

后硅器时代

林鸿溢

(北京理工大学电子工程系, 北京 100081)

摘要: 纳米科学技术在 20 世纪最后 10 年诞生并得到迅速发展. 讨论和论述了新兴的纳米科学技术的进展, 展望了包括量子功能器件、薄膜传感器、纳米显示、纳米材料、生物技术和原子工程等的应用前景, 同时给出了某些实验结果.

关键词: 纳米科学技术; 纳米材料; 纳米电子学

PACC: 7360F; 6855

中图分类号: O484.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0011-06

1 引言

2001 年, 纳米技术取得了突破性进展, 分别经中国《科技日报》、中国科学院和中国工程院 566 位院士, 以及美国《科学》评定, 入选 2001 年度“世界十大科学新闻”、“世界十大科技进展”和“十大科学突破”.

早在 20 世纪 70 年代, 就有科技工作者提出制作单电子器件, 并组装成微小而快速的“分子计算机”的建议. 科学家们经过不懈的努力, 2001 年开始得到最初的回报. 来自美国哈佛大学、IBM 公司、荷兰 Delft 大学等研究机构的科学家们, 实现将若干纳米电子器件连成逻辑电路. 这是纳米技术领域的巨大突破性进展. 它有可能为未来诞生极微小和极快速的分子计算机铺平道路. 《科学》杂志指出, 这将“成为今后几十年科学技术突破的一大动力”.

德国北威州纳米技术研究联合会和埃森大学等科学研究机构在单电子纳米开关电路的研究中取得进展, 可能成为未来更微小、更精确和更低功耗的芯片之基础. 贝尔实验室利用一个单一的有机分子研制成功目前世界最小的晶体管, 在针尖般大小尺寸的纳米芯片上容纳 1000 万个这种晶体管, 这种纳米晶体管大小接近 1nm, 将导致成批更小更强的纳米芯片的诞生.

中国科学院和中国工程院 566 位院士还评选了

2001 年中国十大科技进展, 其中第六项为纳米技术进展. 中国科学技术大学侯建国、杨金龙和朱清时等, 利用扫描隧道显微镜, 将笼状结构碳 60 分子组装在一单层分子膜的表面, 在零下 268℃ 下, 冻结碳 60 分子的热振动. 在国际上首次拍摄到可清晰分辨的碳原子间单键和双键的分子图像. 这种单分子直接成像技术为制造未来的纳米器件提供有效手段.

令人高兴的不仅是这些纳米器件、纳米导线、纳米电路和纳米芯片的研制成功, 而且是这些纳米技术将会被应用到各种各样复杂的微仪器和微系统中. 有朝一日这些微仪器也许会钻进我们的体内检查身体、诊断疾病和进行治疗, 直接为人类的健康施展高超技术.

开展纳米科学技术研究, 是一项开发物质的潜在信息和结构潜力的重大工程^[1~7], 它将使单位体积物质储存和处理信息的能力实现又一次飞跃, 导致人类认识和改造世界的的能力出现重大突破, 从而对国民经济和国防实力产生深远的影响. 本文简要介绍纳米科学技术在若干方面的研究成果和我们实验室的某些实验研究结果, 并指出 21 世纪 20 年代末, 将进入“后硅器时代”.

2 21 世纪的核心技术

纳米科学技术是跨世纪的新学科, 必将发展成为 21 世纪的关键技术, 可能引导一次新的工业革

命. 1990 年在美国巴尔的摩召开了第一届国际纳米科学技术会议, 同年, 国际性刊物“Nanotechnology”创刊. 此后, 日本、德国、美国等国家制定了发展纳米科学技术的国家规划, 美国国家自然科学基金优先支持纳米科学技术项目, 等等, 这些都说明了纳米科学技术已成为国际科学界和工程技术界关注的热点. 我国也不失时机地加紧开展纳米技术的研究和开发. 有远见的科学研究机构的领导者和企业家应关注这个新的领域, 有选择地加以支持, 必将推动我国纳米技术的迅速发展. 目前, 纳米技术正处于重大突破的前夜, 人类将有可能直接操纵单个原子或分子, 制造具有特定功能的产品.

