

硅微电子技术物理极限对策探讨^{*}

王占国

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 根据国际半导体技术蓝图(ITRS)发布的未来半导体工艺技术预测,2016年世界集成电路主流工艺线宽为22纳米,2022年达到10纳米。届时,以硅为基础的微电子技术发展所遵循的摩尔定律将不再适用;为此,必须发展基于全新原理的新技术,以满足人类不断增长的对信息量的需求。本文首先介绍硅材料国内、外的发展现状与趋势,进而讨论后摩尔时代的微电子技术发展可能采取的对策,最后展望基于全新原理的纳米电子、分子电子、光计算和量子信息技术的发展前景。

关键词 硅材料,微/纳米电子技术,分子电子技术,量子信息技术,光计算技术



王占国院士

1 硅微电子技术研究进展和发展趋势^[1]

今天,几乎90%以上的电子器件和电路都是以硅(Si)为基础的,2006年世界

集成电路的产值约为2300亿美元,并由它带动了超过1万亿美元的电子产品。硅微电子技术已深入到千家万户,深刻地影响着人类的生产和生活方式。Si作为微电子技术的基础材料,预计到本世纪中叶都不会改变。Si材料经过多年的发展和竞争,信越、瓦克、SUMCO和MEMC等世界6大硅片公司的销量占硅片总销量的90%以上,决定着国际硅材料的价格和高端技术产品市场,其

中以日本的硅材料产业最大,占有国际硅材料行业的半壁江山。多晶硅主要由美国、德国和日本等国的大企业所垄断,目前世界多晶硅的年生产能力约为32950吨,其中电子级单晶硅的产量约19250吨,2006年世界硅片年销售额在70亿美元左右。从提高硅集成电路(ICs)成品率,提高性能和降低成本来看,增大直拉硅单晶的直径,解决硅片直径增大导致的缺陷密度增加和均匀性变差等问题,仍是今后硅单晶发展的趋势。预计硅ICs工艺由8英寸向12英寸的过渡可在近几年内完成,到2015年后12英寸硅片将成为主流产品,2020年将会达到高峰。2016年以后,将逐步向22纳米线宽的18英寸硅片过渡,届时18英寸的硅片将投入生产;直径27英寸硅单晶研制也正在积极筹划中。从进一步缩小器件的特征尺寸,提高硅ICs的速度和集成度看,研制用于硅深亚微米乃至纳米工艺所需的大直径硅外延片将会成为硅材料发展的另一个主要方向。绝缘体上半导体(SOI)材料,因其具

^{*} 收稿日期:2007年9月1日

有电路速度快、抗辐射、低功耗和耐高温等特点,同时具有简化工艺流程、提高集成密度、减小软误差等优势,受到广泛重视,有可能成为新一代存储器电路的优先选用材料。据预测,SOI材料2008年的市场将达到80亿美元,其中,大部分为300毫米SOI圆片市场。目前,IBM年消耗8英寸SOI外延片已达数10万片,并正在建造12英寸SOI线。GeSi/Si应变超晶格材料,以其器件、电路的工作频率高,功耗小等特点优于硅,以其价廉而胜于GaAs,加之与硅CMOS集成电路工艺兼容、成本低的优点,在微波器件和移动通信高频电路等产业领域有着广泛的应用前景和竞争优势。

我国硅材料行业经过40多年发展已取得很大的进展,但仍无法满足国内市场需求,供需缺口很大,已严重制约我国集成电路和太阳能电池产业的发展。我国硅单晶材料以5、6英寸为主,2006年产量达3740吨;8、12英寸硅单晶及抛光片,虽已具有小批量生产能力,但尚未应用于集成电路制造。硅外延材料产品主要是4和5英寸的,6英寸外延片还未实现大量生产,8、12英寸硅外延片尚处起步阶段。目前集成电路用8、12英寸硅抛光片和外延片,几乎全部依赖进口。我国SOI(主要是SIMOX圆片技术)研发虽有一定的基础,但在8英寸以上SOI圆片制造方面仍是空白。国内在SiGe异质结外延材料生长和SiGe-HBT等器件与电路研发的技术水平,特别是生产水平与国外差距很大。

