



锗硅异质结构的分子束外延生长和特性研究

卫星

· 现代物理知识 ·

编者按:

此篇系本刊特约稿,由著名物理学家谢希德先生审定,其评语是:“卫星同志这篇文章写得清晰明了,对于不从事这方面工作的读者是个有益的介绍”。

作者卫星,1968年生。1986年获第17届国际物理奥林匹克竞赛铜牌奖,同年入复旦大学物理系,1990年进复旦大学应用表面物理国家实验室从事锗硅分子束外延的研究,已在国内外学术刊物和会议上发表论文数篇,1992年获硕士学位。

卫星现为复旦大学物理系教师,1986年、1991年两次荣获李政道物理奖学金,1992年获中国真空学会颁发的“1991年真空科学优秀硕士生奖”。

如果你有机会到复旦大学应用表面物理国家重点实验室来参观,走进分子束外延组,隔着宽敞的玻璃窗,你将看到一台大型实验设备。中间是三个大小不等、银光闪闪的超高真空腔体,上边接满了一根根电缆线,还有液氮管道、冷却水管、压缩空气管,一眼望去真有点叫人眼花缭乱;四周是几只高大的机柜,安装着一台精密电子仪器。这就是我国第一台锗硅分子束外延设备,已经在这里服役六年多,状态良好,至今仍是国内唯一投入运行的IV族半导体材料的分子束外延系统,为我国在IV族半导体超晶格量子阱的某些研究领域保持世界先进水平立下汗马功劳。

何谓分子束外延?超晶格量子阱又是怎么回事?这些都是近二十年内才逐步发展起来的,而涉及到IV族半导体材料硅和锗则仅有大约十年的历史。分子束外延简称MBE (molecular beam epitaxy),是一种独特的半导体外延工艺,其外延生长是在超高真空环境中,通过对固体源的蒸发来实现的。与通常的外延工艺相比,分子束外延具有较低的生长温度,对成分和厚度能进行精确的控制,能够进行薄到几个甚至一个原子单层的外延,特别适合于异质外延,即在一种半导

体衬底材料上生长另一种半导体材料。分子束外延还易于实现复杂的掺杂分布,对于研制实用器件是极为有利的。

利用这一高新技术,人们制备了各种各样具有新型人工结构的半导体材料,包括半导体超晶格量子阱。说起超晶格量子阱,还得从半导体的电子结构讲起。每种半导体材料都具有其特定的能带结构,当不同的半导体材料连接在一起时,在界面就存在所谓“能带偏移”(band offset),其结果等效于对电子或空穴人为地引入一个阶梯形势场。如果把电子能量较低的半导体薄层(厚度几到几十纳米)生长在两种电子能量较高的半导体材料中间,那么就能把电子约束在这一薄层中,就象一个井,被称为“量子阱”,这是因为在如此微小的尺度下所有现象只有借助于量子力学才能进行正确的描述。而多个存在耦合的量子阱作周期性排列就成为一种“超晶格”结构。利用分子束外延等技术,人们可以在原子级尺度上设计、制作异质结量子阱超晶格,对半导体能带进行“剪裁”。这些新技术新概念为凝聚态物理开拓了一个全新而广阔的领域,呈现出许多物理内涵丰富的新现象、新效应,并被用来开发具有新原理、新结构的固态

电子、光电子器件,对相关的高技术产业产生着重要影响。在过去的十到二十年内,美、日、西欧等科技先进国家高度重视半导体超晶格物理、材料和器件的综合性基础研究和应用开发,使之很快成为整个半导体科学技术中的发展主流。

IV族元素半导体硅和锗是迄今为止人们研究最为透彻,工艺最为成熟的半导体材料,广泛应用于当代科学技术和工程系统的各个方面。尤其硅储量极为丰富,可以说是取之不尽用之不竭,而以硅为基础的超大规模集成电路工艺更使之体现出得天独厚的优越性。但是由于硅熔点高,不能使用常规的辐射加热蒸发,加之在超高真空系统中获得理想衬底表面的某些具体困难,因此硅分子束外延技术发展较晚,早期的分子束外延多数集中于III-V族化合物半导体材料。直到八十年代中期,锗硅材料的分子束外延技术逐步成熟,有关锗硅异质结构的研究工作才迅速发展起来。

