

绿色微纳电子:21 世纪中国集成电路产业和科学技术发展趋势

王阳元,王永文

北京大学微电子学研究院,北京 100871

摘要 简要回顾了世界经济和集成电路产业发展的历史进程,指出“绿色微纳电子”将成为低碳经济社会的重要组成部分。在此基础上,分析了中国集成电路市场、产业及科学技术的现状、面临的挑战和历史机遇,并分别对微纳电子新器件结构、绿色集成电路芯片制造、低功耗集成电路设计的发展趋势进行了阐述,提出“降低功耗,提高性能/功耗比是未来集成电路与系统发展的驱动力”的观点,以及在技术进步、体制改革、人才培养、产业环境等方面对中国集成电路产业发展的目标和举措等建议。

关键词 集成电路;产业;科学技术;发展趋势

中图分类号 TN40

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.16.009

Development Trend of Chinese Integrated Circuit Industry and Science and Technology in 21 Century

WANG Yangyuan, WANG Yongwen

Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract This paper briefly reviews the history of the world economics and the development of integrated circuit industry. It is indicated that "Green Micro-Nanoelectron" will become a significant component of the low-carbon economic society. In this context, this paper analyzes the market of China's integrated circuit, the present status of China's IC industry and IC technology, the opportunity and challenges for the main land of China. This paper also discusses the Micro-Nano new structure device, the green integrated circuit manufacture, the development trend of low-power IC design. It is thought that reducing energy consumption and raising the rate of performance of power consumption are going to be the main driving force for the development of ICs and the systems. Finally some comments are made concerning the development goal of China's IC industry, including the fields of technology progress, institutional reform, talent cultivation and industry environment. This paper is divided into four chapters. (1) Chapter one addresses the neo-industrialization in the mainland of China and reveals the objective laws governing the development of an industrial society. (2) Chapter two shows that China is still in the stage as a leading power of IC consumption. (3) Chapter three describes the development road of the IC industry in the mainland of China. There are five points worth mentioning. Firstly, China is a lake of information industry's core competency. Second point concerns the relationship between IC development and energy consumption. Thirdly, the planning of industrial breakthroughs in China is to give a high priority to the design industry and the innovative design should be based on the system requirements and low power consumption. Fourthly, China should reinforce the manufacturing industrial foundation, raise the technical level, strengthen the serviceability and save energy consumption. Fifthly, China should grasp the historic opportunity in the 2020—2030s and make significant breakthroughs in the IC science and technology. (4) Chapter four illustrates that the institutional reform and the cultural evolution are the essential conditions of the sustainable development for IC industry in particular and the science and technology in general.

Keywords integrated circuit; industry; science and technology; development trend

收稿日期:2010-09-13;修回日期:2011-04-16

作者简介:王阳元,中国科学院院士,研究方向为微纳电子新器件、新工艺和新结构电路,电子信箱:yywang@pku.edu.cn;王永文,研究员,研究方向为微纳电子科学技术产业发展战略,电子信箱:wangyw@pku.edu.cn

1 中国的新型工业化道路

1.1 工业革命后世界经济 200 年的发展

农业社会的生产力要素主要是土地和人力,人力资源的多寡决定了生产力的高低,人口和 GDP 增长大致呈 1:1 关系(图 1^[1])。

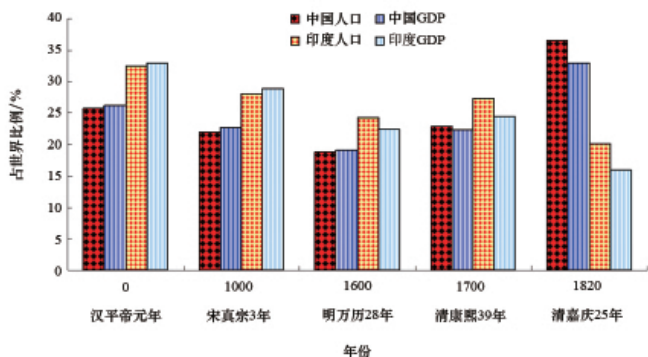


图 1 中国人口和 GDP 占世界的比重

Fig. 1 China's share of world population and the proportion of GDP

1740 年, Hargreaves 发明了珍妮纺纱机, 1765 年, Watt 发明了蒸汽机, 揭开了工业革命的序幕, 开创了机器代替手工工具、工厂制代替手工工场的新时代。作为机器的动力之源, 沉睡了上百万年乃至几亿年的化石能源登上工业社会的历史舞台。煤、石油、天然气的应用扩大了纺织工业的产能, 进而逐步开创了钢铁、电力、化工、汽车等新兴产业的天地。这些产业的兴起, 大大促进了社会生产力的迅速发展。1820 年, 世界人口为 10.42 亿, 1950 年为 25.21 亿^[1], 增长了 2.4 倍, 人口增长 2.4 倍与 GDP 增长 7.7 倍大致呈 1:3.2 关系。与上述农业社会的 1:1 关系相比, 1:3.2 的增长关系主要依赖于能源投入。1900 年, 世界一次能源消耗总量为 7.75×10^8 标准煤, 1950 年则上升至 26.04×10^8 标准煤^[2], 增长 3.36 倍(图 2), 与上述 1:3.2 的关系大致吻合。也就是说, 工业社会以能源的消耗为代价, 换取生产效率的提高和生活质量的改善。从图 3^[3]也可以看出, 世界一次性能源消费增长率与 GDP 增长率呈正相关关系。

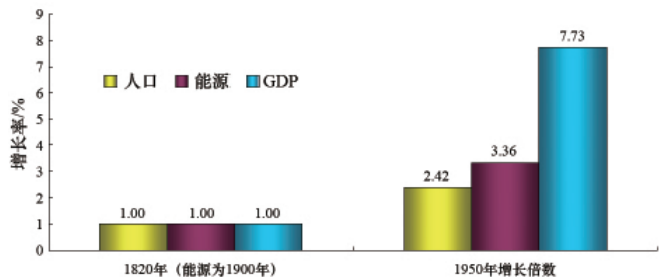


图 2 工业社会人口、能源和 GDP 增长

Fig. 2 Growths of population, energy and GDP in industrial society

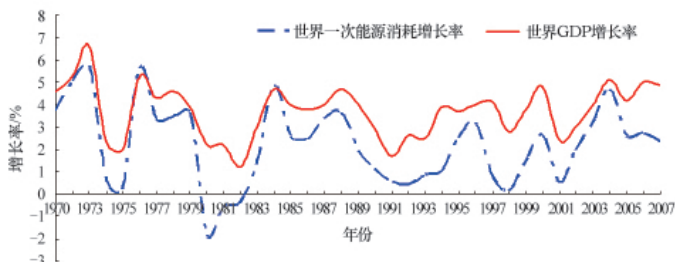


图 3 世界一次能源消费增长率和 GDP 增长率

Fig. 3 Growth rates of world primary energy consumption and GDP

1.2 中国工业化进程的障碍

当前, 中国正处于工业化中期、后工业化和信息化的初期阶段。在改革开放政策指引下, 中国的经济发展取得了史无前例的成就。2010 年中国的 GDP 超过日本, 成为世界第二大经济体。但是, 人均 GDP 仅 4283 美元, 排名世界第 95 位, 仍为发展中国家。图 4 给出了美、日、中、德 GDP 发展趋势。

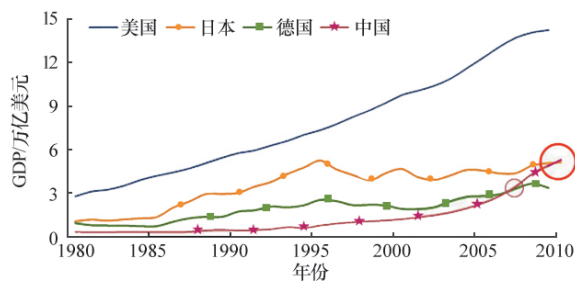


图 4 美、日、中、德 4 国 GDP 趋势(数据来源: UNSD)

Fig. 4 GDP trends of the United States, Japan, China and Germany

中国正在复兴之路上迅速崛起。按保守估计, 大约在 21 世纪中叶, 中国将超过美国成为世界经济总量第一大国, 届时, 16—17 亿中国人的人均 GDP 将超过 2 万美元, 位列人均 GDP 世界排名第 60—70 位。

实现这一美好愿景, 如果依然沿着发达国家的老路推进工业化的进程, 经济高速增长和经济总量迅速增加依然不可避免地伴随能源的大量消耗。2010 年 6 月 7 日, 胡锦涛总书记在中国科学院第十五次院士大会、中国工程院第十次院士大会上指出: “未来几十年, 世界上包括中国 13 亿人口在内的 20 亿至 30 亿人将逐步进入现代化行列, 能源资源需求和生态环境压力将大幅上升, 经济社会快速发展与地球有限承载能力的矛盾将日益尖锐。”

从图 5^[4]可以看出, 1978—2006 年, 中国的 GDP 增长与能耗增长趋势基本一致。2007 年 9 月 8 日科技部部长万钢在中国科协年会上说: “从 1980 年到 2006 年, 中国国民经济年均 9.8% 的增长, 是以能源消费年均 5.6% 的增长为支撑的。”不仅如此, 粗放经营的经济增长方式, 其效率低下造成能源的更大浪费。图 6^[5]为 2006 年各国单位 GDP 能耗比较, 可以看出,