2 硅微电子技术遇到的挑战和可能对策

研究表明,硅集成电路的特征线宽进入纳米尺度(如100纳米以下)时,硅微电子技术将受到来自物理(短沟场效应、绝缘氧化物量子隧穿效应、沟道掺杂原子统计涨落,功耗等),技术(寄生电阻和电容、互连延迟,

光刻技术等)和经济(制造成本昂贵、难以承受)三个方面的限制和挑战。为克服上述器件物理和互连技术限制,人们一方面正在开发诸如:高K栅介质、金属栅、双栅/多栅器件、应变沟道和高迁移率材料以及铜互连技术(扩散阻挡层)、低介电常数材料、多壁碳纳米管通孔和三维铜互连等;另一方面,在电路设计与制造方面,采用硅基微/纳器件混合电路、光电混合集成和系统集成芯片(SOC)技术等,来进一步提高硅基ICs的速度和功能,以求延长摩尔定律的寿命,下面介绍几种可能的潜在应用技术。

2.1 GeSi/Si材料和应变沟道技术

应变硅通常是在硅衬底上依次外延生长SiGe和Si单晶薄膜的方法制备。由于GeSi的晶格常数大于Si,硅晶格将经受四方畸变,在生长平面内形成具有双轴张应变的薄层单晶Si。张应变使Si材料的导带由原来的6重简并退化为一个4重简并和一个2重简并的两个能级,价带上的轻重空穴能级发生分离。这种能带结构的变化不仅导致载流子有效质量降低,同时由于简并度的降低,减弱了载流子的带间散射,从而使应变硅载流子的迁移率上升。另外SiGe/Si异质结的应变,也会分别使GeSi/Si和Si/SiGe具有高的电子气和空穴气的迁移率。应变硅技术可以提供更高的器件驱动电流与更快的晶体管速度(如应变硅的迁移率提高70%,集成芯片的速度就将提高35%),但制造成本却只有2%的提升。因而,应变硅技术有可能成为65纳米以下CMOS的主流技术,受到广泛关注。IBM已将SiGe-HBT高速性能引入到Bi-CMOS工艺中,在同一芯片上实现了模拟与数字电路功能的集成,应用前景看好。

2.2 硅基微/纳器件混合集成技术

理论分析表明,若将纳米量级的共振隧穿二极管(RTD)集成在微米级的金属氧化物

半导体场效应晶体管的源极或漏极上,形成量子效应-体效应混合集成器件,便可实现随偏压变化的漏电流的多重开关态。即在不增加器件功耗和器件尺寸不变的情况下,数字电路的逻辑密度增加 100—1 000 倍。

2.3 硅基光电器件集成技术

硅基光电器件集成一直是人们所追求的目标,可分为硅基光电器件混合集成和全硅光电器件集成两种不同的技术。

2.3.1 硅基光电器件混合集成^[2]

人们认为,硅技术与非硅技术集成是半导体产业发展面临的急待解决的一个关键技术问题,例如将 III- V 的工艺技术与硅技术结合,实现硅基光电集成是延长摩尔定律的一个可能的办法。最近,法国 Riber 分子束外延设备公司加入了位于比利时的国际微电子中心的 III- V/Si 开发计划。准备建造一台串接式的 MBE 设备,用于在 8 英寸锗(Ge)衬底上生长 III- V 族化合物半导体材料,同时还可用于生长硅基高 K 介质和金属电极材料。预计 III- V/Ge 材料体系可用于开发 22 纳米工艺。尽管 GaAs/Si 和 InP/Si 是实现光电子混合集成的理想材料体系,但由于晶格失配和热膨胀系数等不同造成的高密度失配位错而导致器件性能退化和失效,使其难以实用化。这方面的研究虽有进展,但目前尚无突破。继 2004 年 Boyraz 和 Jalali 采用由光纤制成的 8 米环形激光腔,硅作为增益介质实现了硅基拉曼激光输出后的 2005 年,美国和以色列的科学家在单一硅芯片上研制成功一个紧凑的全硅拉曼激光器,引起人们兴趣。最近,Intel 公司报道了混合硅激光器研制成功的消息,这种激光器是由“熔”合在硅片上的 InP 基材料作为光源和光放大介质,用硅材料作为波导而构成的可控激光器。制造混合硅激光器的关键是应用低温,氧等离子体在硅和 InP 两者材料表面上,生长一个约 25 个原子

