

· 学科进展与展望 ·

我国微电子技术及产业发展战略研究*

许正中 李欢

(天津大学管理学院, 天津 300134)

[摘要] 微电子技术的发展正在推动整个社会由人类社会-物理世界的二元模式向人类社会-信息空间-物理世界的三元模式转变。本文首先阐述了微电子技术发展的历程与特点,剖析出微电子技术未来发展的突破口;其次,在归纳出我国微电子产业的现状与特点后指出当前我国微电子技术及产业发展的体制障碍及市场机遇;最后,结合国情,给出了促进我国微电子技术及产业发展的政策建议。

[关键词] 微电子技术,微电子产业,管理创新

每一次重大的社会变革都与科技的革命性突破密切相关。“智慧地球”、“感知中国”等一系列以微电子技术为基础的重大项目的开展与实施已经向我们昭示了物联网时代的到来,整个社会将由人类社会-物理世界的二元模式向人类社会-信息空间-物理世界的三元模式转变。微电子技术及产业的发展深刻影响并改变着整个民族的兴衰和国家的命运。

1 微电子技术 10 年一代的技术进步

微电子技术是使电子元器件功能化、电子设备微型化的技术,其核心就是集成电路,本质上是最先进的晶体管——外延平面晶体制造工艺的延续。

在 1975 年以前,微电子技术的发展处于发明与初步发展阶段,1975 年以后,微电子技术基本维持了 10 年一代的技术进步并有继续加速的趋势。

从具体技术看,50 年来集成电路特征尺寸不断缩小,45 nm 已进入产业化阶段,32—22 nm 工艺已基本定型,集成度从 10^1 增加到 10^9 ,集成电路上晶体管价格下降至最初的 1/108,晶圆直径增加了 12 倍,MPU 集成度 24 个月翻一番,存储器集成度 18 个月翻一番,基本上遵循了 Intel 公司创始人之一的 Gordon E. Moore 1965 年预言的摩尔定律¹,工艺技术的进展对 IC 集成度的提高起到乘积的效果。

表 1 集成电路 10 年一代的技术进步

	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代
时间(每代 10 年)	1975—1985	1985—1995	1995—2005	2005—2015	2015—2025
主流光刻技术光源	g 线	i 线	准分子激光	浸渍+叠图	EUV, EPL
光源波长 nm	436	365	248	193	13.5
特征尺寸 μm	≥ 1	1—0.35	0.35—0.065	0.065—0.022	0.022—0.007
每代缩小约 1/3					
DRAM	<4 M	4 M—64 M	64 M—1 G	1 G—16 G	>16 G
主流产品 Bit 数					
CPU 代表产品	8086—386	Pentium Pro	P4	多核架构 突破功耗	
CPU 晶体管数	10^4 — 10^5	10^6 — 10^7	10^8 — 10^9		
CPU 时钟频率 MHz	(2—33)	(33—200)	(200—3800)	非主频	
每代增 10 倍	10^0 — 10^1	10^1 — 10^2	10^2 — 10^3	衡量标准	
Wafer 直径(英寸)	4—6	6—8	8—12	12—18*	
主流设计工具	LE—P&R	P&R—Synthesis	Synthesis—DFM	SoC	
主要封装形式	DIP	QFP	BGA	SiP	

资料来源:王阳元院士研究报告。

* 国家自然科学基金资助项目“微电子技术及激光技术国家基础研究发展需求调研”的部分成果。

本文于 2009 年 12 月 28 日收到。

¹ 摩尔定律内容:芯片上可容纳的晶体管数目每 18 个月便可增加一倍,即芯片集成度 18 个月翻一番,这视为引导半导体技术前进的经验法则。

2 微电子技术未来发展的突破口

纵观 21 世纪微电子技术的发展,将延续、扩展和跨越摩尔定律:(1) 延续摩尔定律:即继续缩小 CMOS 器件的工艺特征尺寸、提高集成度,发展系统集成芯片(SOC);(2) 扩展摩尔定律:即不一味追求缩小特征尺寸,而是通过系统封装(SiP)等方法实现功能多样化;(3) 跨越摩尔定律:即超越 CMOS,探索新原理、新结构和新材料,向纳米器件方向发展,