中国的单位 GDP 能耗高达世界平均值的 2.9 倍,是英国、德国、法国、日本 4 国平均值的 5.8 倍。换言之,中国在获得与发达国家大致相同的 GDP 总量时,付出了近 6 倍于它们的能源代价。这一代价的产生与发达国家的产业转移相关。从图 7^[7]可以看出,在工业化初期,英、美、德、法、日等发达国家均不同程度地伴随着相当高的能源消耗,在单位 GDP 能耗达到峰值后开始出现下降趋势。中国自 2006 年,单位 GDP 能耗开始逐步下降,2008 年的单位 GDP 能耗与 1950 年的发达国家相比,略高于法国和日本,但低于美国、英国和德国。

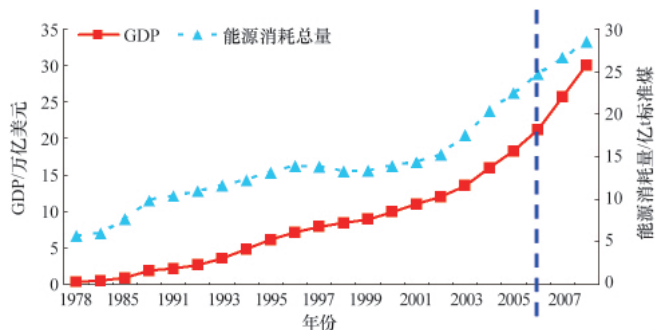


图 5 中国 GDP 和能源消耗量变化
(资料来源:中国国家统计局 2009 年度数据)
Fig. 5 Relation between China's GDP and energy consumption

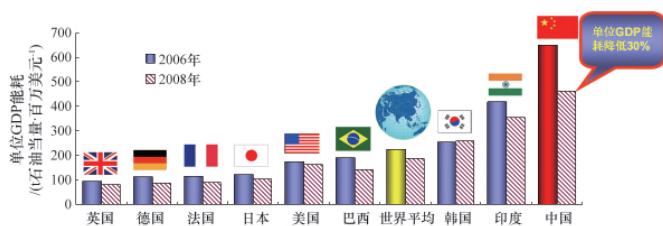


图 6 2006 和 2008 年各国单位 GDP 能耗比较
(GDP 数据来自中国国家统计局,能耗数据来自《BP 世界能源统计 2008》)
Fig. 6 Unit GDP energy consumption in 2006 and 2008

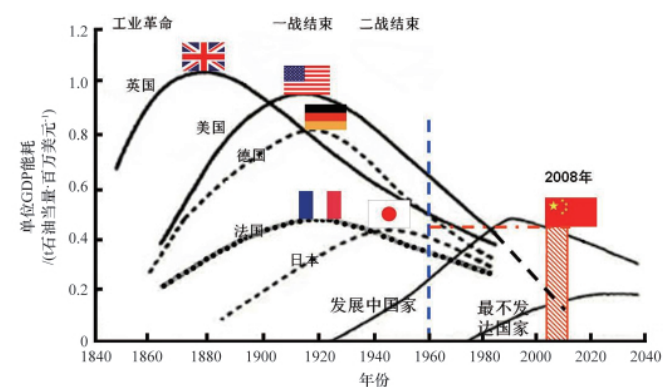


图 7 工业化初期各国单位 GDP 能耗的比较
Fig. 7 Unit GDP energy consumption in early industrialization stages

1.3 中国的新型工业化之路

2006 年 3 月 14 日,十届全国人大四次会议表决通过了《关于国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》(以下简称《纲要》)的决议,《纲要》中明确提出了将单位国内生产总值能源消耗降低 20% 的约束性指标。从图 5 可以看出,自 2007 年起,中国能源消耗总量开始下降。《纲要》指出,“必须加快转变经济增长方式。要把节约资源作为基本国策,发展循环经济,保护生态环境,加快建设资源节约型、环境友好型社会,促进经济发展与人口、资源、环境相协调。推进国民经济和社会信息化,切实走新型工业化道路”。这种新型工业化道路就是“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”的道路,是立足于科技创新的道路、是节能减排而不是放任能源过度消耗的道路。

1958 和 1959 年,Kilby 和 Noyce 先后发明的集成电路相继问世。随着集成电路的集成度沿着摩尔预测的规律不断增加、其性能的不断提和成本的大幅降低,集成电路的应用逐步渗透到了国民经济和国防建设的各个领域。21 世纪初,以集成电路为基础的信息产业发展速度为纺织、钢铁、电力石化、汽车等传统产业的 2 倍(图 8^[8],1997 年起,国家统计局用生产指数替代不变价格计算方法,用生产指数衡量产业实质产出,表征产业发展速度)。

2004 年,信息产业已经成为世界第一大产业(图 9^[9])。

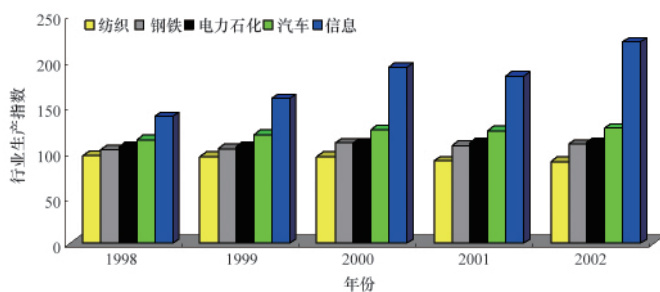


图 8 世界各行业生产指数变化趋势
Fig. 8 World trend of industrial production index

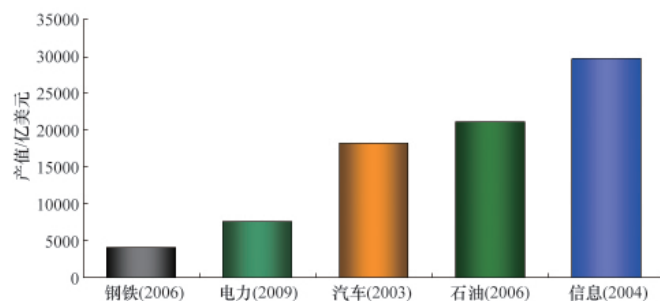


图 9 世界主要产业市场规模
Fig. 9 World's major industrial market

2007 年,信息产业对全球 GDP 增长的贡献达到了 7.2%^[10]。信息正在成为驱动第 5 个经济长波的新引擎(图 10)^[11]。

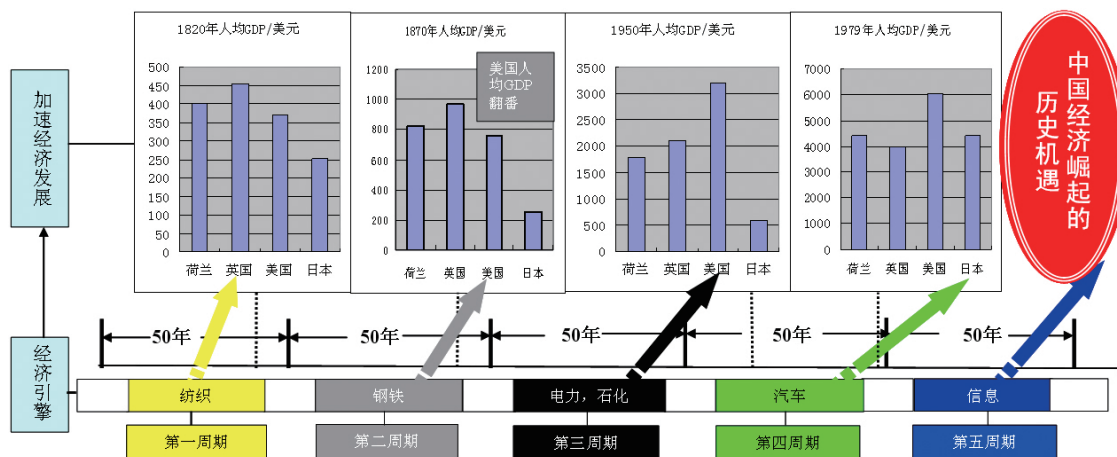


图 10 5 个经济长波与经济引擎

Fig. 10 Five economic long-waves and the economic engines

随着集成电路技术不断进步、市场需求不断增加,以集成电路为主的半导体市场也在不断扩大。1981 年,世界 GDP 与半导体市场之比接近 900,随后这一比值在波动中呈总体下降趋势,预计到 2020 年,世界 GDP 达到 884170 亿美元,半导体市场达到 8697 亿美元,二者之比为 101.66(图 11^[12])。

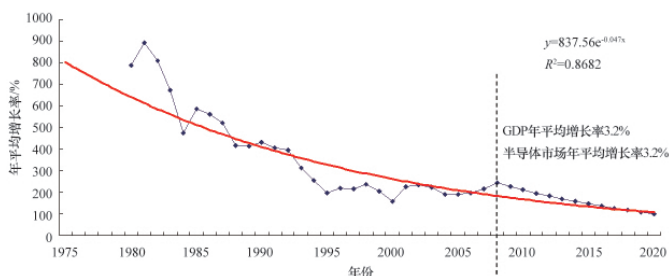


图 11 世界 GDP/半导体产业规模的变化趋势

Fig. 11 Trend of GDP/semiconductor market scales in the world

图 12^[13]为世界电子信息制造业产值变化,2002 年以后电子信息制造业产值持续增长,2002—2008 年平均增长率为 6.83%。2001 年,电子信息制造业产值为半导体市场的 8 倍,2006 年为 6 倍(下降的原因一是由于芯片集成度的不断提高,二是由于制造业向发展中国家转移)。2004—2009 年,中国电子信息制造业产值约为半导体市场的 10 倍。2009—2020

