

单晶炉及单晶硅的制备方法

相关申请的交叉引用

本公开主张在 2023 年 04 月 27 日在中国提交的中国专利申请 No. 202310473614.0 的优先权，其全部内容通过引用包含于此。

技术领域

本公开涉及半导体制造技术领域，尤其涉及一种单晶炉及单晶硅的制备方法。

背景技术

多晶硅是生产太阳能光伏产品和半导体产品的主要原材料。丘克拉尔斯基 (Czochralski, Cz)法是制备单晶硅最常用的方法之一，高纯度固态多晶硅原料在晶体生长炉(即单晶炉)的坩埚中熔化形成熔体，通过籽晶提拉机构下降籽晶使其与旋转坩埚中的熔融状态下的熔体接触，然后，将籽晶按照一定的工艺方法提拉出，熔体围绕籽晶凝固形成单晶硅棒。

单晶硅棒的缺陷性质敏感地依赖于晶体的生长和冷却条件。单晶炉包括水冷套，可实现热场纵向温度梯度的稳定。但相关技术中，在熔料阶段，因坩埚位置较低，水冷套的温度也比较低，导致了热场纵向温度梯度较大，挥发物易在水冷套上聚集；而在单晶等径后期，因坩埚位置较高，晶体离水冷套较近，导致水冷套温度升高，故热场纵向温度梯度较小。也就是说，单晶硅棒的位置变化使得水冷套的温度并不恒定，因此热场纵向温度梯度也并不稳定，无法保证单晶硅棒的稳定生长，导致制备的单晶硅的缺陷较多。

发明内容

为了解决上述技术问题，本公开提供一种单晶炉及单晶硅的制备方法，能够减少制备的单晶硅的缺陷。

为了达到上述目的，本公开实施例采用的技术方案是：

一种单晶炉，所述单晶炉包括炉体，所述炉体内设置有坩埚支撑组件，

所述坩埚支撑组件上部设置有坩埚，所述坩埚的正上方设置有导流筒，所述炉体的内壁和所述坩埚的外周之间设置有加热器，所述炉体的顶部设有籽晶提拉机构，所述单晶炉还包括：

位于所述导流筒远离所述坩埚支撑组件一侧的水冷结构，所述水冷结构包括多个相互独立的水冷区，所述多个水冷区沿远离所述导流筒的方向依次排布；

质量流量控制器，用于分别控制不同水冷区中冷却水的流量和温度。

一些实施例中，所述质量流量控制器具体用于在单晶硅棒生长前，沿远离所述导流筒的方向，控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

一些实施例中，相邻所述水冷区的温度的差为 1.5°C - 2.5°C 。

一些实施例中，所述质量流量控制器具体用于在单晶硅棒生长时，随着所述坩埚沿靠近所述导流筒的方向移动，控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

一些实施例中，所述质量流量控制器还用于在所述单晶硅棒生长结束后，获取所述单晶硅棒的缺陷评价结果，根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度。

一些实施例中，所述质量流量控制器具体用于在所述单晶硅棒存在 V-rich 缺陷时，降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量；在所述单晶硅棒存在 N-rich 缺陷时，提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却水的流量。

一些实施例中，所述水冷结构包括三个水冷区。

本公开实施例还提供了一种单晶硅的制备方法，应用于如上所述的单晶炉，所述方法包括：

在单晶硅棒生长前，沿远离所述导流筒的方向，通过所述质量流量控制器控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

一些实施例中，所述方法还包括：

在单晶硅棒生长时，随着所述坩埚沿靠近所述导流筒的方向移动，通过

所述质量流量控制器控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

一些实施例中，所述方法还包括：

在所述单晶硅棒生长结束后，获取所述单晶硅棒的缺陷评价结果；

根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度。

一些实施例中，所述根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度包括：

在所述单晶硅棒存在 V-rich 缺陷时，降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量；

在所述单晶硅棒存在 N-rich 缺陷时，提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却水的流量。

本公开的有益效果是：

本实施例中，水冷结构包括多个相互独立的水冷区，质量流量控制器可以分别控制不同水冷区中冷却水的流量和温度，这样在单晶硅棒生长过程中，通过对不同水冷区的温度和流量进行分区管理，可以降低晶体生长时的纵向温度梯度变化，实现温区平稳过渡，进而实现热场纵向温度梯度的稳定，从而减少制备的单晶硅的缺陷。