如自旋电子、单电子、量子、分子器件等。具体来讲需要在以下既相互联系又相互区别的几个方面寻求技术突破:

2.1 器件的特征尺寸继续缩小

缩小特征尺寸可以提高集成度,从而不断提高产品的性能/价格比,是微电子技术发展的动力。器件特征尺寸的不断缩小会遇到如表 2 所示的各种问题的挑战及技术突破需求。

表 2 特征尺寸缩小的挑战与技术突破需求

特征尺寸缩小的挑战	相应的技术突破需求
Source 中 SCE& 串联电阻,接触电阻问题	超浅结技术,提升源漏,肖特基源漏等
Substrate 的 Band-to-band 隧穿,SD 直接隧穿,迁移率退化问题	应变沟道技术,高迁移率材料
栅的问题:Gate 的栅多晶硅耗尽效应,栅寄生电阻,如何有效控制 Vth;栅介质结构与厚度问题,漏电流增加,可靠性降低等	金属栅,高 k 栅介质,增强栅的控制能力,双栅/多栅器件
铜互连与低介电常数绝缘材料共同使用的可靠性问题	Cu 互连技术中的铜/扩散阻挡层/低介电常数体系,互连结构模拟与设计,电路级三维铜互连架构,光互连、射频互连等全新信息传输方式
16 nm 后	新光刻技术

2.2 新材料的应用

目前芯片的主要制造材料是硅,随着器件特征尺寸的不断缩小,会受到物理极限的限制,寻找新的器件材料也是微电子技术发展的必然趋势。如图 1 所示,未来芯片可能将使用金属而不是硅作栅极,并

使用“高-k 栅介质”(高介电值栅介质)取代已经使用了数十年的二氧化硅,克服业界困扰的晶体管漏电问题。碳纳米管、石墨烯等都有可能成为新的芯片制造材料。

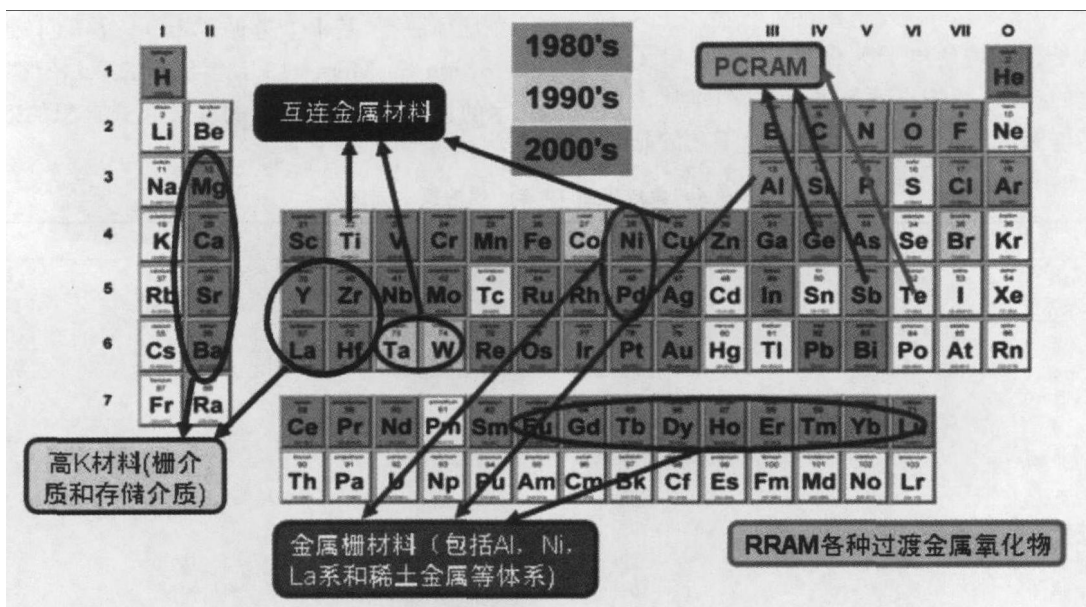


图 1 新器件材料

资料来源: Kristin De Meyer, J. P. Colinge 2008 IEDM, and Kang Jin Feng IMEPKU.