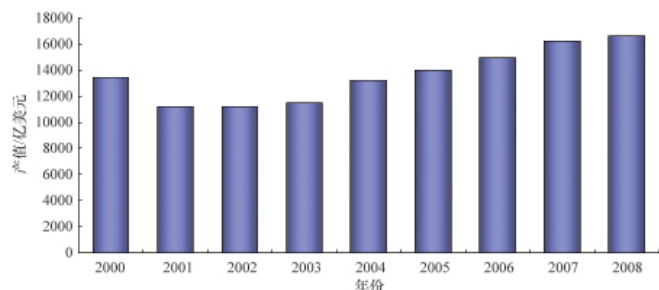


图 12 世界电子信息制造业产值

Fig. 12 Output of the world's electronic information industry

年,由于泛网时代的到来,各种新型电子整机、系统和设备不断涌现,电子信息制造业仍会呈现正增长的态势,假定电子信息制造业产值年平均增长率按 8.3%考虑,则到 2020 年,该产值将达到 43202 亿美元,为同年半导体市场的 4.97 倍。

根据上述预测,2020 年世界半导体市场、电子信息制造业和 GDP 之间将构成 1:5—10:100 的关系(图 13)。



图 13 2020 年世界 GDP/电子信息制造业产值/半导体市场

Fig. 13 World GDP/electronic information industries/semiconductor market in 2020

信息产业的进步改变了人们的生产方式和生活方式,人们也对信息产业市场提出了更为强劲的客观需求。作为信息产业基础的集成电路也由最初的政府(含军事)采购,法人(企业法人和社团法人)采购,逐步显现为个性化消费的趋势(图 14)。人们对各种身边、身上的电子系统提出了信息存储量更大、处理信息速度更快、整个系统重量更轻、能耗更低的多种需求(图 15)。

图 15 表明,在经历大中型计算机时代、PC 时代和移动通信时代后,自 21 世纪初期,人们开始迎接泛网时代的到来。云计算、物联网、智慧地球等技术已经从“概念”走进深入研发阶段。以物联网为例,物联网是继计算机、互联网和移动通信网之后,世界信息产业又一次新的信息化浪潮。物联网是

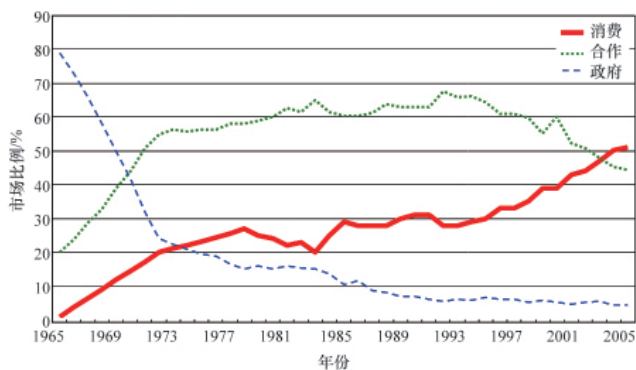


图 14 个性化集成电路消费正在逐步成为主流

(资料来源:IC China 2007 高峰论坛,
SIA 理事长 George Scalise)

Fig. 14 Personalized IC consumption is becoming the mainstream

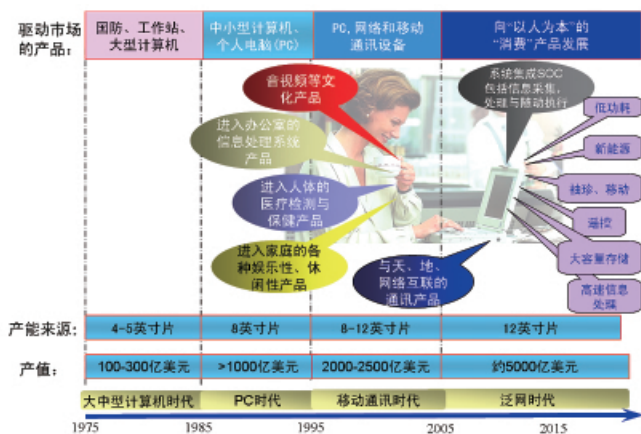


图 15 驱动集成电路市场产品的变化

Fig. 15 Changes of the drivers of IC market

通过互联网和各种传感设备,实现人与物体、物体与物体之间进行信息交换的一种网络,在互联过程中,需要实现全自动智能化的信息采集、安全可靠的信息传输和智能、高速、海量的信息处理。美国权威咨询机构 Forrester 预测,到 2020 年,世界上物与物互联的业务,跟人与人通信的业务相比,将达到 30:1^[14]。物联网涉及众多的产业与行业,如物流中货物与车辆的监控,电子货币的快速支付,各种灾害的监控与报警,居室、儿童、老人的安全监护,个人健康状态的实时监测,农业温室的温度与湿度的控制等。

这些广泛、急切的市场需求强有力地牵引了集成电路技术的不断进步。射频识别(RFID)集成电路,芯片集成系统(SoC)、异质封装集成系统(SiP),以及集热、光、磁、化学、生物、机械、电子等器件为一身的微纳集成系统(M/NEMS)研究成果层出不穷。预计在 21 世纪 30 年代左右,集成电路技术在自上而下(scaling down)和自下而上(bottom up)的交汇中有可能产生革命性突破,这就为中国的集成电路产业提供了宝贵的历史机遇。

中国在探索新型工业化道路的过程中,必须把信息化科学技术放到事关生命线的地位。信息化科学技术与新能源、新材料和生物产业一并成为牵引中国经济持续发展的四大战略性支柱产业。作为信息科学技术与产业基础的集成电路产业,将始终是伴随这一历史时期的战略性新兴产业。

2 中国正处于集成电路消费大国的历史阶段

随着中国经济的飞速发展,各行各业对集成电路的需求也呈现出直线上升趋势。2001 年,中国半导体市场(其中集成电路市场约占 85%)占世界市场的 14.5%;到 2009 年,这一比例迅速飙升到 42.5%(图 16^[15])。8 年间市场扩大了 3 倍。20 世纪 90 年代以来,中国集成电路市场的平均增长速度约为世界半导体市场平均增长速度的 6 倍(图 17^[16])。

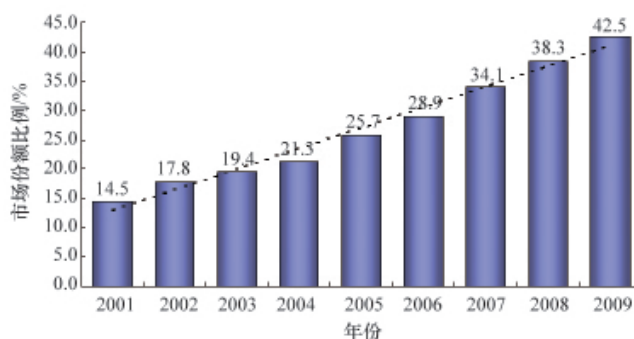


图 16 中国半导体市场占世界市场份额变化

Fig. 16 Market growth rates of the world semiconductor and China's ICs

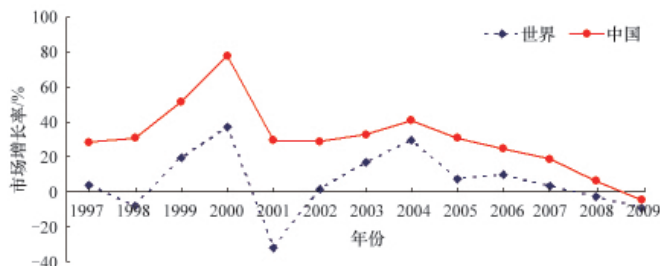


图 17 世界半导体市场和中国集成电路市场的增长率

Fig. 17 China's semiconductor market share in the world semiconductor market

在巨大市场需求的牵引和相关政策的支持下,中国集成电路产业发展迅速,2001—2007 年的销售额年平均增长率为 31%。2008 和 2009 年因受国际金融危机等经济环境影响,出现了负增长(图 18^[15])。2009 年,中国集成电路产业销售额为 1109.13 亿元人民币,约为 162.4 亿美元。2009 年,中国集成电路产业的销售额占世界集成电路市场总额的 8.54%(图 19^[15])。

虽然中国集成电路产业增长率为同期 GDP 增长率的 3 倍以上,但因初始基数小,到 2009 年,仍只能满足国内市场(5676 亿元人民币)19.5%的需求。162.4 亿美元的销售总额,约为同年 Intel 公司销售额(324.1 亿美元)的 50%;TI(96.71

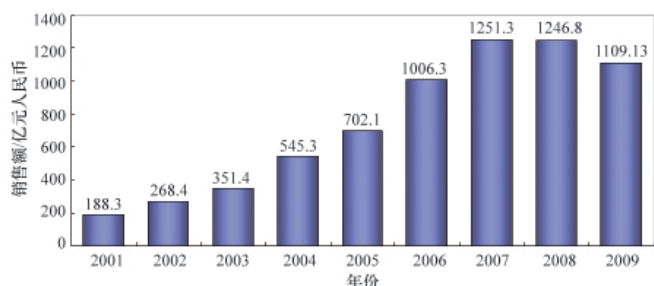


图 18 2001-2009 年中国集成电路产业的销售额

Fig. 18 2001-2009 sales value of China's IC industry

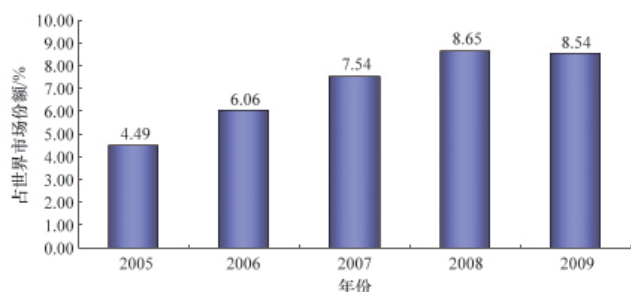


图 19 中国集成电路产业销售额占世界集成电路市场的份额

Fig. 19 Sales value of Chinese IC industry in the world's IC market share

亿美元)与 Qualcomm(64.09 亿美元)两公司销售额之和。

为满足国内市场的巨大需求,近年来,集成电路一直成为中国进口额位列第一的产品(图 20^[17])。2009 年,中国集成电路进口额为 1199 亿美元(包括来料加工产品),是本土企业集成电路销售额的 7.4 倍。

