

纳米电子器件与纳米电子技术

沈海军, 史友进

(南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 介绍了纳米电子器件与纳米电子技术的概念以及纳米电子器件的分类; 综述了现有的光刻、外延、SPM、特种精细加工等相关的纳米电子器件制备与加工技术; 阐述了纳米电子技术中急需解决的若干关键问题。

关键词: 纳米电子器件; 纳米电子技术; 纳米器件加工

中图分类号: TN301; TN405 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2004) 06-0014-06

Nano-electronic components and nano-electronic technology

SHEN Hai-jun, SHI You-jin

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The concept and classification of nano-electronic component and nano-electronic technology are introduced, and the fabrication technologies of nano-electronic components, such as lithography, epitaxial growth and SPM, are reported. At last some impending problems on nano-electronic technology are listed as well. It should be beneficial for readers to comprehend nano-electronic components and nano-electronic technology.

Key words: nano-electronic components; nano-electronic technology; fabrication of nano-electronic components

1 引言

按摩尔定律推算, 在未来的 10 余年里, 继续提高计算机的储存密度和运算能力将面临严峻的挑战。这些挑战既有原理性的物理限制, 又有技术性的工艺限制^[1]。其主要表现为: ①电子器件的尺寸处于微米量级时, 其中的电子主要呈粒子性。但是当器件的尺寸小到纳米量级时, 电子则以波动性为主。电子的波动性是一种量子效应, 这时电子器件将在一个全新的原理下进行工作; ②任何多体系统都存在热的统计起伏, 当器件尺寸缩小到纳米量级时, 这种热起伏便会限制

器件性能的一致性, 以致集成芯片无法正常工作。

然而, 纳米电子技术、纳米电子器件与纳米电子学的出现为微电子技术的发展提供了新的途径和转机。这一方面可归功于微电子技术与纳米技术的不断发展; 另一方面则要归功于半个多世纪来微电子学与量子物理学对纳米电子器件的制备、特性、机理与表征提供的有力支持。

本文将对纳米电子器件与纳米电子技术的概念、纳米电子器件的分类以及现有的纳米电子器件制备技术进行剖析和阐述。最后, 指出了纳米电子技术中急需解决的若干关键问题。

收稿日期: 2003-11-17

2 纳米电子器件

2.1 纳米电子器件与纳米电子技术

纳米电子器件指利用纳米级加工和制备技术,如光刻、外延、微细加工、自组装生长及分子合成技术等^[2-4],设计制备而成的具有纳米级(1~100 nm)尺度和特定功能的电子器件。目前,人们利用纳米电子材料和纳米光刻技术,已研制出许多纳米电子器件,如电子共振隧穿器件(共振二极管 RTD、三极共振隧穿晶体管 RTT)、单电子晶体管(SET)、金属基 SET、半导体 SET、纳米粒子 SET、单电子静电计、单电子存储器(SEM)、单电子逻辑电路、金属基单电子晶体管(SET)存储器、半导体 SET 存储器、硅纳米晶体制造的存储器、纳米浮栅存储器、纳米硅微晶薄膜器件和聚合物电子器件等^[5]。

纳米电子技术是指在纳米尺寸范围内构筑纳米和量子器件,集成纳米电路,从而实现量子计算机和量子通信系统的信息计算、传输与处理的相关技术,其中,纳米电子器件是目前纳米电子技术发展的关键与核心。现在,纳米电子技术正处在蓬勃发展时期,其最终目标在于立足最新的物理理论和最先进的工艺手段,突破传统的物理尺寸与技术极限,开发物质潜在的信息和结构潜力,按照全新的概念设计制造纳米器件、构造电子系统,使电子系统的储存和处理信息能力实现革命性的飞跃。

2.2 纳米电子器件的分类

关于纳米电子器件的分类,国内外有着不同的看法。根据纳米电子技术的发展和对未来的预测,一种分法把纳米电子器件广义地分为以下 8 类^[5]:①纳米级 CMOS 器件,如绝缘层上硅 MOS FET、异质结 MOSFET、低温 MOSFET、双极 MOSFET 等;②量子效应器件,如量子干涉器件、量子点器件和谐振隧道器件等;③单电子器件,如单电子箱、电容耦合和电阻耦合单电子晶体管、单电子结阵列、单电子泵、单电子陷阱等;④单分子器件,如单电子开关、单原子点接触器件、单分子开关、分子线、量子效应分子电子器件、电化学分子电子器件等;⑤纳米传感器,如量子