复旦大学应用表面物理国家重点实验室是我国最早开展锗硅分子束外延的单位,1986年建立了锗硅分子束外延设备,生长锗硅超晶格、量子阱等异质结构,填补了国内在这方面的空白。经过长期探索,我们已经在材料的生长技术和结构完整性方面达到国际先进水平。

首先介绍一下锗硅分子束外延设备,其主要结构如图1所示。样品生长是在超高真空室中进行的,背景真空度达 6×10^{-9} Pa,生长时由于样品和源的加热放气使真空度有所下降,但在液氮及循环水的冷却下真空度仍可以维持在 1.3×10^{-7} Pa。Si和Ge的蒸发源分别放在电子束蒸发器的水冷坩埚内,由安装在坩埚下方的电子枪产生的10KeV

高能电子束经偏转磁场作 270° 偏转, 聚焦在蒸发源上, 使源的中央部分熔融而蒸发。Si、Ge 束源上方分别装有气动挡板, 控制束流的开启和关闭。束流强度由两只石英晶体振荡器分别监测, 而束流强度的调节则通过改变电子束加热功率来实现。样品衬底由样品背后的灯丝辐射加热, 用热电偶测温。样品底座能够自转, 提高了加热均匀性和外延厚度的均匀性。生长室中还配备反射式高能电子衍射, 可对样品生长作原位检测。与生长室相联的分析室中还有俄歇电子能谱仪和二次电子成像等在线测试设备, 可以对

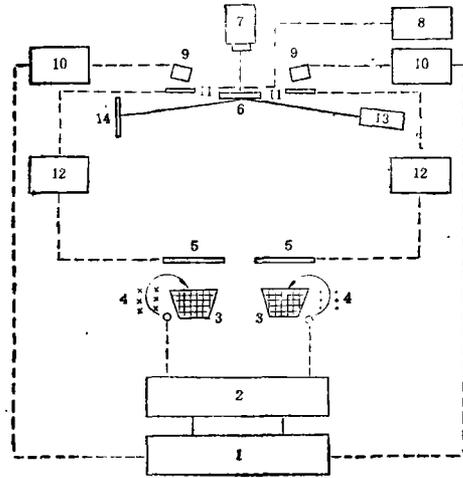


图 1 锗硅分子束外延系统示意图

1. 微处理机 2. 电子枪束源
3. 挡板 4. 偏转磁场 5. 束源挡板
6. 样品 7. 样品旋转控制
8. 样品加热控制 9. 测厚石英晶体
10. 振荡器 11. 石英晶体挡板
12. 挡板气动阀门控制
13. RHEED 电子枪
14. RHEED 荧光屏

样品表面的形貌和化学成分进行分析、研究。

Si 和 Ge 的晶体结构均为金刚石结构, Si 的晶格常数为 0.543nm , Ge 为 0.566nm , 晶格失配为 4.2% 。 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金的晶格常数介于 Si 和 Ge 之间, 与 x 有近似的线性关系。尽管 Ge/Si 和 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 都是晶格失配较大的体系, 但是研究表明, 当异质外延层不很厚时, 能够实现“共度”生长 (commensurate growth, 又称 pseudomorphic growth 即“赝晶”生长), 也就是说, 外延层通过弹性形变自动地向衬底材料的晶格常数“看齐”。例如将 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 生长在 $\text{Si}(100)$ 衬底上, 外延层将在横向压缩而在纵向伸长, 发生四角畸变(图 2), 其外延层

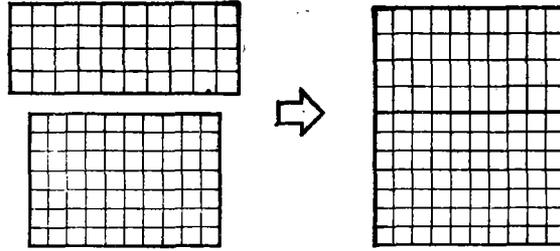


图 2 晶格失配体系的共度生长

的应变通常不小于 1% 。我们知道, 单晶 Si 和 Ge 都具有很高的硬度, 很难发生弹性形变; 当弹性形变达 1% 时, 其内部应力可达 10^9Pa , 相当于大气压强的一万倍。因此这是一种亚稳结构, 只有适当地控制