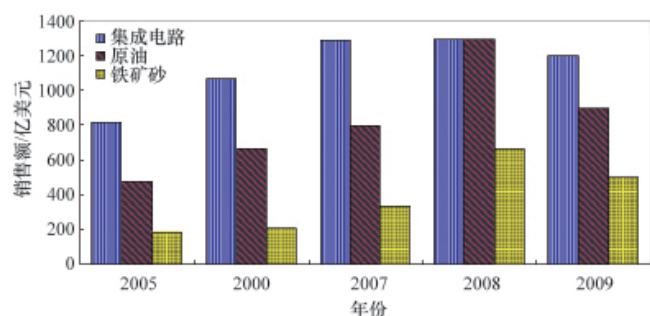


图 20 中国近年来集成电路、原油和铁矿砂的进口额

Fig. 20 Comparisons of China's imports of ICs, crude oil and iron ore in recent years

综上所述,中国目前仍处于集成电路消费大国的历史阶段。面对占世界近 50%份额的大市场,没有一个企业会无动于衷,没有一个企业不想在其中分一杯羹。但中国企业不得不面临的严峻事实是,真正能够切入的市场范围并不大。2008 年,各种集成电路产品在市场中所占比例如图 21^[18]所示。

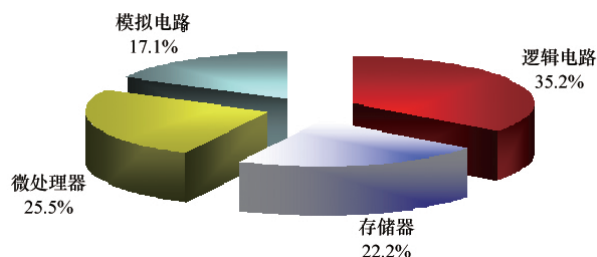


图 21 2008 年世界集成电路市场中的产品比例

Fig. 21 Ratios of products in world IC market in 2008

鉴于中国目前还没有类似于 Intel、Samsung、Toshiba、TI 等这样的集成器件制造商 (Integrated Device Manufacture, IDM)企业,因此除很少数量嵌入式微处理器和 Flash 产品外,中国在微处理器和存储器两个市场中暂不具备竞争的實力;而在余下的逻辑电路和模拟电路市场中,世界 IDM 企业也占据相当份额。

当前,中国的集成电路产业结构由无生产线的设计企业 (Fabless)、代工制造 (Foundry) 和封装 3 种企业组成。代工制造和封装企业主要提供加工服务,并不生产直接占领终端市场的、具有自主知识产权的集成电路产品。而与市场关系最为密切的无生产线的设计企业,由于其规模较小,在技术、销售、专利、成本等方面均不具备与国际上先进企业竞争的优势(图 22)。如果不思进取,仅在这样一个狭小的市场空间里竞争,虽可以极低利润取得一时温饱,但永远不会在世界市场上披荆斩棘。只有通过创新开辟新市场,才能使中国集成电路产业与科学技术由弱变强。

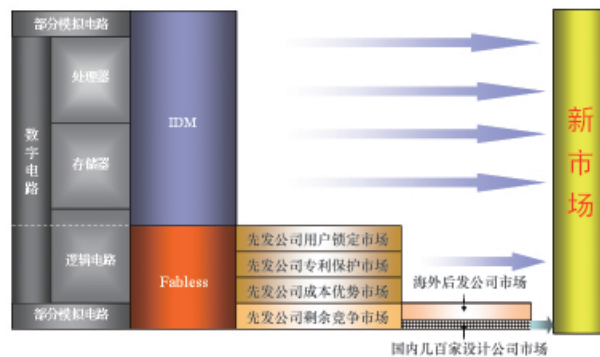


图 22 集成电路市场中不同类型企业在各种产品中的竞争

Fig. 22 Competition in different inds of products of different enterprises in IC markets

3 中国集成电路产业和科学技术发展之路

3.1 中国信息产业和科学技术核心竞争力的缺失

2010 年 8 月 19 日,《信息化蓝皮书:中国信息化形势分析与预测(2010)》发布,揭示 2008 年中国信息产业实现销售收入 6.3 万亿人民币元,产业规模已居国内工业部门首位;信息产业增加值占全国 GDP 的比重达到 5%。根据《中国支柱产业振兴方略》提出的量化指标(工业增加值在 GDP 中的比重达到 5%),信息产业已成为中国国民经济中的支柱产业。

2009年,中国共计生产计算机1.82亿台、手机6.19亿部、彩电9899万台,分别占全球产量的60.9%、49.9%、48.3%。2009年,全国软件产业实现业务收入9513亿元人民币;中国网民规模达到3.84亿,位居世界第一;互联网普及率为28.9%,超过全球25.6%的平均水平。

信息产业成绩的取得得益于集成电路市场的有力支撑。1999年,中国集成电路市场为548亿元人民币,信息产业销售总额为4302.1亿元人民币;2009年,集成电路市场扩大了10.4倍,为5676亿元人民币,相应信息产业的销售额扩大了14.6倍,达到6.3万亿元人民币。但应该清醒地认识到,作为信息产业的基础,集成电路市场的扩大主要是进口产品的增加,也就是说,作为中国支柱产业的信息产业,很大程度上依赖于国外集成电路的支撑,信息大厦的根基并不十分牢固,一旦世界经济走向、政治风云、军事格局出现变幻,势必对中国信息化进程造成不可估量的影响。

中国信息化核心技术缺失的主要表现是:集成电路和软件技术缺乏创新能力,缺乏市场竞争力。支柱产业是国民经济的命脉产业,支柱产业的“空心化”不仅严重威胁到国家的经济安全,也使得科技进步难以维系,科教兴国难以落实,同时使得科技人才失去用武之地,由此,国防安全和政治安全将受到极大威胁。

图23表明,在信息化产业链中,系统设计处于产业链的最高端,系统设计者往往还掌握着销售和在增值服务中分配利润的权力。而整机组装则处于该产业链的最低端,只能获取最微薄的利润。也就是说,信息化的核心技术在于系统设计(系统结构设计及相应芯片设计),而这恰恰是中国信息产业和集成电路设计业的软肋。

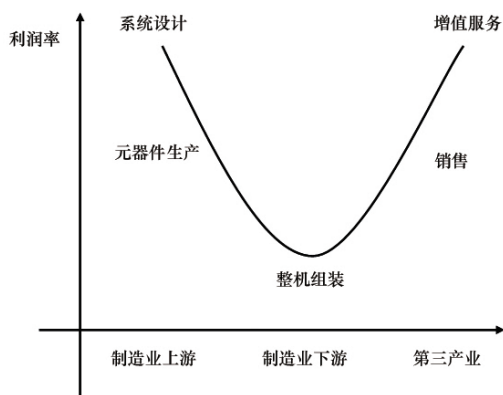


图 23 信息产业微笑曲线

Fig. 23 Smile curve of the information industry chain

系统可以由不同的芯片构成的整机,也可以是单一芯片(SoC),或是将不同芯片通过异质封装方法组成(SiP),或是通过微米、纳米技术加工方法制作的微纳集成系统(M/NEMS)。在全球经济一体化条件下,系统的设计和制造可以通过调动世界各地的资源完成。图24为Broadcom公司利用全世界资源进行系统设计的电视机芯片^[18]。

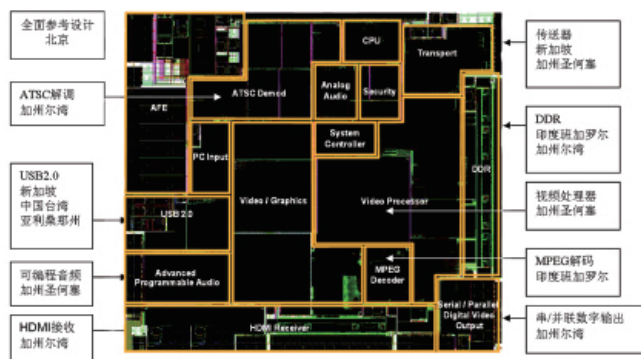


图 24 Broadcom公司采用65纳米技术设计的电视机芯片

Fig. 24 Broadcom designed TV chip using 65 nanometer technology

系统的设计企业通过“芯片+软件+解决方案(Total Solution)”的产品设计获取最大利润。以Apple公司的iPhone 4为例,一台售价600美元的手机价格组成如图25所示,其中Apple的利润占60%,元器件采购占31%,组装成本仅占1%^[9],其中的元器件部分由世界各著名企业分别提供。iPhone的成本结构清楚地表明:The value goes to where the knowledge is(价值流向知识聚集的地方)^[20]。

