

Research Status and Development of Magnetic Field Direct Pull Silicon Single Crystal Growth Technology

Guoliang Yang

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd., Kaihua, Zhejiang, 324300, China

Abstract

With the development of the semiconductor industry, semiconductor materials are becoming more and more important in the field of electronic information. The development of semiconductor materials is of great significance to the development of integrated circuit industry. At present, silicon single crystal has become the most widely used semiconductor material in the field of electronic information materials with its excellent electrical performance, low cost and easy growth. Therefore, the research and development of silicon single crystal growth technology is of great significance to promote the development of China's electronic information industry. This paper summarizes the growth technique of magnetic field, introduces the research status of magnetic field at home and abroad, and prospects the development trend of this technology in the future.

Keywords

magnetic field; cilla silicon; single crystal growth technology; electronic information materials; development trend

磁场直拉硅单晶生长技术的研究现状与发展

杨国梁

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 开化 324300

摘要

随着半导体行业的发展, 半导体材料在电子信息领域中的地位越来越重要。半导体材料的发展对推动中国集成电路产业的发展具有重要意义。目前, 硅单晶以其优良的电学性能、低成本和易生长等优点成为电子信息材料领域中应用最广的一种半导体材料。因此, 研究和发​​展硅单晶生长技术对促进中国电子信息产业的发展具有重要意义。论文对磁场直拉硅单晶生长技术进行了综述, 详细介绍了国内外磁场直拉硅单晶生长技术的研究现状, 并对未来磁场直拉硅单晶生长技术的发展趋势进行了展望。

关键词

磁场; 直拉硅; 单晶生长技术; 电子信息材料; 发展趋势

1 引言

集成电路(IC)是现代信息技术的核心, 其性能的优劣决定了现代信息产业的发展。随着半导体器件技术和集成电路技术的发展, 人们对微电子器件的性能要求越来越高, 这对半导体材料提出了更高的要求。硅单晶具有优良的电学性能、低成本和易生长等特点, 使其在微电子、光电子和光电等领域得到了广泛应用。目前, 硅单晶已成为半导体材料中最主要的应用材料。

磁场是一种在不产生热效应的情况下产生电磁感应现象的物理场, 通常用于制作磁致伸缩元件。利用磁场进行器件设计, 具有响应速度快、精度高、功耗小、制造成本低等优点, 是目前应用最广泛的一种磁场技术^[1]。磁场直拉硅单

晶生长技术是将硅锭放置在直拉坩埚中, 利用磁场对硅锭产生的洛伦兹力实现拉晶。在磁场直拉硅单晶生长过程中, 拉晶线圈和坩埚都被放置在磁场中进行转动, 能够保证熔体按照一定方向旋转。同时, 通过改变磁场强度、方向等参数能够调节熔体温度, 实现对拉晶速度和生长速率的控制。此外, 磁场直拉硅单晶生长技术具有环境污染小、对原材料损伤小等优点, 因此是一种绿色环保的生长技术。

论文综述了国内外磁场直拉硅单晶生长技术的研究现状和发展趋势, 从直拉硅单晶生长原理、磁场对晶体生长过程影响、磁场直拉硅单晶生长技术进展等方面进行了总结和分析, 并对未来磁场直拉硅单晶生长技术的发展趋势进行了展望。

2 磁场直拉硅单晶生长技术的原理

2.1 磁场直拉技术的基本原理

熔体中的流动场至少受下列因素的影响: 由于温度场

【作者简介】杨国梁(1986-), 男, 中国浙江磐安人, 本科, 工程师, 从事半导体设备及动力设备研究。

不均匀引起的密度场不均匀所导致的引力场（重力）作用下的自然对流；由于熔体自由表面存在温度梯度引起表面张力梯度导致的 Marangoni 对流；由于晶体转动和坩埚转动所引起的强迫对流。

上述三种对流能够影响杂质在界面上的微分凝，产生生长条纹，使晶体横截面的电学性质、光学性质不均匀。为了抑制这种现象，目前主要有以下两种技术途径：

第一，在太空微重力环境下生长单晶体^[2]。此时熔体无宏观热对流，晶体生长过程中熔体质量的输运主要依赖扩散，晶体完整性、均匀性可得到极大改善。然而，由于太空生长硅单晶耗资巨大，所以是不可能产业化的，只能用于基础研究，验证有关晶体生长理论。第二，向熔体空间引入磁场。磁场直拉单晶技术（MCZ）的基础是磁场对导电液体的热对流抑制作用。上述两种途径在直拉生长条件下存在着物理本质上的联系。太空微重力下生长单晶，熔体中质量输运为“扩散控制机制”；磁场下生长单晶，当引入磁感应强度达到一定值时，一切宏观对流均因受到 Lorentz 力的作用而被抑制，此时熔体的质量输运同样是“扩散控制机制”，从而可以把后者称为“等效微重力生长”。

