

·学科进展与展望·

纳信息功能器件系统的关键科学问题和发展趋势

郭万林¹ 薛其坤^{*2} 范守善^{*2}

(1 南京航空航天大学, 南京 210016; 2 清华大学, 北京 100085)

[摘要] 本文综合评述了国内外纳电子器件和新原理的纳功能器件的最新进展,指出硅基微电子技术正在向与新的、目前尚不明确核心技术的纳信息技术共同发展的方向转型,这是我国信息技术和产业后来居上的重要机遇。基于纳尺度各种显著的物理效应和多场耦合原理,开展低维纳功能器件的新原理、新性能、新架构的深入系统的研究,具有重大科学与现实意义。这类纳信息功能器件与硅芯片技术相融合的设计、工艺和技术将是需要突破的重大问题。随着纳米科学技术研究的重点向功能化器件系统方向发展,如何加强以产业发展为背景的研究,特别是加强微纳电子、芯片设计制造业与纳米科技基础研究的结合,加强微纳硅工艺与新的纳米技术的结合,加强高水平科学研究发现与关键技术创新的结合,是我国纳米科学技术发展的重要问题。

[关键词] 纳功能器件,纳电子电路,物理原理,系统集成,自下而上,硅技术

1 引言

1947年肖克利等发明半导体晶体管,1959年Kilby等发明集成电路技术以来,以微电子技术为基础的信息产业革命已成为影响人类社会的最重要的领域之一。以摩尔定律为主线的信息技术40年的高速发展,已使整个国际社会建立起从教育、研发、生产、市场到政府管理和全球协作的巨大而完整的体系。继续维持摩尔定律的发展速率是维持这个庞大体系以至人类社会生产秩序所必须的。但是,自微电子技术2003年全面进入纳米尺度以来,微处理器主频的提高变得困难,因基本器件单元CMOS(互补型金属氧化物半导体晶体管)的沟道长度减缩、栅绝缘层厚度减小和互连电阻增大等,使高端芯片的能耗高居 100 W/cm^2 不下,工艺日趋复杂,为满足市场需求而不得不采用多核技术。尽管如此,国际半导体产业仍然维持了摩尔定律的发展规律。然而,按照国际半导体协会发展趋势(ITRS 2005, 2006年更新^[1])预测,原有的半导体CMOS技术到2019年将趋向物理极限。因此,深入纳尺度的后CMOS技

术和非CMOS技术已被ITRS 2005正式提出。由西方占据最核心的基本知识产权和统治地位的硅基微电子时代转向新的目前尚不明确核心技术的纳信息时代,是中国建立创新型国家、实现民族复兴的极其重要的机遇。目前,现有技术仍在发展,但下一代基础性的核心技术可能已在孕育,如何抓住机遇已经时不我待。

纳米技术在产业需求牵引和各国政府的推动下,已得到迅速发展,目前的重点已开始由纳米功能材料研究向器件和系统研发阶段过渡。纳尺度内的奇异多场耦合效应和量子效应使传统技术难以实现的信息功能和调控效果可以在纳尺度容易地实现和突破。基于巨磁电阻效应的硬盘技术和基于纳米浮门概念的闪存技术就是最好的例子。因此,利用纳尺度下多场耦合规律发展新原理的信息功能核心器件不仅是交叉科学前沿问题,更日益成为纳信息技术突破的关键。国际上各大半导体公司和产业集团都对纳尺度下的电子新技术投入巨资并组织专门力量开展技术探索,从新型的纳米运算器、存储器到集微处理和高速高密度非易失性随机存储于一体的

* 中国科学院院士。

本文于2008年3月24日收到。

SoC(System on Chips)技术,以及分子仿生技术等,令人震惊的新发现、新进展不断报道。主宰未来产业发展的核心知识产权的争夺已在悄然间进入白热化阶段。在未来的产业核心技术尚不明朗的情况下,洞察发展方向、取得先机是至关重要的。

