

纳米器件的制备、表征及其应用*

王太宏 赵继刚 傅英 李宏伟 李卫 王春花
王振霖 庞科 刘淑琴 符秀丽

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 利用建立的常规光刻法的纳米加工工艺系统,研制碳纳米管晶体管、单电子晶体管和单电子晶体集成的纳米器件.研制出了 90K 的单电子晶体管,实现了两单电子晶体管的电容耦合集成、多个单电子晶体管的串联集成以及单电子晶体管与传统器件的集成.

关键词 纳米器件 碳纳米管晶体管 单电子晶体管 纳米加工

CHARACTERIZATION AND DEVELOPMENT OF NANODEVICES

WANG Tai-Hong ZHAO Ji-Gang FU Ying LI Hong-Wei LI Wei WANG Chun-Hua
WANG Zhen-Lin PANG Ke LIU Shu-Qin FU Xiu-Li
(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10080, China)

Abstract The fabrication of carbon nanotube field-effect transistors, single-electron transistors and their integrated circuits is reported. A single-electron transistor has been successfully fabricated which can operate to 90K. Integration of two single-electron transistors by capacitive coupling has been realized. Integration of a series of single-electron transistors as well as a single-electron transistor to a high electron mobility transistor has been achieved.

Key words nanodevices, carbon nanotube field-effect transistors, single electron transistors, nanofabrication

1nm 为十亿分之一米,科学家把对物质材料的尺寸在 100nm 以下的微小结构进行研究处理的技术称为纳米技术.纳米技术是当今世界尖端技术.纳米电子学将使量子元件代替微电子器件. IBM 最新 30nm 晶体管的成功研制将使电脑芯片速度在今后 5 到 10 年内提高到目前的 10 倍,同时使硅芯片技术离物理极限更近一步.英特尔公司开发出的这种迄今世界上最小最快的晶体管,厚度仅为 30nm.这将使英特尔公司可以在未来 5 到 10 年内生产出集成有 4 亿个晶体管、运行速度为 10GHz、工作电压在 1V 以下的新型芯片.而目前,市场上出售的速度最快的芯片“奔腾 4”集成了 4200 万个晶体管.当用硅制造的芯片不能更小时,碳纳米管就是代替硅的最佳选择.在计算机小型化和节能化的研究方面,碳纳米管引起的科技进步将超出人们的想象.当硅场效应晶体管的栅长的减小达到 35nm 的临界尺寸时,其价格将不再随尺寸的减小而降低.预测在未来 10 到 15 年内,利用硅制造的芯片将很难变得更小,难以满足计算机发展对芯片大小和运行速度的要求.科学家们一直在进行研究,希望找到替代硅的物质.利用碳

纳米管制备半导体晶体管和电路具有深远的意义,将引起信息技术,特别是微电子科学技术的重大变革和发展.

利用我们建立的常规光刻法制备纳米器件的工艺系统,我们已分别发展了基于下面三种方法原理的纳米加工技术(1)材料的异向腐蚀特性(2)采用光刻掩膜定位的边缘效应(3)强电场下的蒸发剥离.利用这三种纳米加工技术,我们实现了目前最先进的电子束光刻设备都无法实现的纳米加工精度.所制备出的线条金属栅是目前国际上报道的最细的线条栅,所制备出的“纳米电极对”的精度和结构的完美性都远远强于国际上报道的结果^[1].这些“纳米电极对”由 Cr/W 材料组成,适合于隐埋在量子点周围的量子点层的材料中.为研制碳纳米管晶体管及其电路,我们进一步改善了这些加工工艺系统,特别是器件原位加工的电子束蒸发系统,建立了强电场和高温下的蒸发剥离的纳米原位加工工艺和技术,

* 国家自然科学基金(批准号 69925410,19904015)资助项目
2001-09-03 收到初稿 2001-09-18 修回

实现了多种有应用前景的变形纳米加工.在碳纳米管晶体管的研制中,我们主要利用了我们建立、发展的“纳米电极对”技术,包括非直线型的“纳米电极对”,双缝型的“纳米电极对”和定位型的“纳米电极对”.图1是我们正在合作研制的碳纳米管晶体管的原理结构图之一.