2.2 硅单晶生长的原理

直拉法硅单晶生长过程属于一个多晶硅熔液转变为单晶硅固体的固液相变过程。首先，将多晶硅原料装于石英坩埚内，坩埚上方有一可旋转和升降的籽晶杆，杆的下端有一夹头，其上捆上一根籽晶。原料被加热器熔化后，将籽晶插入高温硅熔体表面，使得籽晶与硅熔液熔接，在合适的热场环境下，通过转动并缓慢向上提拉籽晶，并经过引晶、缩颈、放肩、转肩、等径生长和收尾等过程，从而完成单晶硅的生长。直拉法制备单晶硅需要采用直拉法生长炉及相关配套系统生长单晶硅。整个生长系统主要包括晶体旋转提拉系统、加热系统、坩埚旋转提拉系统、控制系统等。图1为直拉单晶炉示意图。晶体生长过程是在一个封闭的热场条件下进行的，通常单晶硅生长周期较长，尤其是大尺寸单晶硅。

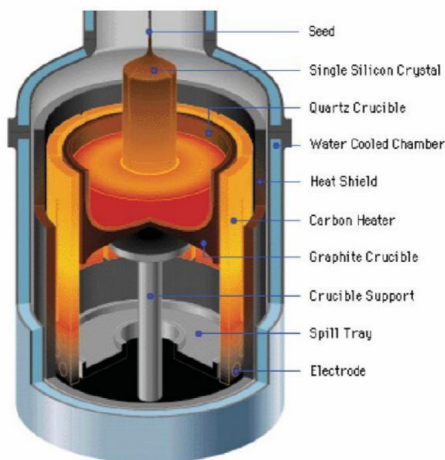


图1 直拉单晶炉示意图

3 磁场直拉硅单晶生长技术的发展历程

3.1 磁场直拉技术在硅单晶生长中的应用历程

磁场直拉技术是一种在硅单晶生长过程中的重要技术，能够提高硅单晶质量和生长速度。其应用历程可以追溯到20世纪50年代，当时是苏联科学家首次提出该技术，并成功地应用于硅单晶生长实验中。此后，磁场直拉技术不断被改进和优化，如加入辅助气体、使用不同的磁场形式和改变拉控制方式等，从而取得了显著的发展和广泛应用。现在，磁场直拉技术已成为硅单晶生长领域中非常重要的技术之一。

3.2 磁场直拉技术在硅单晶生长中的发展趋势

目前，磁场直拉技术已成为国内外硅单晶生长领域的研究热点，尤其是在高质量大直径硅单晶方面具有明显优势。未来，磁场直拉技术将会在以下几个方面进行深入研究和发展：

①研究磁场强度对硅单晶质量的影响。磁场强度对硅单晶质量的影响是一个复杂的研究领域，需要深入的实验和理论分析。一些研究表明，磁场可以影响晶体生长过程中的热传递和质量输运，从而影响晶体的结构和质量。然而，这个领域还需要更多的研究来进一步了解磁场如何影响硅单晶质量，并为实际应用提供更好的基础。

②随着中国工业制造水平的发展，对于高品质产品的需求日益增长，这就使得中国企业对于高质量硅单晶的需求量越来越大，而目前市场上能够满足这种要求的技术并不多，因此为了满足市场的需求，就需要不断地进行技术创新。

③目前，人们越来越注重生活品质，尤其是对健康和环保的要求越来越高，这就需要企业在生产的过程中，严格遵守国家的相关法律法规，并且要严格按照相关的标准来进行生产^[3]。然而，如果企业的产品质量得不到保障，那么就会影响消费者的使用体验，最终导致消费者对企业失去信心，这不仅会影响企业的销售业绩，还会影响企业的长期发展。为了更好地保证产品质量，就需要企业不断地加强创新，积极地探索新的技术和新的工艺，以实现产品品质的提升，进而增强消费者的购买欲望，促进企业与消费者之间的良性互动。

4 磁场直拉硅单晶生长技术的研究现状

4.1 国内外研究现状的比较分析

目前，世界上主要的几个国家都拥有成熟的磁场直拉法工艺，但各国之间存在着较大的差异。例如，美国拥有世界上最先进的磁控溅射设备，并且已经实现了工业化应用；日本则拥有世界上最大的多级磁控溅射炉；德国也拥有自己的专利，其水平为世界领先。这些国家及地区的科研机构和企业在该技术研究上都取得了较大的进展，提出了一些先进的理论和技术手段，其中以日本和欧洲的研究较为深入^[4]。此外，中国也成功开发出了具有自主知识产权的高性能水平的磁