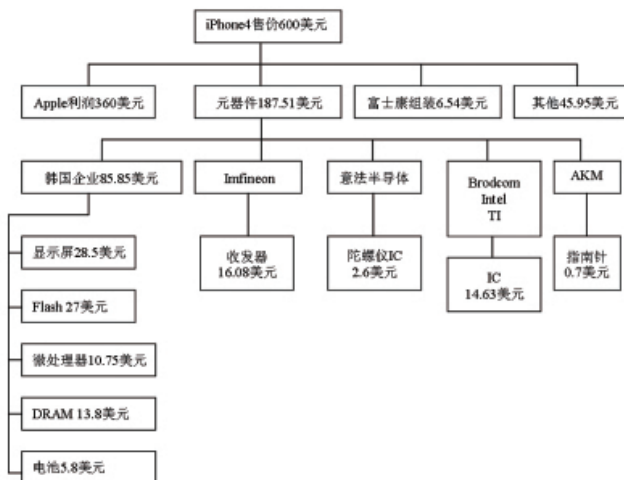


图 25 iPhone 4的价格结构

Fig. 25 Price structure of Apple iPhone 4

当然,在这里并未谈及高端制造业的问题,从整个集成电路产业链讲,芯片制造业,特别是处于发展前沿的高端芯片制造业,如45nm、32nm及未来的22nm加工技术和相应的三维封装技术、测试技术均具有很高的知识含量,它们也是价值流向的地方。据不完全统计,集成电路设计、高端芯片制造和高端封装测试的利润分配比例约为40%、40%和20%。

3.2 集成电路产业和科学技术的发展与能源消耗

集成电路产业不会、也不应该游离于低碳经济之外。集成电路与世界上的任何事物一样,都具有两面性,在经济社会中,集成电路同样是一把双刃剑。一方面,集成电路对于节能做出了巨大贡献,美国节能经济委员会在《半导体技术,美

国能源生产力革新的希望》^[21]一书中指出:“与 1976 年的技术相比,我们估计,单单在 2006 年一个年头,整个半导体技术的应用就节约了大概 7750 亿 kW·h 的能源”(约相当于三峡水电站年发电量的 9 倍)。该书还认为:“事实证明,各种各样的政策和激励措施可以推动半导体节能技术投入的增加”;“到 2030 年,这些政策可能会促使这一现象出现:即与 2008 年相比,美国经济增长量将超过 70%,但耗电量却减少了 11%。”

另一方面,集成电路工作时也需要消耗由各种一次能源转化而来的电能。尽管每个集成电路的工作电压一降再降,其中晶体管的能耗也一降再降,但由于集成电路的集成度越来越高,集成电路的市场越来越大,所消耗的电能也相应越来越多。20 世纪 90 年代,全世界拥有个人计算机 1.2 亿台,2008 年一年激增至 12 亿台,增长了 10 倍;1990 年,全球网络用户只有 400 万,2009 年则增长到 16 亿,19 年间增长了 400 倍;美国一个普通家庭中拥有 24 个或更多的微处理器芯片;一辆汽车中包含 50 个甚至更多的微处理器。初步估算,一个中产家庭 IT 产品的能耗已接近照明的能耗。Google 位于 Oregon 的数据中心需要一个 1.8GW 的水力发电站专门为其供电,该数据中心所消耗电力,约与宾西法尼亚州纽卡斯尔市全部家庭的用电量相当^[22]。

此外,集成电路制造业也在消耗着电力、水等资源,也在向大气和地面排放着一些污染物。这就是说,从社会发展的外部环境看,集成电路产业本身也应该为节能减排的做出应有的社会贡献。

3.3 产业与技术突破的焦点在于优先发展设计业,从系统需求和低功耗出发进行创新设计

目前,中国集成电路设计业有企业 480 余家,2009 年全行业销售总额为 379.83 亿元人民币。其中,超过 1 亿元销售额的企业 35 家,其销售总额为 228.85 亿元人民币,占全行业销售总额的 60.25%;排名第一的深圳海思公司的销售额为 37 亿元人民币^[23]。

总体而言,中国的集成电路设计企业尚比较弱小,2009 年全行业销售总额约折算为 55.6 亿美元,为世界第一大设计企业 Qualcomm 同年销售额 64.09 亿美元的 87%;而 Media Tek 同年的销售额为 35.51 亿美元^[24],相当于大陆全设计行业销售总额的 64%(图 26)。

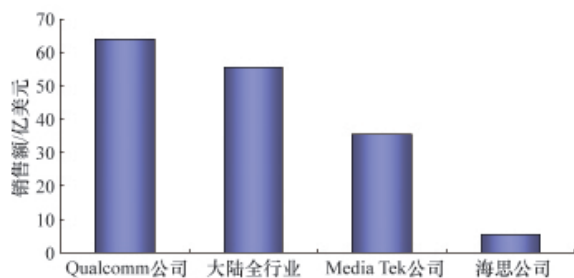


图 26 集成电路设计企业销售额的比较

Fig. 26 Comparison of the IC design industry of China

集成电路是一种不与消费者直接见面的“中间产品”,只有在整机或系统中得到应用后才能体现其价值。集成电路与系统的关系有两种模式,一种是集成电路是核心,系统围绕集成电路来开发和升级换代;另一种是系统(包括标准)是核心,集成电路围绕系统来开发和升级换代。前者的典型是 CPU、存储器与 PC 的关系,同一种 CPU 可以制造出不同品牌的 PC,也就是说,系统性能取决于集成电路的性能;后者的典型是各种集成电路芯片与手机的关系,同一功能的手机可以采用不同厂家的集成电路实现,也就是说,集成电路的性能/价格要满足系统的需求(图 27)。这两种模式都是市场牵引与技术推动相结合的结果。

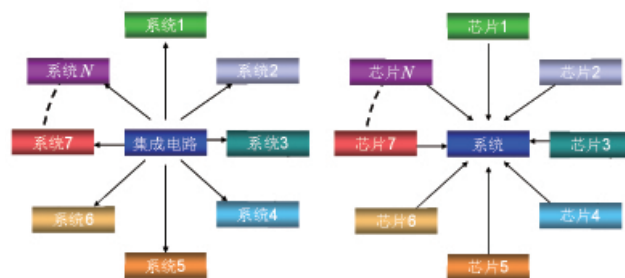


图 27 集成电路与系统的关系

Fig. 27 Relationship between integrated circuit and system

无论哪一种模式,集成电路都离不开系统。某些企业面对各种系统,以“博”取胜;某些企业只面对专业领域的系统,以“专”立足。前者如 Toshiba、Panasonic、TI、Samsung、Sony、NEC 等,后者如 Intel、Qualcomm、AMD、Broadcom、Hynix 等。

瞄准市场、解决系统设计和开发产品与上下游产业链的衔接是设计企业生存与发展的关键。海思的成功在于华为的通信市场;华大的成功在于受保护的身份证市场;比亚迪电子的成功在于比亚迪汽车市场;大唐微电子的成功在于背后的大唐电信市场;上海展讯的成功在于 3G 手机市场。

中国的设计业正处于博弈阶段,既包括与国际企业的博弈,也包括国内企业之间的博弈。在复杂的博弈过程中,演绎着诞生、发展、兼并、壮大、停滞、衰亡等各种状况。在目前尚无强大的设计企业与世界 IDM 企业相抗衡的情况下,需要鼓励、吸引大量海外高端人才和企业来华创业,研究和瞄准中国与世界市场需求,充分发挥政治稳定、政策优惠、市场开放、人才培育的潜在优势,整合各种资源,大力发展与系统相结合的设计企业,力求将设计产业尽快做大做强。

中国的 Fabless 企业应以系统开发为核心竞争力,不断开辟新市场。包括:

- (1) 个性化手机市场。从系统角度着重解决芯片+软件+Total Solution 问题;
- (2) 消费类产品市场。如新型显示器彩电等;
- (3) 网络市场。包括移动互联网、物联网,以及电信网、广播电视网和计算机通信网三网融合等;

(4) 汽车电子与车载系统市场。包括车身控制、安全设施、动力传动、底盘控制、驾驶信息等;

(5) 智能卡市场。包括移动通信/电信卡、市政管理卡、金融支付卡、电子证件、电子护照、电子标签等;

(6) 以节能、减排和低碳能源应用为代表的绿色集成电路市场。如电源管理单元(PMU)、功率因子校正控制器、LED灯、节能灯、HID灯等;

(7) 安全产品市场。如增值税发票认证系统、金融数据密码机、加密传真机等专用芯片,网络应用安全芯片、可信计算芯片、安全存储芯片、专用密码芯片、安全通信芯片等;

(8) 有关人体健康和国土防灾系统芯片,包括煤矿安全、天然气安全、防震、防火等方面。

同时,设计企业要与加工制造企业建立战略伙伴关系,更要通过和增值开发商、应用开发商建立产业联盟延伸产业链,以此获取更大的利润空间。期待着在 10—20 年内能够在中国诞生世界级的集成电路设计企业。

集成电路的低功耗设计是今后集成电路创新的重要组成部分。

容性功耗占集成电路总功耗的 70%—90%,降低容性功耗可以分别从开关活动率 α 、负载电容 C_L 、电源电压 V_{dd} 和工作频率 f 共 4 个方面入手。图 28 为降低 V_{dd} 的思路和解决方案。