生长条件, 才能得到理想的应变外延层。

这种应变的共度生长只能维持到一定的厚度, 称为共度生长临界厚度, 与晶格失配大小有关。当

外延层厚度达到该临界厚度时, 外延层就会通过产生失配位错释放积累的弹性应变能。为了得到无位错的共度外延层, 其厚度必须控制在上述临界厚度以内。可是, 要获得高完整性的应变外延层, 仅满足这一个条件是远远不够的。我们研究发现, 对于较高 Ge 含量 ($x \geq 0.3$) 的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结构, 其外延生长模式为 Stranski-Krastanow 模式, 即初期为二维层状生长, 在达到某一厚度时开始出现三维成岛现象, 这个转变厚度与 Ge 组分 x 和生长温度都有关系, 通常小于共度生长临界厚度。因此, 还必须选择适当的生长条件, 使外延层保持二维层状生长, 这有时比共度生长临界厚度的考虑更为重要。

清洁处理等。我们对进口仪器上的加热装置作了改进, 使衬底加热的均匀性大为改善。我们又发展了 Si 衬底的氢钝化处理技术, 使得暴露大气的 Si 片不被氧化, 进入真空系统的 Si 片表面吸附的氧小于 0.1 原子单层, 经过不高于 700°C 的热处理即可脱附全部氧, 碳沾污小于 0.03 原子单层。这些技术对成功地生长高完整的锗硅异质外延层都起了不可低估的作用。

从 1986 年起, 在我们的分子束外延设备上已经生长了大批锗硅超晶格、量子阱、异质结等样品, 并作了包括截面透射电子显微镜、X 射线衍射、卢瑟福背散射、拉曼光谱等多方面的测试, 结果表明样品具有极高的结构完整性, 某些测试结果在国际上也是罕见的。

图 3 是我们生长的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格的截面透射电镜照片, 可以看到一个个清晰的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层被人工地周期性地排列在 Si 材料中。图 4 为这种材料的 X 射线衍射谱。固体的 X 射线衍射相当于对其原子排列作富利叶变换, 对于单晶体材料, 其原子为严格周期性排列, 反映在富利叶频谱上就是一系列明锐的尖峰, 图 4 中最强的峰就是 Si 衬底的 (400) 衍射峰。图 3 所示的超晶格可以看作是对 Si 的周期性原子排列进行了低频的调制。熟悉无线电通信的人都知道, 被调制的波的频谱是在原有的载频近旁出现边带, 图 4 中出现在 Si (400) 峰旁边的一组伴峰正是这样一种边带, 是对 Si 的原子排列作低频的周期性调制的结果。这组伴峰的强度与理论计算符合得很好, 表明样品的结

构达到设计要求。在这种超晶格样品上所做的拉曼散射实验观察到多达9级的折叠纵声学声子,而在最近国外文献所报道同类结构的锗硅超晶格中最多只有5级折叠声子峰,这表明样品的结构完整性已达到世界先进水平。

目前我们还较好地掌握了锗硅分子束外延中的p型掺杂技术,并开始研制基于锗硅异质结构的新型半导体器件。我们在国内率先研制出 $p^+-Ge_xSi_{1-x}/p-Si$ 异质结内光电远红外探测器原型,迈出了把高新技术投入应用的第一步。