附图说明

图 1 表示本公开实施例单晶炉的结构示意图；

图 2 表示本公开实施例单晶硅的制备方法的流程示意图。

附图标记

1 单晶硅棒；2 水冷结构；3 导流筒；4 加热器；5 石墨坩埚；6 石英坩埚；7 硅溶液；8 坩埚支撑组件；9 质量流量控制器；10 冷却水供给单元。

具体实施方式

为使本公开实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本公开实施例的附图，对本公开实施例的技术方案进行清楚、完整地描述。显然，

所描述的实施例是本公开的一部分实施例，而不是全部的实施例。基于所描述的本公开的实施例，本领域普通技术人员所获得的所有其他实施例，都属于本公开保护的范围。

单晶的缺陷性质敏感地依赖于晶体的生长和冷却条件，因此可以通过调节生长界面附近的热环境控制在生长过程中形成的缺陷的种类和分布。

生长缺陷被分为几类：空位型(vacancy-type)缺陷和间隙型(interstitial-type)缺陷。它们是由开始于超过平衡浓度的空位点缺陷或间隙点缺陷的聚积造成的。生长缺陷的形成与 V/G 值密切相关，其中 V 是生长速度，而 G 是在晶体生长界面附近晶体的温度梯度。当 V/G 的值超过临界值时形成空位型缺陷，而当 V/G 的值低于临界值时形成间隙型缺陷。因而，当晶体在特定的热区中生长时存在于晶体中的缺陷的种类、大小和密度受提拉速度的影响。晶体的冷却速度被控制在固化温度和大约 1000°C 的温度之间，在此范围内当熔融的硅被固化成单晶硅时，缺陷的核就在受热处理过程中形成并生长。硅间隙或空位以此方式向锭的侧面扩散或者被加速以相互联合，这就能够抑制间隙或空位的过饱和低于发生聚积的临界值。应用切克劳斯基法生长的锭的区域温度差异被最小化在 $1000^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内。更具体地，在温度为 $1000^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 的锭的区域中单晶硅锭的温度差异不超过 $20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。可选地，温度控制差异发生在垂直方向上的锭的外周部分。同时，当锭在 $1000 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 的温度时，生长锭的温度被加以控制使得锭的中心部分和外周部分的温度梯度差异不大于 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。

单晶炉内比较关键的部件就是水冷套，可实现热场纵向温度梯度的稳定；但相关技术所设计的水冷套的结构单一，冷却水流量和温度无法调节，无法将冷却作用无法最大程度发挥。在熔料阶段，因坩埚位置较低，坩埚的热量较少影响到水冷套，使得水冷套温度较低，导致了热场纵向温度梯度较大，挥发物易在水冷套上聚集；而在单晶等径后期，因坩埚位置较高，晶体离水冷套较近，坩埚的热量影响到水冷套，水冷套的温度升高，热场纵向温度梯度较小。也就是说，单晶的位置变化使得水冷套的温度并不恒定，因此热场纵向温度梯度也并不稳定，无法保证单晶的稳定生长。另外，水冷套仅是冷却水的流经部件，冷却水在水冷套内并无任何控制措施，因此，水冷套流经

的冷却水没有得到充分利用，大部分被白白浪费，对水冷套的温度并不能起到恒温控制作用，对单晶生长所需的热场纵向温度梯度起不到的控制作用。

本公开提供一种单晶炉及单晶硅的制备方法，能够减少制备的单晶硅的缺陷。

本公开提供一种单晶炉，如图 1 所示，所述单晶炉包括炉体，所述炉体内设置有坩埚支撑组件 8，所述坩埚支撑组件 8 上部设置有坩埚，所述坩埚包括石墨坩埚 5 和位于石墨坩埚 5 内的石英坩埚 6，石英坩埚 6 内盛放有硅溶液 7，所述坩埚的正上方设置有导流筒 3，所述炉体的内壁和所述坩埚的外周之间设置有加热器 4，所述炉体的顶部设有籽晶提拉机构，所述单晶炉还包括：

位于所述导流筒 3 远离所述坩埚支撑组件 8 一侧的水冷结构 2，所述水冷结构 2 包括多个相互独立的水冷区，所述多个水冷区沿远离所述导流筒 3 的方向依次排布；

质量流量控制器(Mass Flow Controller, MFC)9，用于分别控制不同水冷区中冷却水的流量和温度。

本实施例中，水冷结构 2 包括多个相互独立的水冷区，质量流量控制器 9 可以分别控制不同水冷区中冷却水的流量和温度，这样在单晶硅棒 1 生长过程中，通过对不同水冷区的温度和流量进行分区管理，可以降低晶体生长时的纵向温度梯度变化，实现温区平稳过渡，进而实现热场纵向温度梯度的稳定，从而减少制备的单晶硅的缺陷。