厚度的氧化层,这个薄的氧化层在加热和加压时就像玻璃胶一样能将两种材料“熔”合在一起,形成一个单一的芯片。当在其上加电压时,InP 基材料中产生的光通过氧化物玻璃胶进入硅芯片的波导层,控制波导层的结构,便可实现混合硅激光输出。波导层的设计对混合硅激光器的性能和输出波长起决定性作用。多个混合硅激光器和硅调制器可组成特拉比特硅光学发射器,信号由一根光纤输出,可广泛地用于 PC 机、服务器和数据中心等。上述这些研究进展使人看到了硅基光电集成的曙光。

2.3.2 全硅光电器件集成技术

实现全硅光电集成的关键是提高硅材料的发光效率,人们在过去的几十年里,做了多种尝试,如多孔硅发光、基于布里渊区折叠的 Ge_mSi_n 短周期超晶格、稀土离子注入纳米硅和硅基量子点发光等,但都未取得实质性的突破。

2.4 系统芯片集成技术

系统芯片集成是指将不同功能的器件或电路集成在一个芯片上,使其功能得到显著提升的一种技术,是在硅集成电路的特征线宽进入 65 纳米以下时的一个可能的主流技术。这里所谈的是更加广义的、理想的集成技术,它是将微电子、光电子、纳电子、自旋电子和分子电子学器件等通过光-电和光-光等直接互联在一起,从而具有强大的、全新功能的集成芯片技术,目前,尚处于探索研究阶段。

3 基于全新原理的信息技术展望^[3]

上述的技术虽然可用来延长摩尔定律的寿命,但硅基微电子技术将最终难以满足人类不断增长的对更大信息量的需求。为此,科学家们正在积极探索基于全新原理的纳米电子、光电子技术,量子计算、光计算、分子计算和 DNA 生物计算技术等。显然,基于全新原理的技术,与特征线宽 10 纳米的

CMOS 技术相比, 应当满足具有集成度高、信息处理速率快、能耗小、成本低和室温稳定工作的要求。目前, 研究热点主要有: 纳米电子技术、分子电子学技术、量子信息技术和光机算技术以及 DNA 生物计算技术等。

3.1 纳米电子技术

目前, 虽然建立在量子力学基础上的纳米电子学的工作原理、工作模式, 采用什么材料体系和工艺技术等尚存争议, 但纳米电子学仍是纳米科学与技术领域的研究热点。单电子器件 (单电子晶体管和单电子存储器) 虽然早在 10 多年前就已研制成功, 而且按照目前的技术水平, 制备室温工作的单电子器件也没有不可克服的困难, 但要实现单电子器件的大规模集成, 还有很长的路要走。有人认为, 碳纳米管将成为纳米电子学主导材料, 碳纳米虽然有着很高的沟道电子迁移率, 但它的手性难以控制和寄生效应 (寄生电阻和电容等) 使其难以高频工作。最近, 哥伦比亚大学的 Chen 等人^[4]在一个 1.5 微米长的单壁碳纳米管上制造了包含 5 个 CMOS 反转级的环形振荡器, 工作频率超过 52MHz, 虽比以前由分立碳纳米晶体管间连接电路的速度快 10 万倍, 但与 CMOS 相比, 仍差千万倍。另外, 如何将无序碳纳米管有序地排列和互连起来构成一个功能强大的电路, 目前尚无良策。

3.2 分子电子学技术^[5]

1974 年 IBM 的 Arieh Aviram 和 纽约大学的 Mark Ratner 教授提出了分子开关的设想, 他们的开创性工作受到重视, 但由于合成像晶体管一样的分子十分困难, 加之当时缺乏操纵原子和分子的手段而进展缓慢。上个世纪 80 年代后期和 90 年代初扫描隧道显微镜技术 (STM) 的发展, 加深了人们对纳米尺度上电子输运行行为的理解, 促进了分子电子技术的发展。目前, 在分子存储器研究方面取得较大进展, 如加州大学洛杉矶分

