

镱量子点实现单电子晶体管方法

郭荣辉¹, 赵正平¹, 郝跃¹, 刘玉贵²,
武一斌², 吕苗²

(1. 西安电子科技大学微电子研究所 陕西 西安 710071;
2. 河北半导体研究所 河北 石家庄 050051)

摘要: 研究了一种新型的镱量子点单电子晶体管,它是利用电子束直写系统的高分辨率和分子束外延设备的高度可控生长方法得到的. 实现了在纳米电极间隙上生长镱量子点. 该结构由量子点充当单电子晶体管的库仑岛,构成了多岛结构的单电子晶体管.

关键词: 单电子晶体管; 库仑阻塞; 量子点

中图分类号: TN303 文献标识码: A 文章编号: 1001-240X(2006)02-0186-04

A novel SET process with Indium quantum islands

GUO Rong-hui¹, ZHAO Zheng-ping¹, HAO Yue¹, LIU Yu-gui²,
WU Yi-bin², LÜ Miao²

(1. Research Inst. of Microelectronics, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: A new Single-electron Transistor with Indium Quantum Dots is presented. By virtue of the high resolution of the EBL and the accurately controllable growth of the MBE, Indium Quantum Dots are grown in the nanometer gap of the electrodes. With these Indium quantum dots as coulomb islands, a kind of SET with multi-islands is prepared, and the coulomb blockade effect is observed successfully.

Key Words: single-electron transistors; Coulomb blockade; quantum dots

单电子晶体管(SET)是一种极有希望成为未来VLSI的量子效应器件,它利用导体或半导体的小尺寸效应(大的库仑充电能),依靠量子隧穿和库仑阻塞效应之间的竞争实现单个电荷的控制转移^[1~5]. SET具有小尺寸(10 nm以下)、低功耗(器件导通电流小)、高速度、特殊的伏安特性曲线(库仑台阶,能实现多值逻辑)的特性. 目前困扰SET发展的主要因素是制作工艺和工作温度的问题. SET的结构类似MOS器件,它是由一个库仑岛(量子点)通过隧道结和源、漏电极形成弱连接,并通过电容和另外的栅极耦合形成的. 其核心结构是能够和漏源发生电子隧穿的库仑岛,岛的库仑充电能 $E_c = e^2 / (2C)$ (e 是基本电荷, C 为库仑岛的电容,包括自电容与其他电极之间的互电容)能够抑制电子在岛和漏源电极之间的转移. 当热起伏能 $E_T = kT$ (k 是玻耳兹曼常数, T 为温度)和库仑充电能 E_c 可比时,热能将克服库仑阻塞,使电子可在不受栅极控制的情况下在岛和漏、源之间隧穿转移,使SET失效. 提高SET的工作温度就是设法提高库仑阻塞能,使其远远高于工作温度下的热起伏能,一般是减小库仑岛的尺寸,进而减小岛的自电容以提高 E_c ,也有使库仑岛和漏、源电极错开以减小隧道结电容来提高 E_c 的方法^[6]. 由于岛的尺寸达到纳米级,通过光学光刻等传统半导体工艺很难做到纳米尺寸的精度,因此许多新的SET制作方法被提出来. 主要为:①边缘错开^[6];②掩模斜蒸^[7];③二维电子气静电约束^[8];④扫描探针显微镜直接纳米氧化^[9];⑤金属团簇沉积^[10]等. 这些制作工艺主要是设法减小库仑岛的尺寸,获得适当厚度的隧道结以提高工作温度.

收稿日期 2005-04-05

基金项目 国家部委科技重点基金支持项目(51432030101DZ2302)

作者简介 郭荣辉(1972-),男,西安电子科技大学博士研究生.

笔者研究了一种采用镱量子点薄膜的 SET 制作方法,结合电子束直写系统(EBL)的高分辨率和分子束外延设备(MBE)的精确可控生长优势,实现了一种新的 SET 结构。

1 SET 实现方法

实现 SET 可分为两步:第 1 步是利用 EBL 制作纳米间隙的漏源电极,在热氧化的硅衬底上,通过 EBL 光刻、磁控溅射和金属剥离制作 Ti/Au 电极;第 2 步是利用 MBE 在有电极图形的基片上生长镱量子点,落在电极间隙的镱量子点和漏、源电极形成了单岛或者多岛结构的单电子晶体管。其中的关键工艺包括电子束直写电极和镱量子点的生长,笔者分别对这两个关键工艺进行了工艺实验,获得了可靠的设计数据。首先在高阻硅衬底上热氧化生长 200 nm 二氧化硅,通过 EBL 光刻获得源、漏、栅电极图形,磁控溅射 Ti/Au 并剥离做出漏、源、栅电极,然后采用通常的光刻剥离工艺做出测试电极,最后 MBE 外延生长镱量子点。其中 EBL 制备源、漏、栅电极和 MBE 生长镱量子点是关键工艺,针对这两步工艺进行了工艺试验,试验结果如下。

