

纳米结构的制备及单电子器件研究*

王太宏 李宏伟 贾海强 李卫 黄绮 周均铭

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 建立了单电子器件的制备工艺和单电子器件的分析、测量系统,研究了有潜在应用价值的纳米结构加工技术,制备了适合光电集成的多种纳米结构,发展了常规光刻法制备单电子器件的多种技术.其中,在生命科学和信息领域有着广泛应用的“纳米电极对”引起了国内外专家的重视.发展以“纳米电极对”为基础的单电子器件及其应用是我们目前的主要研究方向.目前正在探索这种单电子器件在生命芯片、微电子系统集成方面的应用.

关键词 单电子晶体管,纳米加工技术,量子点

NANOFABRICATION AND SINGLE ELECTRON DEVICES

WANG Tai Hong LI Hong Wei JIA Hai Qiang LI Wei HUANG Yi ZHOU Jun Ming

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract We have set up a nanofabrication facility and a single-electron measurement system, and have successfully realized nanofabrication by optical lithography. This technique is especially suitable for fabricating high temperature single-electron devices. With this method we have fabricated nanoelectrode pairs which have potential applications in developing genetic chips and in microelectronics integration.

Key words single-electron transistors, nanofabrication technique, quantum dot

目前纳米结构的主要制备技术有:(1)扫描探针显微镜 SPM 技术^[1];(2)聚焦离子束注入 FIB 技术^[2];(3)自组装技术^[3];(4)电子束光刻法^[4];(5)常规光刻法^[5].扫描探针显微镜 SPM 技术可制备原子尺度的纳米结构,但因它的加工时间太长、重复性和稳定性都不太好等原因,很少被用在器件制备上.聚焦离子束注入 FIB 技术对器件有一定的损伤,因而在真正的器件制备上也用得不多.用自组装技术制备纳米结构的方法相当普遍,在物理、化学和生物领域都得到了广泛的应用.目前实现量子器件的纳米结构的制备主要使用电子束光刻技术.最近,常规光刻法制备纳米结构和纳米器件的技术正逐步受到重视.它是通过普通的光刻设备并利用实验中发现的原理,对样品进行纳米加工.其重复性和稳定性都相当好,并适合于大面积的器件制备.这一技术的建立和发展是我们整个器件研究过程中的关键和重点.下面着重介绍我们在这方面的研究进展和结果.

1998年6月,我们在创新工程的支持下启动了

单电子器件研究工作,建立了一套常规光刻法制备纳米器件的工艺系统和一套单电子器件的分析测量系统.其纳米器件制备的工艺系统主要包括:(1)多功能快速电子束蒸发系统;(2)防静电金丝压焊系统;(3)高温氧化系统;(4)等离子体刻蚀系统.多功能快速电子束蒸发系统是由自己独立设计,委托多家单位加工,在中国科学院物理研究所组装而成.该系统的特点是:样品架在蒸发室里可随意转动,保证了纳米器件多方位、多角度的蒸发;样品温度在室温和300℃间连续可调;可实现电场作用下的原位蒸发.这些特点充分保证了多种纳米结构及其纳米器件的制备.利用该系统,我们一次性地将中国科学院电工研究所制备的100nm宽的线条图形转换成了50nm宽的线条图.防静电金丝压焊系统是用进口的节能器及相关部件,在国内组装而成.高温氧化炉主要用于 AlAs 和 Si 的氧化,特别是 Si 的 1000℃高

* 国家自然科学基金(批准号:69925410,19904015)资助项目
2000-10-25收到

温氧化.这些过程主要用来形成纳米量子点和减少纳米线条栅的漏电流,保证单电子器件的稳定工作.单电子器件的分析、测量系统的电流测量精度为 10^{-15} A,其接地电阻为 $0.45\ \Omega$,测量温区在 $1.6\ \text{K}-300\ \text{K}$,并连续可调.其测量方式有(1)室温原位检测(注:变温原位检测系统正在研制中),(2)18条栅压可独立控制的芯片插入式.