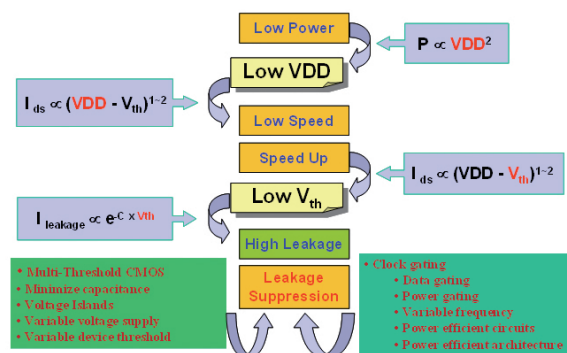


图 28 集成电路低功耗设计思路和解决方案

Fig. 28 Design ideas and solutions for low-power IC

单纯降低工作频率为实际应用所不容,但可采用并行处理(Parallel Processing)的方式解决,缺点是带来硬件开销的增加。降低负载电容主要是指降低栅电容、节点电容、连线电容和封装电容,可采用多层金属布线、SOI、多芯片模块(MCM)等方法实现。降低开关活动率的目的是尽量去除不必要的耗能翻转,可以通过优化算法、改进编码和优化逻辑结构等途径实施。同时,可采取“全局异步,局部同步”设计方法降低全局统一时钟带来的功耗,通过减少软件的无效运行降低无谓功耗的增加等。

具体设计集成电路时,又分为系统级、行为级、RTL 级、逻辑级、晶体管级和版图级 6 个层次。其中系统级的低功耗设计比其他级别在降低功耗上更加有效。系统级设计包括动态

电源管理、动态电压调节、低功耗编译、软硬件协同设计(图 29)等内容。图 30 为典型的功耗优化设计流程,图 31 为从系统到 SoC 芯片的设计流程。

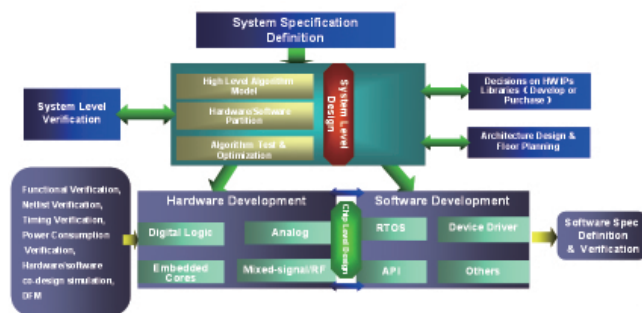


图 29 集成电路的软/硬件协同设计

Fig. 29 Co-design of low-power hardware and software for IC

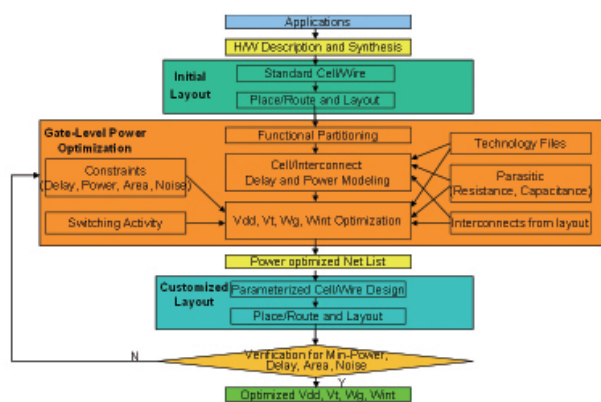


图 30 典型的功耗优化设计流程

Fig. 30 Typical IC power optimization of the design process

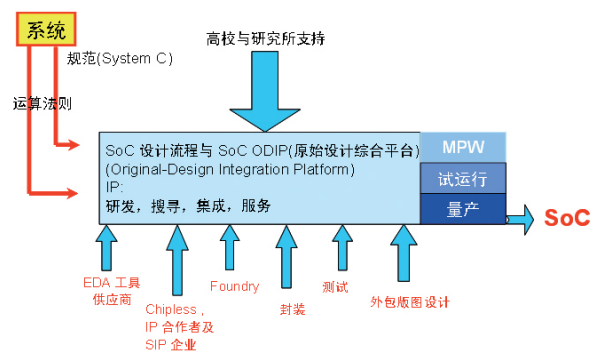


图 31 从系统到 SoC 芯片的集成电路设计

Fig. 31 The IC design platform from the system to SoC chip

3.4 夯实制造业的基础,提升制造业的技术水平和服务能力,降低制造业的能耗

制造是设计的延伸,是将设计思维转化为产品,并通过产品在市场中的交换使设计产生价值,并且最终将设计智慧普惠于大众的手段。没有成熟的、稳定的制造工艺,没有足够

的制造产能,再优秀的设计也不能迅速在占领市场的过程中转化为强劲的生产力。目前,中国设计业在逐渐崛起的进程中已经感受到制造业产能的局限,对夯实制造业的基础提出了急切的市场需求。

对集成电路代工企业而言,除要求其工艺稳定、良品率高、交货周期准时和价格优势外,建立多种类型的IP库是为设计企业提供优质和快速服务的重要基础,是扩大客户对象、争夺市场和开辟新市场的有利手段。

加工尺寸<65nm以后,将涉及许多新工艺和新技术,这是集成电路知识创新的又一个关键领域,因而不仅是价值流向的聚合点,同时也成为投资流向的着重点,其主要工艺技术如图32所示。其中最关键的低功耗新工艺有:高K栅介质/金属栅技术、低K介质材料互连技术和光刻技术。



图 32 各工艺节点工艺模块

Fig. 32 Featured modules at each node of the process

从45nm技术代开始,高K栅介质和金属栅分别开始替代SiO₂和多晶硅电极(薄SiO₂层仅作为缓冲层存在)。该工艺可使源漏间的漏电降低5倍以上,使栅极氧化物介电质漏电降低10倍以上,并能使驱动电流效率提高20%以上。高K材料可将芯片整体功耗降低多达45%^[24]。

从250nm技术代开始,互连延迟已经超过器件的延迟。解决互连问题的方法,一是采用电导率高的材料减小连线电阻,如铜;二是采用超低介电常数(Low K)的材料(包括K=1的空气桥)减小连线间的电容,三是采用新型互连结构,如三维封装(3D SiP)、三维硅通孔(3D TSV)以及RF互连、光互连和碳纳米管等。

目前,32nm主流光刻技术有193nm+浸渍(Immersion)+叠图(Double patterning)方式,经过努力有可能延伸到22nm。<22nm以后可能的的方式有EUV或电子束光刻EPL(Electron Project Lithography),EUV的光源波长可达13.5nm,但EUV首先要解决光源能量大部分被反射而不能被充分利用的问题。

材料是创新的源头,装备是工艺的物化。集成电路生产中的材料,既包括衬底材料、外延材料、光刻材料,也包括封

装材料和工艺辅助材料。不同的材料经过不同工艺的加工,可以生产出千变万化的产品。20世纪80年代,集成电路生产中的材料仅硅、硼、铝、氮、磷、氧等12种;到90年代,品种增加了钛、钨、钴、钼、溴;进入21世纪后,在金属栅、高K栅介质、互连工艺和PCRAM、RRAM中应用的材料已超过60种。仅在RRAM研究中就涉及金属氧化物、多元化合物材料、有机材料等,其中过渡金属氧化物如NiO、TiO₂、ZnO、HfO₂、ZrO₂、CeO₂、WO₃、Fe₂O₃等倍受关注。

材料的变化可以对集成电路生产带来革命性进步,如硅圆片直径的增加大大提高了生产效率,铜替代铝的互连大大提高了器件的性能,硅基材料(SOI)材料具有速度快、功耗低、集成度高、抗辐照能力强的优势,高K/金属栅材料可以降低器件功耗等等。

集成电路装备的生产既涉及机械、光学、化学、自动控制、软件等多个技术领域,又需要生产厂商对集成电路的加工工艺有深刻的了解,是一项极其复杂且专业性极强的系统工程。因此,一个企业,甚至一个国家都不可能制造整条生产线的全部设备。我们认为,(1)量大、面广、关键的产品(>65nm, 12")应用实现产业化,不求整条生产线配置齐全;(2)光刻机要着重EUV、EPL预研;(3)开展193nm浸渍光刻DFM软件研究;(4)在新器件、新工艺、新材料基础上开发与之相结合的、具有自主知识产权的新型装备应成为我们研究的重点。

3.5 抓住21世纪20—30年代的历史机遇,在集成电路科学技术上力争取得重大突破

20世纪30年代,物理学上的一系列突破促进了晶体管的诞生。50年代后期开始,集成电路、计算机、移动通信、网络相继问世,开创了人类社会的信息时代。21世纪头30年集成电路科学技术所面临的历史机遇,与20世纪头30年物理学上一系列重大突破有着惊人的相似之处,在这场新一轮博弈中,我们期待科学技术的重大突破能够催生新的信息器件与系统。

据ITRS预测,到2022年,集成电路加工尺寸将有可能达到11nm,这已进入介观(Mesoscopic)物理的范畴,将遇到诸如费米钉扎、杂质涨落(Fluctuation)、库仑阻塞、量子隧穿、量子约束、准弹道输运、自旋输运等物理问题(图33)。

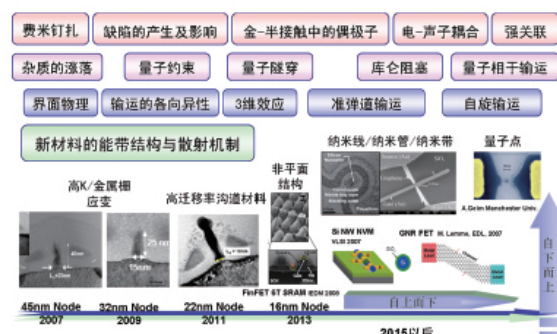


图 33 集成电路技术遇到的物理限制问题

Fig. 33 Device physical limitation in integrated circuit technology

另一方面,集成电路本身将遇到不可逾越的功耗障碍。

其一是功率密度,根据 Intel 公司发布的数据(图 34)^[25], Pentium 处理器的功率密度已接近 $10\text{W}/\text{cm}^2$,与电炉的功率密度相当。如果任其发展,则有可能逐步达到核反应堆、火箭喷嘴、甚至是太阳表面的功率密度,当然这是不可能被接受的事实。因为过高的工作温度不仅会对集成电路的性能、漏电及其可靠性劣化产生巨大影响,甚至令集成电路完全失效。