1.1 电子束直写制备电极实验

漏、源、栅电极的间隙是一个关键参数,合适的电极间隙是获得弱耦合隧道结的必要前提。由于间隙是纳米级的(要求在 20 nm 以下),一般光学光刻远不能满足线条精度。笔者采用莱卡 VB5 型电子束直写系统(EBL)来获得细线条,EBL 的分辨率和电子束的剂量、能量、束流等参数以及显影条件有关。电子束的能量越大,穿透能力越强,衍射越小,束流越大,电子束斑的直径越大,剂量越大,对光刻胶的曝光作用越强。采用不同的 EBL 参数进行了大量试验,试验条件和结果如表 1 所示。

表 1 EBL 实验条件和结果

序号	阳极电压/kV	束流/nA	曝光剂量/($\mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$)	分辨率/nm
1	20	8	900	119
2	50	4	900	78
3	100	2	900	49
4	100	2	600	43

经过控制 EBL 剂量、电压和选取合适的电子束光刻胶,可把小电极间隙控制到 50 nm 以下。但对 SET 而言,要得到大的库仑充电能,这样的间隙仍然太大。笔者提出了欠显影与等离子去胶相结合的方法,有效地解决了在显影过程中图形的变形和外扩。具体方法是,在显影时缩短显影时间,使图形不完全显透,接着通过等离子去胶,均匀地把胶刻去一层,把图形完全暴露出来,这样就有效地控制了显影时图形外扩。通过这种技术,并采用表 1 第 4 组实验条件,把分辨率降到如图 1 所示的 20 nm 以下。

1.2 镱量子点的生长实验

由于要求岛的尺寸很小,结合 MBE 的精确可控(分子层)慢速生长的特点,经过不同材料和不同生长时间的对比研究,在二氧化硅表面上生长量子点作为岛。这种量子点的生长主要是依赖于衬底材料和量子点材料之间的浸润性,当材料内部的化学键和分子力大于两种材料之间的化学键强度时,会在生长过程中产生应力积累,最后导致晶格破裂,释放应力形成一个个小岛。并不是所有材料都适合量子点的生长,笔者选择了镱和铝源进行试验,其中 Al 材料的试验结果并没有得到量子点,这是由于铝的应力小,并且应力很容易通过金属原子的滑移释放,同时和衬底材料黏附性较好,更适合成膜。

为了让镱原子快速在衬底上冻结,衬底不加热。量子点的尺寸比较均匀,密度比较大,适合 SET 的制作。在生长量子点时,衬底表面应预处理,去除有机物等表面污渍,形成洁净的表面。

经过分析,发现在短时间 MBE 生长镱实验中,镱量子点的尺寸和密度随着生长时间的增长而增大(如图 2 所示)。28 s 的样品,量子点的尺寸较小,而点之间的距离较大;81 s 的样品密度较大,点之间的距离较小,但点的尺寸较大;55 s 的样品点的尺寸和点之间的距离接近多岛单电子晶体管的要求。为了得到大的库仑充电能(要求点的尺寸要尽量小)且保证电子能够在点间隧穿(点之间的距离要尽量小),笔者选取了 40 s 的生长时间,这时的镱量子点的 SEM 照片如图 3 所示。

