 排除了诸如硒、氧化亚铜等材料中的一些复杂因素, 因而在客观上具备开展基本物理现象研究的条件. 贝尔实验室半导体研究组在比较单纯的锗材料上进行了场效应的实验, 但最初的实验结果却比理论预言至少小 1500 倍! 为了探究其原因, Bardeen 提出了实际硅表面的表面理论, 成功地解释了场效应理论与实验间的矛盾. 为了进一步研究 Bardeen 的表面态理论对场效应的影响, 化学家 Gibney 提出在外电场电极和半导体之间加一个绝缘电介质, 以增强电场, 克服表面态的影响, 这一来自化学家的重要建议, 解除了物理学家久已存在的困惑, 大大促进了贝尔实验室半导体小组在场效应放大器的研究工作, 并于 1947 年 12 月 16 日诞生了具有放大和功率增益性能的点接触二极管. 点接触晶体管的发明给肖克莱以极大的启示, “少子注入”的概念被紧紧抓住了. 但点接触晶体管并不稳定, 在物理分析上也比较困难, 因为它是一个三维问题. 为了进一步搞清楚点接触晶体管的工作原理, 并加以改进, 肖克莱在对 p-n 结基本物理图像进行长期研究的基础上, 提出用 n 型半导体与薄的 p 型材料面接触代替探针的点接触, 这样就可以用一维模型来进行分析. 1948 年 1 月 23 日, 肖克莱完成了晶体管的三个基本概念, 宣布了面结型晶体管的发明, 该结果于 1949 年以论文形式发表. 此后的发展十分迅速. 1950 年和 1952 年分别制得了锗、硅单晶, 1950 年用生长法制成了锗 n-p-n 结型晶体管, 1951 年用合金法制成了锗 p-n-p 晶体管, 1954 年用气相

扩散制成了大功率硅整流器和高效率的光电池, 1956 年就制成了扩散型基区台式晶体管. 1956 年, Bardeen、Brattain 和 Shockley 一起获得了物理学的诺贝尔奖. 自此, 也宣告了微电子学的诞生.

可以看到, 晶体管的发明是在社会需求的推动下, 在物理学研究成果和技术进步的基础上, 在开展系统的研究中取得的, 其中物理学的研究成果对晶体管的发明起了决定性的作用. 因此, 有人形象地将微电子学称为以能带论为基础的固体物理学和无线电电子学结合而诞生的孩子.

3 微电子技术与物理学进展的相互促进

在晶体管诞生以后, 微电子技术在一系列创新工作的推动下, 进入了迅速发展的阶段. 这些创新是在应用需求的驱动下, 借助于当时物理、材料和技术成果而实现的. 集成电路的发明是其中具有里程碑意义的创新之一.

如前所述, 集成电路是将晶体管等元件, 按照一定电路集成在一起, 完成特定功能的电路. 关于集成电路的概念最早是由英国皇家信号和雷达机构 (Royal Signal & Radar Establishment) 的 G. W. A. Dummer 于 1952 年 5 月在电子元器件会议上提出的, 但当时没有能实现, 直到 1958 年, 才由美国德州仪器公司 (TI) 的 J. S. Kilby 发明^[3,4].

在晶体管发明之前, 当时的电子学工作者是通过将制成的电子管和电阻、电容等元件焊装在一起, 构成具有一定功能的电路系统的, 如第一台电子计算机 ENIAC 就是这样一个电路系统. 但随着电子装备复杂性的提高, 连线和焊接点大大增加, 不仅使电路系统体积太大, 而且可靠性很差. 出于对电子装备可靠性和小型化的要求, 人们就着手研究“集成”. 美国 TI 公司的 J. S. Kilby 承担了这样的任务, 但他在对小型化 IF 放大器做了仔细分析后认为, 用传统的元件和连接组装方法是解决不了根本问题的, 其出路在于采用全半导体化的新方法. 为此他开始了将电阻、电容等无源元件和有源元件制做在同一块半导体材料上的实验. 通过进一步分析后, 他认为有可能将这些元件同时“在位”制备在一起, 并用互连形成电路. 由此, Kilby 完成了集成电路的创新思维过程. 他很快就画出了关于触发器 (flip-flop) 的构思, 并用分离硅元件和生长结晶体管等搭成一个全半导体化的实验装置, 证实了方案的可行性, 并终于在 1958 年 9 月 12 日在实验室实现了第一个集成电路

震荡器的演示实验,标志着集成电路的诞生.基于当时的 TI 生产条件,该实验是在锗晶体管基础上完成的.