目前,我国纳米科技领域的重大项目投资主要集中在纳米材料和量子信息技术领域,并在低维纳米结构制备、结构表征和物性研究,量子加密技术、量子光学等领域取得了一批突出成果^[2-7]。但在与现有硅基信息技术框架融合、近期更具现实意义的纳电子和分子电子技术的发展上与西方国家相比受到光刻技术等纳米芯片技术滞后的制约。据 2006 年 5 月国际著名的马克斯-克拉克商标专利事务所关于全球纳米技术行业专利申请情况的报告,过去 5 年,全球纳米技术专利年增 300%。在商业化最高的纳电子领域,日本公司和机构申请的“专利族”(相关专利的集合)占 51%,美国 24%,欧洲 8%,纳电子领域申请专利最多的企业有日富士通、韩三星、美 IBM 和 Intel 等。

本报告以微纳硅技术的发展为背景,着重评述国际、国内基于低维纳米材料结构的主要信息功能器件的重要研究进展,分析发展趋势,基于我们的理解探讨我国纳器件系统技术、相关基础研究和产业发展的可能方向,以便抛砖引玉和集思广义,为国家和社会发展献智献策。

2 纳功能器件技术发展的产业和技术基础

电子器件一般都具有性价比随尺度减小而显著上升的特点。这成为集成电路技术微型化的强大动力,推动着集成度长时期以每 3 年 4 倍的速度发展。微硅制造业已进入数十纳米线宽层次,2004 年已全面实现 90 nm 工艺微处理器的商业生产。Intel 继 2005 年底正式投产 65 nm 芯片产品后,又于 2006 年 1 月率先宣布成功制备 45 nm 技术的 SRAM(152 Mb)。2007 年 11 月中旬,Intel 正式推出 45 nm 芯片产品,业界其他芯片厂商几乎都在向 45 nm 芯片努力。按半导体工业的发展趋势,硅基 CMOS 器件尺度还将继续向 32 nm, 22 nm 以至更小尺度发展(图 1)。

Intel 2007 年 9 月已经公布了 32 nm 制程处理器(300 mm 的基板上全都是 32 nm 的储存芯片,每个储存芯片都拥有 19 亿的晶体管),用来证明其生产 32 nm 芯片的实力。Intel 2007 年还公布了包含 80 个 3.1 GHz 处理器核的万亿次(Tera Flops)原型

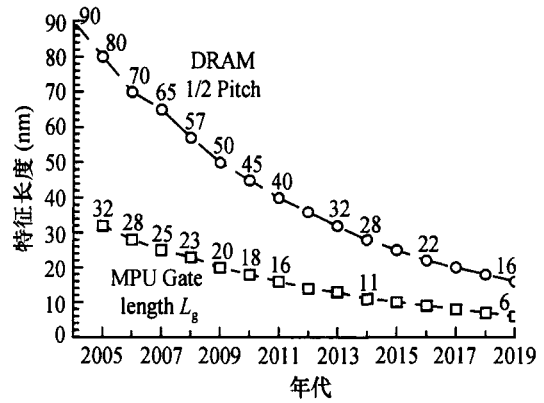


图 1 国际半导体产品技术发展趋势 (ITRS 2005)^[1]:DRAM 特征尺度和微处理单元 (MPU) 物理栅长。Intel 更是坚持两年周期的进程:在 2007、2009 和 2011 年分别投产 45 nm、32 nm、22 nm 芯片。

芯片,标志着硅技术在向纳尺度纵深继续发展的令人振奋的势头。双/多栅极、新的应变硅技术、高 k 绝缘和低 k 互连都会为硅基纳电子技术向 22 nm 推进提供希望,将硅晶圆的平面结构向三维芯片结构拓展的构思也是极具潜力的发展方向。但是,从最新的 45 nm 产品向 32 nm 转移将代价高昂且充满风险,32 nm 产品的研发成本将逼近 7,500 万美元,远远高出 45 nm 的 2,000 万到 5,000 万美元。不得已采用三维栅极等技术会使结构的复杂度和制造成本更急剧地上升。因此,除了物理极限和工艺限制外,成本也可能成为现行产业技术中止按照摩尔定律继续前行的另一个关键因素。

同时,根据最新的国际半导体技术发展趋势蓝图,应用纳尺度的新规律发展新型的、更具潜力的纳器件技术,或非 CMOS 技术,已经进入与硅基 CMOS 技术并行发展的时代(图 2)。我国纳米科技的积极倡导者和推动者白春礼院士指出:“纳米科技的一个最重要的应用方向是发展基于新原理的纳米尺度功能器件”^[8]。