在发展纳米结构及其器件的制备技术方面,首先研究了利用常规工艺现象及原理进行常规光刻法微细加工的技术,并成功建立了利用现有实验设备进行纳米加工的一套技术.其研究内容主要包括(1) III-V族半导体的腐蚀特性^[6],(2)金属材料的腐蚀特性. III-V族半导体材料的腐蚀特性研究中,所选择的腐蚀液主要是盐酸、硫酸和氨酸等体系.在这些研究中,我们发现了在同一过程、同一腐蚀液的两种不同轮廓的腐蚀台面,掌握和发展了利用常规光刻法制备多种纳米量子线的技术.根据高度选择性的腐蚀特性,腐蚀台面首先呈倒三角形,随继形成与之互补的正三角形的腐蚀轮廓.这套技术有利于形成稳定的纳米结构及其纳米器件.利用这些技术,我们制备出了稳定的纳米量子线和纳米量级的台面.在金属材料(包括 Au, Pt, Ni, Ti, Cr)的腐蚀特性研究中,我们掌握和发展了利用常规光刻法在不同材料和不同平整度衬底上制备多种纳米金属线条栅的技术.在 $1.3\ \mu\text{m}$ 高的台阶起伏表面上制备出纳米金属线条栅.此纳米金属线条栅的长度达 $1200\ \mu\text{m}$,并经过30个 $1.3\ \mu\text{m}$ 高的起伏台阶.我们也检查了其他数条纳米金属线条栅,并未发现任何断裂的迹象.结合(1)和(2)两技术,就可制备高温的单电子晶体管.虽然这些技术都是基于常规原理发展起来的,但它们在纳米结构及其器件的制备中有非常广阔的应用前景.因为它不需要昂贵的先进设备(如电子束光刻系统等),只是利用常见的但未引起重视的工艺现象、原理,就能制备出性能稳定的并适合集成应用的纳米器件和单电子晶体管.可见,挖掘常见的但未被引起重视的工艺原理及技术,进行纳米结构的加工和纳米器件的制备,对纳米科学的研究和微电子极限器件的制备有重要意义.

常规的工艺极易对纳米器件造成损伤,优化设计纳米器件的结构及加工过程是制备性能稳定纳米器件的关键.较其他实验室制备的一维电子气的量子线,我们制备的量子线的耗尽宽度更小.一般制备的量子线的耗尽宽度为 $400\ \text{nm}$,而我们制备的量子线的耗尽宽度可减小到 $100\ \text{nm}$ ^[6].

在寻求纳米加工技术突破方面,我们经过系统的工艺研究,进一步改进了现有的纳米加工工艺系统,获得了一些好结果,并利用实验中发现的新原理、新现象进行了纳米结构的加工和单电子器件的制备.利用常规原理,我们制备了非常理想的金属栅.在此基础上,我们利用新原理改变现有的工艺条件,制备出线条金属栅,发现此线条金属栅的尺寸可大大缩小.利用这一技术,制备出了线宽仅为 $6\ \text{nm}$ 的线条金属栅.这是先进的电子束光刻技术都难以实现的纳米结构.进一步发展该技术,我们制备出了间距为 $10\ \text{nm}$ 的“纳米电极对”.相对国外制备的“纳米电极对”来说,我们的“纳米电极对”更完美、更适合应用,因为它呈圆弧状且电极对间的间距等同. $10^{-3}\ \text{V}$ 的偏压可在电极对间产生 $10^5\ \text{V/m}$ 的强均匀电场,这在研究单个 DNA 分子的光、电特性方面有重要应用,对未来生物芯片技术的发展也会有大的推动作用.制备“纳米电极对”阵列可实现生物芯片的微型化,而微型化的生物芯片是实现生物体内信息原位探测和分析的必要工具.单分子光谱以及单分子器件研究是最有应用前景的领域之一.目前为止,研究它们还仅仅依靠扫描隧道显微镜或原子力显微镜等手段.利用“纳米电极对”技术,可制备出稳定可靠便于研究的单分子器件.在此基础上,可系统研究单分子的光电特性并开展其应用研究,寻求该领域的新突破.

量子点是单电子器件最基本的元素,制备高温单电子器件关键就是使其量子点尽可能小.因而稳定、小尺度纳米结构的实现是制备高温单电子器件的关键.利用上面我们创立和发展的纳米加工技术,我们实现了多种适用型的纳米结构并将它们制成了高温单电子器件.我们也利用量子点的自组装技术,制备了具有量子点串结构的单电子器件.这些量子点的有效尺寸都小于 $15\ \text{nm}$,因而这些单电子器件都可工作在 $77\ \text{K}$ 以上.这些器件的成功制备是我们研究单电子器件在微电子集成和光电子集成应用上的关键一步.

我们利用“纳米电极对”技术制备了能在 $90\ \text{K}$ 工作的 Si 单电子晶体管.它主要由(1) Si,(2) $400\ \text{nm}$ 埋层 SiO_2 , (3) $60\ \text{nm}$ Si, (4) $80\ \text{nm}$ SiO_2 , (5) 金属栅等层组成.它不同于一般的单电子晶体管,点接触式的沟道有利于形成极小的量子点,从而大大提高它的工作温度.更重要的是,自洽形成的点接触式平面栅能使多量子点的单电子晶体管变成具有单一量子点的单电子晶体管,使单电子晶体管的工作特性更理