隧道传感器等;⑥纳米集成电路,包括纳米电子集成电路和纳米光电集成电路;⑦纳米存储器,如超高容量纳米存储器、隧道型静态随机存储器、单电子硅基 MOS 存储器、单电子存储器、单电子量子存储器等;⑧纳米 CMOS 混合电路,包括纳米 CMOS 电路和 III-V 族化合物半导体共振隧道效应电路,纳米 CMOS 电路和单电子纳米开关电路,纳米 CMOS 电路和碳纳米管电路,纳米 CMOS 电路和人造原子电路,纳米 CMOS 电路和 DNA 电路等。在这种分类中,纳米级 CMOS 器件、纳米传感器、纳米存储器、纳米集成电路以及纳米 CMOS 混合电路等分别被作为一种独立的纳米器件类型。但事实上,这些纳米传感器、纳米级的 CMOS 器件或电路是否应该纳入纳米器件的范畴,目前还存有争议^[6]。

根据 David 等人对纳米电子器件范畴提出的两个基本条件,即器件的工作原理基于量子效应;具有隧穿势垒包围的“岛”(或势阱)的典型结构。文献[6]认为,纳米传感器、纳米级 CMOS 等器件虽然尺度为纳米量级,也是用纳米加工技术研制成功的,但它们只能归属在纳米器件的大类而不属于纳米电子器件范畴。基于这种观点,文献[6]认为纳米电子器件可分为固体纳米电子器件,包括共振隧穿器件、量子点(QD)器件和单电子器件(SED);分子电子器件,主要包括量子效应分子电子器件和电机械分子电子器件。

文献[4]根据电子在纳米器件中的量子效应,即电子的波粒二相性,把具有各种量子功能的纳米电子器件分为两类,即①单电子器件,这类器件的电子处于点结构中,其行为以粒子性为侧重,典型的实例有单电子晶体管、单电子开关等;②量子波器件,这类器件中的电子处于相位相干结构中,其行为以波动性为主,主要包括量子线晶体管、量子干涉器件、谐振隧道二极管、晶体管等。此外,考虑到原理和材料结构上的明显差异,文献[4]还将分子电子器件和上述的单电子器件、量子波器件并列,单独作为一类特殊的纳米电子器件。这类器件的研究属于分子电子学范畴,包括分子电子开关、电化学分子器件等。

3 纳米电子器件的制备技术

要制备纳米电子器件及实现其集成电路, 有两种可能的方式^[3,7]。一种是将现有的电子器件、集成电路进一步向微型化延伸, 研究开发更小线宽的加工技术来加工尺寸更小的电子器件, 即所谓的“由上到下”的方式。另一种方式是利用先进的纳米技术与纳米结构的量子效应直接构成全新的量子器件和量子结构体系, 即所谓的“由下到上”的方式。

纳米电子器件“由上到下”的制备方式主要是指光学光刻、电子束光刻和离子束光刻等技术。“由下到上”的制备方法则包括金属有机化学汽相沉积(MOCVD)、分子束外延(MBE)、原子层外延(ALE)、化学束外延(BE)等外延技术、扫描探针显微镜(SPM)技术、分子自组装合成技术以及特种超微细加工技术等。

3.1 光刻技术

光学光刻、电子束光刻与离子束光刻技术统称三束光刻技术, 是通过掩模、曝光等工艺将设计的器件图形结构转移到半导体基片上的 IC 加工技术^[3]。目前, 随着光刻技术线宽的不断减小, 光学光刻、电子束光刻与离子束光刻技术已在纳米 CMOS 器件、纳米集成电路、纳米 CMOS 混合电路等加工领域表现出了很好的应用前景, 并开始在一些纳米电子器件加工方面取得了应用。

3.1.1 光学光刻技术

光学光刻是通过光学系统以投影方法将掩模上的大规模集成电路器件结构图形“刻”在涂有光刻胶硅片上的技术。它是现在 IC 产业半导体加工的主流技术。在这种技术中, 通常甲基丙烯酸酯聚合物(PMMA)被用作抗蚀涂层, 甲基异丁酮和异丙醇合剂被用作显像剂。