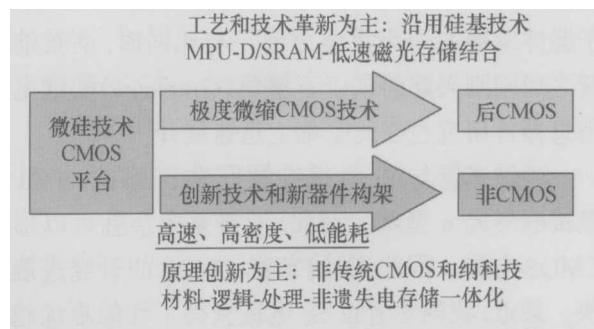


图 2 2005 年 12 月公布的国际半导体发展趋势 (ITRS 2005)明确提出由极度微缩 CMOS 向后 CMOS 时代的发展和非 CMOS 技术的并行发展趋势

但是,新的基于低维材料结构的纳器件技术要具有产业意义,必须在关键技术指标方面比硅技术有量级上的飞跃。明确这类指标对纳米器件研究十分重要。我们将微纳硅技术已经实现的一些主要技术指标总结在表1中。纳米科技研究应该朝着在量级上超越这些指标的方向努力才更有现实意义。

表1 微纳硅器件的一些主要技术指标和预期进程
(* 等效 SiO₂ 厚度)

单位(nm)	现有产品	最新产品 (Intel 07)	实验中	远景规划 (ITRS)	远景规划 (Intel)	理论极限(德州仪器)
制程(nm)	65	45	32	14	8	4
栅长(nm)	30	20	15	6	3	1.5
MPU 栅厚*(nm)	1.0	0.6				
开关频率(THz)	<1	无				25

3 沿用场效应管原理的低维纳器件技术发展状况

微纳信息功能器件的创新发展主要有三个方面:新材料、新结构和新工艺。利用新材料技术可以在现行半导体晶体管框架下突破硅基器件发展的瓶颈。当短沟道效应使二维电子气形成困难时,一维纳米结构成为理想的一维弹道输运体,并可以栅极电调控,形成各式各样的一维纳米场效应晶体管(1D-FET),如碳纳米管 FET, 纳米线 FET, 单电子 FET 等^[9,10]。其工作原理和结构框架完全与硅基 CMOS 协调。在技术上除自下而上的一维结构生长外,完全可以采用微硅工艺集成制备,并易于实现多栅等非平面结构。由于自组织生长的一维纳米结构具有完美的晶体结构和多层原子排布(如多壁碳纳米管),使得 1D-FET 具有弹道输运、电热损耗小、接近理论极限的超高电子迁移率、比一般金属高 4—5 个量级的高电流密度、多场耦合调控等优越的本征特性。因此,纳电子 1DFET 和集成系统已成为纳电子器件发展的一个重要方向。与此同时,继碳纳米管之后刚刚兴起的基于石墨层(Graphene)的纳电子信息器件研究也在此基础上迅速展开^[11-13]。

碳纳米管与 Pt 电极接触形成 p 型结,与 Al 电极接触形成 n 型结。因此,不需要掺杂就可以形成 CMOS 电路。因此,碳纳米管-CMOS 的研究进展很快。最近,我国学者以 Sc 电极获得了性能更优越的碳纳米管 n 型结^[14];并以氧化铝包覆碳纳米管构筑了同轴电缆式 FET^[15]。但这类一维器件的结构、性能可控性,电极的接触问题和纳电路等仍存在大的挑战。

4 新型纳功能器件的最新研究进展

利用新原理来开发新一代的电子器件已成为微电子技术深入纳米尺度后的发展趋势,例如利用量子隧穿原理的纳浮门晶体管存储器等。在纳尺度,材料和器件的物理性质与功能将由几个与尺度效应、边界效应和量子效应直接相关的特征物理尺度来决定。只要结构几何尺寸接近这些物理量的特征长度(微电子技术已深入其中),材料的电子结构、输运、磁学、光学、热力学性质以及机械性能均要发生明显的变化。在这些特征尺度内,物质的局域场强度与外场强度可比或更强,局域场、外场、原子分子构型形变的耦合变得突出,特异的智能性和信息功能性成为纳器件和纳信息科技发展的基础。为简便,我们将这类效应归结为纳尺度下的多场耦合效应(图3)。因此,纳尺度多场耦合是纳信息技术持续发展的根本问题。探索和利用纳尺度下的多场耦合机制,开发基于新物理原理的器件成为信息功能器件发展的必然方向。

