(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101133193 B
(45)授权公告日 2010.05.12

(21)申请号 200580048849.5
(22)申请日 2005.11.29
(30)优先权数据
11/026,780 2004.12.30 US
(85)PCT申请进入国家阶段日
2007.08.29
(86)PCT申请的申请数据
PCT/US2005/042928 2005.11.29
(87)PCT申请的公布数据
WO2006/073614 EN 2006.07.13
(73)专利权人 MEMC 电子材料有限公司
地址 美国密苏里州
(72)发明人 Z·陆
(74)专利代理机构 北京市中咨律师事务所 11247
代理人 马江立 秘凤华
(51)Int.Cl.
C30B 15/30(2006.01)
C30B 15/00(2006.01)
C30B 15/22(2006.01)
(56)对比文件
US 5178720 A,1993.01.12, 全文.
US 5911823 A,1999.06.15, 全文.
审查员 王晓燕

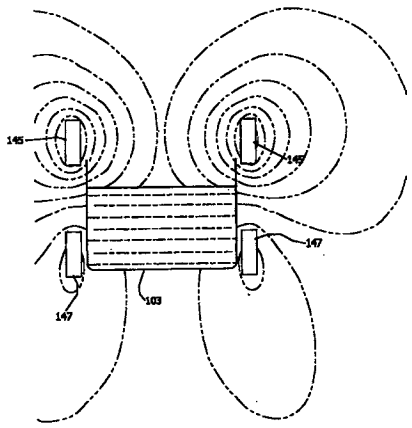
权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 19 页

(54)发明名称

使用可变磁场控制生长的硅晶体的熔体-固体界面形状

(57)摘要

本发明公开了用于控制直拉法晶体生长装置内的晶体生长的方法和系统。在晶体生长装置内施加磁场，并且在从熔体拉制晶锭的同时改变该磁场以控制熔体-固体界面的形状。熔体-固体界面的形状响应于根据晶锭的长度改变的磁场形成为预期的形状。



CN 101133193 B

1. 一种控制晶体生长装置内的晶体生长的系统，所述晶体生长装置具有容纳半导体熔体的被加热的坩埚，从该半导体熔体根据直拉法工艺生长单晶体晶锭，所述晶锭在从熔体拉制的籽晶上生长，所述系统包括：

位于坩埚附近的用于向熔体施加会切磁场的第一和第二线圈；

用于向线圈供电的可变电源；以及

用于在从熔体拉制晶锭的同时改变电源的控制器，所述可变电源响应于控制器改变磁场，以控制相对于熔体和晶锭之间的熔体－固体界面的磁场的会切点位置，以便生成预期的熔体－固体界面形状，所述预期的熔体－固体界面形状与晶锭的长度有关。

2. 根据权利要求 1 的系统，其特征在于，该可变电源响应于控制器改变根据相对于熔体－固体界面的以下磁场形态中的一种或多种磁场形态的磁场：水平主导的不对称磁场形态；轴向主导的不对称磁场形态；以及基本对称的磁场形态。

3. 根据权利要求 2 的系统，其特征在于，水平主导的不对称磁场产生以下结果中的一个或多个：相对于晶锭具有较平坦凹入的鸥翼形的熔体－固体界面形状；在熔体－固体界面处的增大的轴向温度梯度；以及在熔体－固体界面附近在晶锭内的轴向温度梯度的减小的径向变化，并且，

轴向主导的不对称磁场产生以下结果中的一个或多个：相对于晶锭具有更凸出形状的熔体－固体界面形状；基本稳定的熔体流动；以及晶锭内的减小的氧浓度水平。

4. 根据权利要求 1 的系统，其特征在于，第一线圈的位置高于熔体－固体界面，而第二线圈的位置低于该熔体－固体界面。

5. 根据权利要求 4 的系统，其特征在于，该可变电源响应于控制器以便相对于第二线圈增加第一线圈内的功率分配，以将会切点位置移动到熔体－固体界面下方从而实现水平主导的不对称磁场形态。

