

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 3 月 28 日 (28.03.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/060650 A1

(51) 国际专利分类号:

C30B 15/00 (2006.01) **C30B 15/20** (2006.01)
C30B 29/06 (2006.01) **C30B 27/02** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2023/095179

(22) 国际申请日: 2023 年 5 月 19 日 (19.05.2023)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:

202211148316.6 2022年9月20日 (20.09.2022) CN

(71) 申请人: 隆基绿能科技股份有限公司 (**LONGI GREEN ENERGY TECHNOLOGY CO., LTD.**) [CN/CN]; 中国陕西省西安市长安区航天中路388号, Shaanxi 710100 (CN)。

(72) 发明人: 王正远 (**WANG, Zhengyuan**); 中国陕西省西安市长安区航天中路388号, Shaanxi 710100 (CN)。李广砥 (**LI, Guangdi**); 中国陕西省西安市长安区航天中路388号, Shaanxi 710100 (CN)。郭力 (**GUO, Li**); 中国陕西省西安市长安区航天中路388号, Shaanxi 710100 (CN)。杨正华

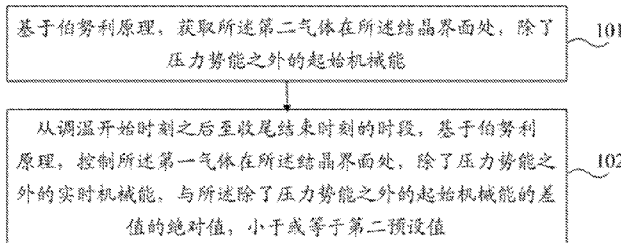
(**YANG, Zhenghua**); 中国陕西省西安市长安区航天中路388号, Shaanxi 710100 (CN)。张伟建 (**ZHANG, Weijian**); 中国陕西省西安市长安区航天中路388号, Shaanxi 710100 (CN)。

(74) 代理人: 北京润泽恒知识产权代理有限公司 (**BEIJING RUN ZEHENG INTELLECTUAL PROPERTY LAW FIRM**); 中国北京市海淀区中关村南大街甲18号北京国际C座6层606, Beijing 100081 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(54) **Title:** CRYSTAL PULLING METHOD, SINGLE-CRYSTAL SILICON ROD, AND SINGLE CRYSTAL FURNACE

(54) 发明名称: 一种拉晶方法、单晶硅棒和单晶炉



101 On the basis of the Bernoulli's principle, obtain starting mechanical energy of a second gas at a crystallization interface except pressure potential energy
102 Within a time period from a temperature regulation start moment to an ending moment, on the basis of the Bernoulli's principle, control the absolute value of a difference between real-time mechanical energy of a first gas at the crystallization interface except the pressure potential energy and the starting mechanical energy except the pressure potential energy to be less than or equal to a second preset value

图 2

(57) **Abstract:** The present invention relates to the technical field of crystal growth, and provides a crystal pulling method, a single-crystal silicon rod, and a single crystal furnace. The crystal pulling method comprises: within a time period from a temperature regulation start moment to an ending moment, controlling the absolute value of a difference between first pressure of a first gas introduced into the single crystal furnace at each moment at a crystallization interface and second pressure of a second gas introduced into the single crystal furnace at the temperature regulation start moment at the crystallization interface to be less than or equal to a first preset value. In the present invention, within the time period from the temperature regulation start moment to the ending moment, the pressure corresponding to different moments at the crystallization interface is approximately equal, so that crystallization temperatures corresponding to the different moments are approximately equal, crystallization speeds corresponding to the different moments are approximately equal, and the diameters of a crystal rod corresponding to different moments are approximately equal. Therefore, a diameter fluctuation of a single-crystal rod finally obtained by pulling is small. In addition, concentration distribution of a same impurity at each position of the crystal rod is approximately equal, and quality uniformity of the crystal rod is good.



(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:
— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明提供了一种拉晶方法、单晶硅棒和单晶炉, 涉及晶体生长技术领域。拉晶方法包括: 从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内, 控制各个时刻, 通入单晶炉的第一气体, 在结晶界面处的第一压强, 与调温开始时刻, 通入所述单晶炉的第二气体, 在所述结晶界面处的第二压强, 两者的差值的绝对值, 小于或等于第一预设值。本发明中, 在调温开始时刻至收尾结束时刻的时段中, 不同时刻对应的结晶界面的压强大致相等, 则不同时刻对应的结晶温度大致相等, 不同时刻对应的结晶速度大致相等, 不同时刻对应的晶棒直径大致相等, 使得最终拉制得到的单晶晶棒的直径波动小较小。同时, 同一种杂质在晶棒各处的浓度分布大致相等, 晶棒质量均匀性较好。

一种拉晶方法、单晶硅棒和单晶炉

本申请要求在 2022 年 09 月 20 日提交中国专利局、申请号为 202211148316.6、名称为“一种拉晶方法、单晶硅棒和单晶炉”的中国专利申请
5 的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本发明涉及晶体生长技术领域，特别是涉及一种拉晶方法、单晶硅棒和单晶炉。

背景技术

将硅材料加工成单晶硅目前常用的生产工艺为直拉法。直拉法主要分为装料、熔料、降温调整引晶温度、引晶、放肩、转肩、等径、收尾等工序。

然而，现有的拉晶方法拉晶得到的单晶硅棒的直径波动较大，单晶硅棒的质量欠佳。

发明内容

本发明提供一种拉晶方法、单晶硅棒和单晶炉，旨在解决现有的拉晶方法拉晶得到的单晶硅棒的直径波动较大，单晶硅棒的质量欠佳的问题。

本发明的第一方面，提供一种拉晶方法，所述方法包括：

步骤 S，从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，控制各个时刻，
20 通入单晶炉的第一气体，在结晶界面处的第一压强，与调温开始时刻，通入所述单晶炉的第二气体，在所述结晶界面处的第二压强，两者的差值的绝对值，小于或等于第一预设值。

本发明中，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段，在不同时刻通入单晶炉的气体在结晶界面的压强大致相等，同一时刻通入单晶炉的气体在结晶
25 界面的压强，等于该时刻结晶界面的压强，就是说，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段，保持结晶界面的压强基本稳定。结晶界面的压强会大致决定硅料的熔点，大致决定结晶温度，结晶温度会大致决定结晶速度，宏观体现在拉制得到的单晶晶棒的直径的稳定性，本发明中，在调温开始时刻至收尾结束时刻的时段中，不同时刻对应的结晶界面的压强大致相等，能够保障
30 在调温开始时刻至收尾结束时刻的时段中，不同时刻对应的结晶温度大致相

等，进而能够保障在调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段中，不同时刻对应的结晶速度大致相等，最终能够保障在调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段中，不同时刻对应的晶棒直径大致相等，使得最终拉制得到的单晶晶棒的直径波动小较小，晶棒的直径的稳定性较高，进而提升了晶棒的质量。

- 5 同时，结晶界面的压强会影响杂质的分凝系数，进而影响杂质在晶棒各处的浓度分布，本发明中，从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段中，不同时刻，结晶界面的压强大致相等，则，同一种杂质在晶棒各处的浓度分布大致相等，晶棒质量均匀性较好，同样提升了晶棒的质量。

可选地，所述步骤 S 之前，所述方法还包括：

- 10 基于伯努利原理，获取所述第二气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的起始机械能；

所述步骤 S，包括：

- 15 从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，基于伯努利原理，控制所述第一气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能，与所述起始机械能的差值的绝对值，小于或等于第二预设值。

可选地，所述第一气体，与所述第二气体相同；所述基于伯努利原理，获取所述第二气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的起始机械能，包括：

获取所述第二气体，在调温开始时刻，在所述结晶界面处的流速；

- 20 所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，基于伯努利原理，控制所述第一气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能，与所述除了压力势能之外的起始机械能的差值的绝对值，小于或等于第二预设值，包括：

- 25 从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，控制所述第一时刻，所述第一气体，在所述结晶界面处的流速，与所述第二气体，在调温开始时刻，结晶界面处的流速的差值的绝对值，小于或等于第三预设值。

- 30 可选地，所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，控制所述第一时刻，所述第一气体，在所述结晶界面处的流速，与所述第二气体，在调温开始时刻，结晶界面处的流速的差值的绝对值，小于或等于第三预设值，包括：

从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体从热屏下沿流出后，至所述第一气体从所述单晶炉中排出之前的流
通路径中，各点处的最小的流通截面积；

用所述第一时刻对应的最小的流通截面积，乘以所述第一时刻，所述第
5 一气体，在结晶界面处的流速，得到所述第一时刻的第一实时流量；

在所述第一时刻，向所述单晶炉内通入所述第一实时流量的所述第一气
体。

可选地，所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第
一时刻，所述第一气体从热屏下沿流出后，至所述第一气体从所述单晶炉中
10 排出之前的流通过程中，各点处的最小的流通截面积之前，所述方法还包括：