德国科学技术部曾组织科学家进行深入的调研与评估, 对全世界纳米技术市场作了预测, 估计到 2010 年可以达到 14400 亿美元, 是一个很大的市场. 而美国则在最近预测到 2010 年美国的纳米技术市场就将达到 10000 亿美元.

美国提出了“国家纳米技术倡议”, 指出可能引导一次新的工业革命, 把纳米技术置于国家最优先发展的地位. 2000 年 1 月美国总统克林顿在加利福尼亚理工学院 (1959 年费教授就是在这所学院对纳米技术作了预言) 演说中宣布启动“国家纳米技术倡议”, 美国政府以 5 亿美元的预算支持纳米技术与开发. 倡议指出, 纳米技术“正在实现对各种物件基本结构单元, 作前所未有的了解和控制”. “开发工作可能改变每一件产品的设计和制造方式, 从疫苗到计算机到汽车轮胎, 直到尚未想像出来的产品”. 今年, 美国政府拨给纳米技术的经费又增加了 8%.

3 从微电子技术到纳电子技术

人类经过真空管和晶体管的发明与发展, 迄今, 以集成电路为主的微电子技术已成为整个电子工业技术的支柱.

微电子技术作为现代高技术的重要支撑, 经历了若干发展阶段^[8]. 上世纪 50 年代末发展起来的小规模集成电路 (SSI), 集成度在 100 个元件; 60 年代发展了中规模集成电路 (MSI), 集成度在 1000 个元件; 70 年代又发展了大规模集成电路 (LSI), 集成度高达 10^5 个元件; 80 年代更进一步发展特大规模集成电路 (ULSI), 集成度高达 10^6 个元件以上. 随着集成度的提高, 要求器件尺寸不断减小. 1985 年, 1 兆位特大规模集成电路的集成度达到 200 万个元

件, 要求器件条宽为 $1\mu\text{m}$; 1992 年, 16 兆位的芯片, 集成度达到 3200 万个元件, 条宽减到 $0.5\mu\text{m}$, 即 500nm; 而后, 64 兆位的集成电路, 其条宽已达到 $0.3\mu\text{m}$, 即 300nm; 目前, 在实验室条宽已可以小到 15nm.

空间尺度对微电子技术来说是至关重要的. 在纳米空间电子的波动性质将明显地显示出来. 因此, 视电子为粒子的微电子技术将面临挑战. 于是纳米电子技术应运而生^[9].

据估算全球每天都有 2 亿亿个晶体管在运作中, 这相当于全世界每人平均 4000 万个; 而全世界每年制造的晶体管总量高达 10^{17} 个, 与地球上的蚂蚁一样多! 所以, 继铁器时代后, 当今可称为“硅器时代”. 随着微电子技术向纳电子技术过渡, 我们预料 21 世纪 20 年代末, 将从“硅器时代”过渡到“后硅器时代”.

4 纳电子技术

利用电子的量子效应原理制作的器件称为量子功能器件, 也称量子器件或纳米器件. 要实现量子效应, 在工艺上要实施制作厚度和宽度都只有几十到几十纳米的微小导电区域. 这样, 当电子被关闭在此纳米导电区域中时, 才有可能产生量子效应. 这也就是制作量子功能器件的关键所在. 如果制作若干纳米级导电区域, 而导电区域之间形成薄薄的势垒区, 称这样的导电区域为势阱. 当势阱中注入电子时, 电子的波动性将明显地表现出来. 因此, 电子可以从一个势阱穿越势垒进入另一势阱, 这就是量子隧道效应. 电子在势阱中将处于分立的能级上, 当电子受激励时, 将从低能级跃迁到高能级. 而当电子从高能级向低能级弛豫时, 会发射出一定波长的光子. 诸如此类量子效应在纳米技术的不断发展中将得到有效应用.