目前国际微电子领域最引人关注的热点是新一代光刻技术。随着加工尺寸向 $0.1 \mu\text{m}$ 逼近, 能否突破 $0.1 \mu\text{m}$ 成为现有光学光刻技术所面临的最为严峻的挑战。限制光刻所能获得的最小线宽与光刻系统的分辨率直接相关, 而减小光源的波长是提高光刻分辨率的最有效途径。现在, 商品化

光刻机的光源波长已经从过去的汞灯光源紫外光波段进入到深紫外波段, 已可以用波长为 193 nm 的 ArF 准分子激光作光源获得 $0.18 \mu\text{m}$ 的光刻线宽度^[8]。

另外, 利用更短波长的极紫外光(波长为 $10\sim 14 \text{ nm}$)和 XRL 光(1 nm)作为光源的极紫外光刻(EUVL, 也称软 X 射线光刻)和 X 射线光刻技术也得到了发展。根据目前光刻技术的发展形势, EUVL 将很可能成为大批量生产特征尺寸为 70 nm 及更细线宽集成电路的主流技术。2001 年国际半导体工业协会发布的半导体技术发展蓝图预测, 特征线宽为 70 nm 的半导体电子器件极可能于 2006 年开始进入批量生产。

除此之外, 利用光的干涉特性以及电磁理论结合光刻实际对曝光成像的深入分析, 采用各种波前技术优化工艺参数也是提高光刻分辨率的重要手段。

3.1.2 电子束光刻技术(EBL)

电子束光刻是采用高能电子束对光刻胶进行曝光而获得结构图形的光刻技术。鉴于电子束的德布罗意波长为 0.004 nm 左右, 远小于光刻技术的波长, 因此, 电子束光刻几乎不受衍射极限的影响, 便可获得接近原子尺度的分辨率。现在, EBL 不但成为 VLSI 制作中不可缺少的掩模制作工具, 同时, 也成为加工纳米器件和纳米结构的主要方法。

目前, 电子束曝光机的分辨率已达到 $0.1 \mu\text{m}$ 以下。但电子束光刻的生产效率很低, 仅为每小时 $5\sim 10$ 个圆片, 远小于目前光学光刻的每小时 $50\sim 100$ 个圆片的水平, 故已成为限制其广泛应用的“瓶颈”。

最近, 美国朗讯公司开发的角度限制散射投影电子束光刻 SCALPEL 技术令人瞩目, 该技术如同光学光刻那样对掩模图形进行缩小投影, 并采用特殊滤波技术去除掩模吸收体产生的散射电子, 从而在保证分辨率条件下提高产出效率。应该指出, 无论未来光刻采用何种技术, EBL 都将是集成电路研究与生产不可缺少的基础设施。

3.1.3 离子束光刻(IBL)

离子束光刻是采用液态原子或气态原子电离

后形成的离子通过电磁场加速及电磁透镜的聚焦或准直后对光刻胶进行曝光的光刻技术。其原理与电子束光刻类似，但德布罗意波长更短，且具有无邻近效应小、曝光场大等优点。离子束光刻主要包括聚焦离子束光刻（FIBL）、离子投影光刻（IPL）等。其中 FIBL 发展最早，最近已在实验研究中获得了 10 nm 的分辨率。但该技术效率极低，很难在生产中作为曝光工具得到应用，目前仅用于 VLSI 中的掩模修补工具和特殊器件的修整。

由于 FIBL 的缺点，现在，人们又开始发展具有较高曝光效率的 IPL 技术。如欧洲和美国联合了大量企业、大学和研究机构，开展了一个名为 MEDEA 的合作项目，用于解决设备和掩模等方面的瓶颈问题。

3.2 外延技术

金属有机化学汽相淀积（MOCVD）、分子束外延（MBE）、原子层外延（ALE）与化学束外延技术（BE）统称外延技术，是在基体上生长纳米薄膜的一种纳米制造技术，可用于纳米集成电路用硅基半导体材料（SoI）、纳米半导体结构/器件的加工与制备。