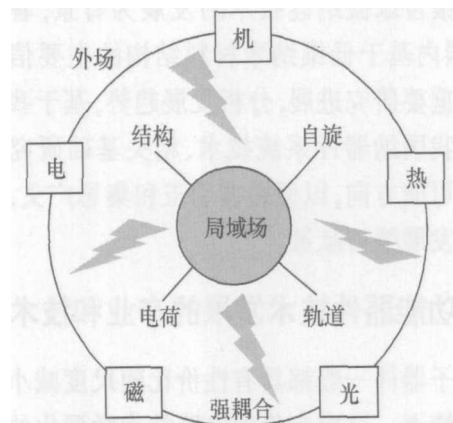


图3 纳尺度局域场与外场的多场耦合效应

即使很普通的物质,当其尺寸接近物理特征长度,局部场与外场以及几何构型的耦合,就会具有丰富多彩的智能特性和功能性。例如,碳原子构成结构很简单的纳米管(CNT),就具有从半导体到一维弹道输运的电性质、AB 电磁效应、流致生电、超敏传感、巨电致伸缩以及显著的机电磁光耦合特性,其特异的电输运性能可以容易地通过机械、光、磁、环境介质作用而显著调制,因此几乎拥有所有的智能性和信息功能性。已发现的类似纳智能材料十分广泛,新奇的 I-V 特性等智能/功能性在纳材料系统中普遍存在,特别适于新型纳电子器件。例如,纳米尺寸自旋阀、铁磁性隧道结、自旋隧穿共振二极管以及单电子隧穿器件等中的电流诱导磁化翻转行为,就是新一代低能耗非易失电子器件的基础;而光学晶

体相变存储器则利用电致相变引致的电输运性能改变实现电读写和非易失存储。因此, 纳尺度多场耦合是发展结构简洁、高速低能耗开关和非易失存储功能纳器件的根本物理原理。

利用纳尺度机电耦合原理, Lieber 研究组在 2001 年提出了一种由碳纳米管(CNT) 十字交叉网络构建大规模并行 RAM(称为 NRAM) 和分子运算器的方案^[16]; 以纳米间隙相交的两根 CNT 在异相电流作用下相吸进入范德华作用下的稳态接触, 而后续的同相电流会使接触的两根 CNT 重新分离, 从而实现分子机械双稳态间的 0/1 逻辑存取或运算, 其器件单元密度可达 1 T/cm^2 , 速度达 100 GHz 。Iijima 教授小组 99 年提出了一种基于碳纳米管的逻辑运算及存储器件的设想, 在内含富勒烯的碳纳米管的笼状结构内, 将一个钾离子填充进富勒烯内, 在交流电场驱动作用下, 该富勒烯分子便可以稳定地在碳纳米管两端来回运动, 从而构成作为逻辑运算的“0”、“1”两种状态。该课题组在制备富勒烯的包合物等复合纳米结构方面有富有特色的创新成果和技术。很多低维纳结构会具有机电耦合的双稳态。运用交叉碳纳米管网络和铁电材料, 设计出了三维高密度的闪存器件, 可以在 $1 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ mm}$ 大小的体积内实现 10 T Bit 的存储量。

现在人们可以在实验室里利用多场耦合实现各种纳尺度下的驱动功能。例如, 利用范德华和静电相互作用, 将 C_{60} 分子放在相距纳米间隙的两电极间, 在电驱动下 C_{60} 分子振荡并产生高频的电信号, 形成单电子晶体管; 中部悬空 CNT 在底部基电极电压调控下产生电激振荡, 导致其中电流的高频振荡输出。以具有极低的层间摩擦力的多壁碳纳米管作为超光滑轴承, 现已制造出静电驱动的纳米电机或转动致动器, 可实现 360° 内的精确定位; 利用电与电化学环境驱动的纳米管膜致动器来实现“人工肌肉”; 大量研究发现, 弯曲、扭转、拉伸、横压和纵压等机械变形都能显著改变碳纳米管的电子结构、能带和导电性, 因而可实现机械调控。最近, Zettl 等研究组利用一维纳米结构的固有振荡性能和场致发射原理, 在单根碳纳米管上实现了收音机的所有功能: 天线接受、调频、放大等。