制作量子势阱的方法有分子束外延 (MBE)、原子层外延 (ALE)、等离子体增强化学气相淀积 (PECVD)^[10,11] 和金属有机物化学气相淀积 (MOCVD) 等方法. 图 1 是 PECVD 系统图. 我们利用 PECVD 方法已经成功地生长出纳米硅 (nc-Si : H) 薄膜. 纳米硅薄膜的结构特点是其内部晶态组分与界面组分各占 50%, 晶粒的尺寸在几纳米, 界面宽度约为 1nm. 由于纳米硅薄膜具有独特的结构^[12~14], 可以设想各纳米级晶粒之间的界面区形成

势垒,则纳米级晶粒即为势阱.这样就形成随机的量子点(quantum dots)阵列结构.

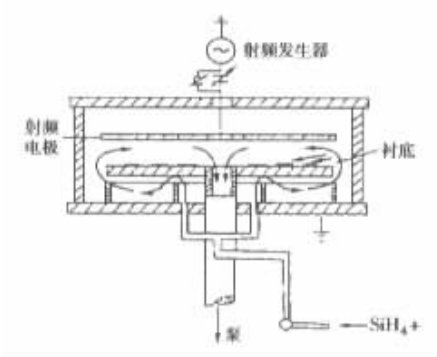


图1 PECVD 系统图

Fig.1 PECVD system

在纳米半导体薄膜材料制备的基础上,北京理工大学电子工程系开展了纳米传感器技术研究.图2是该实验室研制的纳米硅薄膜的高分辨电子显微(HREM)图像.图3是纳米硅薄膜场发射压力传感器的场发射尖锥,其尖端半径为30nm.

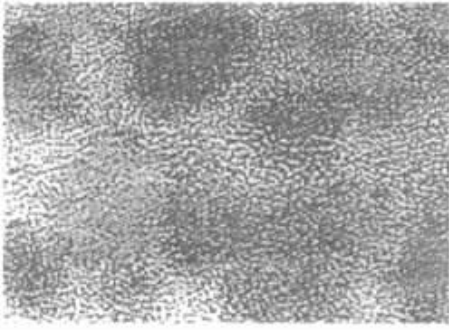


图2 薄膜的HREM像

Fig.2 HREM image of nc-Si:H film

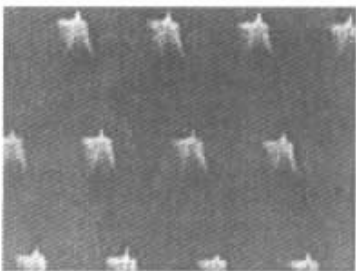


图3 纳米硅薄膜场发射阵列的扫描电镜图

Fig.3 SEM image of field emission array of nc-Si:H film

日本 NEC 基础研究所制定了量子波计划,并成功地制作了量子点阵列.在 GaAs 衬底上淀积 InP 形成许多纳米级岛状结晶量子点结构.当用激光照射这些量子点使之激励时,从量子点释放出蓝色的光,表明所制作的量子点确实有封闭电子的功能.

纳米逻辑电路实验成功,单电子纳米开关电路取得进展,纳米芯片的诞生,分子自组装的实现,等等都表明纳米电子学的进展是巨大的,不久的将来人类社会将进入“后硅器时代”,即“纳米电子时代”.

5 纳米显示技术

“显示”是现代信息技术中不可或缺的环节.继阴极射线管(CRT)显示、液晶显示器(LCD)显示和等离子体显示(PDP)之后,利用碳纳米尖端场致电子发射制作矩阵寻址高效率、高分辨率和长寿命的场致发射平板显示器(FED),将成为显示技术重要的发展方向.

碳纳米管引入显示技术领域具有若干显著的优点:高清晰度、低工作电压、低功耗、高响应速度,从而易于实现薄型化、数字化和集成化.

即使在场发射领域,碳纳米管制作的平板显示也比传统的阴极场发射具有若干明显的优点:纳米管的尖端在纳米尺度,尖锐的电子发射尖端提供了形成强电场的独特条件;碳纳米管具有的低的电子逸出功,十分有利于电子向真空发射;碳纳米管的电子发射特性稳定.此外,在电导特性、大面积和产业化方面都具有优势.所以,碳纳米管制作的平板显示器可能成为今后显示技术的重要新成员而被广泛关注.