集成电路的发明是一个技术创新,在这一技术创新中,Kilby 所做的深入的物理分析,特别是对 PN 结电容和薄膜电阻的物理分析以及所提出的集成电路概念,起了关键的作用.由于集成电路的发明,微电子技术迅速发展起来,并对物理学的发展产生越来越大的影响.为此,Kilby 于 2000 年获得了诺贝尔物理学奖.

平面技术的发明是推动集成电路产业化的关键技术基础.现代平面技术包括氧化、扩散、薄膜生长和光刻刻蚀等技术.在这些技术中,论其重要性当首推二氧化硅绝缘层的发现和研究.早期大量生产的晶体管由于基区宽度不好控制,不易做得很薄,频率的提高受到很大限制.为了减薄基区,人们研究采用了扩散方法.C. S. Fuller 和他的同事以及 M. Tanenbaum 等在气相-固态杂质扩散形成 p-n 结技术方面做了系统的基础工作,他们的成果很快被应用于光电池、功率整流器和高频晶体管等方面.同时在研究杂质扩散的过程中发现,高温扩散往往在硅表面热生长一层薄的二氧化硅,它对某些杂质例如硼和磷有阻止向硅中扩散的屏蔽作用.这种作用对扩散来说是不希望的事.但是科学家们在这种“偶然”现象中得到了启示:能否利用二氧化硅的掩蔽作用来制造各种复杂功能的电路呢?1956 年,C. J. Frosch 和 Derick 系统论述了二氧化硅对材料表面的钝化和扩散屏蔽作用.Fairchild 公司的 Jean Hoerni 和贝尔实验室以 Atalla 为首的许多科学家对二氧化硅特性进行了深入而系统的研究工作^[5],发现它不仅具有掩蔽作用,而且是一个高频损耗小、击穿电场强度高的良好绝缘体.由于这一物理学上的卓越发现,使 Fairchild 公司在 1959 年生产出了平面型晶体管,设计并研制成功了金属互连、p-n 结隔离的集成电路.需要指出的是,直到今天,二氧化硅仍然是集成电路中所采用的主要的绝缘层材料,而对二氧化硅物理特性的研究一直是物理学也是微电子学中重要的研究课题.

在平面工艺中,光刻技术是另一关键技术.光刻是一种精密的表面加工技术,它最初出现在印刷照相术上.1957 年,美国 DOF 实验室首先将它引入到半导体工艺技术中来.Fairchild 公司的 Noyce 则将光刻技术和二氧化硅氧化掩蔽巧妙地结合起来,实现了精细晶体管和集成电路图形结构.由于这种结构

表面平整,使各元件间的连接不必再采用手工焊接,而是用真空蒸发金属来代替,然后用光刻技术刻出所需要的电路,从而完成元件间的互连.Noyce 因此而与 Kilby 同时分别享有了集成电路发明专利,同时进入了美国国家发明家名人殿堂.集成电路产品能够高效、廉价地生产,并不断地改善性能,降低成本,是平面工艺,特别是光刻技术不断发展完善的结果.而光刻技术的进步则与物理学研究的进展攸切相关,这在后面的光刻技术发展趋势介绍中将可以清楚地看到.目前集成电路技术中主流的光刻技术加工的线条宽度已在超深亚微米量级.

