

MeV 高能离子注入 Si 的研究*

卢武星 吴瑜光

(北京师范大学低能核物理所, 北京市辐射中心 北京 100875)

摘 要 综述了近年来低能核物理所开展 MeV 高能离子注入 Si 的研究概况. 研究工作包括深注入掩埋层物理特性分析, 新型增强退火研究, 二次缺陷的抑制与消除, 离子束缺陷工程新原理、新方法的建立和应用, 注入杂质的叠加分布与计算等.

关键词 高能注入 增强退火 缺陷工程

分类号 TN305.3

1 引 言

由于近代高技术的发展和需要, 促使离子注入技术的研究迅速向 MeV 高能区扩展^[1], 高能离子注入的研究已经成为国际上研究的前沿课题.

除了在金属等材料改性方面有重要用途而日益受到人们的重视外, 高能离子注入在半导体领域的应用其优点也最为突出. 用 MeV 能量的一些离子注入 Si 衬底或其他半导体材料, 可以形成 μm 数量级的深注入区或各种掩埋层和绝缘层. 采用不同能量的叠加注入, 更可以造就各种类型的杂质与载流子分布. 这些手段有可能开发许多新型结构的器件和电路^[2].

高能离子束轰击引起的材料改性、损伤与缺陷的机制研究还不够充分, 有待深入探讨与认识. 从本质上来看, 高能注入过程包含有丰富而复杂的物理内容. 例如, 涉及到高能离子与固体相互作用特性、晶体损伤微结构、二次缺陷的形成与抑制等. 这些研究领域一直是国内外研究工作者所共同关心的问题. 开展这些基础性研究, 将为离子注入技术开辟新的、更广阔的应用前景.

北京师范大学低能所自 80 年代后期以来, 在国家自然科学基金资助下, 开展了

MeV 高能离子注入方面的研究, 是我国较早开展此项研究工作的单位之一. 针对国际上的研究热点、难点与前沿课题, 并与国内外同行学者紧密合作, 经多年的研究, 已在此领域形成了自己的特色, 并有所创新. 所以该项研究成果已受到了许多国外学者的重视, 且被引用^[3].

2 实验工作要点

2.1 样品

通常实验工作使用 CZ 生长的 Si(100) 单晶片, p 型或 n 型, 电阻率为 $\rho = 1 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围. 实验工作之前, 将单晶片经常规抛光及化学清洗.

2.2 注入

使用本单位的串列加速器或合作单位的高能注入设备进行 MeV 高能注入, 几百 keV 的常规注入也可在本单位完成. 注入条件有随机注入或沟道注入两种.

2.3 退火处理

常用的退火条件有真空退火和氮气保护退火两种. 在真空退火时, 应保持炉子的基本压力优于 10^{-7} 托.

2.4 分析测定

涉及的测定手段主要有: (1) 用 2 MeV 的 He^+ 离子沟道背散射方法测定注入的某些重离子的杂质分布, 测定 Si 晶片的损伤和非晶

* 国家自然科学基金资助课题, 课题编号 1860113 19175006 19345006.

化及分布。(2)用截面透射电子显微术(XTEM)测定缺陷的结构及分布。(3)用扩展电阻法测量载流子浓度分布和 Van der Pavn 方法鉴定样品激活率及电特性。

3 研究工作概况

此处仅着重介绍下列一些方面的研究概况及结果,更详细的研究工作将在其他文章中报导。

3.1 深注入掩埋层的形成与分析

MeV 高能注入的重要特色之一,是在被注入 Si 晶体表面以下形成高浓度的掺杂掩埋层,使表面单晶层与掩埋掺杂层均具备良好的结晶学特性和电学特性,这是高能注入物理研究应当解决的首要任务。

在以往研究中发现 MeV 高能掺杂注入后,往往在表面单晶区出现高阻层,这种高阻层表现得十分稳定,常规的高温退火也不能将它消除,这对实际器件应用将是十分不利的。在本所的 2.0 MeV B⁺注入实验研究中,也看到了相似的结果^[4]。研究分析发现,这种现象可能与表面的损伤和杂质的补偿有关。

为消除注入 Si 晶体的表面高阻层,使有利于器件与电路的实际应用,进一步研究发现,使用适当条件的二次注入可以克服存在于表面的高阻层问题,达到改善晶体表面结构的目的。研究中,已经成功地使 2.0 MeV B⁺注入后形成的 P 型埋层结构中,既可做到消除表面的高阻层,保持良好的表面单晶特性,又可以获得具有良好电学特性的掩埋高掺杂浓度 P 型层。这些结果主要是通过平面电子衍射、Van der Pavn 霍尔测量、扩展电阻分析、沟道背散射分析以及 XTEM 等方法的分析而得到证明^[5]。