6. 根据权利要求 4 的系统，其特征在于，该可变电源响应于控制器以便相对于第一线圈增加第二线圈内的功率分配，以将会切点位置移动到熔体－固体界面上方从而实现轴向主导的不对称磁场形态。

7. 根据权利要求 4 的系统，其特征在于，该可变电源响应于控制器以便根据基本均匀的功率分配向第一和第二线圈供电，以将会切点位置移动到熔体－固体界面附近从而实现基本对称的磁场形态。

8. 根据权利要求 5 的系统，其特征在于，控制器根据以下因素中的一个或多个改变电源以选择性地调节第一和第二线圈的功率分配以便改变磁场强度，从而将会切点位置移动到熔体－固体界面上方或下方的预期位置：晶锭长度，以及晶锭生长阶段；并且该生长阶段包括以下阶段中的一个或多个：颈缩，冠顶，以及最晚体部到端部圆锥的生长。

9. 根据权利要求 1 的系统，其特征在于，该控制器响应于预期的氧浓度水平改变电源以选择性地调节磁场，以控制熔体－固体界面的形状，以便在晶锭内产生预期的氧浓度水平。

10. 根据权利要求 9 的系统，其特征在于，该控制器响应于预期的氧径向梯度水平改变电源以选择性地调节磁场，以控制熔体－固体界面的形状，以便在晶锭内产生预期的氧径向梯度水平。

11. 一种通过直拉法工艺生产单晶体半导体晶锭的方法，所述方法包括：

在从半导体熔体拉制的籽晶上生长单晶体晶锭；

在生长晶锭的同时向该熔体施加不对称磁场；以及

在从熔体拉制晶锭的同时改变磁场以控制熔体－固体界面的形状，所述熔体－固体界面的形状与晶锭的长度有关。

12. 根据权利要求 11 的方法，其特征在于，施加不对称磁场包括施加相对于熔体－固体界面的水平主导的不对称磁场以产生以下结果中的一个或多个：相对于晶锭具有较少凹入且更似鸥翼形的熔体－固体界面形状；在熔体－固体界面处的增加的轴向温度梯度；在熔体－固体界面附近在晶锭内的轴向温度梯度的减小的径向变化；以及晶锭内的增加的氧浓度水平；或者施加相对于熔体－固体界面的轴向主导的不对称磁场以产生以下结果中的一个或多个：相对于晶锭具有更凸出形状的熔体－固体界面形状；基本稳定的熔体流动；以及晶锭内的减小的氧浓度水平。

13. 根据权利要求 11 的方法，其特征在于，施加不对称磁场包括以不同功率水平向位于熔体－固体界面上方的第一磁体供电和向位于熔体－固体界面下方的第二磁体供电。

14. 根据权利要求 11 的方法，其特征在于，改变磁场包括以下操作中的一个或多个：

选择性地调节磁场以控制熔体－固体界面的形状，以便在晶锭内产生预期的氧浓度水平；以及

选择性地调节磁场以控制熔体－固体界面的形状，以便在晶锭内产生预期的氧径向梯度水平。

15. 一种用于控制单晶体晶锭的晶体生长的氧特性的方法，所述晶锭根据直拉法工艺在晶体生长装置内生长，所述晶体生长装置具有容纳半导体熔体的被加热的坩埚，从该半导体熔体生长晶锭，所述晶锭在从该熔体拉制的籽晶上生长，所述方法包括：

向熔体施加会切磁场；以及

在从熔体拉制晶锭的同时改变磁场以控制相对于在熔体和晶锭之间的熔体－固体界面的磁场的会切点位置，以便生成预期的熔体－固体界面形状，所述预期的熔体－固体界面形状在晶锭内产生预期的氧特性。