金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOS-FET)器件的发明,在微电子技术史上是另一个具有里程碑意义的事件,它是目前超大规模集成电路的基本电路形式.肖克莱在研究垂直表面的电场对半导体内部载流子浓度和各种性质所产生的影响时,发现了垂直表面电场可以引起表面电导变化的场效应现象,并在 1948 年提出了场效应晶体管的理论.实际上,早在 20 世纪 20 年代到 30 年代就曾有场效应放大器的设想,如 1935 年海尔在一份英国专利中宣布过他的发明,然而由于当时社会工艺水平的限制而无法实现,其主要限制是无法制备满足器件需要的薄的高强度栅绝缘层.直到 1959 年 Atalla 提出用硅片上热生长二氧化硅层作为栅绝缘层,1960 年,贝尔实验室的 Kahng 和 Atalla 用 Ligeza 高压水气生长二氧化硅层获得成功,才制备出了第一支 MOS 场效应晶体管^[6],但性能还是不稳定.为了解决 MOS 电路性能不稳定问题,众多的科学家诸如 A. S. Grove, C. T. Sah, E. H. Snow, B. E. Deal 等通力合作,经过近十年的努力,终于在 1967 年基本搞清了 Si-SiO₂ 系统的四个电荷的性质^[7],这是界面物理研究取得的重要成果,并成为界面物理研究的基础.在工艺上,找到了控制 Na 离子玷污的方法,并结合净化措施和采用高纯级的基础材料,使 MOS 集成电路得到稳定生产.由于 MOS 器件具有工艺简单、功耗低、易于集成、可满足器件尺寸按比例缩小的需要等特性,因此,目前在半导体工业中,95% 以上的集成电路产品都是采用 CMOS 结构的.

微处理器的发明也是一个具有里程碑意义的事件.第一台微处理机是 1971 年由 Intel 公司制造的^[8].微处理器的发明可以说是一个应用创新的例子,它在观念和应用技术方面的创新,开辟了计算机应用和普及的新纪元.在 Intel 发明微处理器之前,计算机的发展一直集中在大型机、中型机、小型机系

列方面,只能被少数大型单位所拥有,主要用在军事、航空、航天、天气预报、科学计算等方面.随着微处理器的发明和随之带来的成本降低、体积缩小,使得计算机的应用领域得到迅速拓展,并最终成为当前信息技术的基础. Intel 公司也因为微处理器的发明,从一个名不见经传的小公司发展成为世界著名的工业巨头.到 1998 年,微机在全世界的占有率已达 3.7%,在美国每年由计算机完成的工作量超过 4000 亿人年工作量.微处理器的发明带动了以 CMOS 为基础的超大规模集成电路技术的发展,带动了智能化电子产品的发展,成为信息技术的基础元件.同样,也给物理学及其实验技术的研究带来了崭新的面貌.

超大规模集成电路技术的发展在多方面带动了有关物理研究的进展.基于计算机辅助设计(CAD)的需要,发展了对器件、电路、工艺进行模型模拟的研究,为此,大大深化了器件中物理效应和原理的研究;基于预测和改善器件和电路寿命的需要,开辟了专门研究器件和电路的可靠性问题的研究领域——可靠性物理研究;人们在研究一些物理效应的基础上,发明了新的半导体器件,这些新器件的发明又带动了集成电路技术和微电子产业的发展.如人们利用电容存储电荷效应实现信息存储的原理,发明了半导体随机存储器(DRAM),带来了信息存储方面的革命. S. Z. Sze 将量子隧穿效应应用到半导体存储器领域,发明了浮栅存储器,目前浮栅存储器已成为 Flash 和 EEPROM 存储器技术和产业的基础,直接带来了 IC 卡如此广泛的应用,促进了社会信息化程度的提高.

随着一些新材料、新物理效应的发现,一些新的微电子技术研究领域正在诞生,如铁电存储器(FeRAM)^[9]和磁阻随机存储器(MRAM)^[10]技术. FeRAM 是利用铁电材料所具有的铁电效应进行信息的存储.铁电效应是一种早已被发现的物理效应,但由于材料性能和与集成电路工艺的不兼容性,促使人们去研究新的材料.到 20 世纪 80 年代,一些新型的高性能铁电材料如 PZT 和 SBT 被发现,使 FeRAM 既具有半导体随机存储器(RAM)随机存储数据的功能,又具有半导体只读存储器(ROM)保留数据不丢失(非挥发性)的功能,同时还具有抗干扰、抗辐射的功能,因此,铁电存储器被认为是继 DRAM 和 ROM 之后新一代的半导体存储器.而 MRAM 技术则是随着人们在一些新的材料体系中发现巨磁电阻效应这一新的物理现象后,才提出的一种新型半导体存储

器.由于巨磁电阻效应与电子的自旋特性有关,因此,巨磁电阻效应及其应用可能性的发现,带动了自旋电子学的研究.