本实施例中，水冷结构 2 可以包括 2 个相互独立的水冷区、3 个相互独立的水冷区或更多个相互独立的水冷区。

本实施例中，质量流量控制器 9 与冷却水供给单元 10 连接，能够控制不同水冷区中冷却水的流量和温度；这样在单晶硅棒 1 生长前，质量流量控制器 9 可以对不同水冷区中冷却水的流量和温度进行设定；在单晶硅棒 1 生长过程中，随着单晶硅棒 1 位置的变化，质量流量控制器 9 也可以对不同水冷区中冷却水的流量和温度进行调节，实现热场纵向温度梯度的稳定，从而减少制备的单晶硅的缺陷。

本实施例中，所述质量流量控制器 9 可以在单晶硅棒 1 生长前，沿远离

所述导流筒 3 的方向,控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低,和/或,所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大,这样可以实现热场纵向温度梯度。本实施例中,可以仅对多个水冷区中冷却水的温度进行调节,也可以仅对多个水冷区中冷却水的流量进行调节,还可以对多个水冷区中冷却水的温度和流量均进行调节。其中,水冷区中冷却水的温度降低,会降低水冷区附近的环境温度,水冷区中冷却水的温度升高,会升高水冷区附近的环境温度;水冷区中冷却水的流量降低,会升高水冷区附近的环境温度,水冷区中冷却水的流量升高,会降低水冷区附近的环境温度。

一些实施例中,如图 1 所示,水冷结构 2 包括 3 个相互独立的水冷区: A 区、B 区和 C 区。在单晶硅棒 1 生长开始前,质量流量控制器 9 控制 A 区、B 区、C 区导入的冷却水温度都是不同的, A 区的冷却水的温度高于 B 区的冷却水的温度, B 区的冷却水的温度高于 C 区的冷却水的温度,这样能够实现热场纵向温度梯度。

相邻所述水冷区的温度的差可以为 1.5-2.5℃,比如可以为 1.5℃、1.6℃、1.7℃、1.8℃、1.9℃、2.0℃、2.1℃、2.2℃、2.3℃、2.4℃或 2.5℃,可选地,相邻所述水冷区的温度的差可以为 2.0℃,这样有利于减少单晶硅棒 1 缺陷的形成。

当然,还可以控制 A 区的冷却水的流量低于 B 区的冷却水的流量, B 区的冷却水的流量低于 C 区的冷却水的流量,这样也有助于实现热场纵向温度梯度。

在单晶硅棒 1 生长过程中,随着籽晶提拉机构提拉单晶硅棒 1,坩埚的位置也逐渐上移,靠近水冷结构 2,坩埚的热量会影响水冷结构 2 的热量,为了保证热场纵向温度梯度的稳定,需要调节多个水冷区中冷却水的温度和流量,具体地,随着所述坩埚沿靠近所述导流筒 3 的方向移动,控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低,和/或,所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大,这样能够抵消坩埚的热量的影响,有利于热场纵向温度梯度的稳定。

质量流量控制器 9 可以提前设定在单晶硅棒 1 生长过程中,单晶硅棒 1 位于不同位置时对应的 A 区、B 区、C 区的流量和温度。比如位置 1 对应:

A 区的流量为 L1、温度为 T1；B 区的流量为 L2、温度为 T2；C 区的流量为 L3、温度为 T3。位置 2 对应：A 区的流量为 L4、温度为 T4；B 区的流量为 L5、温度为 T5；C 区的流量为 L6、温度为 T6。则可以在单晶硅棒 1 移动至位置 1 时，控制 A 区的流量为 L1、温度为 T1；B 区的流量为 L2、温度为 T2；C 区的流量为 L3、温度为 T3。可以在单晶硅棒 1 移动至位置 2 时，控制 A 区的流量为 L4、温度为 T4；B 区的流量为 L5、温度为 T5；C 区的流量为 L6、温度为 T6。

本实施例中，可以仅对多个水冷区中冷却水的温度进行调节，也可以仅对多个水冷区中冷却水的流量进行调节，还可以对多个水冷区中冷却水的温度和流量均进行调节。

一些实施例中，所述质量流量控制器 9 还用于在所述单晶硅棒 1 生长结束后，获取所述单晶硅棒 1 的缺陷评价结果，根据所述单晶硅棒 1 的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度。

单晶的缺陷性质与晶体的冷却条件相关，通过调节生长界面附近的热环境可以控制在生长过程中形成的缺陷的种类和分布，因此，在单晶硅棒 1 生长结束后，可以根据单晶硅棒 1 的缺陷调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度，实现对热场纵向温度梯度的控制和优化。可以仅对多个水冷区中冷却水的温度进行调节，也可以仅对多个水冷区中冷却水的流量进行调节，还可以对多个水冷区中冷却水的温度和流量均进行调节。