实验表明,多孔硅也具有场致电子发射特性.多孔硅是利用单晶硅片经化学腐蚀形成纳米量级硅柱和孔洞.在足够的电场(10^9V/m)作用下,多孔硅便成为场致电子发射的无规阵列.据此实验结果,利用多孔硅作为平板显示的可能性是存在的.至于应用的程度,还要看深入的实验研究结果.

6 纳米技术的应用前景

纳米科学技术是一个多学科交叉的横断学科,是在现代物理学和先进工程技术相结合的基础上诞生的.它是一门学科与高技术紧密结合的新型科学

技术。“纳米”的涵义不仅仅指空间尺度,更重要的是提出一种崭新的思维方式,即人类将利用越来越小,越来越精确的精细技术生产成品,以满足高层次的需求。近年来的研究进展表明,科学家们已经实现了对单个原子的操纵。当然,制造具有特定功能的产品尚需时间。

6.1 高灵敏度信息系统

纳米电子学是在纳米空间研究电子运动的特性和功能的新学科。美国和日本正在分别执行量子波计划。美国 IBM 公司和日本日立制作所的中央研究所都已研制成功单电子晶体管。中国物理研究所等多个研究组也研制成功单电子晶体管原型。这种晶体管不同于传统的晶体管,是新一代量子功能器件。传统晶体管是控制成群电子的运动,以实现读写功能。因此,响应速度的提高和功耗的降低都受到了限制。单电子晶体管,只要控制单个电子即可以实现某种读写功能。所以其响应速度和功耗都比传统晶体管的极限数据优 1000~10000 倍。这对构成高性能信息系统是极为重要的,将为国防和民用信息体系提供高性能的信息系统。

6.2 纳米材料

纳米材料技术的进展速度惊人^[15~17],已经研究出多种制备技术,开发成功的信息薄膜、半导体、金属、超导体、陶瓷和磁性材料等都有独特性质,可用于许多领域。例如,纳米硅薄膜将在信息领域发挥重要作用;陶瓷材料具有硬度大、耐磨、抗腐蚀性等优点,但脆性是它最大的缺点。然而,已经研制成功的纳米二氧化钛(TiO_2)陶瓷材料,在室温下可弯曲,塑性形变达到 100%;纳米 TiO_2 粉具有良好的光催化特性,可以用于产品的抗菌、自洁、防紫外线等;北京理工大学电子工程系利用等离子体增强化学汽相淀积技术制备的纳米硅薄膜具有很高的压阻效应。如图 4 所示,可在传感器技术中得到应用;利用普通化学方法制备的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 超微粉(20~40nm)有吸收紫外线的功能,已用于延长日光灯的寿命; Fe_3O_4 超微粉(5~20nm)也是用普通化学方法制备的,通过技术处理后具有使入射光发射的功能;纳米材料作为新一代隐身材料的探索正在进行之中;已提出一种新原理纳米 TiO_2 薄膜能源器件,这种新型太阳光电转换器件,即便在阴雨天也能正常工作;传感器是纳米半导体材料的重要应用,薄膜传感器将成为

机器人灵敏的感官。诸如此类的纳米产品将开拓宽广的应用领域。

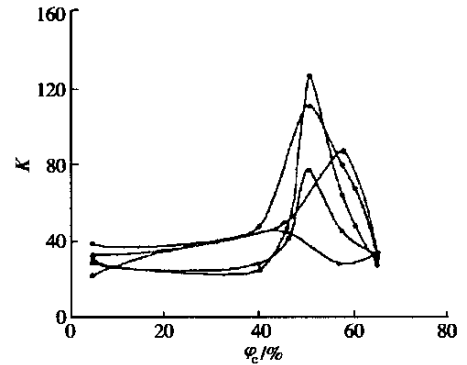


图 4 nc-Si:H 薄膜的压阻灵敏系数 K 与薄膜晶态体积分数 φ_c 的关系

Fig. 4 Piezoresistance effect coefficient of nc-Si:H film varied with volume fraction

6.3 微机电系统(MEMS)^[18]