想化。“纳米电极对”间的间距为 70nm 的单电子晶体管显示了非周期性的库仑振荡。使用“纳米电极对”的负偏压挤压点接触式的沟道,库仑振荡逐渐变得规则,并在 -116mV 偏压下,库仑振荡完全变成周期性的振荡。当其间距为 10nm 时,-60mV 的偏压就能使单电子晶体管显示清楚的周期性振荡。随温度的提高,库仑振荡的幅度减小,但周期不变。在 90K 温度下,其库仑振荡仍能清楚可见。这说明了点接触式平面栅在实现高温理想单电子晶体管的重要作用以及它在集成单电子方面的应用。《Appl. Phys. Lett》审稿人对这一工作给予了较高的评价。他认为:这是目前一种最简单可靠的单电子晶体管的制备技术,有非常大的实用价值。

单电子器件极低的功耗可解决集成化不稳定因素问题。它的高度集成化程度可远远超越目前大规模集成化的极限,并能达到海森伯不确定原理设定的极限而成为将来不可被取代的新型器件。我们以前的实验结果表明:单电子器件的集成化将依赖于各原器件的无线耦合^[7],这与传统的大规模集成电路原理不同。实现单电子晶体管功能的必经之路就是要集成单电子器件或将单电子器件与传统器件集成。我们在这方面的研究主要分为两方面:(1)原位集成^[8],(2)组装集成。在原位集成方面,我们利用分子束外延技术生长了含 7 层的量子点串的调制掺杂二维电子气样品,利用“纳米电极对”技术对样品进行加工,制备出了室温的单电子器件。单电子从一电极经过 7 个竖直串接的量子点阵列,通过二维电子气层,再隧穿经过另一旁的 7 个竖直串接的量子点阵列,最后回到另一电极。在这些结构中,横向量子点间的间距大于 70nm,因此量子点间的横向耦合可不考虑。这实际上可看成 14 个单电子晶体管的串联集成。在组装集成方面,我们以前的做法是将两单电子晶体管集成在一起^[8],它们间通过悬浮栅的电容耦合而相互作用。现在我们实现了单电子晶体管的剥离并正在研究它的组装。这种组装集成方法较前种方法有更大的灵活性:单电子晶体管间靠范德瓦尔斯力结合在一起,因而有很大的可易性。

单电子器件另一方面的研究是将其应用到光子领域并制备成单光子器件。在我们去年正式提出用单电子器件研究单光子器件的时候,国际上还无单光子器件的文章和数据报道。不过,现在已有三个课题组报道了他们研制的单光子器件。我们通过(1)

光刻方法,(2)分子束外延量子点自组装方法,来研制单光子器件。这两方面的工作都还处于研究的初始阶段。将一单电子晶体管和一单空穴晶体管集成在一起,电子和空穴分别从不同沟道注入到同一量子点中。由于库仑阻塞作用,每次只能有一个电子和一空穴注入到量子点中且量子点中也只能有一个电子和一个空穴,并复合发出单个光子。正由于库仑阻塞作用,电子和空穴的注入都分别是相关的,因而发出的单光子是相关的。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光激发来实现,栅偏压的调控由共振远红外光代替。通过调节远红外光的强度和频率,来控制输出光子的强度和频率。这种晶体管的输入信号是单光子而输出信号也是单光子,具有非线性(光子能量变化)和(光子能量或光子数)放大作用,我们把它称为单光子晶体管。它克服了传统电子晶体管的“瓶颈”问题和“时间倾斜”问题,具有很高的信噪比。它是单电子晶体管 and 单空穴晶体管的一种组合、集成。我们在研究单电子晶体管集成方面有很好的经验,目前正在发展单光子的探测技术和研制超快速无电流数字处理器。利用能带工程将它们集成在一起,就可用来研究单光子晶体管的集成原理。以单光子晶体管作为最基本单元构成的单光子计算机较目前正在研究的几种量子计算机有更多的优点,因为它可保持更长的相干时间,不发生退相干。另外,它是用现代超规模集成技术制备的,因而这种计算机将有非常强的生命力。

总之,我们建立了单电子器件的制备工艺系统和单电子器件的分析测量系统,在纳米结构制备和加工方面取得了创新的结果,进一步发展以“纳米电极对”为基础的单电子器件以及它们的应用研究是我们现在的主要任务。实现微电子和光电子在单电子器件上的统一是我们的长期目标。

参 考 文 献

- [1] Matsamoto K *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 68 :34
- [2] Fujisawa T *et al.* Appl. Phys. Lett., 1993, 63 :51
- [3] Horiguchi N *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71 :2294
- [4] Wang T H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69 :406
- [5] Ishikuro H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 68 :3585
- [6] Fu Y *et al.* J. Appl. Phys., 2001, Jan. 1
- [7] Wang T H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71 :2499
- [8] Wang T H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2001, Feb. 5