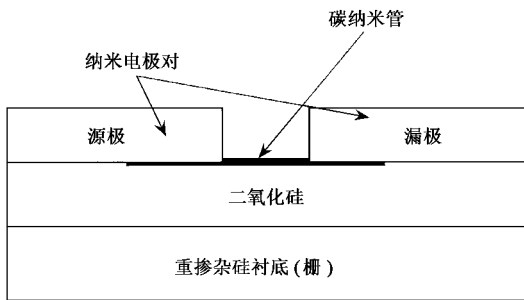


图1 碳纳米管晶体管的原理结构图

目前我们研制的单电子晶体管可工作在 90K 的温区^[2],进一步提高温度至室温是我们目前的主要任务之一.提高温度的关键是实现尽可能小的量子点结构,这些量子点的制备主要有 SPM 技术、FIB 技术、电子束光刻技术、自组装技术等等^[1].在完成国家自然科学基金委项目“功能一维量子点线的制备及基础研究”中,我们制备出了量子点线阵列的功能一维材料.通过在制备材料样品上沉积金属电极的方法,我们观察到这种结构材料的电子存储效应、库仑台阶效应、能级共振效应和量子点间的相互库仑阻塞现象.因而,这种材料可用于研制单电子存储器、单光子探测器、单光子源和单电子集成电路.目前利用分子束外延自组装方法制备的量子点材料主要是用来制备量子点激光器.这些量子点的直径都在 10nm 以上,不适合于制备与单电子效应相关的光电器件.现在我们正在将电子束光刻技术、纳米孔膜板技术、原位强电场方法与分子束外延方法结合起来制备有效直径在 1—6nm 内的量子点,并在量子点周围的量子点层的材料中隐埋多种“纳米电极对”,使其具有单光子探测、单电子存储和单电子集成等功能.由于制备的量子点的有效直径在 6nm 以下,在这些量子点中加入一个电子所需的额外能量大于室温热能,这些材料中的电子都受库仑阻塞的作用,因而表现为单电子行为并可用来实现单光子探测、单电子存储和单电子集成等功能.此技术的关键是制备所要求的纳米孔膜板并实现加工手段的精密套刻.

在硅片上用电子束蒸发一层高纯铝膜,所得到

的铝膜具有良好的表面性质,不需要再经如阳极氧化单晶片片时所必需的脱脂、机械抛光及电化学抛光等预处理程序,可直接用于进行多孔型阳极氧化.用浓度为 0.05—0.6M 的草酸溶液对铝膜进行阳极氧化处理,多孔氧化铝层随着氧化的继续不断加厚,孔壁垂直于铝层和氧化铝层的交界面.多孔层的有序程度取决于最初的铝表面的平滑程度,并随着氧化的深入趋于更加有序化.我们用磷酸对第一步阳极氧化过程所生成的氧化铝多孔层进行湿化学腐蚀处理,将其去掉,并保持剩余的铝的蜂窝状粗糙表面.之后在第一步所得到的较为有序的蜂窝状表面的基础上进行第二步阳极氧化,最后得到二维纳米孔的非常有序的阵列.图2是阳极氧化设备原理图.阴极由铂材料制成,密封环的材料为聚四氟乙烯,弹性好,耐腐蚀.给阳极施加一个由下向上的力,则可以保证密封环将电解液保持在电解槽内而不至于外溢.由于硅基底放置在电解槽之外,不和电解液接触,故不会被氧化.同时阴阳极的导线可以保持在电解液之外,不会被电解液浸湿,因此不会像传统的阳极氧化法那样在导线与极板的连接处出现电流聚集区,因而不会干扰我们所需要的阳极氧化过程的进行.由于极板是水平放置,所以阳极氧化过程中所产生的氢和电解液中的离子或杂质不容易停留在阳极表面,不会阻塞已形成的纳米孔隙,阻碍氧化,这样能使整个基片的品质或厚度的均匀性得到很大的改善.另外,我们可以在阴极与阳极之间设置一个旋转机械,用来搅拌电解液,使阳极氧化溶液的状态在整个电解槽内分布均匀,而这在传统阳极氧化设备中是较难实现的.

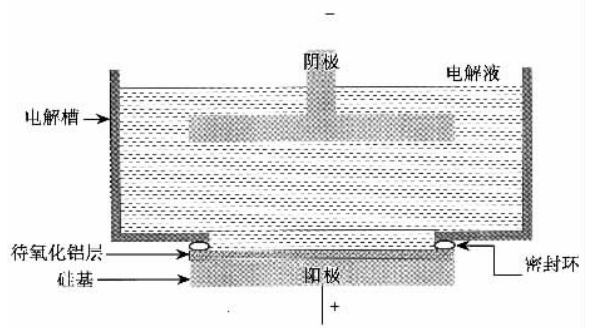


图2 阳极氧化设备原理图

利用阳极氧化的纳米孔膜板技术、常规光刻纳米加工技术和分子束外延混合技术可望制备出室温的单电子晶体管、室温单电子存储器,从而为单电子电路和单电子器件的应用研究提供基础,并推动纳米电子学的发展.