使用可变磁场控制生长的硅晶体的熔体 - 固体界面形状

技术领域

[0001] 本发明的实施例涉及生产用于电子元件制造的单晶硅的领域。具体地，本发明的实施例涉及通过施加可变磁场控制生长晶体的熔体 - 固体界面形状。

背景技术

[0002] 单晶硅是大多数用于制造半导体电子元件的工艺中的原料，它通常根据所谓的直拉法 (Czochralski) 工艺准备。在此工艺中，将多晶体硅或者多晶硅填充到坩埚内并进行熔化，使籽晶与熔融的硅接触，并通过较缓慢的抽拔来生长单晶体晶锭。在完成颈部的形成之后，减小拉晶速率和 / 或熔体温度以使晶体的直径扩大，直到达到预期或目标直径。然后，通过控制拉晶速率和熔体温度并同时补偿降低的熔体液面来生长晶体的大致为圆柱形的具有基本恒定的直径的主体。在生长过程接近结束但是坩埚内的熔融硅清空之前，使晶体直径逐渐减小以形成端部圆锥。通常，增加拉晶速率以及提供给坩埚的热量可形成端部圆锥。然后，当直径变得足够小时，使晶体与熔体分离。

[0003] 如本领域内已知的，熔融硅 (处于大约 1420 摄氏度 (℃)) 将使容纳熔体的硅石 (SiO_2) 坩埚的表面溶解。一些被溶解的硅石作为 SiO(一氧化硅) 从熔体的表面蒸发，而一些被溶解的硅石则结合在生长的晶体内。其余的被溶解的硅石会保留在熔体内。这样，容纳硅熔体的坩埚就成为在通过传统直拉法工艺生长的硅晶体内发现的氧的来源。

[0004] 硅晶体内的氧既具有有利的也具有不利的影响。在各种电气设备的制造期间的各种热处理过程中，晶体内的氧会导致晶体缺陷例如沉淀物、位错环和堆垛层错，或者会引起导致设备具有较差运行特性的电活性缺陷。但是，晶体内的氧固溶体会增加硅晶片的机械强度，并且晶体缺陷可通过俘获重金属的污染物提高合格产品的产量。因此，硅晶体内的氧含量是影响产品品质的重要因素，应该根据硅晶片的最终应用小心控制。

[0005] 在工业中占主导的直拉法条件下所生长的传统硅晶体内的氧浓度沿晶体的长度改变。例如，在籽晶端部的浓度通常高于在晶体的中部和 / 或在底部或柄脚端 (tang end) 的浓度。另外，氧浓度通常沿晶体的横截面切片的半径改变。

[0006] 为了解决氧控制问题，已经注意到利用磁场来稳定金属和半导体熔体内的对流以便控制氧浓度和径向分布从而除去掺杂物条痕等。例如，由导电熔体内的磁场生成的洛伦兹力可用于减缓自然对流和湍流。存在用于稳定导电熔体内的对流的三种传统类型的磁场形态，即轴向、水平和会切 (cusped)。

[0007] 轴向 (或垂直) 磁场形态 (例如见图 1) 生成平行于晶体生长方向的磁场。在图 1 中，以横截面示出的电磁线圈 21 向坩埚 23 提供磁场。如图所示，坩埚 23 容纳硅熔体 25，从该硅熔体生长晶体 27。这种形态具有设置较简单和轴向对称的优点。但是轴向磁场形态由于其主导的轴向磁场分量而破坏了径向均匀性。

[0008] 在水平 (或横向) 磁场形态中 (例如见图 2)，两个磁极 29 相对地设置以生成垂直于晶体生长方向的磁场。水平形态的优点是可有效地减慢在熔体表面的对流。但是，其轴向和径向的不均匀性以及复杂和庞大的设置使得难以在大直径直拉法生长工艺中施加水

平磁场形态。

[0009] 会切磁场形态（例如见图 3）设计成克服轴向和水平磁场形态的缺陷。同轴地放置在熔体-固体界面上方和下方且以相反电流模式操作的一对线圈31、33（例如Helmholtz线圈）生成这样的磁场，该磁场在熔体表面附近具有纯径向场分量，在熔体的中心附近具有纯轴向场分量。这样，会切磁场形态试图在熔体和晶体之间的界面处保持旋转对称性。但是，会切磁场的有效性在熔体的中心降低。此外，由于会切点位置保持位于熔体表面处，所以随着熔体深度因接近晶体生长结束而减小，熔体内的轴向均匀性逐渐减低并且最终消失。