2.3 系统集成芯片(SOC)

SOC 是微电子设计领域的一场革命,目前 SOC 正在逐渐替代 Non-SOC(如图 2 所示),21 世纪是 SOC 真正快速发展的时期。发展 SOC 要从两个方

面进行突破。第一,是软、硬件的协同发展:软件是整机系统运行的灵魂,设计性能良好的软件系统是 SOC 发展的必然要求。第二,是要突破 IP 核技术:IP 核分三种,即软核、固核和硬核。软核主要是功

能描述,固核主要为结构设计,硬核是基于工艺的物理设计,使用价值最高,也最有创新意义。同时,IP 模块间的胶联逻辑技术以及 IP 模块综合分析及实现技术也亟待技术的新突破。

一步降低功耗,建立技术与人类社会共生态,是微电子技术发展的必然趋势,迫切期待技术的新突破。新材料、新工艺的应用,生物芯片等的研制都是发展绿色微电子技术的有效途径,环境污染指数应该作为重要指标纳入技术评估体系。

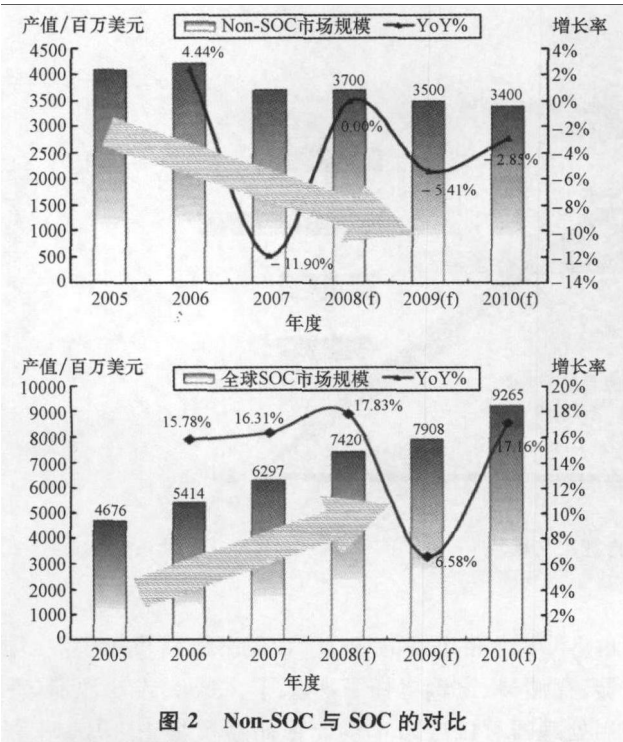


图 2 Non-SOC 与 SOC 的对比

2.4 绿色微电子技术

随着集成电路应用的不断推广,产量的不断提高,功耗问题越来越凸显。2007 年,全球集成电路总功耗按产量和相应功耗估算,已逐步接近照明用电总功耗(约占总发电量的 10%)。Pentium 的功率密度已经超过电炉。高温将对集成电路的高频性能、漏电和可靠性劣化产生巨大影响。如不开发绿色集成电路,则会向核反应堆的功率密度发展,后果不堪设想。

2.5 新器件的突破

从制作方法的角度讲,采用 Bottom-up 研究的各种器件如量子器件、基于自组装的原子和分子器件,1D 结构的(如碳纳米管、纳米线)器件等有望在 21 世纪上半叶实现重大突破,但是,现有的各种器件都存在着不同程度的困难。比如纳米管/纳米线(CNT/NW)具有高迁移率、集成密度高、易形成不同结构的优势,但存在难以大规模集成、精确定位性不好、源漏接触等问题。分子器件具有自组装、集成密度高、低开关能量等优势,但存在可控性、稳定性等问题。单电子器件(SET)功耗低、集成密度高,但抗噪声能力低、扇出能力低。在逾越困难的过程中,有可能会出现全新的信息器件。最有希望突破的是新型存储器和传感器。具体来讲,比如双掺杂浮栅(DDFG)闪存存储器件,垂直结构双氮化层只读存储器件(VDNROM),基于垂直双栅结构和双层陷阱层结构的 VDNROM 器件等。与其他新型存储器技术相比,PCRAM 被认为是新一代 NVM 技术的主要候选者,同时 RRAM 被认为是最有发展潜力和成为通用存储器的候选者。