获取各个坳位处，所述流通过程中，各点处的最小的流通截面积，并将
所述坳位对应的最小的流通截面积，存储在所述第一坳位面积列表中；

所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，
所述第一气体从热屏下沿流出后，至所述第一气体从所述单晶炉中排出之前
15 的流通过程中，各点处的最小的流通截面积，包括：

获取所述第一时刻对应的第一坳位；

从所述第一坳位面积列表中，查询得到所述第一坳位对应的最小的流通
截面积。

可选地，所述获取各个坳位处，所述流通过程中，各点处的最小的流通
20 截面积，并将所述坳位对应的最小的流通截面积，存储在所述第一坳位面积列表
中，包括：

获取各个坳位处，以热屏下沿靠近所述结晶界面的端点，与所述单晶炉
的第一中线之间的距离，为半径，以所述端点所在的第一平面与所述第一中
线的第一交点为圆心，形成的圆柱体的侧面的第一表面积；其中，所述第一
25 中线和所述结晶界面垂直，所述第一平面和所述结晶界面平行；

获取各个坳位处，以坳坑的内壁上沿和所述热屏的外壁的 R 弧上的第二
点的连线为母线，以所述第一中线为中心线，形成的圆台的侧面的第二表面
积；其中，所述第二点位于所述热屏的外壁的 R 弧的圆心，与所述坳坑的内
壁上沿的连线上；

30 获取各个坳位处，以坳坑进入过渡盘前，坳坑的外壁上沿和过渡盘的内

壁下沿两者连线为母线，以所述第一中线为中心线，形成的圆台的侧面的第三表面积；

获取各个塌位处，以塌帮进入过渡盘，塌帮的外壁上沿和过渡盘的内壁下沿两者连线为母线，以所述第一中线为中心线，形成的圆台的侧面的第四表面积；

针对同一塌位处，从所述第一表面积、第二表面积、第三表面积、第四表面积四者中，选择最小的表面积，作为所述塌位对应的最小的流通截面积，并存储在所述第一塌位面积列表中。

可选地，所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，控制所述第一时刻，所述第一气体，在所述结晶界面处的流速，与所述第二气体，在调温开始时刻，结晶界面处的流速的差值的绝对值，小于或等于第三预设值，包括：

从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体在所述结晶界面处的流通截面积；

用所述第一时刻对应的结晶界面处的流通截面积，乘以所述第一时刻，所述第一气体，在结晶界面处的流速，得到所述第一时刻的第二实时流量；

在所述第一时刻，向所述单晶炉内通入所述第二实时流量的所述第一气体。

可选地，所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体在所述结晶界面处的流通截面积之前，所述方法还包括：

获取各个塌位处，所述结晶界面处的流通截面积，并将各个塌位处，所述结晶界面处的流通截面积，存储在第二塌位面积列表中；

所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体在所述结晶界面处的流通截面积，包括：

获取所述第一时刻对应的第一塌位；

从所述第二塌位面积列表中，查询得到所述第一塌位对应的流通截面积。

可选地，所述第一预设值为：10pa。

可选地，所述第二预设值为：6J/m³。

可选地，所述第三预设值为：2mm/min。

可选地，所述第一气体包括拉晶过程的保护气体，所述第二气体包括拉晶过程的保护气体。

可选地，所述保护气体包括：氮气，和/或，惰性气体。

可选地，所述惰性气体包括氩气。

5 本发明的第二方面，还提供一种单晶硅棒，采用任一前述的拉晶方法制备得到。

本发明的第三方面，还提供一种单晶炉，所述单晶炉用于采用任一前述的拉晶方法进行拉晶。

上述说明仅是本申请技术方案的概述，为了能够更清楚了解本申请的技术手段，而可依照说明书的内容予以实施，并且为了让本申请的上述和其它目的、特征和优点能够更明显易懂，以下特举本申请的具体实施方式。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例或相关技术中的技术方案，下面将对实施例或相关技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图是本申请的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 示出了本发明实施例中的一种单晶炉的结构示意图；

图 2 示出了本发明实施例中的一种拉晶方法的步骤流程图；

20 图 3 示出了本发明实施例中的晶棒与对比比例的晶棒的直径波动情况对比图。

附图标记说明：

11-热屏，111-热屏的内壁，112-热屏的外壁，1121-热屏的外壁的 R 弧，12-过渡盘，13-中保温筒，14-坩埚，15-坩帮，16-下保温筒，17-上保温筒，25 2-结晶界面，3-单晶晶棒。

具体实施例

为使本申请实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中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申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获

得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

发明人发现，现有的拉晶方法拉晶得到的单晶硅棒的直径波动较大，单晶硅棒的质量欠佳的主要原因在于：现有技术的拉晶方法，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段，在各个时刻，对结晶界面处的压强不作限定，导致从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段，在各个时刻，结晶界面处的压强波动较大。同时，发明人创造性的发现，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段，在各个时刻，结晶界面处的压强会大致决定该时刻的硅料的熔点，进而影响结晶温度，结晶温度会大致决定结晶速度，宏观体现在拉制得到的单晶硅棒的直径的稳定性。因此，为了解决该问题，本发明的主要思路在于：从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段，在各个时刻，通入单晶炉的气体在位于结晶界面处的压强大致稳定，同一时刻通入单晶炉的气体在结晶界面的压强，等于该时刻结晶界面的压强，就是从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段，保持结晶界面的压强基本稳定，进而使得拉制得到的晶棒的直径的波动性较小，拉制得到的单晶晶棒的直径的稳定性较好。同时，结晶界面的压强会影响杂质的分凝系数，进而影响杂质在单晶晶棒各处的浓度分布，本发明中，在调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段中，不同时刻，结晶界面的压强大致相等，则，同一种杂质在单晶晶棒各处的浓度分布大致相等，单晶晶棒质量均匀性较好，同样提升了单晶晶棒的质量。

更为具体的，直拉法主要分为装料、熔料、降温调整引晶温度、引晶、放肩、转肩、等径、收尾等工序。此处的调温开始时刻就是：降温调整引晶温度该工序开始的时刻。第一气体为调温开始时刻之后，至收尾结束时刻的时段内，各个时刻，通入单晶炉的气体，例如，单晶炉 A 某次拉晶过程中，调温开始时刻为 2021 年 10 月 20 日 10:13:20，收尾结束时刻的时刻为：2021 年 10 月 21 日 12:13:20，则，该第一气体即为：2021 年 10 月 20 日 10:13:20 之后，至 2021 年 10 月 21 日 12:13:20 的时间段内，各个时刻通入该单晶炉 A 的所有气体。该第一气体可以为混合气体或者单一种类的气体，本发明对此不作具体限定。该第一压强就是，第一气体在调温开始时刻之后，至收尾结束时刻的时段内，各个时刻，通入单晶炉的气体在结晶界面的压强。例如，针对上述例子，第一压强就是 2021 年 10 月 20 日 10:13:20 之后，至 2021 年 10 月 21 日 12:13:20 的时间段内，各个时刻通入该单晶炉 A 的所有气体在结晶界面的压强。此处的第一气体和第一压强对应同一时刻。

该第二气体为：调温开始时刻，通入单晶炉的所有气体。该第二压强就是，调温开始时刻，通入该单晶炉的第二气体，在结晶界面处的压强。例如针对上述例子，在结晶界面处的第二压强就是：调温开始时刻为 2021 年 10

月 20 日 10:13:20, 通入该单晶炉 A 的所有气体在结晶界面处的压强。

更为具体的, 对结晶界面的压强产生影响的主要因素是通入单晶炉的气体, 而且, 结晶过程或晶棒拉制过程主要是从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段。因此, 本发明从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内, 控制各个时刻, 通入单晶炉的第一气体, 在结晶界面处的第一压强, 与调温开始时刻, 通入该单晶炉的第二气体, 在结晶界面处的第二压强, 两者的差值的绝对值, 小于或等于第一预设值, 就是说, 保持的是从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内, 不同时刻, 通入单晶炉的气体在结晶界面处的压强基本保持不变。

需要说明的是, 此处的第一气体和第二气体的成分是否相同不作具体限定。此处的第一预设值的大小不作具体限定, 具体以对晶棒的直径的稳定性要求程度而定。

本发明保持的是, 从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内, 通入单晶炉的气体在结晶界面的压强稳定, 相对于保持气体在其余位置的压强稳定而言, 结晶界面的压强稳定, 对于晶棒的直径的稳定性的影响最大, 因此, 本发明对于提升晶棒的直径的稳定性效果更优。例如, 相对于保持排出单晶炉的气体的压强稳定而言, 结晶温度、结晶速度受到结晶界面的压强的影响更大, 更直接, 因此, 本发明中, 从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内, 控制通入单晶炉的气体在结晶界面的压强稳定, 能够得到直径更稳定的单晶晶棒。

