

硅量子线的研究^①

(1995年1月25日收到)

施毅 刘建林 汪峰 张荣 韩平 顾树林 郑有焯

(南京大学物理系 南京 210093)

茅保华

(南京电子器件研究所 南京 210016)

摘 要

利用常规硅工艺的反应离子刻蚀、各向异性化学腐蚀、热氧化和超低压 CVD 生长技术, 成功地在硅单晶衬底上制作了硅/二氧化硅异质界面结构超精细硅量子线。本项研究结果对开展低维量子结构物理及硅量子器件的研究具有十分重要的意义。

关键词: 量子线, 硅, 二氧化硅, 硅工艺

一、引 言

下世纪初, 硅集成电路将进入线宽小于 0.1 微米的图形范畴, 从微电子发展到纳(米)电子(Nano electronics)。通常把这种尺度在纳米量级的超精细线状硅材料称为“硅量子线”。在这样的微细线结构材料中, 电子(或空穴)的运动只能沿长度方向上进行, 在其它两个方向上受到量子尺寸限制, 由此将产生各式各样内涵深刻的物理效应, 器件的工作模式亦将发生变革^[1,2]。硅量子线作为纳电子学的基础, 对发展特大规模集成电路(Ultra large scale integrated circuits)和开拓新一代硅量子效应器件具有十分重要的意义^[3];同时, 这种人工设计的一维微结构材料的能带结构不同于天然硅材料, 可望获得高的发光效率, 用于发展硅基集成光电子技术, 在信息高速公路中得到应用^[4]。因此, 硅量子线具有极强的现实意义和应用前景, 已成为当前国际半导体科学技术研究的热门领域。目前, 开展这一领域研究工作的关键是如何以最可控制的方法制作这种超精细微结构, 并进行物理和器件的研究。近几年, 国际上采用先进的材料生长手段和各种亚微米级以至纳米级的超微细加工技术, 尝试了许多制作量子线的方法。例如, 采用电子束曝光和反应离子刻蚀形成垂直于衬底的硅微柱, 或用分裂栅进行电调制等。本文报道采用常规硅技术通过反应离子刻蚀、各向异性化学腐蚀, 特别是控制热氧化过程以及超低压 CVD 生长技术, 在国内首次成功地在硅单晶衬底上制作出超精细硅量子线。

二、硅量子线的制作及结构

图 1 是这种硅量子线的透视示意图。它四周被二氧化硅封闭, 是一种以二氧化硅为势垒, 硅/二氧化硅异质界面起着量子限制作用的单晶硅量子

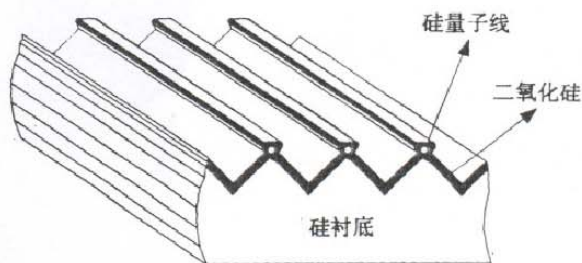


图 1 硅量子线结构示意图

^① 国家攀登计划和国家自然科学基金资助项目

线, 它被平置在硅衬底表面上, 这对进行物理和器件研究极为有利。

硅量子线的制作是在硅(100)单晶衬底上通过热氧化、反应离子刻蚀和各向异性化学腐蚀, 在衬底上刻蚀出的横截面为倒置三角形硅线, 它们处在衬底锯齿的顶部, 此时尚未与衬底分离。图2给出了刻蚀样品(011)横截面的扫描电镜观察照片。然后采用热氧化处理, 对硅线进行细化, 同时, 形成硅/二氧化硅异质界面, 量子线完全与衬底隔离, 并消除刻蚀过程带来的表面损伤。实验研究发现, 超细微尺寸的硅材料存在着自限制氧化效应, 通过改变氧化温度可以非常有效地控制量子线的最终尺寸。图2(b)是热氧化后样品(011)横截面扫描电镜观察照片, 可以清楚地看到超精细的硅量子线已经形成, 完全包含在热氧化形成的二氧化硅层内。这里量子线尺寸小于20纳米。



图2 样品横截面 SEM 观察照片

(a) 氧化前的刻蚀结构 (b) 热氧化后形成的量子线

三、硅量子线的特点

我们研制的这种硅/二氧化硅(Si/SiO₂)异质界面结构的硅量子线具有以下特点:

1. 量子线由晶体结构高度完整的单晶硅构成, 并采用热氧化形成的高质量硅/二氧化硅异质界面结构;
2. 由宽带隙二氧化硅形成的 Si/SiO₂ 异质界面结构的量子线对电子(或空穴)具有很高势垒;
3. 利用氧化自限制效应, 通过选择热氧化条件能有效地控制硅量子线的尺寸;
4. 量子线具有确定的位置和尺寸, 有利于进行物理性质和器件研究;
5. 它与硅集成工艺高度兼容, 便于制作和推广;
6. 可用于特大规模集成电路中制作各种硅量子器件。

以上这些特点将使这种硅/二氧化硅异质界面结构的硅量子线具有优良的低维物理特性和广阔的应用前景。