我国学者在机电耦合理论和实验研究方面也取得重要进展: 提出双壁碳纳米管 GHz 振荡器原理; 研究发现了单壁碳纳米管在局部电场强度约 4 V/nm 时可产生 12% 的巨电致伸缩性和强机电耦合性质, 比典型的 PZT 压电材料高两个数量级, 其重量

和体积功密度更是已有智能材料的 10^3-10^6 倍^[17]; 提出碳纳米管径向和轴向压缩双稳态的器件原理; 实现了多种纳米管、纳米线在高分辨电镜下的原位机电耦合和激振实验。

各种一维纳米管/线交叉结构形成的纳米结阵列是十分理想的逻辑开关、运算甚至非易失存储与互连一体化阵列, 具有超高频(THz 范围)、低能垒、室温稳定、多场耦合调控等性能, 为纳信息功能器件的发展提供了巨大的新空间。纳米结器件也具有良好的与微硅技术的协调性。从物理原理上讲, 纳尺度多场耦合可使机电磁耦合振荡、量子输运、单电子调控、自旋输运和调控、量子存储等功能用简洁的纳结结构实现。结间的间距和介质可依需要方便的改变, 形成有机分子逻辑和存储器件、逻辑开关、THz 非易失纳存储器等。结型器件结构还具有易于集成制造、器件与互连一体等优越性。

一维纳结构本身可具有半导体、铁磁、铁电、光电等信息功能性, 可掺杂调制, 并能控制生长形成沿轴向结构和性能变化的可编码纳米线、纳米管。这类纳结结构基元的生长制备技术也已经高度发展。因此, 一维纳米结构构成的栅极调控场效应管、纳米结等新型纳米器件已成为发展最快、潜力最大的纳器件。

此外, 纳机电系统(NEMS) 很小的机械运动行程、微小的惯性使得其机械振荡频率可容易地达到 0.1 THz — 1 THz , 这为高频机电磁耦合调控提供了物理的基础; 而原子、分子间在纳尺度复杂的相互作用使纳器件很容易具有二进制信息逻辑所必须的双稳态。这一切构成了又一类高频机电磁耦合逻辑-非易失存储一体化器件的科学基础。一维纳结构是构成这类机电磁耦合 NEMS 最理想的选择。

各类电磁耦合功能结构可广泛应用到纳米随机存储、自旋阀、铁磁性隧道结、自旋隧穿共振二极管以及单电子隧穿器件等的研制, 纳尺度电读写铁电和磁性随机存储器如能实现高速低能耗, 将是非易失存储器发展的又一重要方向。新近, 利用纳功能结构已实现高效率的电光转换, 使得光电一体化、低能耗高速光信息传导的 SoC 技术向应用迈进了一大步。2007 年 11 月 30 日, *Science* 已报道了利用微纳硅工艺制造的电路控制单个电子自旋的重要进展^[18]。因此, 基于纳尺度各种显著的物理效应和多场耦合原理, 开展低维纳功能器件的新原理、新性能、新架构的深入系统的研究, 具有重大科学与现实意义。这类纳信息功能器件与硅芯片技术融合设

计、工艺和技术将是需要突破的重大问题。

5 纳功能器件与电路的工艺技术发展状况

硅基信息产业的重要技术基础是紫外光刻(UV)技术。Intel已经利用传统的193 nm波长“干式”扫描器技术实现了45 nm芯片的产业化。在45 nm节点之后, Intel和IBM等芯片制造商将把193 nm沉浸式光刻扩展到32 nm节点,甚至22 nm节点。至于业界寄予厚望的深紫外光刻(EUV)技术,可能要到2009年才能最终成熟。因此,光刻技术目前还有近15年的发展空间。然而,随着产品节点继续向前推移,每一代产品的研发费用急剧上升,这有可能成为制约纳电子产业发展的重要因素。