图 1 给出了分子束外延技术的原理示意图。在超高真空系统中相对地放置衬底（一般为 Si 衬底）和多个分子束喷射炉，将组成化合物（如 GaAs 等）的各种元素（如 Ga、As 等）和掺杂剂元素（如 Si、Be 等）分别放入不同的喷射炉内，

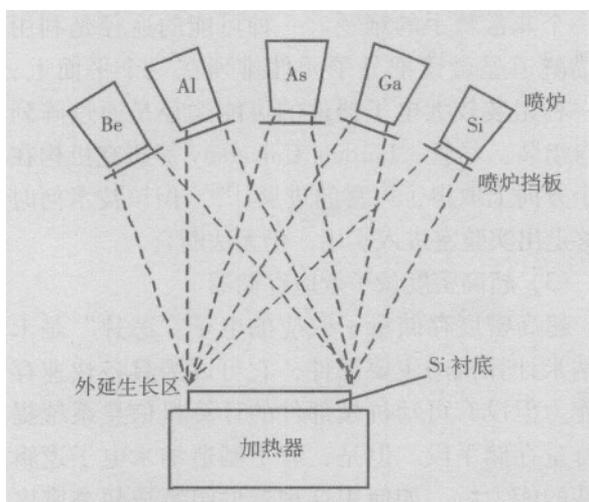


图 1 分子束外延技术原理图

加热使它们的分子以一定的热运动速度和一定的束流强度比例喷射到加热的衬底表面，最终与表面相互作用进行单晶薄膜的外延生长。各喷射炉前的挡板用来改变外延膜的组分和掺杂。根据设定的程序开关挡板、改变炉温和控制生长时间，则可生长出不同厚度的化合物或不同组分比的三元、四元固溶体以及它们的异质结，从而制备出各种超薄微结构材料。

目前，采用外延生长最常见的纳米集成电路用硅基半导体材料有绝缘体上硅（SoI）材料和锗硅（SiGe）异质材料。SoI 和 SiGe 异质材料以及派生出的新型硅基半导体材料，由于可满足低电压、低功率、高速度、抗辐射等电路要求，已开始应用于各种微纳电子器件和集成电路。

MBE、MOCVD、ALE 等外延技术能够满足设计精度要求，如外延层组分、厚度、掺杂浓度和电学均匀性等，故可以生长出各种高质量的超晶格量子阱材料。

另外，采用 V 形槽表面或台阶表面上的选择外延、条栅掩模选择水平外延、应变诱导限制外延以及激光辅助原子束外延等改进的外延技术，还可以制造出各种具有特殊功能的低维纳米结构，如一维量子线和零维量子点等。

3.3 分子自组装合成技术

自组装是依赖分子间非共价键力自发结合成稳定的聚集体的过程。自从 80 年代提出分子器件的概念至今，人们已从 LB 技术发展到了分子自组装技术，从双液态隔膜（BLM）技术发展到了 SBLM 技术，已在分子组装有序分子薄膜、加工具有特定功能的分子聚集体方面取得了丰硕的成果。如美国马萨诸塞州技术大学化学系采用胶体晶体的自组装技术合成 CdSe 纳米晶三维量子点^[9]；Alivisatos 等人采用金属胶体纳米结构自组装技术，通过 Watson-Crick 的碱基配对作用把 Au 纳米粒子自组装到 DNA 分子上，形成了“纳米晶分子”^[10]；Yang 等人采用多孔纳米结构自组装技术将正硅酸乙酯（TEOS）与氯代十六烷基三甲胺的酸性水溶液混合，然后让其在新解理云母表面上于 80℃ 下成核生长，得到了取向生长连续的介孔 SiO₂ 薄膜等^[11]。

近年来,分子自组装技术还被许多科技工作者用来合成具有特定电子特性的纳米结构材料。这些采用分子自组装合成的纳米结构主要包括纳米棒、纳米管、多层膜和介孔材料。如 Li 等人用 β -和 γ -环糊精通过二苯基己三烯连接成功地合成了长 20~35 nm,直径为 2 nm 的纳米管^[12];美国伊利诺斯大学的工作者成功地合成了蘑菇形状的高分子聚集体,并以此为结构单元,自组装了具有纳米结构的超分子多层膜^[13];Fujita 等用 4 个有机配体和 6 个金属 Pd(II) 离子通过分子自组装制备出了自然界不存在的中空的介孔超分子^[14]等。