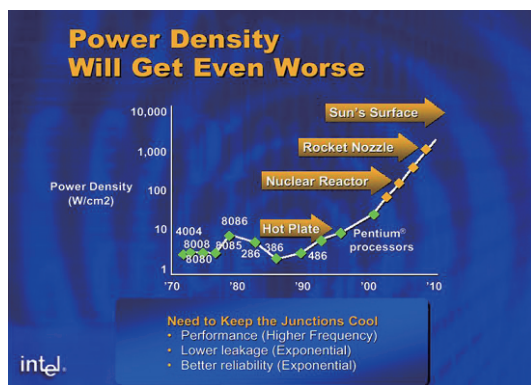


图 34 集成电路功率密度对集成度的制约

Fig. 34 Integrated level is limited by power density

基于上述分析,我们可以提出这样一个命题,即:在集成电路技术进入纳米技术节点后,作为在经济和技术层面上曾经起过指导作用的摩尔规律将完成它的历史使命,淡出历史舞台。代之而立的应该是:降低功耗,提高性能/功耗比是未来集成电路与系统发展的主要驱动力。为此,应从设计、工艺、封装、材料、设备、资源整合、研发机制、人才培养等多方面入手。21 世纪 30 年代,超越摩尔规律的 SoC、SiP 等技术将随着各个领域信息化的推进,并在整个 21 世纪中始终会成为熠熠生辉的亮点,我们必须把握这一难得的历史机遇。

器件创新是技术创新的结晶,是产业与市场创新的起点,正所谓“风起于青萍之末”。开发绿色微纳电子器件有两种途径,一是自上而下,二是自下而上(图 35)。

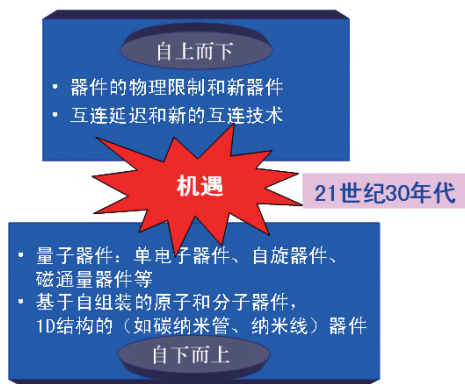


图 35 21 世纪 30 年代集成电路科学技术

有可能产生重大突破

Fig. 35 Integrated circuit science and technology may make important breakthrough in the 2030s

在自上而下的研究中,主要研究对象有动态阈值器件;低压低泄漏电流纳米尺度 MOS 器件,包括超薄体 (Ultra-Thin Body, UTB) SOI 器件和准 SOI 器件,平面双栅、垂直双栅器件, FinFET, 三栅、 Ω 栅及围栅器件 (Gate All Around, GAA) 等(图 36);超陡亚阈斜率的新机制低功耗器件,包括隧穿场效应晶体管 (Tunneling FET, TFET), 碰撞电离 MOS 器件 (Impact Ionization MOS, IMOS) 和悬栅 MOSFET (Suspended Gate MOSFET, SGMOSFET)。

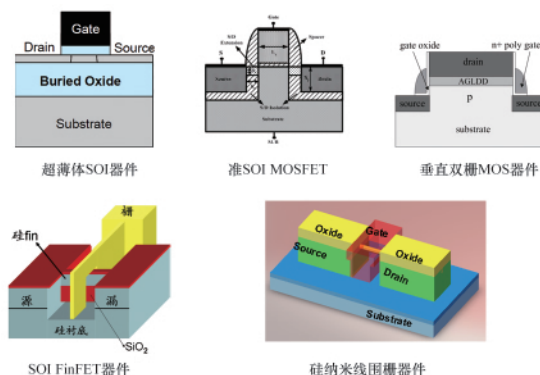


图 36 低泄漏电流纳米尺度 MOS 器件

Fig. 36 Low leakage current nano-scale MOS devices

此外,正在研究的新型非挥发存储器技术包括:基于分布式电荷存储的概念的电荷陷阱存储器 (CTM) 和纳米晶存储器;基于新存储机理的铁电随机存储器 (FeRAM)、磁随机存储器 (MRAM)、相变随机存储器 (PCRAM) 和阻变随机存储器 (RRAM) 等,PCRAM 和 RRAM 正在成为对存储器产生革命性影响的绿色器件。RRAM 的特点是:动态功耗 $<1\text{W}/\text{Tb}$, 高低阻态的转换时间 $<5\text{ns}$, 高低阻态的电阻比率可在 $10^1\text{—}10^8$ 范围变化,器件的可擦写次数可以达到 $>10^8$, 数据保持时间有望 >10 年,存储密度可达 $10\text{Tb}/\text{cm}^2$ 。按照一本《红楼梦》电子版的存储空间为 3MB 计算,一枚 10Tb 的 RRAM 即可存储 30 万册《红楼梦》的存储量,则中国国家图书馆 2700 万册藏书用 100 枚 RRAM 即可全部容纳,而总动态功耗不超过 1000W 。由于 RRAM 兼备了 DRAM、SRAM 和 NVM 优点——极快的速度、低工作电压和电流、良好按比例缩小和高密度集成能力、良好的非挥发性等,被认为是最有发展潜力和成为通用存储器的竞争者。

近年来,北京大学利用过渡金属氧化物材料和可与 CMOS 工艺兼容的 SiO_xN_y 材料,在制造 RRAM 的研究中取得了可喜的进展,如 HfO_2 RRAM,基于氧化硅和氮氧硅全兼容材料的 RRAM (Memristor 与硅基工艺结合的较好实例),以及利用 TaO_x 材料和小分子 TiOPc 材料研制了嵌入式 RRAM。

绿色微纳电子器件的另一个重要分支是微集成系统 (M/NEMS)。M/NEMS 的典型产品包括:微型加速度计、微型压力传感器、数字微镜器件 (DMD)、喷墨打印机的微喷嘴、汽车电子稳定系统 (ESP)、胎压监测系统 (TPMS)、刹车防抱死系统

(ABS)、发动机控制、转向控制、防盗器以及家用血压计和血糖分析仪等。从能耗角度看,所有 M/NEMS 都是具有低功耗特点的产品。驱动一个 NEMS 器件只需 10^{-12}W ,比电子器件处理器低 3—4 个数量级。例如, 麦克风功耗仅为 $75\mu\text{W}$;RF MEMS 功耗可以达 μW 数量级;ADI 双轴加速度计的功耗仅为 11mW ; 微型卫星和无线传感网纳卫星重量在 10kg 以下,皮卫星则降低到 1kg 以下,其功耗甚至可以 $<1\text{W}$ 。

自下而上主要包括量子器件(包括单电子器件,自旋器件,磁通量子器件等)和基于自组装的原子器件、分子器件,以及一维结构的纳米线和碳纳米管器件等。近年来,新材料石墨烯引起了更多的关注,由于石墨烯具有超强的电子迁移率、超薄的厚度(0.34nm)和超强的硬度等特点,使它很可能成为新型纳米器件的基础材料。

如图 35 所示,预计在 21 世纪 30 年代,自上而下和自下而上将产生交汇,届时,集成电路技术可能产生革命性突破,在此基础上发现全新的信息器件。当然,也有可能随着物理学、数学、化学、生物学等领域的新发现和新技术的产生,另辟蹊径,建立新形态的信息科学技术及其产业。但无论如何,它们均应是低功耗和超低功耗器件。

3.6 机制改革与文化进步是集成电路产业与科学技术持续发展的必备条件

唐太宗李世民言:“以铜为鉴,可正衣冠;以人为鉴,可明得失;以古为鉴,可知兴替”。世界发展史正是一部科技进步与文化发展相互作用的历史(图 37)。

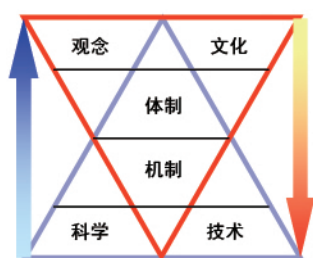


图 37 科学技术、体制机制与观念文化的关系
Fig. 37 Relationship among science and technology, system and mechanism, concepts and culture

科学技术的突破有可能产生新体制、机制的突破,也有可能被旧文化、旧体制扼杀于襁褓之中。牛顿的力学理论体系、蒸汽机和内燃机的发明促进了航海技术的成熟和地理大发现的可能,而地理大发现使得最先崛起的国家完成了资本的原始积累,从而使资产阶级的力量日益壮大,最终打破了封建体制的桎梏;反之,中国曾拥有领先于世界、西方受惠于中国的 100 项技术发明,由于封建统治者因循守旧的文化理念,始终奉四书五经为圭臬,中国并未成为引发生产力变革的先驱。同样,体制、机制的革命有可能促使新观念、新文化产生和科学技术的发展,但也有可能使旧观念、旧文化沉渣泛起,使科学技术的发展停滞不前。前者如改革开放,没有改革开放的体制、机制,就不可能有“科学发展观”和“建立和谐

社会”的文化,就不可能有 GDP 的持续增长;后者如文化大革命。因此,一个产业的发展必须放在体制、机制、文化和历史的大环境中考虑,急于前进,可能欲速则不达,趋于保守,可能丧失大好良机。