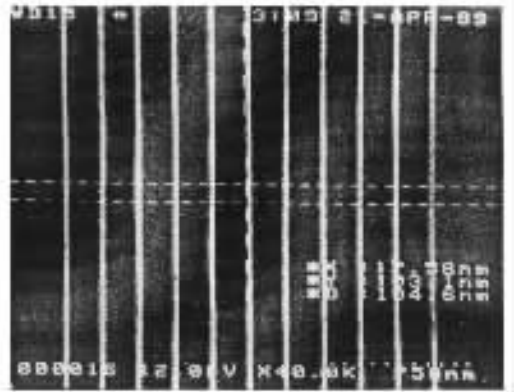


图 1 通过 EBL 光刻试验获得的 17 nm 的线条

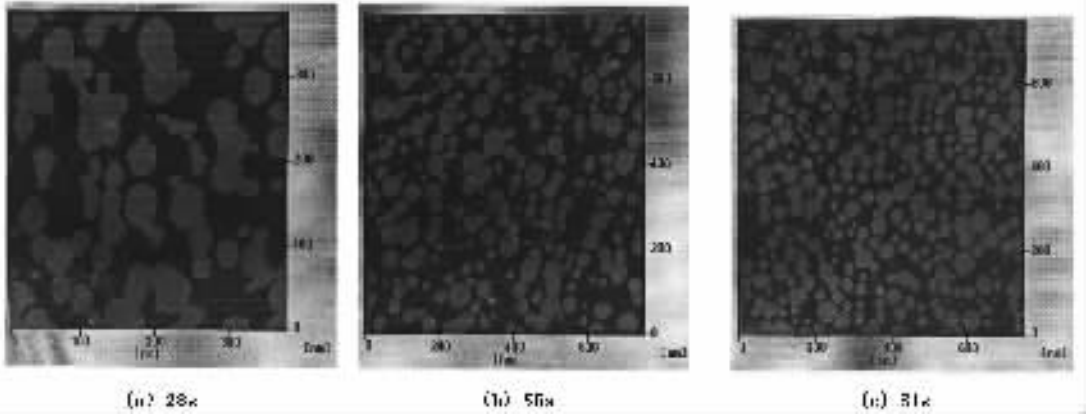


图 2 不同生长时间的 MBE 生长 InAs 量子点图像

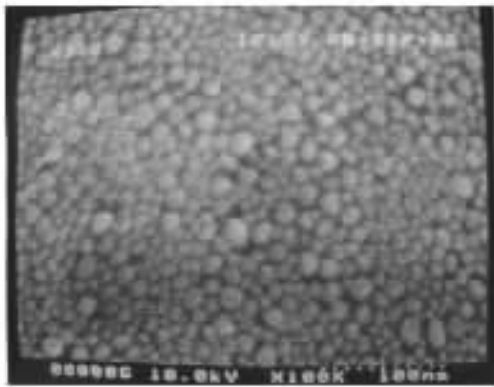


图 3 MBE 生长 40 s InAs 量子点的 SEM 照片

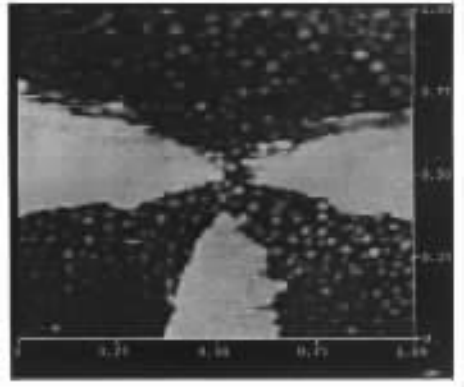


图 4 InAs 量子点多岛单电子晶体管的 AFM 照片

2 单电子晶体管的实验结果

栅、源、漏电极材料采用 20 nm 厚的 Ti/Au, 兼顾导电性和附着性, 通过磁控溅射得到致密性好的导电层. 由于电极尺寸很小, 剥离时有一定的难度, 通过合适的布局和线条渐变的设计来方便剥离, 这样通过超声剥离可得到很洁净的 SET 电极. 图 4 是制备的 InAs 量子点多岛晶体管的原子力显微镜照片.

为了便于压焊, 测试电极采用 300 nm 厚 400 μm 宽的 Ti/Au 薄膜. 采用金属管壳封装, 点焊封帽. 将 InAs 量子点单电子晶体管放入盛有液氮的杜瓦瓶中, 保持 77 K 的低温和对环境信号的屏蔽. 用 Keithley 6485 检测了 InAs 量子点单电子管的输出特性, 得到了明显的单电子特性, 并且测量的库仑阈值电压比较大, 大约为 0.5 V (图 5) 同时抑制了 Co-tunneling 效应. 这说明该样品是多岛结构的单电子晶体管, 由于是多个隧道结串联, 因而有比较大的库仑阈值电压, 而且多隧道结串联能很好地抑制 Co-tunneling 效应.

然后将测试样品进行了解剖并采用 AFM 观察, 发现试验所得的 SET 样品既有单岛结构也有多岛结构, 且样品的库仑阈值电压差别也较大. 这主要是因为 InAs 量子点的尺寸从几纳米到 30 nm, 因此, 进一步的工作将是探索各种材料和生长条件, 生长颗粒尺寸更小、密度更大、粒径更均匀的量子点.