在微电子技术发展的第二阶段,微电子技术是按照摩尔定律的规律,并以特征尺寸缩小、集成度增加的一维方式发展的.在一维发展模式下,技术的创新和应用创新起了关键的作用.其中光刻技术的发展对特征尺寸的按比例缩小起了关键作用.为了满足器件特征尺寸缩小的需求,光刻技术不断改进,这些改进包括^[11](1)曝光光源的改进,曝光波长不断缩小;(2)图形印制方式的改进,从接触式、接近式、投影式,发展到目前的分步(stepper)-扫描(scan)-投影式(projection)的方式;(3)分辨率增强技术(RET)的应用,发展了偏轴照明(OAI)、邻近效应校正(OPC)、移相掩膜(PSM)、光刻胶修剪(resist trimming)、抗反射和表面感光功能的多层光刻胶等技术.而这些改进技术的提出是以光学研究成果为基础的,如偏轴照明、邻近效应校正、移相掩膜等技术的提出,是基于光的干涉、衍射效应提出来的.为了满足 70nm 以下特征尺寸的加工需要,光刻技术需要革命性的变化,当前的光学光刻技术需要被新一代的光刻技术如 EUV 光刻、电子束投影光刻、X 射线光刻、离子束光刻、纳米印制光刻等技术所替代,而这种需求,反过来将大大促进相应领域的物理学研究工作.

铜互连技术的发明在微电子技术中具有举足轻重的地位.在传统集成电路中主要采用铝导线互连工艺.物理分析表明,采用铜替代铝作为互连后,无论是电路的性能还是可靠性都可得到显著的改善.但由于一些关键的技术和物理问题一直得不到解决,人们对铜互连只能停留在“望梅止渴”的阶段.其主要问题有两方面:其一是铜互连图形加工问题,在传统的铝互连工艺中,是通过光刻和刻蚀工艺来加工互连图形的,但在微电子工艺中,找不到能够刻蚀铜的工艺,因此无法加工铜的互连图形;其二是铜的污染和扩散问题,由于铜是深能级杂质,进入到硅和二氧化硅中造成的污染,将引起器件性能的严重退化,而器件一旦被铜沾污后又很容易扩散进入到硅和二氧化硅中,造成整个电路的失效.铜互连技术的突破来自于对这两个问题的解决.铜互连图形加工问题的解决是称之为大马士革加工工艺的发明,在该工艺中,首先根据互连引线图形加工成沟槽,接着将铜淀积在沟槽中,然后用化学机械磨抛方法(CMP)将沟槽图形外的铜去掉,即可得到所需要的

互连图形,由此避开了铜的刻蚀问题.当然,大马士革工艺的发明是以 CMP 技术的发明为基础的.对铜污染问题的解决方法是,采用可防止铜扩散的势垒层材料将铜与硅和二氧化硅隔离开来,从而解决了铜污染的问题.其中能防止铜扩散的势垒层材料的发现是关键.

微电子技术对物理学研究工作的推动作用,不仅体现在使物理学的研究手段发生革命性的变化方面,还在于微电子技术的发展对物理学提出新的研究课题和研究领域,为物理学的研究拓展了更为广阔的空间,构筑了新的平台.例如,微电子技术的发展使得计算机的性能和普及得到很大提高,使得物理学可以涉及一些非常重要、但由于计算量巨大过去无法涉足的领域,如半导体的能带计算、蒙特卡罗方法模拟电子系统性能特征等,由此产生了新的物理学科分支——计算物理学;又如,由于微电子技术的特征尺寸已进入纳米尺度,纳米电子器件的研究呼唤介观物理学;同时由于微电子技术基本上是在各种薄膜材料(介电、导电、半导体等薄膜材料)上加工转换各种电路与系统的拓扑设计图形,因而促使薄膜物理学的诞生和发展等等.