3.2 新型增强退火研究

MeV 高能离子注入可以形成深注入掺杂层,与此同时在注入掺杂峰值位置附近也存在有掩埋的损伤区。与 keV 能量的常规离子注入情况相比,高能注入所形成的损伤层

表现出更加稳定,不容易退火消除。为满足器件与电路应用的实际需要,进行新型和更为有效的退火过程物理研究是十分需要的。

在研究工作中,对比了多种退火方式对高能注入 Si 以及化合物材料的实验结果,经反复比较与探索,同时又对二次注入过程作了更多的研究与分析。在此基础上,研究了一种新的增强退火效应并且创立了基于双重注入过程的新型增强退火方法^[6]。这一新型增强退火方式在实际应用中证明是行之有效的。例如,在 MeV 高能 B⁺、P⁺、As 注入 Si (100)的实验中,都可以十分有效地用来实现对深注入层的退火。新方法克服了常规热退火对高能深注入层难以实现有效、完全退火的困难。

3.3 二次缺陷的控制与消除

高能注入造成的损伤在不可避免的后续退火过程中将迅速迁移、集聚,进而发展成多种类型的扩展缺陷,即二次缺陷。例如常见的有位错、位错环等。众所周知,此类剩余缺陷的存在将严重地损害半导体器件的品质,降低成品率。因此,开展损伤微结构和二次缺陷的形成与控制的物理研究有着重要的科学意义,并且也将为高能注入技术的有效应用开辟新的、更为广阔的途径。

在过去数年间,美、日等西方先进国家的一些著名学者和研究组都曾对 MeV 高能注入的损伤、二次缺陷的控制与抑制做了深入的探索与研究。其中,尤以 Tamura 等人的研究较为系统,他们对 B、P、As 离子注入 Si 中二次缺陷的行为进行了反复的研究。认为,由于高能注入所形成的损伤比较复杂,因此所形成的二次缺陷结构十分稳定并且难以退火消除。他们的研究结果表明,甚至在 1000℃ 的高温下,经 113 小时的极长时间的常规热退火也不能将它们消除^[7]。因此高能注入 Si 中,二次缺陷的抑制与消除的研究不仅是国际上离子注入物理研究的热点,而且也是具有重要科学意义的前沿研究课题和难点。

针对这个难点,基于基础的物理现象与

规律的研究与分析. 从考察高能注入下离子与固体相互作用过程入手, 研究了一些情况下的损伤微结构, 低、中、高质量数的多种离子注入 Si 中二次缺陷的形成阈值与判据, 以及缺陷的形成和演变规律等.

通过物理现象的研究与实验结果的分析相结合, 发现和认识到常规热退火方法存在某些局限性和不足之处. 为克服这种局限与不足, 改善高能注入下 Si 晶体结构特性, 实现对二次缺陷形成的有效抑制与消除, 研究并创建了几种用于控制二次缺陷形成的新方法. (1) 增强退火缺陷控制新方法; (2) 多重注入/退火缺陷控制新方法等. 实验证明, 该研究的新方法是简便、可行和有效的. 例如在 MeV 高能 B^+ 离子注入^[8] 和 As^+ 离子注入^[9] 的研究中, 都得到了十分理想的结果, 从而解决了一个困扰许多学者多年的技术难题.

3.4 高能重离子注入损伤与缺陷的抑制

与中等质量数的离子相比较, 在 高能、重离子注入条件下, 注入造成的损伤情况更为复杂, 因此要达到对二次缺陷的抑制与消除的目的则难度更大. 在研究中, 面对这样的难点, 系统地考察了各种不同离子注入 Si 中形成的损伤, 也就是分析测定在注入期间所产生的移位 Si 原子总数(即损伤总量). 这种考察着重针对高质量数(重离子)离子的情况, 例如 Ga^+ 、 Ge^+ 、 As^+ 、 In^+ 、 Sb^+ 等各类离子. 研究了各种不同离子注入 Si 形成二次缺陷的判据和条件, 发现二次缺陷形成与否的临界参数是晶体中注入损伤总量. 因此注入期间所产生的移位 Si 原子总数可以成为二次缺陷形成与否的客观判据. 所以在实验中正确控制注入损伤总量(即移位 Si 原子总数), 就可以实现对缺陷形成的有效控制与抑制. 据此, 研究并开创了对高能重离子注入缺陷抑制与消除的有效新方法^[10].

MeV 高能 As^+ 离子、 In^+ 离子注入 Si 的研究结果证明了这样的方法在较高剂量的高能重离子注入下, 对二次缺陷的抑制是很有意义的.