原理上,基于自下而上(bottom-up)的自组装技术不但适于低维结构,尤其是一维纳米结构的构筑,而且不受光刻技术的限制,成本可能很低廉(图4)。因此,发展一维纳米结构的可控生长和器件组装是纳米器件发展的重大问题。在这方面,我国研究者不受传统硅技术基础薄弱的限制,研究进展基本与国外同步,并在碳纳米管、纳米线可控生长和组装、甚至纳米管的手性可控方面不断有国际水平的创新成果产生。

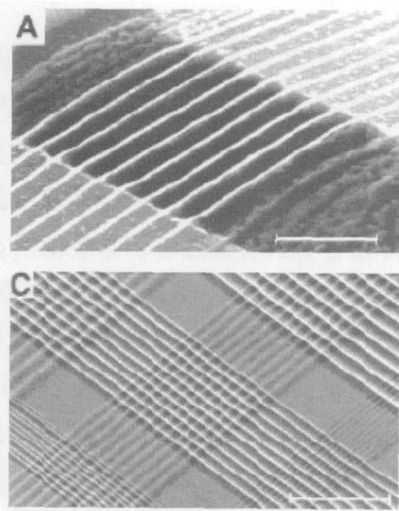


图4 GaAs纳米线有序结构^[21]

把纳结构自下而上与传统的自上而下(top down)的微纳硅加工技术相结合的Hybrid bottom-up/top down approaches对当前的纳器件电路技术发展尤为重要。例如,2006年IBM在一根18 μm长的单壁碳纳米管上制备出54 MHz的振荡电路(图5)。用有序纳米线、双稳态分子和微纳加工技术已经制备出8×16的超高密度分子存储器(160 kb, 10¹¹ bits/cm²)(图6),其性能潜力可以按照现有技术发展至2020年而不落后! 2007年11月的

*Nature Materials*发表了一组Inshight综述文章评述各种纳米信息存储技术的研究新进展^[19]。

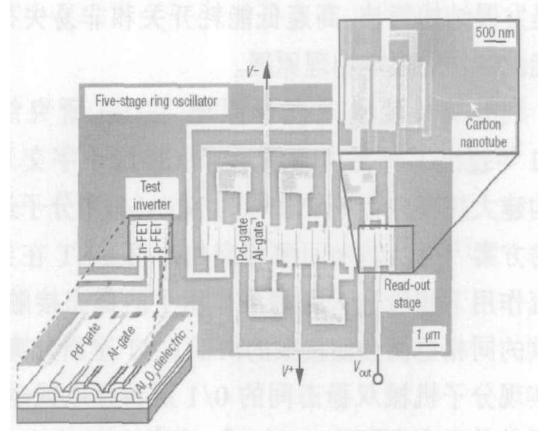


图5 54 MHz的振荡电路^[22]

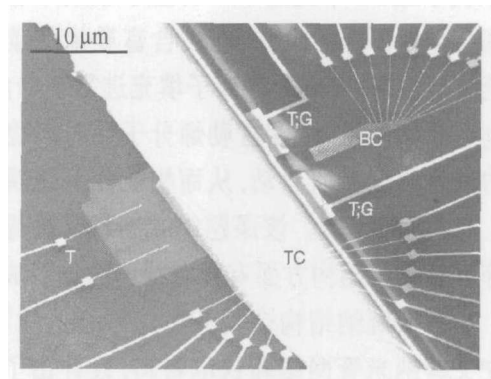


图6 超高密度分子存储器^[23]

利用纳米制造技术会使目前的平面硅技术向三维系统结构拓展,其发展空间将是巨大的。而且,纳器件系统可以建立在柔性基底上,还可以是透明的。正如费曼所言,There is large space at the bottom.