单电子晶体管的研究已进入集成化阶段,最近,国际上单电子晶体管研究取得了非常大的突破,解决了固体器件中单光子的产生和单光子的探测问题(1)法国一实验室集成单电子晶体管和光子收集装置,实现了单个光子的探测(2)日本电报电话公司 NTT 集成了单电子泵和激光器,制备出旋转门理想单光子源.这些单光子是完全相关的,其产生时间可完全控制.这解决了目前量子密码通信中存在的最令人头痛的问题,即单光子产生时间无法预测性造成信号丢失的问题.单电子晶体管主要由一个电化学势可调的量子点和分别与其弱耦合连接的两个隧穿结构成.电子只能从源区单个进入量子点并在它离开量子点进入源区前,第二个电子不能进入量子点.这样就可严格控制量子点中的电子数和电路中单个电子的相关运动.若载流子为空穴,空穴按同样的规律被控制和运动,这种晶体管被称为单空穴晶体管.这两种晶体管的载流子注入都采用电注入.通过能带工程设计,量子点中的载流子注入可通过单个光子来实现.单光子产生单个电子-空穴对(光→电),外界偏压控制各自被注入到量子点的过程.单个电子和单个空穴分别被注入到量子点后,复合发出单个光子(电→光).由此,将来的光电子和微电子很可能统一在单电子器件上.利用能带工程,在材料的制备过程中将它们集成在一起,实现单光子的探测、光子的存储、单光子的产生、单电子的存储等集成功能.我们报道了两个单电子晶体管的平面集成^[3-5],通过混合的台面限制和线条栅耗尽技术实现单电子晶体管的量子点,量子点间再通过悬浮栅的电容耦合将两个单电子晶体管集成在一起.我们的实验结果表明:单电子器件的集成化将依赖于各元器件的无线耦合,这与传统的大规模集成电路的原理不同.当一晶体管有一电子流动时,该晶体管的量子点的静电势随单电子的进出量子点而振荡,并通过悬浮栅的电容耦合引起另一晶体管中的量子点的静电势的变化,从而使该晶体管的漏极电流随另一晶体管中的单电子的进出而变化.这种集成中,单电子晶体管只有电容耦合而没有隧穿耦合,因而它有稳定、可控的特点.这与我们1997年实现的单电子晶体管的集成有很大的不同^[6].最近,我们用这种电容耦合的原理实现了一单电子晶体管 and 传统高迁移率晶体管(HEMT)的集成.单电子晶体管的源漏极与 HEMT 的源漏极都是采用深腐蚀法形成的台面上的欧姆接触技术制备的.其中的单电子晶

体管是一种波导型的单电子晶体管,通过波导上的两条线条栅的负偏压耗尽栅下的波导中的电子气而形成量子点;在该量子点和 HEMT 之间沉积了一条长为 $3\mu\text{m}$ 的线条耗尽栅.测量结果表明:HEMT 的源漏极偏压可控制单电子晶体管的库仑振荡特性.我们也实现了自组装量子点和 HEMT 的集成,如图3所示.填充量子点的单电子极大地影响了栅对源漏极跨导的调控能力.图中1、2和3分别表示量子点中填充1、2和3个电子时的跨导.在这种结构样品中^[7]我们还观察到单电子存储效应和共振隧穿效应的共存现象^[8].

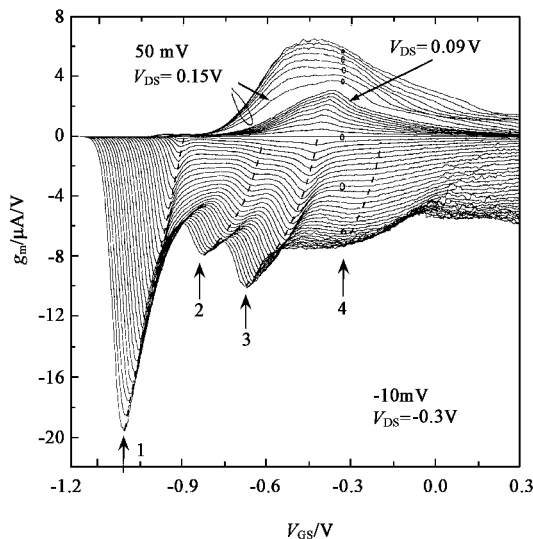


图3 单电子对晶体管的跨导调控

总之,我们2001年研究的纳米器件主要包括碳纳米管晶体管、单电子晶体管和单电子存储器,通过我们建立的超高精度的单电子分析测量系统分析,表征了单电子晶体管及其集成器件的电特性,建立它们的光特性的表征手段是我们下一步实现光电子和微电子统一在单电子器件上应用研究的重要前提.

参 考 文 献

- [1] 王太宏等.物理,2001,30:3[Wang T H et al. Wuli(Physics), 2001, 30:3(in Chinese)]
- [2] Wang T H et al. Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 2160
- [3] Wang T H et al. Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 634
- [4] Fu Y et al. Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 3705
- [5] Fu Y et al. J. Appl. Phys., 2001, 89: 1758
- [6] Wang T H et al. Appl. Phys. Lett., 1997, 71: 2449
- [7] Zhang Q et al. Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 3830
- [8] Wang T H et al. Appl. Phys. Lett., 2001, 79: 1537