可选地, 该第一预设值为 10pa, 就是说从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内, 控制各个时刻, 通入单晶炉的第一气体, 在结晶界面处的第一压强 p_1 , 与调温开始时刻, 通入单晶炉的第二气体, 在结晶界面处的第二压强 p_2 , 两者的差值的绝对值, 小于或等于 10pa, 从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内, 结晶界面处的压强更为稳定, 使得拉制得到的单晶晶棒的直径的波动性更小, 拉制得到的单晶晶棒的直径的稳定性更好。同时, 同一种杂质在单晶晶棒各处的浓度分布大致相等, 单晶晶棒质量均匀性较好, 同样提升了单晶晶棒的质量。

例如, 从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内, 控制各个时刻, 通入单晶炉的第一气体, 在结晶界面处的第一压强 p_1 , 与调温开始时刻, 通入单晶炉的第二气体, 在结晶界面处的第二压强 p_2 , 两者的差值的绝对值为 0、1pa、1.3pa、2pa、5pa、6pa、7pa、8pa、9pa、10pa。

可选地, 第一气体包括拉晶过程的保护气体, 第二气体包括拉晶过程的保护气体, 保护气体的主要作用在于避免其他气体对于拉晶过程的影响。

可选地，保护气体包括：氮气，和/或，惰性气体。上述保护气体易于获得，成本较低。

可选地，惰性气体包括氩气，氩气较为常见，易于获得，成本较低。

图 1 示出了本发明实施例中的一种单晶炉的结构示意图。图 2 示出了本发明实施例中的一种拉晶方法的步骤流程图。

可选地，参照图 2 所示，该拉晶方法可以包括如下步骤：

步骤 101，基于伯努利原理，获取所述第二气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的起始机械能。

流体的伯努利原理为公式一： $p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = C$ ，此处的 p 为流体在某
个位置的压强，更为具体的，可以是压强。 $\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh$ ，可以为伯努利原理中，除了压力势能之外的机械能。其中， C 为常量， ρ 为该流体的密度。 v 为流体在上述位置处的流速， g 为重力加速度，取值可以为 9.8N/kg ， h 为上述位置处与预设水平面之间的距离。对于拉晶过程中的气体而言，该预设水平面可以和结晶界面平行，例如，该预设水平面可以为海平面。需要说明的是，
针对拉晶过程中气体而言，在拉晶过程中，通常是通过改变坩埚位，使得结晶界面的位置保持不动，也就是说，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，结晶界面的位置基本保持不动，则，对于拉晶过程中的气体而言，伯努利原理还可以简化为 $p + \frac{1}{2}\rho v^2$ 为常量。在本发明中，伯努利原理是否简化不作具体限定。

例如，基于伯努利原理，第二气体在结晶界面处，除了压力势能之外的起始机械能可以是：调温开始时刻，通入单晶炉的第二气体，在结晶界面处的起始动能参数和起始重力势能参数。第二气体的起始动能参数为：调温开始时刻，该第二气体的密度与其在调温开始时刻，结晶界面处的流速的平方的乘积。第二气体的起始重力势能参数为：调温开始时刻，该第二气体的密度与其在调温开始时刻，结晶界面与预设水平面之间的距离，以及重力加速度三者的乘积。该预设水平面与结晶界面平行即可，对于该预设水平面的选取不作具体限定。例如，该预设水平面可以为海平面，或者，该预设水平面可以为结晶界面，只需保证该预设水平面与结晶界面平行即可，对于该预设水平面的具体选择不作限定。即，第二气体在结晶界面处，除了压力势能之

外的起始机械能为公式二： $Q_1 = \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 gh_1$ 。 ρ_1 为调温开始时刻，该第二

气体的密度。 v_1 为调温开始时刻，该第二气体在结晶界面处的流速。 h_1 为调温开始时刻，结晶界面和预设水平面之间的距离。

针对前述例子，上述步骤 101 就是，获取 2021 年 10 月 20 日 10:13:20 通入该单晶炉 A 的所有气体或第二气体，除了压力势能之外的起始机械能 Q1，
5 起始机械能 Q1 可以包括起始动能参数和起始重力势能参数，该起始动能参数就是：2021 年 10 月 20 日 10:13:20 通入该单晶炉 A 的第二气体的密度 ρ_1 ，与 2021 年 10 月 20 日 10:13:20 通入该单晶炉 A 的第二气体在结晶界面的流速 v_1 的平方的乘积。起始重力势能参数就是：2021 年 10 月 20 日 10:13:20 通入该单晶炉 A 的第二气体的密度 ρ_1 、与调温开始时刻，结晶界面与预设水平面之间的
10 的距离 h_1 、重力加速度三者的乘积。

步骤 102，从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，基于伯努利原理，控制所述第一气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能，与
所述除了压力势能之外的起始机械能的差值的绝对值，小于或等于第二预设值。

15 基于伯努利原理，从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，第一气体在结晶界面处处，除了压力势能之外的实时机械能可以是：从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，第一时刻，通入单晶炉的第一气体，在结晶界面处的实时动能参数和实时重力势能参数。第一气体的实时动能参数为：从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，第一时刻，该第一气体的密度
20 与其在第一时刻，结晶界面处的流速的平方的乘积。第一气体的实时重力势能参数为：第一时刻，该第一气体的密度与其在第一时刻，结晶界面与前述的预设水平面之间的距离，以及重力加速度三者的乘积。该预设水平面与步骤 101 中的预设水平面为同一水平面。即，第一气体在结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能为公式三： $Q_2 = \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2$ 。 ρ_2 为第一时刻，该
25 第一气体的密度。 v_2 为第一时刻，该第一气体在结晶界面处的流速。 g 为重力加速度，取值同样可以为 9.8N/kg。 h_2 为第一时刻，结晶界面和预设水平面之间的距离。

从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，基于伯努利原理，控制第一气体在结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能 Q2，与除了压力势能
30 之外的起始机械能 Q1 的差值的绝对值，小于或等于第二预设值，就是说，控制第一气体在结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能 Q2，与除了压力势能之外起始机械能 Q1 基本保持一致。则，调温开始时刻，第二气体在结晶

界面处的伯努利方程见公式四： $p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1 = C$ ，此处的 p_1 为调温开始时刻，第二气体在结晶界面处的压力势能，可以是压强。从调温开始时刻

之后至收尾结束时刻的时段，各个时刻，第一气体在结晶界面处的伯努利方程见公式五： $p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2 = C$ ，此处的 p_2 为从调温开始时刻之后至收

5 尾结束时刻的时段，各个时刻，第一气体在结晶界面处的压力势能，可以是压强。伯努利方程中的 C 为常量。将上述公式四和公式五联立，则，

$p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2$ 。该步骤 102 中，可以是控制

$\frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1$ ，与 $\frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2$ 两者的差值的绝对值，小于或等于第二预设

10 值，进而能够保证 p_1 和 p_2 的差值较小，从更为细致的参数上，从调温开始时刻至收尾结束时刻，控制通入单晶炉的气体在结晶界面处的压强较稳定，可操作性更强，控制更为精准，则，单晶晶棒的直径的稳定性更好，同一种杂质在单晶晶棒各处的浓度分布更均匀，单晶晶棒质量均匀性更好，进一步提升了单晶晶棒的质量。

15 针对前述例子，上述步骤 102 就是，控制 2021 年 10 月 20 日 10:13:20 之后，至 2021 年 10 月 21 日 12:13:20 的时间段内，每个时刻，通入该单晶炉 A 的所有气体或第一气体除了压力势能之外的实时机械能 Q_2 ，与除了压力势能之外的起始机械能 Q_1 ，两者的差值的绝对值小于或等于第二预设值，除了压力势能之外的实时机械能 Q_1 包括实时动能参数和实时重力势能参数，该实时动能参数就是 2021 年 10 月 20 日 10:13:20 之后，至 2021 年 10 月 21 日 12:13:20 的时间段内，第一时刻，通入该单晶炉 A 的第一气体的密度 ρ_2 ，与该第一时刻通入该单晶炉 A 的第一气体在结晶界面的流速 v_2 的平方的乘积。实时重力势能参数就是：该第一时刻，通入该单晶炉 A 的第一气体的密度 ρ_2 、与第一时刻，结晶界面与预设水平面之间的距离 h_2 、重力加速度三者的乘积。