Scaling down 的挑战和 Bottom-up 的发展,为微电子未来的发展带来新的机遇,期待新器件结构、新互连、新材料、新设计方法的突破,或者随着物理、数学、化学、生物等新的发现和技术突破,另辟蹊径,建立新形态的信息科学技术及其产业。

3 微电子产业的发展瓶颈

我国内地的微电子产业起步于 1965 年,在之后 30 年间发展缓慢,与世界发达国家和地区的差距越拉越大。到了“九五”计划期间,国家加大投资,才拉开了新世纪我国内地加速发展微电子产业的序幕。目前,我国微电子产业已经形成了由集成电路设计—制造—封装测试组成的微电子产业链。

长期以来,我国 IC 市场以数倍于全球市场的增速高速增长,近来增速正在向全球市场靠拢。但高端产品靠进口,低端产品可出口,进口大于出口的现象仍然比较明显,且大部分微电子企业为外资所主导。产业的突围需要技术的“硬”突破,更需要适合产业生存发展的政策体制“软”环境的扶持。目前来

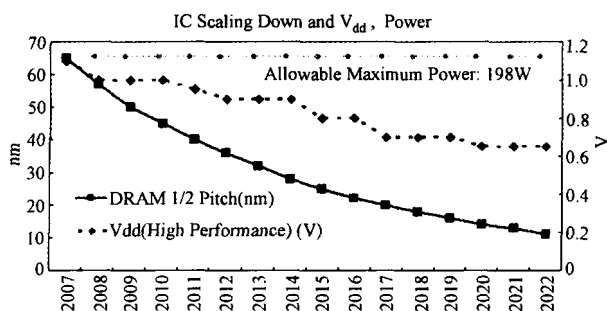


图 3 功耗对集成电路发展的制约

资料来源: ITRS 2008。

功耗已经严重制约了微电子技术的发展,也对人类生存环境产生威胁。发展绿色微电子技术,进

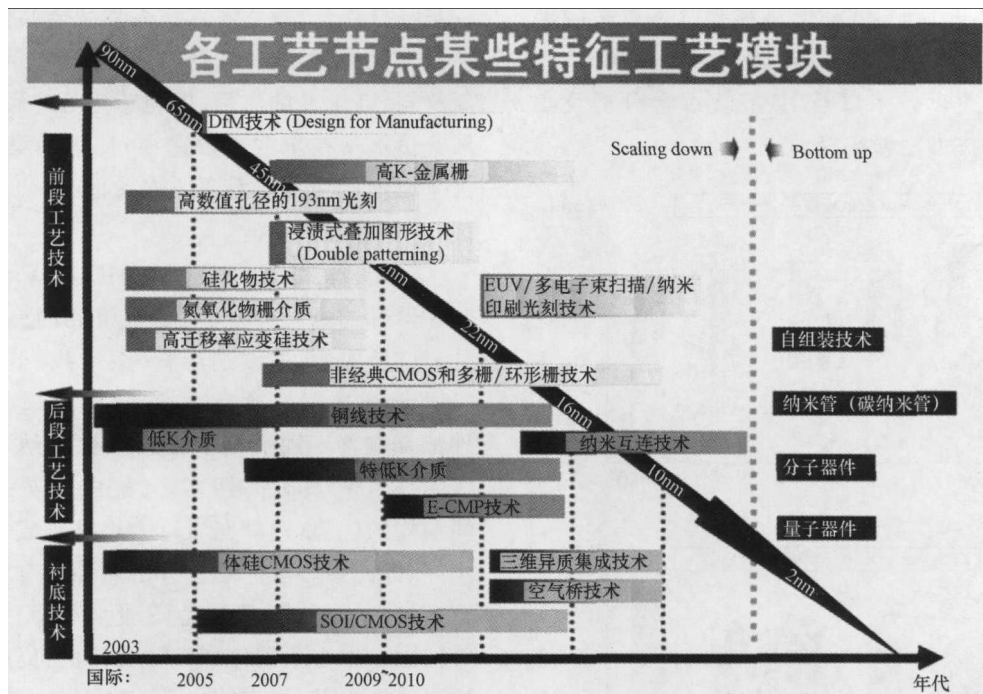


图4 各工艺节点特征工艺模块

资料来源:王阳元、吴汉明研究报告。

看我国微电子产业的发展在人才、体制、管理等方面遇到了发展瓶颈,构成了对我国微电子产业发展的挑战。具体体现在:第一,核心技术受制于人,高性能通用/嵌入式CPU、高速A/D、EDA软件、核心IP等基本依赖进口;第二,产业规模小,大企业少,制约可持续发展。集成电路产业发展具有一定的周期性和规律性,当前,我国集成电路企业普遍较小,在产业发展低谷时,抗风险能力弱,影响可持续发展;第三,体制机制有待进一步完善,风险投资机制仍需健全,以企业为主体的创新体系有待完善,政府部门对产业的引导、监管和服务能力有待进一步提高;第四,高端复合型人才缺乏,“海归”创业成为产业的生力军。