在微电子技术的基础上,利用微细加工技术,美国加州大学伯克利分校和其他一些研究所已制作出微小齿轮和微电机。德国积极推进微机电技术,根据微机电系统加工特点,发展了新一代工艺技术,称为 LIGA 技术,是 X 射线深层光刻、微电铸和微复制三个工艺的缩写。近年来,日本投资 1.5~2.0 亿美元,用于发展 MEMS。纳米马达已实现纳米级驱动和定位。日本 Yoshida 系统定位精度达 1nm,驱动速度达 200nm/s。我国正大力开展 MEMS 研究,并取得许多成果。

6.4 纳米生物技术

纳米生物学最具诱惑力的是纳米机器人(也称分子机器人)的研究,纳米机器人可注入人体血管内,清除心脏动脉脂肪淀积物,杀除病毒和癌细胞。它可以进入人体,进行修复和基因装配工作,未来的发展目标是根据需要组合原子或分子制造植物和动物。这将极大地冲击以至改变人类传统的生活模式和生产方式。要特别指出的是,纳米机器人的感官是依靠纳米电子技术建造起来的。

6.5 对单个原子的操纵与控制

1981 年 Binning 和 Rohrer 发明了扫描隧道显微镜(STM)^[19~21],可以观察到物质原子分布的真

面目. 在扫描隧道显微镜的基础上开发的弹道电子发射电镜(BEEM), 可以在硅片上刻写几个纳米宽的线. 这表明信息存储器的数据密度可以提高几个数量级. 扫描隧道显微镜不仅使人类能直接观察到物质内部原子的形貌和状态, 而且科学家已成功地驱使氙(Xe)原子排列成 IBM 字样^[22], 纳米级的中国地图已经由中国科学院化学研究所的研究人员绘制. 这表明人类实现对单个原子的操纵和控制的年代已经到来, 其意义是非常重大的. 正因为如此, 在 STM 发明后仅 5 年, 1986 年 Binnig 和 Rohrer 共同获得诺贝尔物理学奖, 以表彰 STM 发明的重大意义和深远影响. 图 5 是利用 STM 探针绘制的纳米级世界地图.

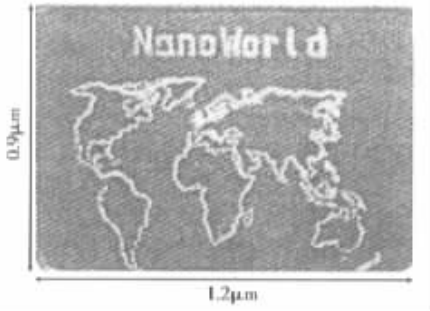


图 5 纳米世界地图

Fig. 5 Nano-world map drawn by STM

7 结束语

经历了 10 多年的发展(1990 年被认为是纳米科学技术诞生之年), 纳米科学技术在国际上已形成相当可观的规模, 在不断完善自身的同时不断推出实际的高技术应用实例. 纳米科学技术促使人类在开发大自然的艰巨事业中进入一个新颖的层次. 就空间概念来说, 即从微米尺度空间进入纳米尺度空间, 也就是走进原子、分子世界. 正如工业革命进程中, 沿着机械化、电气化、信息化, 一步步深入发展, 使整个人类社会产生巨大的变化, 纳米技术将在开发物质潜在信息和结构潜力上发挥独特的作用, 使单位体积物质存储和处理信息的能力实现又一次飞跃, 导致人类认识和变革客观世界的能力产生重大的进步, 从而对经济活力、军事能力、科学研究深度和人类生活质量产生深远的影响, 以至于影响人类自身.