25 需要说明的是，此处的第一时刻，是从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内的任一时刻。

前述的第二预设值可以根据需要控制的单晶硅棒的直径的稳定性的要求进行设定。对于单晶硅棒的直径的稳定性的要求越高，第二预设值越小。

30 可选地，该第二预设值可以为 6J/m^3 。就是说从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，控制各个时刻，通入单晶炉的第一气体，在结晶界面处除了压力势能之外的实时机械能 Q_2 ，与调温开始时刻，通入单晶炉的第二气

体,在结晶界面处除了压力势能之外的起始机械能 Q_1 ,两者的差值的绝对值,小于或等于 6J/m^3 ,从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内,结晶界面处的压强更为稳定,使得拉制得到的单晶晶棒的直径的波动性更小,拉制得到的单晶晶棒的直径的稳定性更好。同时,同一种杂质在单晶晶棒各处的浓度分布大致相等,单晶晶棒质量均匀性较好,同样提升了单晶晶棒的质量。

例如,从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内,控制各个时刻,通入单晶炉的第一气体,在结晶界面处除了压力势能之外的实时机械能 Q_2 ,与调温开始时刻,通入单晶炉的第二气体,在结晶界面处除了压力势能之外的起始机械能 Q_1 ,两者的差值的绝对值为 0 、 0.2J/m^3 、 1.3J/m^3 、 1.9J/m^3 、 2.5J/m^3 、 3J/m^3 、 4J/m^3 、 5J/m^3 、 5.3J/m^3 、 6J/m^3 。

可选地,第一气体和第二气体相同,上述步骤 101 可以包括:获取第二气体,在调温开始时刻,结晶界面处的流速。上述步骤 102 可以包括:从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段,控制第一时刻,第一气体,结晶界面处的流速,与第二气体,在调温开始时刻,结晶界面处的流速的差值的绝对值,小于或等于第三预设值。也就是说,从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内,通入单晶炉内的气体成分、种类等相同。则,第一气体的密度 ρ_2 和第二气体的密度 ρ_1 两者相等。同时,在拉晶过程中,通常是通过改变坩位,使得结晶界面的位置保持不动,也就是说,从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内,结晶界面的位置保持不动,则, $h_1 = h_2$, 则,在该等式中,

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2$$
, 只需保持第二气体,在调温开始时刻,结晶界面处的流速 v_1 ,和从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段,各个时刻的第一气体在结晶界面处的流速 v_2 稳定,就可以保障从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段,各个时刻,通入单晶炉的气体在结晶界面处的压强基本稳定。仅通过控制气体的在结晶界面处的流速,就可以保障拉制得到的单晶硅棒的直径的稳定性,控制的参数较少,工艺相对简单,易于实现。

需要说明的是,前述的第三预设值可以根据需要控制的单晶硅棒的直径的稳定性的要求进行设定。对于单晶硅棒的直径的稳定性的要求越高,第三预设值越小。

可选地,该第三预设值可以为 2mm/min 。就是说从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内,控制各个时刻,通入单晶炉的第一气体,在结晶界面处的流速 v_2 ,与调温开始时刻,通入单晶炉的第二气体,在结晶界面处的流速 v_1 ,两者的差值的绝对值,小于或等于 2mm/min ,从调温开始时刻至收

尾结束时刻的时段内，结晶界面处的压强更为稳定，使得拉制得到的单晶晶棒的直径的波动性更小，拉制得到的单晶晶棒的直径的稳定性更好。同时，同一种杂质在单晶晶棒各处的浓度分布大致相等，单晶晶棒质量均匀性较好，同样提升了单晶晶棒的质量。

例如，从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，控制各个时刻，通入单晶炉的第一气体，在结晶界面处的流速 v_2 ，与调温开始时刻，通入单晶炉的第二气体，在结晶界面处的流速 v_1 ，两者的差值的绝对值为 0、0.1mm/min、0.3mm/min、0.9mm/min、1.1mm/min、1.3mm/min、1.4mm/min、1.5mm/min、1.8mm/min、2mm/min。

参照图 1 所示，可选地，上述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，控制该第一时刻，第一气体，结晶界面处的流速，与第二气体，在调温开始时刻，结晶界面处的流速的差值的绝对值，小于或等于第三预设值，可以包括：从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取该第一时刻，第一气体从热屏 11 下沿流出后，至该第一气体从单晶炉中排出之前的流通过程中，各点处的最小的流通截面积；用第一时刻对应的最小的流通截面积，乘以该第一时刻，第一气体，在结晶界面处的流速，得到该第一时刻的第一实时流量。在该第一时刻，向单晶炉内通入该第一实时流量的第一气体。通入单晶炉的气体，在结晶界面处的流速 v ，可以等于该时刻对应的流量 L ，除以该时刻该气体从热屏下沿流出后，至该气体从单晶炉中排出之前的流通过程中，各点处的最小的流通截面积 S_1 ，即， $v = L/S_1$ ，进而通过逆运算得到该时刻的第一实时流量。通常情况下，流量更容易测量和控制，将流速转换为流量易于测量和控制的流量，操作更简单。

需要说明的是，气体从单晶炉中排出的位置通常位于单晶炉的底部，在不同的时刻，气体从热屏下沿流出后，至该气体从单晶炉中排出之前的流通过程中，最小的流通截面积 S_1 所处的位置不尽相同，该流通过程中，最小的流通截面积，可以对气体在结晶界面处的流速 v 起到较为关键的决定作用，因此，采用此处的最小的流通截面积 S_1 ，获取该第一实时流量，可以保障从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，结晶界面处的压强更为稳定，使得拉制得到的单晶晶棒的直径的波动性更小，拉制得到的单晶晶棒的直径的稳定性更好。同时，同一种杂质在单晶晶棒各处的浓度分布大致相等，单晶晶棒质量均匀性较好，同样提升了单晶晶棒的质量。

可选地，前述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取第一时刻，第一气体从热屏下沿流出后，至第一气体从单晶炉中排出之前的流通过程中，各点处的最小的流通截面积之前，该方法还可以包括：获取各个坩位

处，从热屏下沿，至该单晶炉的气体排出之前的流通路径中，各点处的最小的流通截面积，并将该坨位对应的最小的流通截面积，存储在第一坨位面积列表中。坨位是拉晶过程中，坨帮 15 的上沿相对于结晶界面 2 的距离。在坨位相同的情况下，针对同一个单晶炉或热场，不同气体从热屏下沿流出后，至气体从单晶炉中排出之前的流通路径中，各点处的最小的流通截面积是相等的，就是说，一个坨位对应一个最小的流通截面积。因此，提前获取坨位对应的最小的流通截面积，并存储在第一坨位面积列表中，可以减少重复工作，后续在需要最小的流通截面积时，仅需查表即可，可以提升效率。

上述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取第一时刻，第一气体从热屏下沿流出后，至第一气体从单晶炉中排出之前的流通路径中，各点处的最小的流通截面积，可以包括：获取该第一时刻对应的第一坨位，从前述第一坨位面积列表中，查询得到该第一坨位对应的最小的流通截面积，就得到了该第一时刻对应的最小的流通截面积。

可选地，前述获取各个坨位处，从热屏下沿，至从单晶炉中气体排出之前的流通路径中，各点处的最小的流通截面积，并将坨位对应的最小的流通截面积，存储在第一坨位面积列表中，可以包括下述子步骤 S1-S5：

子步骤 S1，获取各个坨位处，以热屏 11 下沿靠近结晶界面 2 的端点，与单晶炉的第一中线 L1 之间的距离，为半径，以该端点所在的第一平面与该第一中线 L1 的第一交点为圆心，形成的圆柱体的侧面的第一表面积。其中，该第一中线 L1 和结晶界面 2 垂直，第一平面和结晶界面 2 平行。

子步骤 S2，获取各个坨位处，以坨帮 14 的内壁上沿和热屏 11 的外壁 112 的 R 弧 1121 上的第二点的连线为母线，以前述的第一中线 L1 为中心线，形成的圆台的侧面的第二表面积。其中，该第二点位于热屏 11 的外壁 112 的 R 弧 1121 的圆心，与坨帮 14 的内壁上沿的连线上。

子步骤 S3，获取各个坨位处，以坨帮 15 进入过渡盘 12 前，坨帮 15 的外壁上沿和过渡盘 12 的内壁下沿两者连线为母线，以第一中线 L1 为中心线，形成的圆台的侧面的第三表面积。

子步骤 S4，获取各个坨位处，以坨帮 15 进入过渡盘 12，坨帮 15 的外壁上沿和过渡盘 12 的内壁下沿两者连线为母线，以第一中线 L1 为中心线，形成的圆台的侧面的第四表面积。