一些实施例中，所述质量流量控制器 9 具体用于在所述单晶硅棒 1 存在 V-rich 缺陷时，降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量；在所述单晶硅棒 1 存在 N-rich 缺陷时，提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却水的流量。

在单晶硅棒 1 存在 V-rich 缺陷时，表明单晶硅棒 1 生长界面的环境温度较高，因此可以通过降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量来降低单晶硅棒 1 生长界面的环境温度，从而改善 V-rich 缺陷；在单晶硅棒 1 存在 N-rich 缺陷时，表明单晶硅棒 1 生长界面的环境温度较低，因此可以通过提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却水的流量来提高单晶硅棒 1 生长界面的环境温度，从而改善 N-rich 缺陷。

本公开实施例还提供了一种单晶硅的制备方法，应用于如上所述的单晶炉，所述方法包括：

在单晶硅棒 1 生长前，沿远离所述导流筒 3 的方向，通过所述质量流量控制器 9 控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

本实施例中，水冷结构 2 包括多个相互独立的水冷区，质量流量控制器 9 可以分别控制不同水冷区中冷却水的流量和温度，这样在单晶硅棒 1 生长过程中，通过对不同水冷区的温度和流量进行分区管理，可以降低晶体生长时的纵向温度梯度变化，实现温区平稳过渡，进而实现热场纵向温度梯度的稳定，从而减少制备的单晶硅的缺陷。

本实施例中，质量流量控制器 9 与冷却水供给单元 10 连接，能够控制不同水冷区中冷却水的流量和温度；这样在单晶硅棒 1 生长前，质量流量控制器 9 可以对不同水冷区中冷却水的流量和温度进行设定；在单晶硅棒 1 生长过程中，随着单晶硅棒 1 位置的变化，质量流量控制器 9 也可以对不同水冷区中冷却水的流量和温度进行调节，实现热场纵向温度梯度的稳定，从而减少制备的单晶硅的缺陷。

本实施例中，所述质量流量控制器 9 可以在单晶硅棒 1 生长前，沿远离所述导流筒 3 的方向，控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大，这样可以实现热场纵向温度梯度。本实施例中，可以仅对多个水冷区中冷却水的温度进行调节，也可以仅对多个水冷区中冷却水的流量进行调节，还可以对多个水冷区中冷却水的温度和流量均进行调节。

一些实施例中，所述方法还包括：

在单晶硅棒生长时，随着所述坩埚沿靠近所述导流筒的方向移动，通过所述质量流量控制器控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

在单晶硅棒 1 生长过程中，随着籽晶提拉机构提拉单晶硅棒 1，坩埚的位置也逐渐上移，靠近水冷结构 2，坩埚的热量会影响水冷结构 2 的热量，为了保证热场纵向温度梯度的稳定，需要调节多个水冷区中冷却水的温度和

流量，具体地，随着所述坩埚沿靠近所述导流筒 3 的方向移动，控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大，这样能够抵消坩埚的热量的影响，有利于热场纵向温度梯度的稳定。

本实施例中，可以仅对多个水冷区中冷却水的温度进行调节，也可以仅对多个水冷区中冷却水的流量进行调节，还可以对多个水冷区中冷却水的温度和流量均进行调节。

一些实施例中，如图 2 所示，所述方法还包括：

步骤 101：在所述单晶硅棒生长结束后，获取所述单晶硅棒的缺陷评价结果；

步骤 102：根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度。

单晶的缺陷性质与晶体的冷却条件相关，通过调节生长界面附近的热环境可以控制在生长过程中形成的缺陷的种类和分布，因此，在单晶硅棒 1 生长结束后，可以根据单晶硅棒 1 的缺陷调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度，实现对热场纵向温度梯度的控制和优化。可以仅对多个水冷区中冷却水的温度进行调节，也可以仅对多个水冷区中冷却水的流量进行调节，还可以对多个水冷区中冷却水的温度和流量均进行调节。

一些实施例中，所述根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度包括：

在所述单晶硅棒存在 V-rich 缺陷时，降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量；

在所述单晶硅棒存在 N-rich 缺陷时，提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却水的流量。

在单晶硅棒 1 存在 V-rich 缺陷时，表明单晶硅棒 1 生长界面的环境温度较高，因此可以通过降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量来降低单晶硅棒 1 生长界面的环境温度，从而改善 V-rich 缺陷；在单晶硅棒 1 存在 N-rich 缺陷时，表明单晶硅棒 1 生长界面的环境温度较低，因此可以通过提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却