不依赖传统微加工工艺的信息器件系统技术有可能使我国研究者和产业界摆脱西方国家长期以来封锁关键技术的束缚,解放创造力和生产力。实际上,20 nm的电子束光刻技术已经在我国的先进实验室开展着国际最前沿的纳器件原理研究。

6 展望和建议

纳米硅基器件的发展仍有潜力,低维纳米器件的发展虽有原理上的优势,但在工艺技术上极具挑战性,需要在性能上有量级的突破。目前,15年左右的硅基纳电子芯片技术的发展存在许多挑战,但仍然比较明朗。比较而言,能够代替硅技术继续延拓摩尔定律或开拓更高效的纳器件和系统的发展途径尚不明朗。但我们相信这层面纱不久就会被揭破。纳尺度物质丰富的量子效应和外场与局域场耦合效应必将为纳信息时代的器件系统带来丰富多彩的发展前景。纳功能器件技术的潜在价值并不局限于纳电子技术,在超级电容器、新型高效电池等能源

领域也有重要应用前景。

中华民族曾长期引领人类文明发展,但自从第一次工业革命以来,我国的科技发展逐渐落后于西方国家。在以信息产业为主的第三次产业革命中,美国等西方国家先入为主,占据了绝大部分核心知识产权,攫取了巨额利润,垄断了核心技术。当核心信息器件不断微缩进入纳米尺度并向纳米尺度纵深发展,美国等西方国家的公司企业又极力推动并投入巨资,企图再度获取纳时代的信息技术核心知识产权的先机,实现对全球高额利润的长期垄断。西方国家政府更是将这些核心知识产权作为影响他国政策和发展的政治和军事手段,实行技术封锁。在这种形势下,经过20多年的改革开放发展,我国制定了建设创新型国家的宏伟目标,要在未来的产业革命中掌握核心知识产权。因此,当西方国家占据主要统治地位的传统信息技术趋向发展极限,新的纳信息核心技术正在酝酿研发之中的时候,我们必须审时度势,在国家重大基础研究领域设立专题,组织具有创新能力的团队,促进我国在新原理的纳信息功能器件方面获取核心知识产权,取得具有实际意义的成果,并赢取今后发展的主导权,起码具有对抗西方知识产权威胁的基本技术。

目前,国内的基础研究条件已经能够支撑与国际前沿同步的创新研究。现有的微纳加工技术已经能在实验室自上而下的开展20 nm甚至10 nm级的器件构筑研究,与我们具有同样优势的纳米可控生长、组装技术结合,我国研究者能够进行国际一流的纳器件创新研究工作。事实上,2007年我国总的科技人力资源已经列国际首位。过去5年,中国研发投入增长显著,年均增长率高达18%。相比之下,美国、日本和欧盟三者相加的研发年增长率仅为2.9%。对此,2007年12月7日出版的*Science*杂志发表题为“中国的科学在进步”的社论充分肯定^[20]。但是,我国70%的科技人力资源分布在大学和研究所,而西方经济发达国家80%在公司企业。因此,如何加强以产业发展为背景的研究,特别是加强微纳电子、芯片设计制造业与纳米科技研究的结合,加强微纳硅工艺与新的纳米技术的结合,产出高水平学术论文的科学发现与关键技术创新结合等,是我国纳米科学技术发展的重要问题。

参 考 文 献

- [1] ITRS 2006 Update, International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://www.itrs.net/Links/2006Update/2006UpdateFinal.htm>.
- [2] 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020), 2006年.
- [3] 国家纳米科技发展纲要, 2001年.
- [4] 中国纳米新闻, 世界纳米新闻, 中国纳米网, <http://www.nanochina.cn/>.
- [5] Sun L F, Xie S S, Liu W et al. Materials-Creating the narrowest carbon nanotubes. *Nature*, 2000, 403: 384.
- [6] Jiang K L, Li Q Q, Fan S S. Nanotechnology: Spinning continuous carbon nanotube yarns-Carbon nanotubes weave their way into a range of imaginative macroscopic applications. *Nature*, 2002, 419: 801.
- [7] Guo Y, Zhang Y F, Xue Q K. Superconductivity modulated by quantum size effects. *Science*, 2004, 306: 1915.
- [8] 白春礼. 跑步前行的中国纳米研究. *科学时报*, 2007-06-06.
- [9] Tans S J, Vershueren A R M, Dekker C. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube. *Nature*, 1998, 393: 49.
- [10] Adrian Bachtold, Peter Hadley, Takeshi Nakanishi and Cees Dekker. Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors. *Science*, 2001, 294: 1317.
- [11] Williams J R, DiCarlo L and Marcus C M. Quantum Hall Effect in a Gate-Controlled p-n Junction of Graphene. *Science*, 2007, 317: 638.
- [12] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene. *Nature Mater*, 2007, 6: 183.
- [13] Avouris P, Chen Z H, Perebeinos V. Carbon-based electronics. *Nature Nano*, 2007, 2: 605.
- [14] Zhang Z Y, Liang X L, Wang S, Yao K et al. Doping-Free Fabrication of Carbon Nanotube Based Ballistic CMOS Devices and Circuits. *Nano Lett*, 2007, n0717107.
- [15] Fu L, Liu Y Q, Liu Z M, Han B X et al. Carbon Nanotubes Coated with Alumina as Gate Dielectrics of Field-Effect Transistors. *Adv Mater*, 2006, 18: 181.
- [16] Huang Y, Duan X F, Cui Y et al. Logic Gates and Computation from Assembled Nanowire Building Blocks. *Science*, 2001, 294: 1313.
- [17] Guo W L, Guo Y F. Giant Axial Electrostrictive Deformation in Carbon Nanotubes. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 115501.
- [18] Nowack K C et al. Coherent Control of a Single Electron Spin with Electric Fields. *Science*, 2007, 318: 1430.
- [19] Insight: Information storage. *Nature Materials*, 2007, 6: 809.
- [20] Leshner A I, Turekian V. Editorial: Chinese Science on the Move. *Science*, 2007, 318: 1523.