场直拉的设备，并已投入商业应用。造成这一现象的主要原因是：一方面，不同国家的科研实力不同；另一方面，不同的国家所面临的环境问题也不同。因此，对于同一个项目，在不同国家进行研究时，可能会得到完全不同的结果。

4.2 磁场直拉技术在硅单晶生长中的应用案例

磁场直拉技术是一种通过磁场作用下的力来拉伸单晶生长用的熔体的技术。在硅单晶生长过程中，磁场直拉技术被广泛应用。例如，在Czochralski法生长硅单晶中，如图2所示，场直拉技术可以减小晶体生长过程中的液面起伏和基底变形等问题，从而提高晶体质量和生长速率。此外，在实现大面积硅单晶生长时，磁场直拉技术也可以提高晶体纵向的一致性。

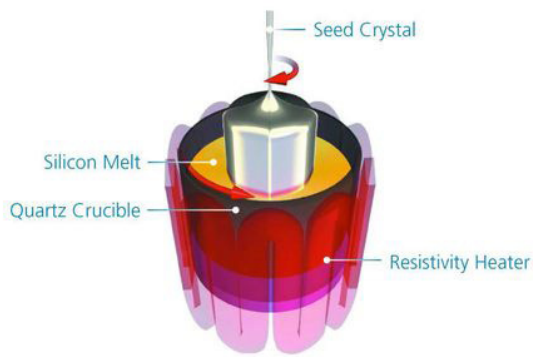


图2 Czochralski法

5 磁场直拉硅单晶生长技术的未来发展方向

5.1 磁场直拉技术在硅单晶生长中的未来发展趋势

目前，磁场直拉技术在硅单晶生长领域中应用较为广泛，但该技术仍存在一些缺点。主要包括：①磁场对晶体中杂质的影响不明确；②磁场直拉生长工艺复杂、成本较高；③磁场对硅单晶质量有一定影响。

针对上述问题，未来磁场直拉硅单晶生长技术的发展方向主要有以下几个方面：①将磁场直拉技术与其他方法进行结合^[5]，利用其他方法的优点来弥补磁场直拉技术的不足，从而使其具有更高的生长质量；②提高磁场直拉硅单晶的生长效率，提高晶体质量，降低成本；③研究不同条件下磁场直拉硅单晶的生长规律，改进现有技术中存在的问题。

综上所述，磁场直拉技术是一种新型的硅单晶生长技术，它具有其他生长技术不具备的优点。但是，目前该技术仍处于实验研究阶段，因此还存在一些问题。为了解决这些问题，未来可以从以下几个方面进行努力：①优化磁场直拉法工艺参数；②优化实验装置，减少晶体中杂质的含量；③改进磁场直拉硅单晶的生长工艺；④提高硅单晶质量。

5.2 磁场直拉技术在其他材料生长中的应用前景

目前，磁场直拉技术已经成功应用于半导体、光学和光电器件等领域，在其他材料的生长中也具有较好的应用前景。例如，在半导体领域，磁场直拉技术已经成功应用于非晶硅的生长。非晶硅晶体的晶体结构与单晶硅类似，晶体缺陷主要为位错和晶格缺陷。在光学领域，磁场直拉技术可以在光学材料中生长大尺寸的单晶光学材料^[6]。此外，在光电器件中，磁场直拉技术可以用于生长太阳能电池用硅单晶。磁场直拉技术在其他材料的生长中具有广阔的应用前景，具有重要的科学意义和潜在的应用价值。

6 结语

目前，磁场直拉硅单晶生长技术已经成为工业上生产高质量硅单晶的主要方法之一。该技术已经经历了几十年的发展和改进，随着科技的不断进步，技术也在不断完善。未来，随着人们对电子、太阳能等行业需求的不断增加，磁场直拉硅单晶生长技术将不断得到发展和应用。同时，探索新的生长机理和材料也是该领域需要持续关注和研究的方向。

参考文献

- [1] 张鸣剑,李润源,付宗义.磁场直拉硅单晶生长技术的研究现状与发展[J].新材料产业,2009:80-83.
- [2] 徐岳生.直拉硅单晶生长的现状与发展[J].河北工业大学学报,2004:57-63.
- [3] 李贺梅.横向磁场中直拉硅单晶生长[J].电子工业专用设备,2016:47-50.
- [4] 饶森林,张发云,罗玉峰,等.磁场作用下硅晶体生长的应用研究现状[J].铸造技术,2019:118-123.
- [5] 吴明明,周标.直拉单晶硅体生长过程中的控氧技术研究[J].新技术新工艺,2013:103-106.
- [6] 吴明明,王建臣.大直径高质量太阳能级硅单晶磁场直拉技术研究[J].机械,2013:84-87.