我们还积极为国内众多研究单位提供优质样品,这些单位有北京大学、南京大学、中科院北京电镜中心、中科院上海冶金所、厦门大学、

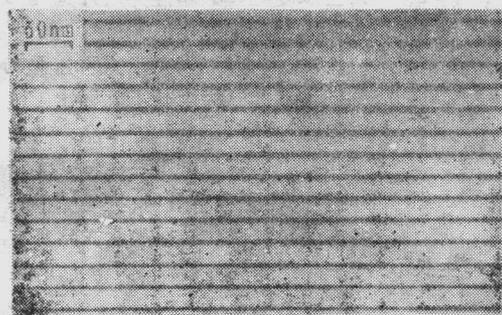


图3 Ge_xSi_{1-x}/Si 超晶格的截面透射电子显微镜照片黑色为 Ge_xSi_{1-x} ,白色为 Si

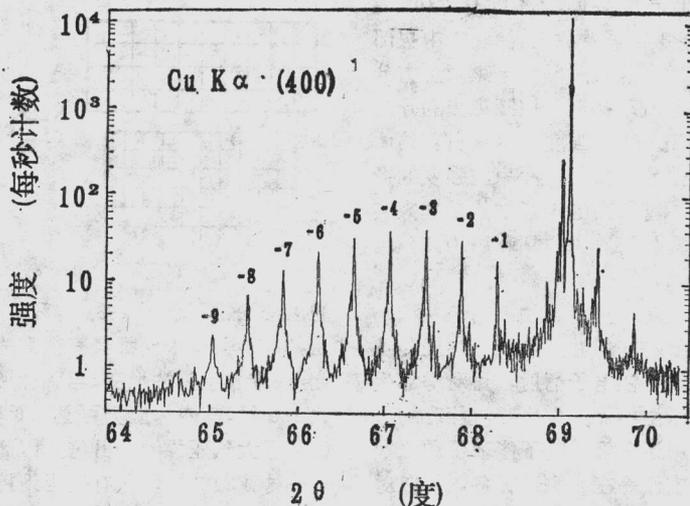


图4 Ge_xSi_{1-x}/Si 超晶格的X射线双晶衍射谱

南开大学等。目前国内各单位研究用的锗硅超晶格样品均由这里提供。各兄弟单位用这些样品完成了许多项高水平的研究工作,在国内国外学术刊物上发表论文十余篇,并一致评价样品为高质量的。

复旦大学应用表面物理国家重点实验室为我国从事锗硅超晶格量子阱的研究闯出了一条

路,奠定了坚实的基础。目前国内,正有越来越多的单位加入到这一领域中来,一个研究锗硅异质结构的高潮即将开始。有志于对半导体科学技术有所贡献的年轻朋友会在这里找到用武之地。

• 下期要目 •

- 大贺羲郎: 科学思维与对称性理论
- 马基茂, 童国梁: 欧洲粒子物理发展战略和 LHC 计划
- 李国栋: 纳米磁性功能材料

留下永久的思念

秋 埔

文裕先生悄然离去,使许多人为之悲痛。近读去年的《中国科学报》,有一篇题为《魂系教育事业》文章引起我的沉思。报载:张文裕志愿捐助“希望工程”10万元。又言:这笔饱含着老科学家生前振兴祖国教育事业心愿的捐款,是“希望工程”迄今为止收到的国内最大一笔个人捐款。

读罢心潮涌,泪水沾衣襟。在这个世界上,有钱的人不少,肯为教育事业出力的不多,像张文裕先生清贫一生,把自己全部积蓄捐赠出

来的更少。据我所知,文裕先生出生在福建惠安山区小镇一个贫困家庭,从小学起便半工半读,靠自己挣来的钱上学。他常对人们说,一个国家教育上不去,人才培养不出来,这个民族就没有希望。

文裕先生长期从事教育和科研工作,为中华民族培养大批人才,许多人成了中外科学界的后起之秀。从1958年起,他在中国科技大学担任兼职教授,主讲“普通物理”的同时,对学校的建设和学生的培养给予极大的关注。他对学生爱护备

至,热情帮助他们如何收集数据,分析数据,如何从复杂纷繁的数据中寻找有用的东西。凡有幸与他接触的人,都得到他的鼓励、帮助和指导,对他无不怀有敬慕之情。既便在晚年,在他病重甚至弥留之际,当电视屏幕出现高能所、对撞机时,他显得少有的激动,说出人们无法听清的语言……。

“有的人死了,他还活着”。张文裕先生就是这样的人。他不仅留下许许多多造福人类的科学成果,还为我们留下无法用金钱衡量的精神财富。作为他的学生,永久思念他,也永久做一个像他那样的人,把自己的一生献给中华民族。