校和 James Heath 以及 J.Fraser Stoddart 等将 Rotaxane 的开关现象归因为不同分子段的旋转和 / 或平移, 而内部移动则由氧化还原反应所控制。他们已经制造了 64 位随机存取存储电路, 现在正在制造 16 千位的存储电路^[6]。惠普公司的研究人员 Stanley Williams 利用他们称之为的“纵横门”的器件 (具有通常二极管阵列没有的非门功能), 来制造 64 位存储器器件。另外, Mark Ratner 提出通过在分子结构上施加电压改变其结构形式来实现开关功能的设想, 但是, 该领域的其它研究者指出, 集成电路的特征是要有充分大的电流, 以保证为一系列联结逻辑门提供动力, 这就需要有增益的三端器件, 目前尚未发现任何一个三端分子器件展现了功率增益。鉴于基于分子电子技术芯片或电路的应用前景仍很渺茫, 一些学者如 Tour 等预测, 分子电子学的第一个应用将会涉及混合器件, 即分子化学和半导体电子学的组合。他的研究组已从发展纯粹的分子电子学器件转变为在硅平台上制造有机结构, 这样既可利用现有 IT 工业的工艺技术和设备, 从而降低成本, 而且也容易被 IT 界人士接受; 因此, 混合器件被认为是目前分子电子技术应用向前发展的最好方法。

3.3 量子信息技术

量子计算机是基于量子力学原理进行计算的装置, 它的基本信息单元叫做量子比特 (qubit), 是实现量子计算的关键。根据量子理论, 电子可以同时处于两个位置, 原子的能级在某一时刻既可以处于激发态, 也可以处于基态。也就是说, 量子比特能作为单个的 0 或 1 存在, 也可以同时既作为 0 也作为 1。如果量子计算机的 CPU 中有 n 个量子比特, 一次操作就可以同时处理 2^n 个数据, 而传统计算机一次只能处理一个数据。例如, 具有 5 000 个量子位的量子计算机, 可以在 30 秒内解决传统超级计算机要 100 亿

年才能解决的大数因子分解问题,这将对现有的 RSA 保密体系产生根本性的冲击。构筑量子比特是实现量子计算的基础,文献报道了很多物理系统都可以用于构筑量子比特,如液态核磁共振,施主杂质核自旋,超导体和半导体量子点中的电子自旋等。在这些系统中,可能最有前途的是半导体量子点,特别是自组装量子点的研究无论在理论上还是实验上也趋于完善^[7]。量子计算机的设想方案很多,如离子阱量子计算机、二溴噻吩核磁共振量子计算机和腔量子电动力学量子计算机等,目前虽已实现 16 个量子位的计算,但离实用尚远。阻碍量子计算机实现的难点主要是量子态在传输、处理和存储过程中,可能因环境的耦合(干扰)而从量子叠加态演化成经典的混合态,即所谓消相干。因此,特别是在大规模计算中能否始终保持量子态间的相干是量子计算机走向实用化前所必需克服的难题。

3.4 光计算技术

光计算机是利用光作为信息的传递媒体,以光运算元件构成的计算机。它突破了传统电子计算机设备之间的连接方式,在运算与存储单元之间采用光互连,具有并行处理、运算速度快、耗电低、抗干扰能力强、容错性强和信息存储量大等优势,受到广泛重视。经过科学家多年的努力,目前光计算机的许多关键性技术,诸如光的存储技术、光存储器以及各种光集成电路(OIC)等都已取得重要进展。继美国 IBM 在 1990 年率先推出的以激光器、透镜、反射镜等组成的世界首台实验性光计算机雏形后,法国、德国、英国和意大利等欧共体国家 70 多名科学家联合,又研制成功世界第一台运算速度比普通电子计算机快很多倍的光计算机,取得了长足的进步,使人们看到了光计算的曙光。解决光的长时间、稳定存储是实现光机算的关键,在过去的 20 多年里,虽然提出多种存储

方案,如利用气体和晶体(缺陷)陷阱的光存储等,但存储时间仅有毫秒,不能满足光计算机的要求。最近,澳大利亚国立大学的物理学家杰文·朗戴尔及其同事利用新型光陷阱(利用掺有稀土元素锆的硅酸盐晶体,制造出一种“超级光陷阱”),首次成功地将一个光脉冲“冻住”了足足 1 秒钟的时间,这是以前最好成绩的 1 000 倍。将“冻住”光束的时间大大延长,意味着可能据此找到实用方法,来制造光计算机或量子计算机用的存储设备。