4 微电子技术发展的物理限制及其对物理学的挑战

随着器件特征尺寸的不断缩小,特别是在进入到纳米尺度的范围内,微电子技术的这种一维发展模式将面临着系列物理限制的挑战^[12],这些挑战有来自于基本物理规律的物理极限,也有来自于材料、技术、器件、系统和传统理论方面的物理限制^[13].为了面对这些挑战,微电子技术将由一维发展模式向多维发展模式方向转变^[14],微电子技术的发展将进入一个新的发展阶段,体现出一些新的发展特征.

4.1 基本物理规律的限制

我们知道,计算机处理信息的过程,主要是一个进行布尔逻辑运算的过程,其中涉及到布尔逻辑间的转换. Rolf Landauer 证明,信息本身就是一个物理系统,因此,计算机或集成电路,无论采用何种器件结构和工作原理,其处理信息的过程都是一个物理过程,需要满足基本物理规律的限制.这些限制包括在电磁学、量子力学测不准关系、热力学等方面的限制,它们对信号的传输速度、器件开关转换的器件功率、器件开关引起的能量变化、集成系统能量耗散和

热量产生等形成限制.这些基本的物理限制是不可逾越的,可以说是微电子技术的物理极限.

4.2 材料方面的限制

主要是传统的微电子材料如硅衬底材料、二氧化硅绝缘材料、多晶硅及其硅化物和金属导电材料等无法满足微电子技术进一步发展的需要.为了解决这方面的限制问题,需要引入一些新的材料到微电子技术中来.目前所研究的新材料包括:SOI、Ge-Si、III-V 族和 II-VI 族等新的衬底材料;高 K 栅介质材料;新型金属导电材料;低 K 互连介质材料;Cu 互连材料;高 K 电容材料、铁电电容材料、巨磁电阻电容材料、低维材料如纳米碳管和纳米硅线等.

4.3 技术方面的限制

传统的微电子工艺技术,如光学光刻工艺、离子注入工艺等将接近其物理极限,无法满足器件进一步缩小的制备需要.解决该限制的途径是寻找新的工艺方法和途径.这些工艺途径包括新一代的替代光刻工艺,如 EUV 光刻、电子束 SCAPEL 光刻、纳米印制光刻技术或自组装的纳米加工技术等.

4.4 器件方面的限制

按照摩尔定律预测,到 2010 年,由于器件特征尺寸的研究水平缩小,MOS 器件开关过程仅需要少数几个电子参与,MOS 器件的经典理论将不适用;而到 2020 年,器件的开关过程仅需一个电子的参与,由此,必须要采用新的器件结构(如量子开关器件)和新的器件工作原理.

4.5 系统方面的限制

系统方面的限制包括互连延迟的限制、系统的散热问题的限制等.随着器件尺寸的缩小和集成密度的增加,互连引线的横截面越来越小,使得电阻值增高,互连引线占的面积增加,互连引线的时延迟问题成为制约集成电路或集成系统性能的进一步提高的主要因素.低 K 介质和铜互连技术的应用,可使问题得到一定的缓解,但问题的真正解决,还需要采用新的互连模式,如采用光互连模式,但在集成电路中实现光互连,尚有许多基础的物理和技术问题需要解决.同时,随着集成度的提高,集成在芯片上的晶体管数越来越多,电路系统的散热问题变得日益严重.系统的总功率限制很有可能成为限制芯片集成度的另一个主要因素.