水的流量来提高单晶硅棒 1 生长界面的环境温度，从而改善 N-rich 缺陷。

需要说明，本说明书中的各个实施例均采用递进的方式描述，各个实施例之间相同相似的部分互相参见即可，每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处。尤其，对于实施例而言，由于其基本相似于产品实施例，所以描述得比较简单，相关之处参见产品实施例的部分说明即可。

除非另外定义，本公开使用的技术术语或者科学术语应当为本公开所属领域内具有一般技能的人士所理解的通常意义。本公开中使用的“第一”、“第二”以及类似的词语并不表示任何顺序、数量或者重要性，而只是用来区分不同的组成部分。“包括”或者“包含”等类似的词语意指出现该词前面的元件或者物件涵盖出现在该词后面列举的元件或者物件及其等同，而不排除其他元件或者物件。“连接”或者“相连”等类似的词语并非限定于物理的或者机械的连接，而是可以包括电性的连接，不管是直接的还是间接的。“上”、“下”、“左”、“右”等仅用于表示相对位置关系，当被描述对象的绝对位置改变后，则该相对位置关系也可能相应地改变。

可以理解，当诸如层、膜、区域或基板之类的元件被称作位于另一元件“上”或“下”时，该元件可以“直接”位于另一元件“上”或“下”，或者可以存在中间元件。

在上述实施方式的描述中，具体特征、结构、材料或者特点可以在任何一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

以上所述，仅为本公开的具体实施方式，但本公开的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本公开揭露的技术范围内，可轻易想到变化或替换，都应涵盖在本公开的保护范围之内。因此，本公开的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

权利要求书

1. 一种单晶炉，所述单晶炉包括炉体，所述炉体内设置有坩埚支撑组件，所述坩埚支撑组件上部设置有坩埚，所述坩埚的正上方设置有导流筒，所述炉体的内壁和所述坩埚的外周之间设置有加热器，所述炉体的顶部设有籽晶提拉机构，所述单晶炉还包括：

位于所述导流筒远离所述坩埚支撑组件一侧的水冷结构，所述水冷结构包括相互独立的多个水冷区，所述多个水冷区沿远离所述导流筒的方向依次排布；

质量流量控制器，用于分别控制不同水冷区中冷却水的流量和温度。

2. 根据权利要求1所述的单晶炉，其中，所述质量流量控制器具体用于在单晶硅棒生长前，沿远离所述导流筒的方向，控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

3. 根据权利要求2所述的单晶炉，其中，相邻所述水冷区的温度的差为 1.5°C - 2.5°C 。

4. 根据权利要求1所述的单晶炉，其中，所述质量流量控制器具体用于在单晶硅棒生长时，随着所述坩埚沿靠近所述导流筒的方向移动，控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低，和/或，所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

5. 根据权利要求1所述的单晶炉，其中，所述质量流量控制器还用于在单晶硅棒生长结束后，获取所述单晶硅棒的缺陷评价结果，根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度。

6. 根据权利要求5所述的单晶炉，其中，所述质量流量控制器具体用于在所述单晶硅棒存在 V-rich 缺陷时，降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量；在所述单晶硅棒存在 N-rich 缺陷时，提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却水的流量。

7. 根据权利要求1所述的单晶炉，其中，所述水冷结构包括三个水冷区。

8. 一种单晶硅的制备方法，应用于如权利要求1-7中任一项所述的单晶炉，所述方法包括：

在单晶硅棒生长前，沿远离所述导流筒的方向，通过所述质量流量控制

器控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低, 和/或, 所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

9. 根据权利要求 8 所述的单晶硅的制备方法, 其中, 所述方法还包括:

在单晶硅棒生长时, 随着所述坩埚沿靠近所述导流筒的方向移动, 通过所述质量流量控制器控制所述多个水冷区中冷却水的温度逐渐降低, 和/或, 所述多个水冷区中冷却水的流量逐渐增大。

10. 根据权利要求 8 所述的单晶硅的制备方法, 其中, 所述方法还包括:

在所述单晶硅棒生长结束后, 获取所述单晶硅棒的缺陷评价结果;

根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度。

11. 根据权利要求 10 所述的单晶硅的制备方法, 其中, 所述根据所述单晶硅棒的缺陷评价结果调整所述水冷区中冷却水的流量和/或温度包括:

在所述单晶硅棒存在 V-rich 缺陷时, 降低所述水冷区中冷却水的温度和/或提高所述水冷区中冷却水的流量;

在所述单晶硅棒存在 N-rich 缺陷时, 提高所述水冷区中冷却水的温度和/或降低所述水冷区中冷却水的流量。