4 小结

据国际半导体技术蓝图发布的未来半导体工艺技术预测,2016 年硅微电子技术的特征线宽达 22 纳米(2022 年 10 纳米),届时,建立在波耳兹曼统计规律的现代微电子技术将遇到困难,“摩尔定律”将失效。建立在量子力学基础上的纳米电子学、分子电子学和量子计算技术以及光计算等都处于探索发展阶段,究竟哪种技术将成为硅微电子的“替代”技术,目前尚不明朗。建立在新原理基础上的“未知”新技术走向实用化之前,存在着一个相当长的过渡时期,其间硅基微电子技术或硅基光电混合集成技术等仍将发挥主导作用。

有些学者认为碳基材料,如纳米碳管是很有潜力的纳米电子学材料,那么如何控制它的尺寸、形貌、空间分布有序性和互连以及自身存在的寄生效应等难题,目前尚无良策。分子电子学研究虽在存储方面显示了一定的应用前景,但由于分子电子器件不具备功率增益能力,驱动能力低,故在实现大规模集成方面难有作为。利用三维受限量子点所特有的性质,构筑固态量子比特和研制单光子光源,是实现量子信息技术的基础,是一个值得重视的研究方向。

主要参考文献

- 1 王占国,陈立泉,屠海令主编.中国材料工程大

- 典——信息功能材料工程 上、中、下).北京:化学工业出版社, 2006, 第一篇:概论, 4-9.
- 2 Michael Hatcher and Andy Extnance. Silicon and compounds get intimate. Compound semiconductor. net, 2007, 10, 15.
- 3 王占国, 陈涌海, 叶小玲等编著. 纳米半导体技术. 北京:化学工业出版社, 2006, 359-382.
- 4 Zhihong Chen, Appenzeller J, Yu-Ming Lin et al. An Integrated Logic Circuit Assembled on a Single Carbon Nanotube. Science, 2006, 311:1 735.
- 5 Paula Gould. 分子电子技术向硅的领域逼近. Materials Today, 2006, 36-40.
- 6 Flood Amar H, Friser Stoddart J, Steuerman David W et al. Whence Molecular Electronics? Science, 2004, 306: 2 055-2 056.
- 7 David Gershoni. Quantum Information: Long live the Spin. Nature Materials, 2006, 5:525-526 .

Discussion on Countermeasures for Physical Limit of Silicon Microelectronic Technology

Wang Zhanguo

(Key Lab. of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, CAS, 100083 Beijing)

According to the prediction of semiconductor technology of International Technology Roadmap of Semiconductors (ITRS), the characteristic line width of silicon ULSI will reach at 22 nanometer in 2016, then 10 nanometer in 2022. At the appointed time Silicon (Si) -based microelectronic technology will meet its physical limitation, in other words Si microelectronic technology following Moore law will be no longer applicable. Therefore, it is necessary to develop new technology based on completely new principle, satisfying continuously increased requirement of mankind for information. In this paper, the present status and trend of Si materials development both in China and the World are introduced first. Then the countermeasures likely to be taken for Si microelectronic technology after Moore law are discussed in detail. Finally the expectation of development foreground for nano-electronics, molecular electronics, quantum information technology and optical computer based on completely new principle are given.

Keywords silicon material, micro/nano-electronic technology, molecular electronic technology, quantum information technology, photo-computing technology

王占国 半导体材料及材料物理学家, 中国科学院院士。1938年12月生。现任中国科学院半导体所研究员、半导体材料科学重点实验室学委会主任、中国电子学会半导体和集成技术分会主任、中国材料研究学会副理事长、北京市人民政府第八届专家顾问团顾问和多个国际会议顾问委员会委员。长期从事半导体材料和材料物理研究。其中, 人造卫星用硅太阳能电池辐照效应和电子材料、器件和组件的静态、动态和核瞬态辐照实验结果, 为我国的两弹一星事业发展做出了贡献。在半导体深能级物理和光谱物理研究方面取得多项国际先进水平的成果。近年来, 他和实验组同事又在半导体低维结构材料生长、性质和量子器件研制方面获得突破。先后获国家自然科学奖二等奖和国家科技进步奖三等奖, 中国科学院自然科学奖一等奖和中国科学院科技进步奖一、二、三等奖以及何梁何利科学与技术进步奖多项, 在国际著名学术刊物发表论文 100 余篇。