参考文献

- [1] Marrian C R K, Coltol R J. Low-voltage electron beam lithography with a scanning tunneling microscope. *Appl Phys Lett*, 1990, 56: 755
- [2] He Y L, Lin H Y. Microstructure and electron conduction mechanism of hydrogenated nano-crystalline silicon films. *Chinese Phys Lett*, 1993, 10: 539
- [3] Lin H Y. Nanometer sized materials and nanotechnology. *Materials Review*, 1993, 6: 42
- [4] Reed M A, Frensley W R. Realization of a three-terminal resonant tunneling device: The bipolar quantum resonant tunneling transistor. *Appl Phys*, 1989, 54: 1034
- [5] Arsott P G, Lee G. Scanning tunneling microscopy of Z-DNA. *Nature*, 1989, 339: 484
- [6] Lin H Y. Nanotechnology. *Scientific Chinese*, 1994, 3: 48 [林鸿溢. 纳米技术. *科学中国人*, 1994, 3: 48]
- [7] Smith H I, Craighead H G. Fabrication of nanometer scale microstructures. *Physics Today*, 1990, 2: 24
- [8] Lin H Y, Li Y X. Nano scale materials and nanoelectronics. *Electronic View*, 1993, 8: 5 [林鸿溢, 李映雪. 纳米材料与纳米电子学. *电子 望*, 1993, 8: 5]
- [9] Lin H Y. Nanoelectronics. *Acta Electronics Sinica*, 1995, 2: 59 [林鸿溢. 纳米电子学. *电子学报*, 1995, 2: 59]
- [10] Lin H Y. Synthetic diamond films. *Science*, 1989, 2: 276 [林鸿溢. 合成金刚石薄膜. *科学*, 1989, 2: 276]
- [11] Lin H Y. Crystallization and fractal structure in hydrogenated amorphous silicon films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1990, 11: 430 [林鸿溢. α -Si:H 薄膜的晶化与分形结构的形成. *半导体学报*, 1990, 11: 430]
- [12] Lin H Y, Zhang Y. Technique of preparation for nanocrystalline zinc oxide films and it's properties. *Journal of BIT*, 1995, 15(2): 132 [林鸿溢, 张焱. 纳米 ZnO 薄膜制备技术及其特性的研究. *北京理工大学学报*, 1995, 15(2): 132]
- [13] Lin H Y. Progress in nano scale science and technology. *Scientific American*, 1996, 1: 71 [林鸿溢. 纳米科学技术的新发展. *科学*, 1996, 1: 71]
- [14] Lin H Y, Yu W W and Wu X H. Fractal aggregation model of hydrogenated nanocrystalline silicon films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1995, 16: 567 [林鸿溢, 余卫武, 武旭辉. 纳米硅薄膜分形凝聚模型. *半导体学报*, 1995, 16: 567]
- [15] Wang Z H, Dai C C. Mechanism for the nanometer scale modification HOPG surface by scanning tunneling microscope. *Chinese Phys Lett*, 1993, 10: 535
- [16] Zhu X, Gleiter H. X-ray diffraction studies of the structure of nanometer-sized crystalline materials. *Phys Rev*, 1987, B35: 9085
- [17] Zhu X. Progress of materials physics——nanosolid materials. *Physics*, 1991, 4: 203 [朱星. 材料物理的新进展——纳米固体

- 材料. 物理, 1991, 4: 203]
- [18] Binning G, Gerber C, Weibel E. Tunneling a controllable vacuum gap. *Appl Phys*, 1982, 40: 178
- [19] Lin H Y, Wu X H. Growth dynamics of nano-crystalline silicon films and its computer simulation. *Acta Phys Sinica*, 1996, 45: 655
- [20] Lin H Y, Li Y X. Fractal theory. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992 [林鸿溢, 李映雪. 分形论. 北京: 北京理工大学出版社, 1992]
- [21] Eigler D M, Schweiger E K. Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, 1990, 344: 524
- [22] Lin H Y, Wang Y. Microstructure properties of nanocrystalline silicon. *The Electro-Chemical Society Interface*, 1995, 3: 142

Later Silicon Ages

Lin Hongyi

(*Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: In the last decade of the 20th century, a brand-new field of nano scale science and technology has emerged in the world. The fundamental and applications of nano scale science and technology are introduced. The applications of nanotechnology which include quantum function devices, film sensors, nanodisplay, nanometer scale materials, microelectromechanical systems (MEMS), nanobiological technology and atomic engineering, etc. are prospected. Some experimental results are given.

Key words: nano scale science and technology; nanometer material science; nanoelectronics

PACC: 7360F; 6855

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0011-06