4.6 传统物理理论的限制

这个限制来自两方面:其一是传统微电子学理论的限制.尽管微电子学的理论基础是半导体能带论,但大部分的理论基础还是基于经典物理理论的,

如经典的载流子输运模型即漂移 - 扩散模型。随着器件特征尺寸缩小,量子效应变得显著,这些传统的微电子学理论需要利用量子力学理论对其进行改造。虽然在微观的原子尺度上,量子力学方法已建立起了一套完备的分析计算方法,但由于涉及极大的运算量和存储量,实际很难应用到多电子系统的固态电子学,因此,亟需发展一种全新的方法,这需要微电子学家和物理学家通力合作。其二是,现有物理理论的限制。随着器件尺寸的进一步缩小到纳米尺度,系统中只有少数电子,而电子与电子之间的相互作用很强,这时,传统的平衡统计理论,如玻尔兹曼或费米 - 狄拉克统计和半导体能带论将面临挑战,需要发展全新的理论,这不论是在微电子学还是在物理学本身都是前沿性研究课题。

面对这些物理限制,微电子技术的发展呈现出多维发展的模式。首先是通过克服在材料、技术、物理基础方面遇到的限制,继续按照特征尺寸按比例缩小的途径继续发展,即所谓的“自上而下”的途径;其二是发展新的纳米技术,如纳米结构的自组装技术等,采用“自下而上”的途径发展;其三是将全新的纳米低维材料如纳米碳管和纳米硅线等与微电子技术相结合,开发新型的纳米电路;其四是研究新的器件结构如量子器件,发展新的运算逻辑如量子逻辑运算;其五是将微电子技术与其他技术结合,形成新的学科和技术领域,如与机械学光学结合的微机电系统(MEMS),与生物学结合的DNA芯片,与各种信息处理系统结合的系统芯片(System on A Chip, SOC)技术等。以系统芯片技术为例,它能够具有对光、声、电、磁、力等各类信息进行信息采集、处理、存储、传输以至随动等功能的电路模块全部集成在一个芯片中。这样的系统芯片可以低成本、高效率地大批量生产,而且可靠性好、耗能少,因此可以广泛而又方

便地应用于国民经济、国防建设、乃至家庭生活的各个方面,大大地提高人们处理信息和应用信息的能力,大大地提高社会信息化的程度。

在微电子技术发展的第三个发展阶段,微电子技术发展表现出了新的特征,不仅从一维发展模式向多维发展模式转变,而且对物理学基础理论提出了挑战,同时也对物理学研究提出新的、更高的要求。

参 考 文 献

- [1] http://www.wired.com/wired/archive/5.05/ff_moore.2.html?person=gordon_moore&topic_set=wiredpeople
- [2] Ross I M. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(10): 7
- [3] Kilby J S. IEEE Trans. Electron Devices, 1976, ED-23: 648
- [4] 王阳元. 物理, 2001(3): 132 [Wang Y Y. Wuli(Physics), 2001(3): 132 in Chinese]
- [5] Atalla M M, Tannenbaum E, Scheiner E J. Bell Syst. Tech. J., 1959, 38: 749
- [6] Kahng D, Atalla M M. Solid State Research Conf., Pittsburgh, PA, June 1960
- [7] Nicollian E H, Goetzberger A. Bell Syst. Tech. J., 1967, 46: 1055
- [8] <http://www.intel.com/pressroom/archive/backgrnd/CN71898A.HTM>
- [9] Zambrano R. Driving Applications for Ferroelectric NVMs, Proc. ISIF 2000, Int. Ferroelectrics 2001(G&B Science Publishers), 2001, 33: 1
- [10] Tehrani S, Slaughter J M, Chen E. IEEE Trans. Mags., 2000, 35: 2814
- [11] 王阳元, 康晋锋. 半导体学报, 2002, 23(3): 225 [Wang Y Y, Kang J F. Chinese J. Semiconductors, 2002, 23(3): 225(in Chinese)]
- [12] Keyes R W. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(3): 227
- [13] 王阳元, 韩汝琦, 刘晓彦, 康晋锋. 电子学报, 1998, 26(11): 77 [Wang Y Y, Han R Q, Liu X Y et al. Chin. J. Electronics, 1998, 26(11): 77 in Chinese]
- [14] Luryi S, Xu J, Zaslavsky A ed. Future of Trend in Microelectronics-The Road Ahead. New York: John Wiley & Sons, 1999