[0010] 因此，需要改进的晶体生长过程控制以解决这些传统磁场形态的缺陷。

发明内容

[0011] 本发明的实施例克服了现有技术的一个或多个缺陷，并通过施加可变磁场提供对熔体和晶体之间的界面形状的控制。在一个实施例中，本发明经由形态和场强可连续改变的不对称磁场控制硅熔体内的流动，晶体从该硅熔体生长。因此，本发明的实施例可以控制晶体－熔体界面形状、界面处的轴向温度梯度、以及在界面处和附近在晶体内的轴向温度梯度的径向变化，以实现预期的界面形状和值。根据本发明的方面，与任何传统磁场形态相比，可变的不对称磁场在控制晶体－熔体界面形状方面具有更大的灵活性和能力。此外，本发明的一个实施例允许根据晶体的长度将磁场的会切点位置移动到晶体－熔体界面上方或下方，以保持预期的熔体流动控制和均匀性。在不改变硬件设置和物理位置的情况下，本发明的可变的不对称磁场结合了传统磁场形态的优点同时避免了它们的缺陷。

[0012] 一种体现本发明的方面的方法控制晶体生长装置内的晶体生长。该方法包括将会切磁场施加于半导体熔体，从该熔体根据直拉法工艺生长单晶体晶锭。该方法还包括在从熔体拉制晶锭的同时改变磁场，以控制磁场的相对于熔体和晶锭之间的熔体－固体界面的会切点位置，以便生成预期的熔体－固体界面形状。预期的熔体－固体界面形状与晶锭的长度有关。

[0013] 在另一个实施例中，一种用于控制晶体生长装置内的晶体生长的系统包括位于容纳半导体熔体的坩埚附近的第一和第二线圈，从该熔体根据直拉法工艺生长单晶体晶锭。线圈向该熔体施加会切磁场。该系统还包括用于给线圈供电的可变电源。在从熔体拉制晶锭的同时控制器改变电源。可变电源响应于控制器以改变磁场，从而控制相对于熔体和晶锭之间的熔体－固体界面的磁场的会切点位置。这生成预期的熔体－固体界面形状。预期的熔体－固体界面形状与晶锭的长度有关。

[0014] 另一个实施例包括一种用于通过直拉法工艺生产单晶体半导体晶锭的方法。该方法包括在从半导体熔体拉出的籽晶上生长单晶体晶锭。该方法还包括在生长晶锭的同时向熔体施加不对称的磁场，并且在从熔体拉制晶锭的同时根据晶锭的长度改变磁场以控制熔体－固体界面的形状。

[0015] 体现本发明的方面的另一种方法控制单晶体晶锭的晶体生长的氧特性。该晶锭根据直拉法工艺在晶体生长装置内生长。晶体生长装置具有容纳半导体熔体的被加热的坩埚，从该熔体生长晶锭。晶锭在从熔体拉制的籽晶上生长。该方法包括将会切磁场施加于熔体。该方法还包括在从熔体拉制晶锭的同时改变磁场，以控制磁场的相对于熔体和晶