子步骤 S5，针对同一坨位处，从所述第一表面积、第二表面积、第三表面积、第四表面积四者中，选择最小的表面积，作为所述坨位对应的最小的流通截面积，并存储在所述第一坨位面积列表中。

更为具体的，上述的第一表面积、第二表面积、第三表面积、第四表面

积，一方面在坩位发生变化时，上述四者的变化较为显著，另一方面，四者对于气体在结晶界面的压强的影响较大，因此，对于同一坩位，从上述四者中选择最小的表面积，计算得到的流速较为准确。

需要说明的是，过渡盘 12 的作用主要在于：支撑上保温筒 17，同时，对于改变中保温筒 13 和上保温筒 17 的内径，起到过渡作用。

需要说明的是，对于调温开始时刻，第二气体在结晶界面处的流速 v_2 的确定，同样是，获取调温开始时刻，第二气体从热屏下沿流出后，至第二气体从所述单晶炉中排出之前的流电路径中，各点处的最小的流通截面积 S_0 。

$v_2 = L_0/S_0$ 。 L_0 为调温开始时刻通入单晶炉的第二气体的流量 L_0 。

可选地，获取调温开始时刻，第二气体从热屏下沿流出后，至第二气体从单晶炉中排出之前的流电路径中，各点处的最小的流通截面积 S_0 ，同样可以为：先获取调温开始时刻对应的第二坩位，然后从前述的第一坩位面积列表中，查询得到该第二坩位对应的最小的流通截面面积。

需要说明的是，全文所提及的一个器件的上沿更靠近炉盖，下沿更远离炉盖，内壁更靠近单晶炉的第一中线 L1，外壁更远离单晶炉的第一中线 L1。

可选地，上述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，控制该第一时刻，第一气体，结晶界面处的流速，与第二气体，在调温开始时刻，结晶界面处的流速的差值的绝对值，小于或等于第三预设值，可以包括：从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取该第一时刻，第一气体在该结晶界面处的流通截面积 S_2 ，然后用该第一时刻对应的结晶界面处的流通截面积 S_2 ，乘以该第一时刻，该第一气体，在结晶界面处的流速 v ，得到该第一时刻的第二实时流量。在该第一时刻，向单晶炉内通入该第二实时流量的第一气体。即，第二实时流量= $v \times S_2$ 。通常情况下，流量更容易测量和控制，将流速转换为流量易于测量和控制的流量，操作更简单。

更为具体的，第一时刻，该第一气体，在结晶界面处的流速 v ，与该第一时刻，第一气体在该结晶界面处的流通截面积 S_2 的直接相关，采用该第一时刻，第一气体在该结晶界面处的流通截面积 S_2 ，计算得到的第二实时流量，对第一时刻，该第一气体，在结晶界面处的压强的稳定性的影响更为直接，进而，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，结晶界面处的压强更为稳定，使得拉制得到的单晶晶棒的直径的波动性更小，拉制得到的单晶晶棒的直径的稳定性更好。同时，同一种杂质在单晶晶棒各处的浓度分布大致相等，单晶晶棒质量均匀性较好，同样提升了单晶晶棒的质量。

可选地，前述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取第一时刻，第一气体在结晶界面处的流通截面积之前，该方法还可以包括：获取各

个坨位处，结晶界面处的流通截面积，并将各个坨位处，结晶界面处的流通截面积，存储在第二坨位面积列表中。前述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取第一时刻，该第一气体在结晶界面处的流通截面积，可以包括：获取该第一时刻对应的第一坨位，然后从第二坨位面积列表中，查询得到该第一坨位对应的流通截面积，可以减少重复工作，后续在需要各个坨位，第一气体在结晶界面的流通截面积时，仅需查表即可，可以提升效率。

本发明还提供一种单晶硅棒，该单晶硅棒采用任一前述的拉晶方法制备得到，该单晶硅棒具有与任一前述的拉晶方法相同或相似的有益效果，为了避免重复，此处不再赘述。

本发明还提供一种单晶炉，该单晶炉用于采用任一前述的拉晶方法进行拉晶，该单晶炉具有与任一前述的拉晶方法相同或相似的有益效果，为了避免重复，此处不再赘述。

下面结合具体的实施例，进一步解释本发明：

实施例 1

应用在 28 吋的热场中。该热场中，热屏 11 的外壁 112 的外径为 614mm，过渡盘 12 的内径为 810mm，坨帮 15 的外径为 740mm，坨坨 14 的内径为 680mm，坨坨 14 可以为石英坨坨。坨坨 15 的高度差可以为 15mm，器盖距为 28mm，热加距为 72mm，热屏 11 的外壁 112 的 R 弧 1121 的半径为 100mm。

从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，通入单晶炉的气体均为氩气，也就是，第一气体和第二气体相同均为氩气。调温开始时刻，氩气的流量 L_0 为 70slpm (stard liter per minute，标准升每分钟)。调温开始时刻对应的坨位为 -80mm，调温开始时刻，结晶界面处的流通截面面积为 136383.22mm^2 ，则，调温开始时刻，氩气在结晶界面处的流速 $v_1 = 70 \times 10^6 \div 136383.22 = 513.26\text{mm/min}$ 。调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，坨位减小，控制每个时刻的氩气在结晶界面处的流速 v_2 均为 513.26mm/min ，同时用每个时刻对应的结晶界面处的表面积 $S_2 \times v_2 = L_t$ ，此处的 L_t 为调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，每个时刻或每个坨位对应的氩气的第二实时流量。在每个时刻或每个坨位，向单晶炉内通入该时刻或该坨位对应的

第二实时流量的氩气，则，根据前述的公式： $p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1 = p_2 +$

$\frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2$ ，由于， $\rho_1 = \rho_2, v_1 = v_2$ ，在拉晶过程中，结晶界面保持不变，

则 $h_1 = h_2$ ，进而保证了，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，氩气在结晶界面处的压强 p 保持不变。

实施例 2

也应用在如实施例 1 所记载的 28 吋的热场中。该热场与实施例 1 对应相同，为了避免重复，此处不再赘述。

从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，通入单晶炉的气体均为氩气，也就是，第一气体和第二气体相同均为氩气。参照下表 1，调温开始时刻，氩气的流量 L_0 为 70slpm (stard liter per minute, 标准升每分钟)。调温开始时刻对应的坳位为 -80mm，调温开始时刻，前述第一表面积、第二表面积、第三表面积、第四表面积四者中，最小的表面积为第二表面积，第二表面积为 136391.97mm^2 ，则，调温开始时刻，氩气在结晶界面处的流速 $v_1 = 70 \times 10^6 \div 136391.97 = 513.23\text{mm/min}$ 。调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，坳位减小，控制每个时刻的氩气在结晶界面处的流速 v_2 均为 513.23mm/min ，同时用每个时刻对应的最小的表面积 $S_1 S \times v_2 = L_{t1}$ ，此处的 L_{t1} 为调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，每个时刻或每个坳位对应的氩气的第一实时流量。在每个时刻或每个坳位，向单晶炉内通入该时刻或该坳位对应的第一实时流量的氩气，则，根据前述的公式： $p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2$ ，由于 $\rho_1 = \rho_2$ $v_1 = v_2$ ，在拉晶过程中，结晶界面保持不变，则 $h_1 = h_2$ ，进而保证了，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，氩气在结晶界面处的压强 p 保持不变。

表 1：实施例 2 中部分拉晶工艺参数表

坳位 (mm)	第一表面积 (mm^2)	第二表面积 (mm^2)	第三表面积 (mm^2)	第四表面积 (mm^2)	最小的流通截面积 (mm^2)	流速 (mm/min)	氩气流量 (slpm)
-80	153388.26	136391.97	269904.33	/	136391.97	513.23	70
-70	126119.24	125940.86	246245.42	/	125940.86	513.23	64.64
-60	105667.47	115946.76	222734.95	/	105667.47	513.23	54.23
-50	88624.33	106530.65	199425.40	/	88624.33	513.23	45.48
-40	81807.07	97820.78	176396.46	/	81807.07	513.23	41.99
-30	78397.44	89949.88	153774.24	/	78397.44	513.23	40.24
-20	74989.82	83051.18	131768.40	/	74989.82	513.23	38.49
-10	71581.19	77253.14	110746.96	/	71581.19	513.23	36.74
0	68172.56	72673.10	91391.77	/	68172.56	513.23	34.99
10	67490.83	69410.40	75004.04	/	67490.83	513.23	34.64
20	66809.11	67539.65	63908.88	/	63908.88	513.23	32.80
30	66127.38	67105.15	61062.83	60868.36	60868.36	513.23	31.24
40	65445.66	67076.14	/	60868.36	60868.36	513.23	31.24
50	64763.93	67076.14	/	60868.36	60868.36	513.23	31.24
60	64763.93	67076.14	/	60868.36	60868.36	513.23	31.24
70	64763.93	67076.14	/	60868.36	60868.36	513.23	31.24
80	64763.93	67076.14	/	60868.36	60868.36	513.23	31.24
90	64763.93	67076.14	/	60868.36	60868.36	513.23	31.24
100	64763.93	67076.14	/	60868.36	60868.36	513.23	31.24