TRENDS AND CENTRAL ISSUES IN DEVELOPMENT OF NANO INFORMATION FUNCTIONAL DEVICES AND SYSTEMS

Guo Wanlin¹ Xue Qikun² Fan Shoushan²

(1 *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;*

2 *Tsinghua University, Beijing 100085*)

Abstract Recent developments in electronic nanodevices and novel principle based functional nanodevices are briefly reviewed. It is pointed out that the silicon based electronic technology is being in transition into a phase of parallel developing with novel information nanotechnology, but the core technology for the new age is still in the exploring stage. This provides our information technology and industry the most important opportunity to catch up with the main stream. It is essential to develop new principles, realize new properties, and create new structures for promising low-dimensional functional devices and systems on the basis of exceptional physical effects and multifield coupling at nanoscale. Merging the design principles, techniques and methodologies of nanotechnology and silicon technology is necessary to make breakthrough. With the nanotechnology shifting from materials to functional devices and systems, it becomes imminently important to strengthen the industry needs directed researches, especially the combination of nanoscience and technology with micro- and nano-electronics, chips design and manufacture; the integration of silicon techniques and bottom-up nanotechniques; as well as balance between scientific findings and innovative key techniques innovation.

Key words functional nanodevices, nano electronics and circuits, physical principle, system integration, bottom-up, silicon technology, information industry

·资料·信息·

“理论物理学及其交叉科学若干前沿问题”重大研究计划 年度学术交流会在北京召开

2008年1月“理论物理学及其交叉科学若干前沿问题”重大研究计划2007年度学术交流会在北京召开。该重大研究计划是在“十五”期间第一批启动的,2001—2005年期间共资助134个项目,2008年底所有项目将全部结题。参加该年度交流会的共有一百多人,包括学术指导专家组成员、协调组成员、学科联合工作组成员、各研究方向的学术交流组召集人、2003—2005资助项目的研究人员以及一些自由听会人员。

会议开幕式由指导专家组组长欧阳钟灿院士主持。基金委副主任沈文庆院士在开幕式上讲话,他指出,希望在该研究计划即将结束的时候,专家组能够认真总结经验,归纳出若干研究方向,争取在国家层面获得更好的支持。黄涛研究员代表指导专家组

做重大研究计划2007年度执行报告,报告指出,过去一年研究计划工作取得了显著的成绩,共发表论文420篇,其中发表在影响因子4以上的论文76篇,约占总数18%;凝炼形成的三大板块九个研究方向都取得了很好的进展;还组织了多种形式的学术交流,促进了不同学科间的交叉和渗透。报告还介绍了理论物理学及其交叉科学的调研和思考以及2008年工作的安排和部署。

分组报告按照三个板块同时进行,共安排了40个报告,与会人员在一起进行了充分的交流和热烈的讨论。

(数理科学部 李会红 蒲钊)