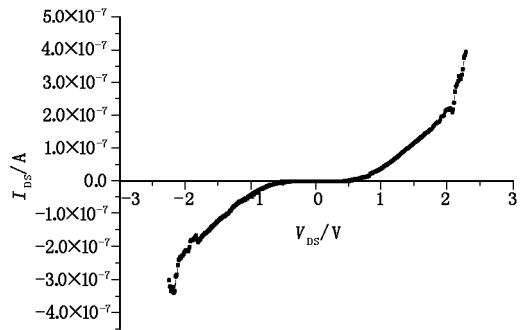


图 5 InAs 量子点多岛电子晶体管的输出特性曲线

3 结束语

利用 EBL 直写和欠显影技术得到了 20 nm 间隙的小电极, 采用 MBE 在 SiO₂ 基片上实现了颗粒小、密度

比较均匀的镉量子点. 用镉量子点充当库仑岛制作了单岛和多岛结构的 SET, 在 77 K 下观测到了明显的库仑阻塞现象. 灵活地利用量子点生长技术并和其他工艺结合起来, 特别适合单电子器件的试验研究, 而且为纳米电子器件和纳米光电子器件提供了新的工艺方案.

参考文献:

- [1] Gordon D G, Montemerlo M S. Overview of Nanoelectronic Devices[J]. Proceedings of the IEEE , 1997 , 85(4) : 521-540.
- [2] Keyes R W. Miniaturization of Electronics and Its Limits[J]. IBM J Res Develop , 1988 ,(1) : 24-28.
- [3] Likharev K. Semiconductor Single-electron Devices and Circuits[M]. New York : Stony Brook , 1996.
- [4] Ahmed H, Nakazoto K. Single-electron Devices[J]. Microelec Eng. , 1996 , 32(1-4) : 297-315.
- [5] Du Lei, Zhuang Yiqi, Jiang Wenping. Anumerical Analysis of the I-V Property of Single Electron Transistors[J]. Journal of Xidian University , 2002 , 28(2) : 153-156.
- [6] Langheinrich W, Ahmed H. Fabrication of Lateral Tunnel Junctions and Measurement of Coulomb Blocaade Effects[J]. Japanese Journal of Applied Physics , 1995 , 34(12B) : 6956-6960.
- [7] Fulton T A, Dolan G J. Observation of Single-electron Charging Effects in Small Tunnel Junctions[J]. Physical Review Letters , 1987 , 59(1) : 109-112.
- [8] Meirav U, Foxman E B. Single-electron Phenomena in Semiconductors[J]. Semiconductor Sciece and Technology , 1995 , (10) : 255-284.
- [9] Matsumoto K, Ishii M, Segawa K, et al. Room Temperature Operation of a Single Electron Transistor Made by the Scanning Tunneling Microscope Nanooxidation Process for the TiO_x/Ti System[J]. Applied Physics Letters , 1996 , 68(1) : 34-36.
- [10] Janes D B, Kolagunta V R, Osifchin R G, et al. Electronic Conduction Through 24 Arrays of Nanometer Diameter Metal Clusters[J]. Superlattices and Microstructures , 1995 , 18(4) : 275-282.

(编辑 : 郭 华)

(上接第 168 页)

4 结 束 语

用于无源定位的调频广播信号可能存在短暂的间歇, 此时系统中用于杂波抑制和相干脉压的参考信号带宽较低, 降低了目标检测的距离分辨率. 检测出参考信号的调制间歇后对应位置置零, 可得到更高带宽的参考信号, 用新得到的参考信号作相关脉压可得到更高的距离分辨率.

参考文献:

- [1] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 234-343.
- [2] 曲长文, 何 友. 基于电视和调频广播的非合作式双(多)基地雷达及关键技术[J]. 现代雷达, 2001, 23(1) : 19-23.
- [3] Afrndykiw M, Boyle J M, Hendrix C E. Bistatic Passive Radar[P]. United States Patents : 3812493 , 1974-03-21.
- [4] Howland P E. A Passive Metric Radar Using a Transmitter of Opportunity[A]. International Conference on Radar 1994[C]. Paris : Soc Electr & Electron , 1994. 251-256.
- [5] Howland P E. Television-based Bistatic Radar[D]. UK : School of Electronic and Electrical Engineering , University of Birmingham , 1997.
- [6] Howland P E. Target Tracking Using Television-based Bistatic Radar[J]. IEE Proc -Radar , Sonar Navigation , 1999 , 1146 (3) : 166-174.
- [7] Nordwall B D. Silent Sentry—a New Type of Rada[N]. Aviation Week & Space Technology , 1998-11-30.
- [8] Lanterman A D. Tracking and Recognition of Airborne Targets Via Commerical Television and FM Radio Signals[EB/OL]. www. ifp. uiuc. edu/ ~lanterma , 1999-03-11.
- [9] Zhao Hongli, Bao Zheng, Wang Jun. Stationary Target Cancellation and Moving Target Detection under the Condition of Continuous FM Signals[J]. Journal of Xidian University , 2001 , 28(sup) : 25-28.
- [10] 白居宪. 时-频分析 理论与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998. 16-17.
- [11] 曾兴雯, 刘乃安, 陈 健. 高频电路原理与分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.

(编辑 : 郭 华)