对比例

也应用在 28 吋的热场中。该热场与实施例 1 对应相同，为了避免重复，此处不再赘述。

从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，通入单晶炉的气体均为氩气。

- 5 从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，氩气的流量均为 70slpm。调温开始时刻对应的坩位为-80mm。

实施例 1、实施例 2 和对比例中单晶晶棒的设定直径均为 300mm。实施例 1、实施例 2 和对比例中所用的硅料相同。实施例 1、实施例 2 和对比例中除了通入氩气的流量或氩气在结晶界面的流速之外其余的工艺参数等均对应

10 相同。图 3 示出了本发明实施例 1 中的单晶晶棒 3 与对比例的单晶晶棒的直径波动情况对比图。图 3 中数值表征的含义为：单晶晶棒各处的直径与设定直径 300mm 的偏差大小。数值的单位可以为 mm。实施例 1 和对比例拉制得到的单晶晶棒的直径的波动情况如图 3 所示。图 3 中实线曲线为实施例 1 拉制得到的单晶晶棒 3 的直径的波动，图 3 中虚线曲线为对比例拉制得到的单

15 晶晶棒 3 的直径的波动。从图 3 中可以得出，实施例 1 拉制得到的单晶晶棒 3 的直径的波动，明显小于对比例拉制得到的单晶晶棒的直径的波动。实施例 1 相对于对比例而言，单晶晶棒 3 的直径的波动由 $\pm 1\text{mm}$ ，大致缩小至 $\pm 0.5\text{mm}$ 。主要原因在于：从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，氩气在结晶界面处的压强 p 会影响硅料的熔点，大致决定结晶温度，进而影响结晶速度，最

20 终影响拉制得到的单晶晶棒 3 的直径的稳定性。实施例 1 中，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，氩气在结晶界面处的压强 p 保持不变，则结晶温度基本稳定，结晶速度基本稳定，拉制得到的单晶晶棒 3 的直径的波动较小，拉制得到的单晶晶棒 3 的直径的稳定性较好。同时，从调温开始时刻至收尾结束时刻的时段内，氩气在结晶界面处的压强 p 保持不变，则，同一种

25 杂质在单晶晶棒 3 各处的浓度分布大致相等，单晶晶棒 3 质量均匀性较好，同样提升了单晶晶棒 3 的质量。同时，实施例 1 和实施例 2，相对于对比例而言，还减少了氩气的使用量，可以降低成本。需要说明的是，实施例 2 和对比例拉制得到的单晶晶棒的直径的波动情况，与图 3 类似，为了避免重复，且简化图示，未在图 3 中示出。

30 需要说明的是，对于方法实施例，为了简单描述，故将其都表述为一系

列的动作组合，但是本领域技术人员应该知悉，本申请实施例并不受所描述的动作顺序的限制，因为依据本申请实施例，某些步骤可以采用其他顺序或者同时进行。其次，本领域技术人员也应该知悉，说明书中所描述的实施例均属于优选实施例，所涉及的动作并不一定是本申请实施例所必须的。

5 需要说明的是，在本文中，术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含，从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者装置不仅包括那些要素，而且还包括没有明确列出的其他要素，或者是还包括为这种过程、方法、物品或者装置所固有的要素。在没有更多限制的情况下，由语句“包括一个...”限定的要素，并不排除在包括该要素的过程、方法、物品或者装置中还存在另外的相同要素。

通过以上的实施方式的描述，本领域的技术人员可以清楚地了解到上述实施例方法可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现，当然也可以通过硬件，但很多情况下前者是更佳的实施方式。基于这样的理解，本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质（如 ROM/RAM、磁碟、光盘）中，包括若干指令用以使得一台终端（可以是手机，计算机，服务器，空调器，或者网络设备等）执行本发明各个实施例所述的方法。

以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的，其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性的劳动的情况下，即可以理解并实施。

本文中所称的“一个实施例”、“实施例”或者“一个或者多个实施例”意味着，结合实施例描述的特定特征、结构或者特性包括在本申请的至少一个实施例中。此外，请注意，这里“在一个实施例中”的词语例子不一定全指同一个实施例。

在此处所提供的说明书中，说明了大量具体细节。然而，能够理解，本申请的实施例可以在没有这些具体细节的情况下被实践。在一些实例中，并未详细示出公知的方法、结构和技术，以便不模糊对本说明书的理解。

最后应说明的是：以上实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案5 的本质脱离本申请各实施例技术方案的精神和范围。

权利要求

1、一种拉晶方法，其特征在于，所述方法包括：

步骤 S，从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段内，控制各个时刻，
通入单晶炉的第一气体，在结晶界面处的第一压强，与调温开始时刻，通入
5 所述单晶炉的第二气体，在所述结晶界面处的第二压强，两者的差值的绝对
值，小于或等于第一预设值。

2、根据权利要求 1 所述的拉晶方法，其特征在于，所述步骤 S 之前，所述方法还包括：

基于伯努利原理，获取所述第二气体在所述结晶界面处，除了压力势能
10 之外的起始机械能；

所述步骤 S，包括：

从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，基于伯努利原理，控制所述
第一气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能，与所述除
了压力势能之外的起始机械能的差值的绝对值，小于或等于第二预设值。

15 3、根据权利要求 2 所述的拉晶方法，其特征在于，所述第一气体，与所
述第二气体相同；所述基于伯努利原理，获取所述第二气体在所述结晶界面
处，除了压力势能之外的起始机械能，包括：

获取所述第二气体，在调温开始时刻，在所述结晶界面处的流速；

所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，基于伯努利原理，控
20 制所述第一气体在所述结晶界面处，除了压力势能之外的实时机械能，与所
述除了压力势能之外的起始机械能的差值的绝对值，小于或等于第二预设值，
包括：

从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，控制所述第一时刻，所述
第一气体，在所述结晶界面处的流速，与所述第二气体，在调温开始时刻，
25 结晶界面处的流速的差值的绝对值，小于或等于第三预设值。

4、根据权利要求 3 所述的拉晶方法，其特征在于，所述从调温开始时刻
之后至收尾结束时刻的时段，控制所述第一时刻，所述第一气体，在所述结
晶界面处的流速，与所述第二气体，在调温开始时刻，结晶界面处的流速的
差值的绝对值，小于或等于第三预设值，包括：

从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体从热屏下沿流出后，至所述第一气体从所述单晶炉中排出之前的流
通路径中，各点处的最小的流通截面积；

用所述第一时刻对应的最小的流通截面积，乘以所述第一时刻，所述第
5 一气体，在结晶界面处的流速，得到所述第一时刻的第一实时流量；

在所述第一时刻，向所述单晶炉内通入所述第一实时流量的所述第一气
体。

5、根据权利要求4所述的拉晶方法，其特征在于，所述从调温开始时刻
之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体从热屏下沿
10 流出后，至所述第一气体从所述单晶炉中排出之前的流通过程中，各点处的
最小的流通截面积之前，所述方法还包括：

获取各个坨位处，所述流通过程中，各点处的最小的流通截面积，并将
所述坨位对应的最小的流通截面积，存储在所述第一坨位面积列表中；

所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，
15 所述第一气体从热屏下沿流出后，至所述第一气体从所述单晶炉中排出之前的
流通过程中，各点处的最小的流通截面积，包括：

获取所述第一时刻对应的第一坨位；

从所述第一坨位面积列表中，查询得到所述第一坨位对应的最小的流通
截面积。

20 6、根据权利要求5所述的拉晶方法，其特征在于，所述获取各个坨位处，
所述流通过程中，各点处的最小的流通截面积，并将所述坨位对应的最小的
流通截面积，存储在所述第一坨位面积列表中，包括：

获取各个坨位处，以热屏下沿靠近所述结晶界面的端点，与所述单晶炉
的第一中线之间的距离，为半径，以所述端点所在的第一平面与所述第一中
25 线的第一交点为圆心，形成的圆柱体的侧面的第一表面积；其中，所述第一
中线和所述结晶界面垂直，所述第一平面和所述结晶界面平行；

获取各个坨位处，以坨埚的内壁上沿和所述热屏的外壁的 R 弧上的第二
点的连线为母线，以所述第一中线为中心线，形成的圆台的侧面的第二表面
积；其中，所述第二点位于所述热屏的外壁的 R 弧的圆心，与所述坨埚的内
30 壁上沿的连线上；