3.4 SPM 技术

自从 1982 年第一台扫描隧道显微镜 (STM) 诞生,以及后来各种扫描探针显微镜发明以来,人类对微/纳观世界的认识翻开了新的一页。SPM 不仅可以进行高分辨率的三维成像和测量,还可对材料的不同性质进行研究。因此,已不仅是一种微观测量分析的工具,而且是一种重要的微观加工与操纵工具。

(1) 利用 SPM 探针直接在样品表面刻划形成纳米图案或拨动颗粒至指定地方,构造特定的纳米电子器件/结构。此技术一般需要选用特殊的 SPM 探针,探针针尖一般是坚硬的金刚石颗粒,探针悬臂梁需要具有高弹性模量的材料,通常达到 20 N/m。如北京大学陈海峰等人^[15]利用自行开发的 AFM 刻蚀系统在 Au-Pd 合金膜上成功地刻划出了纳米尺度的孔洞、沟槽和各种复杂的图形。

(2) 使用扫描探针技术与其他技术相结合,可操纵控制分子和原子、加工出纳米级尺度的微型机构,甚至可以用来设计、制造、组装新型的量子器件和设备。近年来,科学家在这方面取得不少重要成果,已设计出单电子开关、单电子晶体管、单电子逻辑器、碳纳米管整流器、分子开关、化学分子马达及用 AFM 加工出纳米锁和纳米钥匙等。

3.5 特种超微细加工技术

还有一些特殊的超微细加工技术,可用于加工、制备纳米电子器件。它们包括机械控制裂隙

连接电极技术制备 Au 原子线;纳米碳管构建 FET;以 DNA 分子、纳米碳管、介孔材料为模板,制备量子线以及超精密复合加工、电解射流加工、电火花加工,电化学加工技术等。

4 纳米电子技术急需解决的若干关键问题

由于纳米器件的特征尺寸处于纳米量级,因此,其机理和现有的电子元件截然不同,理论方面有许多量子现象和相关问题需要解决,如电子在势阱中的隧穿过程、非弹性散射效应机理等。尽管如此,纳米电子学中急需解决的关键问题主要还在于纳米电子器件与纳米电子电路相关的纳米电子技术方面,其主要表现在以下几个方面。

(1) 纳米 Si 基量子异质结加工

要继续把现有的硅基电子器件缩小到纳米尺度,最直截了当的方法是采用外延、光刻等技术制造新一代的类似层状蛋糕的纳米半导体结构。其中,不同层通常是由不同势能的半导体材料制成的,构建成纳米尺度的量子势阱,这种结构称作“半导体异质结”。但由目前的工艺水平,在纳米尺度上制造出性能稳定、可靠的半导体异质结通常是很困难的,因此,必须尽快发展高性能的纳米 Si 基量子异质结加工技术。

(2) 分子晶体管和导线组装纳米器件

即使知道如何制造分子晶体管和分子导线,但把这些元件组装成一个可以运转的逻辑结构仍是一个非常棘手的难题。一种可能的途径是利用扫描隧道显微镜把分子元件排列在一个平面上;另一种组装较大电子器件的可能途径是通过阵列的自组装。尽管,Purdue University 等研究机构在这个方向上取得了可喜的进展^[16],但该技术何时能够走出实验室进入实用,仍无法断言。

(3) 超高密度量子效应存储器

超高密度存储量子效应的电子“芯片”是未来纳米计算机的主要部件,它可以为具备快速存取能力但没有可动机械部件的计算机信息系统提供海量存储手段。但是,有了制造纳米电子逻辑器件的能力后,如何用这种器件组装成超高密度存储的量子效应存储器阵列或芯片同样给纳米电

子学研究者提出了新的挑战。

(4) 纳米计算机的“互连问题”