锭之间的熔体－固体界面的会切点位置，以便生成预期的熔体－固体界面形状。预期的熔体－固体界面形状在晶锭内产生预期的氧特性。

[0016] 可选择地，本发明的实施例可包括多种其他方法和装置。

[0017] 其他特征部分将是显而易见的，部分将在下文指出。

附图说明

[0018] 图 1 是示出根据现有技术施加于晶体生长装置的轴向磁场的简图。

[0019] 图 2 是示出根据现有技术施加于晶体生长装置的水平磁场的简图。

[0020] 图 3 是示出根据现有技术施加于晶体生长装置的会切磁场的简图。

[0021] 图 4 示出晶体生长装置，以及根据本发明的一个实施例的用于控制晶体生长装置的装置。

[0022] 图 5A 示出相对于晶锭总体为凸形的示例性熔体－固体界面。

[0023] 图 5B 示出相对于晶锭总体为凹形的示例性熔体－固体界面。

[0024] 图 5C 示出总体为鸥翼形状的示例性熔体－固体界面。

[0025] 图 6A 是示出根据本发明的一个实施例的水平主导的不对称磁场的简图。

[0026] 图 6B 是示出在根据本发明的一个实施例的水平主导的不对称磁场内的功率分配的示例性图表。

[0027] 图 6C 是示出与传统的会切磁场生成的熔体－固体界面形状相比较的根据本发明的一个实施例的水平主导的不对称磁场生成的熔体－固体界面形状的示例性图表。

[0028] 图 7A 是示出根据本发明的一个实施例的轴向主导的不对称磁场的简图。

[0029] 图 7B 是示出根据本发明的一个实施例的轴向主导的不对称磁场内的功率分配的示例性图表。

[0030] 图 7C 是示出与传统的会切磁场生成的熔体－固体界面形状相比较的根据本发明的一个实施例的轴向主导的不对称磁场生成的熔体－固体界面形状的示例性图表。

[0031] 图 7D 是示出根据晶体长度而变化的并且与传统的会切磁场生成的氧浓度相比较的根据本发明的一个实施例的轴向主导的磁场生成的氧浓度的示例性图表。

[0032] 图 7E 是示出根据晶体长度而变化的并且与传统的会切磁场生成的氧浓度相比较的根据本发明的一个实施例的水平主导的磁场生成的氧浓度的示例性图表。

[0033] 图 8 是示出根据本发明的一个实施例的对称磁场的简图。

[0034] 图 9 是示出根据本发明的一个实施例当会切点位置高于或低于熔体表面时以及当会切点位置接近熔体表面时，与晶体长度的变化有关的变化的氧径向梯度的示例性图表。

[0035] 图 10A 是示出标准硅生长过程与根据本发明的一个实施例的坩埚旋转调制之间的熔体－固体界面比较的示例性图表。

[0036] 图 10B 是示出与传统硅生长过程的界面梯度相比较的根据本发明的一个实施例的坩埚旋转调制的界面梯度的示例性图表。

[0037] 图 10C 是示出与传统硅生长过程的界面 v/G_s 相比较的根据本发明的一个实施例的坩埚旋转调制的界面 v/G_s 的示例性图表。

[0038] 图 11 是示出与根据直拉法工艺生长单晶体晶锭的晶体生长装置一起使用的根据

本发明的一个实施例的工艺流程的示例性流程图。

[0039] 在整个附图中对应的参考标号指示对应的部件。

具体实施方式

[0040] 现在参照图 4，体现本发明的方面的直拉法晶体生长装置以框图形式示出。通常，晶体生长装置包括封装坩埚 103 的真空室 101。加热装置例如电阻加热器 105 围绕坩埚 103。在加热和晶体拉制期间，坩埚驱动单元（例如马达）107 使坩埚 103 例如沿箭头所示的顺时针方向旋转。坩埚驱动单元 107 还可以在生长过程期间根据需要升高和 / 或降低坩埚 103。在坩埚 103 内是具有熔体液面 111 的硅熔体 109。在操作时，装置从熔体 109 中拉制单晶体 113，这从附装到拉晶轴或缆线 117 上的籽晶 115 开始。如本领域内已知的，拉晶轴或缆线 117 的一端通过滑轮（未示出）连接到滚筒（未示出），另一端连接到保持籽晶 115 和从该籽晶 115 生长的晶体 113 的卡盘（未示出）。