获取各个塌位处，以塌帮进入过渡盘前，塌帮的外壁上沿和过渡盘的内壁下沿两者连线为母线，以所述第一中线为中心线，形成的圆台的侧面的第三表面积；

5 获取各个塌位处，以塌帮进入过渡盘，塌帮的外壁上沿和过渡盘的内壁下沿两者连线为母线，以所述第一中线为中心线，形成的圆台的侧面的第四表面积；

针对同一塌位处，从所述第一表面积、第二表面积、第三表面积、第四表面积四者中，选择最小的表面积，作为所述塌位对应的最小的流通截面积，并存储在所述第一塌位面积列表中。

10 7、根据权利要求3所述的拉晶方法，其特征在于，所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，控制所述第一时刻，所述第一气体，在所述结晶界面处的流速，与所述第二气体，在调温开始时刻，结晶界面处的流速的差值的绝对值，小于或等于第三预设值，包括：

15 从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体在所述结晶界面处的流通截面积；

用所述第一时刻对应的结晶界面处的流通截面积，乘以所述第一时刻，所述第一气体，在结晶界面处的流速，得到所述第一时刻的第二实时流量；

在所述第一时刻，向所述单晶炉内通入所述第二实时流量的所述第一气体。

20 8、根据权利要求7所述的拉晶方法，其特征在于，所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体在所述结晶界面处的流通截面积之前，所述方法还包括：