温家宝总理在 2010 年 8 月 20 日在深圳视察工作时特别强调:“完善社会主义制度的艰巨性,要求我们坚定不移地推进改革开放。只有不断解放思想,与时俱进,全面持久地推进改革,才能建成完善、成熟、有中国特色的社会主义。不仅要推进经济体制改革,还要推进政治体制改革。没有政治体制改革的保障,经济体制改革的成果就会得而复失,现代化建设的目标就不可能实现。”^[26]

人的创造性是科学技术发展之源,是推动经济增长和社会进步之本。世界银行曾在一份报告中提醒新兴市场国家,如果不培养出一支有文化、有创造力的劳动队伍,并打造出支持创新的法律体系,如果放任既得利益企业的扼杀竞争,根据历史和国外的经验,发展中国家都很容易在达到中等收入后停滞不前。

为此,我们要积极营造支持科技事业发展的法律政策环境、市场环境、社会文化环境以及诚信、宽松、和谐的学术环境;鼓励自主探索,保护知识产权,发扬学术民主,提倡学术争鸣。要建立健全国家科技决策机制和宏观协调机制,促进全社会科技资源高效配置和系统集成,促进科研布局 and 结构调整。要加快构建以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系,使企业真正成为研究开发投入的主体、技术创新活动的主体、创新成果应用的主体,全面提高企业自主创新能力,加快科技成果向现实生产力转化。同时,也要坚决反对一切形式的学术腐败和学术不端行为,净化学界和企业界的创新氛围。

集成电路产业的持续发展取决于研发能力的强弱,首先要解决“资源高效配置和系统集成”的问题,要树立资源共享的大局观念。在汲取国外 Sematech、IMEC 等组织先进经验的基础上,一要尽快建设共享资源,以大生产、大企业为背景的国家级产学研结合的研发中心(图 38),及时将科技研究成果

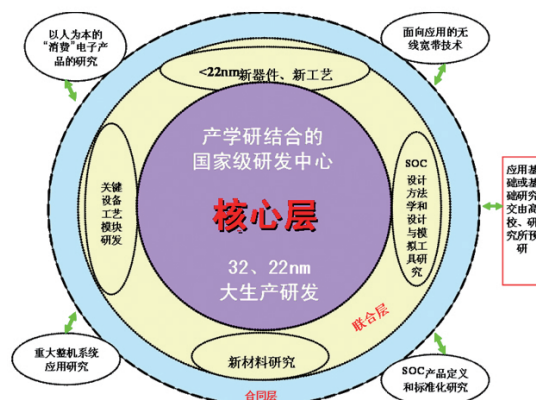


图 38 产学研结合的国家级集成电路研发中心
Fig. 38 A national IC R&D center based on the cooperation of industries, universities and research institutes

转化为生产力;二要抓提前 10 年进行战略部署,开展联合研究工作,建立<16nm 级的纳米集成电路新器件、新工艺、新结构、新材料和新集成系统的国家实验室,组织有关大专院校、研究单位和企业共同参与,为 10 年后的产业做好技术储备。

中国具有巨大的集成电路市场优势和人力资源优势,在正确的战略和战术指导下,希望在未来 10—20 年时间内,这些优势能够转化为产业和经济的优势。期望在 2015 年,中国的集成电路产业总产值占世界市场的比例能够由现在的 8% 增长到 10%,到 2020 年,这一比例增长到 15%。此期间,应该能够培育出数个销售额>10 亿美元的设计企业和销售额>50 亿美元的制造企业。在产学研结合的基础上,32nm 的产品,能够在近 2—3 年内提供批量生产服务;2015 年,28nm 的集成电路能够批量生产;2020 年以前,22nm 的集成电路能够批量生产。在结合实施 973 计划和重大专项支持的基础上开展<16nm 技术的研发工作。从点滴做起,使积累局部优势能够在某些领域引导世界的发展潮流,逐步将中国从集成电路消费大国转变为产业强国。

今后,集成电路产品的发展方向将呈现两大趋势,一是通信、计算机和消费类产品的个性化将成为市场拓展的主流,到 2020 年,中国将是一个拥有 14.5 亿人口的巨大市场;二是集成电路与系统的低功耗化将成为技术驱动的主流,不再以单纯提高集成度即减小特征尺寸为技术节点,而以提高器件、电路和系统的性能/功耗比为标尺。从这个意义上讲,“得中国市场者得天下,领超低功耗者领潮流”。

参考文献 (References)

- [1] 麦迪森. 世界经济千年史 [M]. 伍晓鹰, 等, 译. 北京: 北京大学出版社, 2003.
Maddison A. The world economy: A millennial perspective[M]. Wu Xi-aoying, et al, trans. Beijing: Peking University Press, 2003.
- [2] 华泽澎. 能源经济学[M]. 北京: 石油大学出版社, 1991.
Hua Zepeng. Energy economics [M]. Beijing: University of Petroleum Press, 1991.
- [3] 一次性能源增长率 [EB/OL]//BP 世界能源统计 2008. <http://www.bp.com.cn>, 2008.
One time energy growth rate [EB/OL]//BP World Energy Statistics 2008. <http://www.bp.com.cn>, 2008.
- [4] 国家统计局. 国家统计局关于 2009 年年度国内生产总值(GDP)数据修订的公告[R]. 北京: 国家统计局, 2010.
National Bureau of Statistics. National Bureau of Statistics about 2009 GDP data revise announcement[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2010.
- [5] 国家统计局. 2009 年度统计数据[R]. 北京: 国家统计局, 2009.
National Bureau of Statistics. 2009 annual statics data[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2009.
- [6] 国家统计局. GDP 数据[EB/OL]//BP 世界能源统计 2008. <http://www.bp.com.cn>, 2008.
National Bureau of Statistics. GDP data [EB/OL]//BP World Energy Statistics 2008. <http://www.bp.com.cn>, 2008.

- [7] 丁刚. 国际产业转移对中国能源消耗的影响 [J]. 宏观经济研究, 2007 (8): 33-37.
Ding Gang. *Macroeconomics*, 2007(8): 33-37.
- [8] United Nations monthly bulletin of statistics[E]. 1999-2003.
- [9] 王阳元, 王永文. 我国集成电路产业发展之路 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 79.
Wang Yangyuan, Wang Yongwen. The development road of China integrated circuits industry[M]. Beijing: Science Press, 2008: 79.
- [10] DigiWorld[OL]. <http://www.digi-world.com>, 2007: 24.
- [11] 王阳元. 建设微电子强国的建议[J]. 中国科学院院刊, 2006(6): 472-474.
Wang Yangyuan. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2006(6): 472-474.
- [12] 国家统计局. 国家统计局国际统计数据: 半导体市场 (WSTS)[R]. 1975-2008.
National Bureau of Statistics. National Bureau of Statistics data: Semiconductor market (WSTS)[R]. 1975-2008.
- [13] Yearbook of world electronics data 2008 [R/OL]. 2007. <http://www.reportlinker.com/p071747/Yearbook-of-World-Electronics-Data-4-Volume-Set-Vol-1-2-3-4-See-Note-A.pdf>.
- [14] 徐昂. 物联网将给社会科学研究带来革新[R/OL]. [2010-02-10]. <http://opinion.im2m.com.cn/33/1033196573.shtml>.
Xu Ang. Focus on the Internet of Thing[R/OL]. [2010-02-10]. <http://opinion.im2m.com.cn/33/1033196573.shtml>.
- [15] CSIA. 中国集成电路产业发展状况报告[R]. 2006—2010.
- [16] CSIA. 中国集成电路产业发展状况报告[R]. 2000—2010.
- [17] 中华人民共和国海关总署. 进口重点商品量值 [EB/OL]. <http://www1.customs.gov.cn/Default.aspx?tabid=4370>.
- [18] Scott McGregor Broadcom IC China[R]. 2007.
- [19] Barboza D. Supply chain for iPhone highlights costs in China [N]. The New York Times, 2010-06-05.
- [20] Rivoli P. The travels of a T-shirt in the global economy [M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2009.
- [21] John A. "Skip" Iaitner, Chris Poland Knight[R]. McKinney V L, Ehrhardt-Martinez K. Semiconductor technologies: The Potential to Revolutionize US Energy Productivity. ACEEE Report Number E094. 2009.
- [22] 盛世嘉讯. 俄勒冈州的 Google 数据中心耗电惊人[EB/OL]. <http://www.tjgoogle.cn/wangzhanyouhua/47.html>.
- [23] 王芹生. 沉着应对挑战, 积极主动调整, 努力再创辉煌 [C]. 中国半导体行业协会集成电路设计分会年会, 厦门, 中国, 12 2-3, 2009.
Wang Qinsheng. Face the challenge calmly, adjust actively and try hard to create another brilliant [C]. CSIA-ICCAD Annual Conference, Xiamen, China, Dec 2-3, 2009.
- [24] 王阳元. 绿色微纳电子学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 216.
Wang Yangyuan. Green micronanoelectron [M]. Beijing: Science Press, 2010: 216.
- [25] Pollack F. Intel 1999[R]. ITRS, 2005.
- [26] 中国新闻网. 外报关注温家宝深圳行: 政治体制改革话藏深意[EB/OL]. [2011-08-23]. <http://news.sohu.com/20100823/n274404131.shtml>.
China News. The visit to Shenzhen by Jiabao Wen is noticed by foreign newspaper office: The profound meaning of political restructuring[EB/OL]. [2011-08-23]. <http://news.sohu.com/20100823/n274404131.shtml>.

(责任编辑 朱宇)