一台由数万亿的纳米电子元件以前所未有的密集度组装成纳米计算机注定需要巧妙的结构及合理整体布局，而整体结构问题中首当其冲需要解决的就是所谓的“互连问题”。换句话说，就是计算结构中信息的输入/输出问题。纳米计算机要把海量信息存储在一个很小的空间内，并极快地使用和产生信息，需要有特殊的结构来控制 and 协调计算机的诸多元件，而纳米计算元件之间、计算元件与外部环境之间需要有大量的连接。就现有传统计算机设计的微型化而言，由于电线之间要相互隔开以避免过热或“串线”，这样就有一些几何学上的考虑和限制，连接的数量不可能无限地增加。因此，纳米计算机导线间的量子隧穿效应和导线与纳米电子器件之间的“连接”问题急需解决。

(5) SPM 纳米器件加工技术效率

SPM 技术为纳米电子器件的加工制备提供了新的途径。纳米电子器件最终要变得实用且经济上可行，则要求纳米结构能被迅速大量地组装出来。然而，目前使用 SPM 纳米器件加工技术效率极低，因此，仅靠一台微型扫描隧道显微镜或微型原子力显微镜一次组装一个纳米结构是远远不够的。如果纳米电子器件要实现机械化组装，则需要大量高效的并行显微“纳米操纵器”来完成。

(6) 纳米/分子电子器件制备、操纵、设计、性能分析模拟环境

当前，分子力学、量子力学、多尺度计算、计算机并行技术、计算机图形学已取得快速发展，利用这些技术建立一个能够完成纳米电子器件制备、操纵、设计与性能分析的模拟虚拟环境，并使纳米技术研究获得虚拟的体验已成为可能。但由于现有计算机的速度、分子力学与量子力学算法的效率等问题，目前建立这种迅速、敏感、精细的量子模拟虚拟环境还存在巨大困难。

参考文献：

[1] SHAW J M. Organic electronics: Introduction [J]. J RES & DEV, 2001, 45: 3-8.

[2] 林鸿溢. 跨世纪新学科——纳米电子学 [J]. 电子学报, 1995, 23: 59-66.

[3] 顾宁. 制造纳米电子器件的技术途径 [J]. 华北工学院测试技术学报, 2000, 14: 241-246.

[4] 盛柏桢. 纳米技术与器件的应用 [J]. 电子元件应用, 2002, 4: 1-4.

[5] 程开富. 纳米光电子器件初露端倪 [J]. 世界产品与技术, 2003, 6: 29-32.

[6] 郭维廉. 固体纳米电子器件和分子器件 [J]. 微纳电子技术, 2002, 39 (4): 1-7.

[7] 郭万林, 张田中. 纳米科学技术与模拟 [A]. 虚拟工程与科学 [C]. 北京: 气象出版社, 2001.

[8] 罗先刚, 姚汉民等. 纳米光刻技术 [J]. 物理, 2000, 29: 358-360.

[9] MURRAY C B, KAGAN C R, BAWENDI M G. Self-organization of close-packed quantum dot solids for cdse nanocrystallites [J]. Science, 1995, 270: 1335.

[10] ALVISATOS A P, JOBNSSON K P, PENG X. Organization of “nanocrystal molecules” using DNA [J]. Nature, 1996, 382: 609.

[11] YANG H, KUPERMAN A, COOMBS N, et al. Synthesis of oriented mesoporous silica films on mica [J]. Nature, 1996, 379: 703.

[12] LI G, MCGOWN L B. Molecular nanotube aggregates of beta-and gamma-cyclodextrins linked by diphenylhexatrienes [J]. Science, 1994, 264: 249.

[13] STUPP S I, LEBONHEUR V, WALKER K, et al. Superamolecular materials: self-organized nanostructures [J]. Science, 1997, 276: 384.

[14] FUJITA M, OGURO D, MIYAXAWA M, et al. Self-assembly of ten molecules into nanometer sized organic host framework [J]. Nature, 1995, 378: 469.

[15] 陈海峰, 宋家庆, 等. 利用原子力显微镜在 Au-Pd 合金膜上制备纳米结构 [J]. 科学通报, 1998, 43: 1950-1953.

[16] JANES D B, LEE T. Self-assembled metal/molecule/semiconductor nanostructures for electronic device and contact applications [J]. J Electron Mater, 2000, 29: 565.

作者简介：

沈海军 (1971-), 男, 博士, 南京航空航天大学航空宇航学院副教授, 主要从事纳米电子器件表征、纳米力学、破坏力学、有限元分析、腐蚀疲劳断裂等方面的研究工作, 目前已发表论文 40 篇。