随着整机技术、芯片技术、软件技术以及其他应用技术的融合,对集成电路从业人员提出了更高的要求;第五,面向产业提供技术创新服务的能力偏弱,资源相对分散,没有形成覆盖全国的产业技术创新服务网络。

4 微电子技术与产业的市场机遇

从图5可以看出,目前世界微电子市场从开发到量产的周期大概是10年,现在微电子的世界市场增长率处于低谷时期,这个时候如果我们能实现微电子技术的新突破,会迎来一个新的市场高峰。

我国集成电路市场约占半导体市场的85%,MOS电路约占集成电路市场的90%,数字电路约

占MOS电路市场的90%,在数字电路市场中,处理器、存储器、逻辑电路三分天下。嵌入式处理器、专用处理器可以进入市场。存储器市场中,SRAM和DRAM由于设备、专利等壁垒,进入市场可能性不大,Flash将成为存储器成长的关键驱动器。非易失存储器(NVM)中,NOR Flash和新型存储器有可能取得市场突破。逻辑电路与模拟电路是与集成电路设计结合最紧密的产品,新型逻辑电路与模拟电路有可能开辟新的市场领域,新型结构器件是我国逻辑集成电路开拓国内外市场的重要突破口之一。

无论如何,这些市场的突破建立在技术突破的基础上,我国是全球最大的微电子市场,若能尽可能大的解决困难,抓住机遇,在市场低谷期加大基础研究的力度,实现技术突破,将迎来市场的又一个高峰,带动国家经济的腾飞。

5 微电子技术与产业发展的政策建议

“科学技术是第一生产力”,但只有研以致用才能使科学技术转变为生产力。新中国成立以来,尤其是改革开放以后,我国一直高度重视科学技术的发展,但科技与经济的结合不够,出现科技与经济“两张皮”的现象,在微电子领域也是一样。跨越科技与经济之间的鸿沟,要重视“硬”实力,绝不能忽视“软”实力。管理与体制的创新在很大程度上决定了我国微电子产业的未来。