3.5 高能磷离子注入硅材料特性研究

80 年代, 一些新型的半导体器件和大规模集成电路的生产要求用高能离子注入形成隔离或埋层. 为解决应用急需, 开展了一系列的基础性研究工作: (1) 0.5~6.0 MeV 磷离子注入硅中的射程、歧离和载流子剖面分布^[11]; (2) 采用多次迭加注入在硅表面下向 μm 区域内形成平坦或其他特殊需要的剖面分布^[12]; (3) 高能 (MeV) P 离子迭加和低能 (keV) B 离子双注入硅的载流子剖面分布和退火行为研究^[13]; (4) 采用高压电子显微镜和沟道背散射方法对高能磷注入硅中的损伤情况进行了分析.

这些研究工作得到了国内外同行的关注, 在文献[13]中, 三张高能迭加注入载流子剖面分布曲线被美国微电子学中心收入软件库. 此外, 经过多次实验和调整得到的最佳剖面分布已用于微波功率器件生产中, 得到航天总公司的肯定和奖励. 最近, 又在实验工作中发现非常有趣的分形现象, 这方面的工作将继续深入进行.

3.6 离子束缺陷工程的研究和应用

“离子束缺陷工程”, 是在本所研究了一系列高能注入下的损伤和缺陷的问题并取得富有意义的结果后, 总结和提出的新概念、新思想和新方法. 在传统的研究工作中, 往往总是把注入形成的损伤与缺陷视为有害的东西和消积的因素. 所以这一研究结果将更新观念、克服传统认识的局限性, 从积极的方面去认识和利用高能注入所形成的损伤、缺陷, 化害为利, 积极地、灵活地引入新的损伤, 即利用这种损伤和缺陷之间的相互作用去解决相关的物理问题, 达到积极、有效应用的目的.

基于上述的新思想新方法, 本课题组开拓了一些新的研究工作. 例如: 有效提高掺杂激活率; 深区的损伤吸杂; 重离子、高剂量注入的缺陷抑制等. 这些研究也分别取得了不同的成果, 这也证明了“离子束缺陷工程”新概念、新方法具有很好的普遍性和科学价值. 对这一问题的更深入的研究, 有可能开拓离

子束物理应用的新领域.

参 考 文 献

- 1 Pramanik D, Current M I. MeV Implantation for Silicon Device Fabrication. *Solid State Technology*, 1984, 27: 211~216
- 2 Zidgler J F. High Energy Ion Implantation. *Nucl Instr & Meth*, 1985, B6:270~282
- 3 Holland O W, White C W. Ion-induced Damage and Amorphization in Si. *Nucl Instr & Meth*, 1991, B59/60:353~362
- 4 卢武星, 钱亚宏, 田人和等. MeV 高能 B⁺ 离子注入 Si 中二次缺陷的抑制与消除. *物理学报*, 1990, 39:254~260
- 5 卢武星, 钱亚宏, 卢殿通等. MeV 高能 B 离子注入 Si 的退火. *北京师范大学学报*, 1988, 3:22~26
- 6 Lu Wuxing, Qian Yahong, Lu Diantong et al. The Annealing of MeV Energy Boron Ions Implanted into Silicon. *Vacuum*, 1989, 39:223~226
- 7 Tamura M, Natsuaki N, Wada Y et al. Depth Distribution of Secondary Defects in 2 MeV Boron-implanted Silicon. *J Appl Phys*, 1986, 59:3417~3420
- 8 Lu W X, Qian Y H, Tian R H et al. Reduction of Secondary Defect Formation in MeV B⁺ Ion-implanted Si (100). *Appl Phys Lett*, 1989, 55:1838~1840
- 9 卢武星. MeV 高能离子注入 Si 中二次缺陷控制. *自然科学进展*, 1995, 5:371~377
- 10 卢武星, Schreutelkamp R J, Liefing J R et al. 高能重离子注入 Si 中缺陷的抑制. *物理学报*, 1995, 44:1102~1107.
- 11 Wu Yuguang, Zhang Huixing, Zhang Xiaoji et al. Ranges, Straggling and Carrier Concentration Profiles of 0.5~6.0 MeV Phosphorus in Silicon. *Vacuum*, 1990, 40:407~410
- 12 Wu Yuguang, Zhang Huixing, Zhang Xiaoji et al. Carrier Concentration Profiles in Multiply Implanted Silicon with 0.5~7.5 MeV Phosphorus. *Nucl Instr & Meth*, 1989, B59:428~432
- 13 Wu Yuguang, Zhang Tonghe, Luo Yan. The Behavior of High Energy Multiple P⁺ (0.5~7.5MeV) and B⁺ Implanted Silicon and Rapid Thermal Annealing. *Nucl Instr & Meth*, 1992, B67:464~469

Study on Implanted Silicon with MeV Ions

LU Wuxing WU Yuguang

(*Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University,
Beijing Radiation Center, Beijing 100875*)

Abstract This paper presents a briefing of the development of implanted silicon with MeV high energy ion at the BNU of late years. A lot of subjects are reviewed.

Key Words high energy implantation enhanced annealing defect engineering