获取各个塌位处，所述结晶界面处的流通截面积，并将各个塌位处，所述结晶界面处的流通截面积，存储在第二塌位面积列表中；

25 所述从调温开始时刻之后至收尾结束时刻的时段，获取所述第一时刻，所述第一气体在所述结晶界面处的流通截面积，包括：

获取所述第一时刻对应的第一塌位；

从所述第二塌位面积列表中，查询得到所述第一塌位对应的流通截面积。

30 9、根据权利要求1至8中任一所述的拉晶方法，其特征在于，所述第一预设值为：10pa。

10、根据权利要求 2 至 8 中任一所述的拉晶方法，其特征在于，所述第二预设值为： 6J/m^3 。

11、根据权利要求 3 至 8 中任一所述的拉晶方法，其特征在于，所述第三预设值为： 2mm/min 。

5 12、根据权利要求 1 至 8 中任一所述的拉晶方法，其特征在于，所述第一气体包括拉晶过程的保护气体，所述第二气体包括拉晶过程的保护气体。

13、根据权利要求 12 所述的拉晶方法，其特征在于，所述保护气体包括：氮气，和/或，惰性气体。

10 14、根据权利要求 13 所述的拉晶方法，其特征在于，所述惰性气体包括氩气。

15、一种单晶硅棒，其特征在于，采用如权利要求 1 至 14 中任一所述的拉晶方法制备得到。

15 16、一种单晶炉，其特征在于，所述单晶炉用于采用如权利要求 1 至 14 中任一所述的拉晶方法进行拉晶。

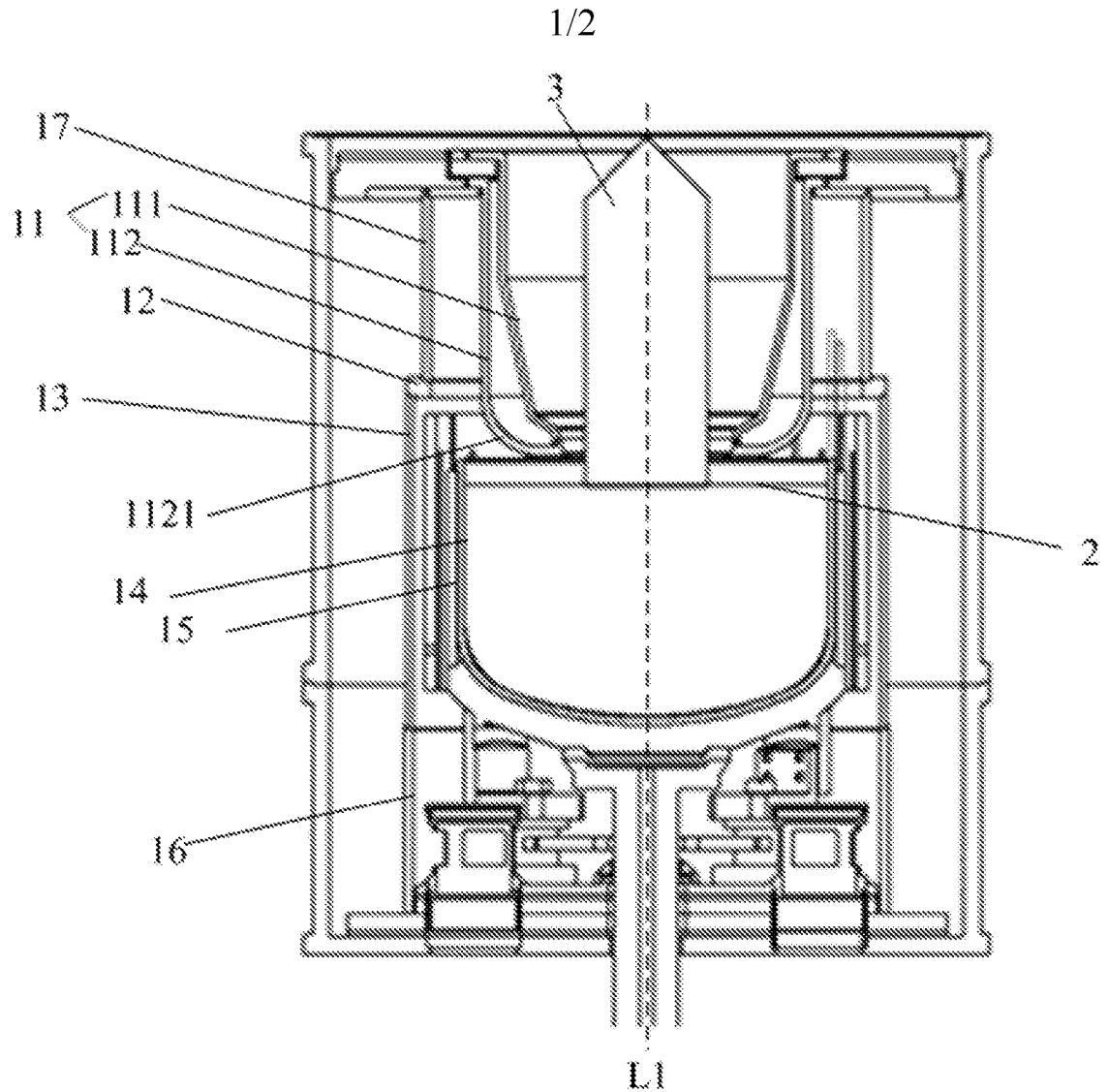


图 1

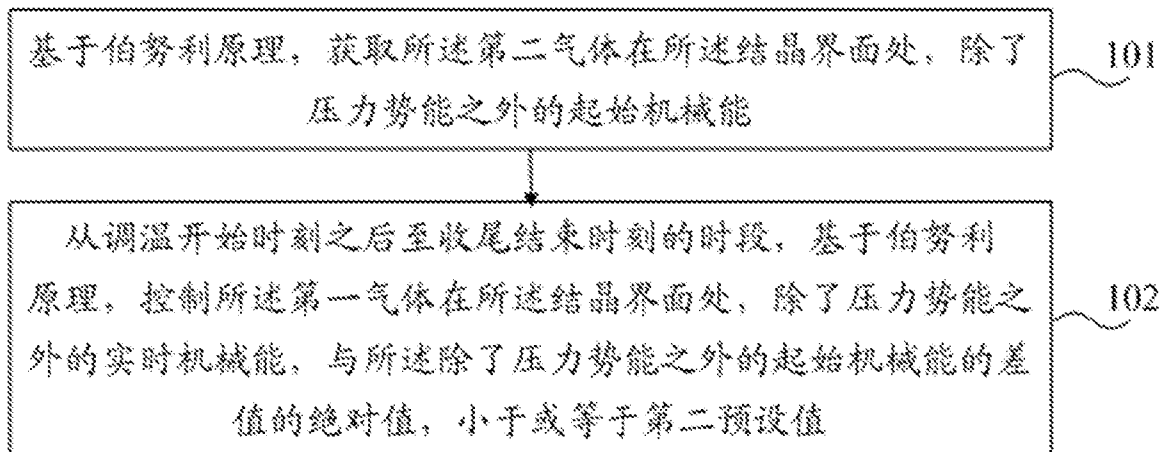


图 2

2/2

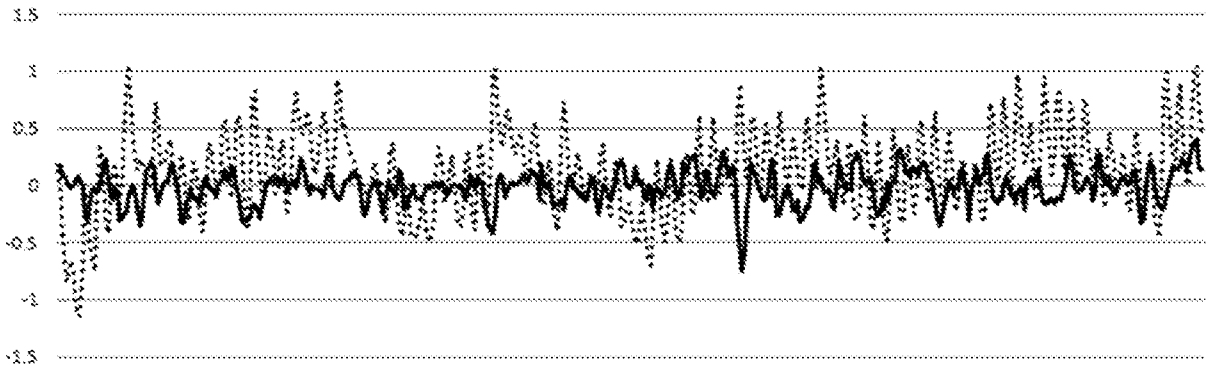


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/095179

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
C30B15/00(2006.01)i; C30B29/06(2006.01)i; C30B15/20(2006.01)i; C30B 27/02(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
IPC:C30B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
CJFD, CNTXT, DWPI, ENTXT, ENTXTC, VEN, WPABS, WPABSC, CNKI, Web of Science, 超星读秀, DUXIU, 万方, WANFANG, 百度检索, BAIDU Search: 控制, 气流, 氩气, 惰性气体, 相等, 相同, 稳定, 压力, 压强, 气压, 波动, 偏差, 流量, 流速, 单晶, 硅, 结晶界面, 结晶面, 结晶温度, 结晶速度, 隆基绿能科技股份有限公司, 王正远, 李广砥, 郭立, 杨正华, 张伟建, 直径, bias, declination, deflection, departure, deviation, diameter, excursion, fluctuation, instant, pressure, stability, stabilization, variation, partial difference, Crystal pulling, pressure drop, pressure imbalance, fluctuation pressure difference, stagl???, Single crystal, pressure differential, pressure difference, si, Silicon, pull crystal, cz, Czochralski, control+		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	林光伟 等 (LIN, Guangwei et al.). "基于贝叶斯参数优化的无模型自适应硅单晶直径控制 (Model-Free Adaptive Diameter Control of Monocrystalline Silicon Based on Bayesian Parameter Optimization)" 《人工晶体学报》(Journal of Synthetic Crystals), Vol. 51, No. 2, 28 February 2022 (2022-02-28), pages 229-241 and 247 ISSN: 10000-985x, pages 229-241 and 247	15
X	CN 109972201 A (ZHEJIANG JINGSHENG MECHANICAL & ELECTRICAL CO., LTD.) 05 July 2019 (2019-07-05) description, paragraph 80	15
X	CN 101709505 A (XI'AN LONGI SILICON MATERIALS CORP. et al.) 19 May 2010 (2010-05-19) claim 1	16
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report
2023-08-27		04 September 2023
Name and mailing address of the ISA/CN		Authorized officer
China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/095179

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 113774476 A (SINOMA INTRAOCULAR LENS RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. et al.) 10 December 2021 (2021-12-10) description, paragraphs 49 and 74	1-16
A	CN 103668450 A (QINGDAO LONGSHENG CRYSTAL SILICON TECHNOLOGY CO., LTD.) 26 March 2014 (2014-03-26) entire document	1-16
A	CN 113862775 A (XI'AN ESWIN MATERIAL TECHNOLOGY CO., LTD.) 31 December 2021 (2021-12-31) entire document	1-16
A	CN 1904147 A (SILTRON INC.) 31 January 2007 (2007-01-31) entire document	1-16
A	JP 2005082474 A (TOSHIBA CERAMICS CO.) 31 March 2005 (2005-03-31) entire document	1-16
A	CN 112301425 A (INNER MONGOLIA ZHONGHUAN SOLAR MATERIAL CO., LTD.) 02 February 2021 (2021-02-02) entire document	1-16

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/095179

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	109972201	A	05 July 2019	CN 109972201 B	11 September 2020
CN	101709505	A	19 May 2010	None	
CN	113774476	A	10 December 2021	None	
CN	103668450	A	26 March 2014	CN 103668450 B	13 April 2016
CN	113862775	A	31 December 2021	CN 113862775 B	20 June 2022
CN	1904147	A	31 January 2007	KR 20070013642 A	31 January 2007
				KR 100840751 B1	24 June 2008
				JP 2007031260 A	08 February 2007
				JP 5150875 B2	27 February 2013
				US 2010158781 A1	24 June 2010
				US 2007022942 A1	01 February 2007
				US 7559988 B2	14 July 2009
JP	2005082474	A	31 March 2005	None	
CN	112301425	A	02 February 2021	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2023/095179

A. 主题的分类

C30B15/00(2006.01)i; C30B29/06(2006.01)i; C30B15/20(2006.01)i; C30B 27/02(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC:C30B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称,和使用的检索词(如使用))

CJFD, CNTXT, DWPI, ENTXT, ENTXTC, VEN, WPABS, WPABSC, CNKI, Web of Science, 超星读秀, 万方, 百度检索:控制, 气流, 氦气, 惰性气体, 相等, 相同, 稳定, 压力, 压强, 气压, 波动, 偏差, 流量, 流速, 单晶, 硅, 结晶界面, 结晶面, 结晶温度, 结晶速度, 隆基绿能科技股份有限公司, 王正远, 李广砥, 郭立, 杨正华, 张伟建, 直径, bias, declination, deflection, departure, deviation, diameter, excursion, fluctuation, instant, pressure, stability, stabilization, variation, partial difference, Crystal pulling, pressure drop, pressure imbalance, fluctuation pressure difference, stagl???, Single crystal, pressure differential, pressure difference, si, Silicon, pull crystal, cz, Czochralski, control+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	林光伟 等. “基于贝叶斯参数优化的无模型自适应硅单晶直径控制” 《人工晶体学报》, 第51卷, 第2期, 2022年2月28日 (2022 - 02 - 28), 第229-241页, 247页 ISSN: 10000-985x, 第229-241页, 247页	15
X	CN 109972201 A (浙江晶盛机电股份有限公司) 2019年7月5日 (2019 - 07 - 05) 说明书第80段	15
X	CN 101709505 A (西安隆基硅材料股份有限公司 等) 2010年5月19日 (2010 - 05 - 19) 权利要求1	16
A	CN 113774476 A (中材人工晶体研究院有限公司 等) 2021年12月10日 (2021 - 12 - 10) 说明书第49段, 74段	1-16

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2023-08-27

国际检索报告邮寄日期

2023年9月4日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

徐楠楠

电话号码 (+86) 020-28950517

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 103668450 A (青岛隆盛晶硅科技有限公司) 2014年3月26日 (2014 - 03 - 26) 全文	1-16
A	CN 113862775 A (西安奕斯伟材料科技有限公司) 2021年12月31日 (2021 - 12 - 31) 全文	1-16
A	CN 1904147 A (希特隆股份有限公司) 2007年1月31日 (2007 - 01 - 31) 全文	1-16
A	JP 2005082474 A (TOSHIBA CERAMICS CO) 2005年3月31日 (2005 - 03 - 31) 全文	1-16
A	CN 112301425 A (内蒙古中环光伏材料有限公司) 2021年2月2日 (2021 - 02 - 02) 全文	1-16

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2023/095179

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109972201	A	2019年7月5日	CN 109972201 B	2020年9月11日
CN	101709505	A	2010年5月19日	无	
CN	113774476	A	2021年12月10日	无	
CN	103668450	A	2014年3月26日	CN 103668450 B	2016年4月13日
CN	113862775	A	2021年12月31日	CN 113862775 B	2022年6月20日
CN	1904147	A	2007年1月31日	KR 20070013642 A	2007年1月31日
				KR 100840751 B1	2008年6月24日
				JP 2007031260 A	2007年2月8日
				JP 5150875 B2	2013年2月27日
				US 2010158781 A1	2010年6月24日
				US 2007022942 A1	2007年2月1日
				US 7559988 B2	2009年7月14日
JP	2005082474	A	2005年3月31日	无	
CN	112301425	A	2021年2月2日	无	