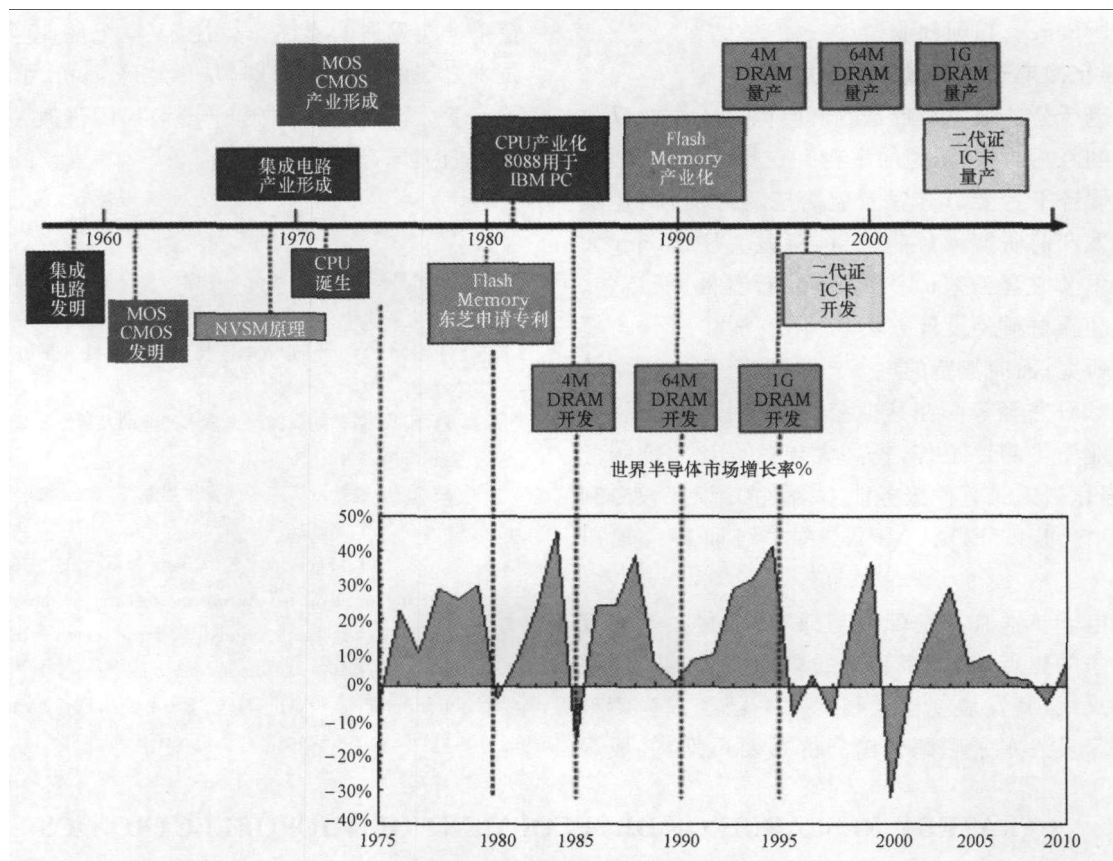


图5 微电子产业与市场

资料来源：王阳元院士研究报告。

5.1 定位多元执行主体与执行方式，以联动带发展

目前我国微电子领域的支持方式还是以高校和科研机构的竞争型项目资助方式为主，比如“973”、“863”、自然科学基金等等。今后应更加注重官、产、学、研、金、创的结合，将资助主体扩大到企业，并引入以机构为主体的资助方式。企业意志与国家需求统一的可以交给企业去做。32—22 nm节点是国家意志的体现，不应依靠单一主体去执行。另外，应突破现有管理体制的障碍，跨部门合力推动AVS、TD-SCDMA、手机电视、数字电视、RFID、闪联等电子产品自主标准的产业化进程，鼓励国内企业积极参与标准的制定和推广；可以设立专项基金，建立整机企业和芯片企业在研发阶段的互动机制。

5.2 实施积极的微电子财政、金融政策

遵照市场经济和集成电路产业发展的规律，在国务院18号文件的基础上，制定更为优惠的、可操作的产业政策，加快制定《微电子产业发展促进条例》；将集成电路专用设备、仪器和材料纳入政策扶持范畴；制定和实施知识产权和标准战略；制定相应的政策和措施，鼓励符合相关条件的中小集成电路设计企业优先在创业板上市；通过设立引导基金、资本金注入、融资信贷、减免征收交易税等方式，对

微电子企业联合重组给予支持，推动优势资源整合，打造我国微电子产业龙头企业。

5.3 加强政府采购，为本国微电子产业发展护航

虽然我国一向重视微电子技术的研发投入，但很多研发出的产品都被“搁置”在实验室里。政府机关、事业单位、国有企业等所用的微电子产品绝大部分还是先入为主从国外引进的。我国的微电子产业起步晚于国外发达国家，正在由模仿到自主创新转化。国有新产品就像一个刚出生的婴儿，需要祖国母亲的呵护和引领，才能逐步发展壮大。一方面国家要加强政府采购，首先鼓励国家机关与国有企业使用国产微电子产品；另一方面要吸收国家组织开发二代身份证的成功经验，组织新的国家级工程，带动本国完整IC产品链条的发展。

5.4 加强人才培养，积极引进海外人才

人力资源是产业发展的第一资源。为了带动我国微电子产业的进一步发展，政府和企业应探索新的有利于吸引人才、留住人才和发挥人才作用的分配制度。比如运用股权、期权等激励机制，放宽技术成果在微电子企业中的占股比例等等。另外，可在有条件的部分高校设立微电子学院，加强急需人才的培养；积极参与国际高端人才竞争，吸引、鼓励海

外学有所成人员归国创业。

5.5 强化微电子公共服务平台建设

微电子公共服务平台是政府与微电子企业以及用户之间互相协作、沟通的平台。在技术层面,微电子公共服务平台要以国家发展需求为导向,构建微电子研发产前联盟。目前来讲,应该关注 32 nm 大生产技术及成套工艺,小于 32 nm 新器件、新结构、新工艺和新材料及设计方法学研究;SOC 设计与模拟工具研究;面向消费电子产品研究;面向应用的宽带技术研究等等。在其他公共服务提供方面,应涵盖产业质量测评工作,提高大规模设计验证服务能力,强化嵌入式软件服务能力,做好知识产权专利预警工作,提供 EDA、MPW、人才培养等常规服务等。

微电子技术兼具基础性与战略性,是大国科技实力竞争的焦点,是即将到来的第四波技术革命浪潮的导火线,其发展规模及技术水平已经成为衡量一个国家发展水平和综合国力的重要尺度,并成为

整个社会发展的支柱。抓住 21 世纪前 30 年微电子技术发展的战略机遇期,从微电子消费大国向微电子产业大国转变,向微电子产业强国过渡,是中国由大国向强国迈进的重要一步。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院. 科技革命与中国的现代化. 北京:科学出版社, 2009年,24.
- [2] 王阳元. 21世纪硅微电子技术三个重要发展方向. 华东科技,2007,6: 86—88.
- [3] 江泽民. 新时期我国信息技术产业的发展. 上海交通大学学报,2008,10.
- [4] 刘忠立. 硅微电子工业的发展限制及对策. 微电子学,2009, 39(4): 552—554.
- [5] Green M L, Schenck P K, Chang K S et al. "Higher-k" dielectrics for advanced silicon microelectronic devices: A combinatorial research study. *Microelectronic Engineering*, 2009,86: 1662—1664.
- [6] International Technology Roadmap For Semiconductors (ITRS), 2009, <http://public.itrs.net/>.

STRATEGY RESEARCH OF DEVELOPMENT OF MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND INDUSTRY IN CHINA

Xu Zhengzhong Li Huan

(School of Management, Tianjin University 300072)

Abstract Development of microelectronics technology is driving the whole community from the binary model of human society-physical world to the triple model of human society—information space—physical world. Firstly, this paper describes the development course and characteristics of microelectronic technology and analyses the breakthrough in the future; secondly, after summarizing the China's microelectronics industry, the paper points out the present situation and characteristics of China's current microelectronics technology and industrial development, the institutional barriers and the market opportunities; finally, based on the combination of conditions, the paper gives the policy recommendations to promote development of China's microelectronics technology and industry.

Key words microelectronics technology, microelectronics industry, management innovation