[0041] 坩埚 103 和单晶体 113 具有公共对称轴线 119。坩埚驱动单元 107 可随着熔体 109 的消耗沿轴线 119 升高坩埚 103，以将熔体的液面 111 维持在预期的高度。类似地，晶体驱动单元 121 沿与坩埚驱动单元 107 旋转坩埚 103 的方向相反的方向旋转拉晶轴或缆线 117（例如逆时针旋转）。在使用相同旋转的实施例中，晶体驱动单元 121 可沿与坩埚驱动单元 107 旋转坩埚 103 的方向相同的方向（例如顺时针方向）旋转拉晶轴或缆线 117。另外，晶体驱动单元 121 在晶体生长期间根据需要相对于熔体液面 111 升高和降低晶体 113。

[0042] 根据直拉法单晶体生长工艺，向坩埚 103 填充一定量的多晶体硅或多晶硅。加热器电源 123 向电阻加热器 105 供电，并且绝缘体 125 衬在真空室 101 的内壁上。当真空泵 131 从真空室 101 中除去气体时，气体源（例如瓶子）127 经由气体流控制器 129 向真空室 101 提供氩气。室冷却护套 133 围绕真空室，并且从贮液器 135 向该护套提供冷却水。然后冷却水被排放到冷却水返回歧管 137。通常，温度传感器例如光电元件 139（或者高温计）在熔体 109 表面处测量熔体的温度，直径转换器 / 传感器 141 测量单晶体 113 的直径。处理器例如控制单元 143 处理光电元件 139 和直径转换器 141 生成的信号。控制单元 143 可以是被编程的数字或模拟计算机；它控制坩埚和单晶体驱动单元 107 和 121、加热器电源 123、泵 131、以及氩气流控制器 129。

[0043] 如图 4 所示，上部磁体例如电磁线圈 145 和下部磁体例如电磁线圈 147 分别位于熔体液面 111 的上方和下方。在所示的实施例中，以横截面示出的线圈 145、147 围绕真空室 101 并且具有公共的对称轴线 119。上部和下部线圈 145、147 具有单独的电源，即上部线圈电源 149 和下部线圈电源 151，每个电源均连接到控制单元 143 并由控制单元 143 控制。

[0044] 根据本发明的实施例，电流在两个电磁线圈 145、147 内沿相反方向流动以产生磁场。贮液器 153 在经由冷却水返回歧管 137 排放之前向上部和下部线圈 145、147 提供冷却水。在所示的实施例中，铁屏蔽 155 围绕线圈 145、147 以减小杂散磁场并提高所产生的磁场的强度。

[0045] 本发明的实施例包括生产适用于器件制造的硅晶体晶锭。有利地，本发明可用于生产硅晶体 113，该硅晶体的大部分或全部基本没有聚集本征点缺陷。即，本发明的实施例生成的晶体 113 的大部分或全部的缺陷密度可小于大约 1×10^{4} 缺陷 /cm^{3}，小于大约 5×10^{3} 缺陷 /cm^{3}，小于大约 1×10^{3} 缺陷 /cm^{3}，甚至没有可检测到的聚集本征点缺陷。在另外的实

施例中，本发明可用于生产基本没有直径大于大约 60nm 的聚集缺陷的晶体 113。

[0046] 本发明的方面在晶体生长期间控制熔体－固体或熔体－晶体界面的形状，以限制和/或抑制聚集本征点缺陷的形成。图 5 示出包括熔体表面 161 的示例性熔体－晶体界面。在熔体 109 和硅晶体 113 之间的此界面可相对于晶体 113 为凹形或凸形。熔体－固体界面形状可相对于晶体 113 同时为凹形和凸形（例如“鸥翼”形状）。如下文所述，熔体－固体界面形状是在晶体生长期间控制缺陷的重要参数。

[0047] 在一个实施例中，本发明使用熔体对流来影响熔体－固体界面形状。对流是指通过流体自身的运动在流体内进行热传递的过程。通常，存在两种对流：自然对流和强制对流。当熔体 109 的运动例如是由于存在导致密度梯度的加热器 105 时会发生自然对流。当熔体 109 的运动是由于外部因素例如坩埚 103 内的磁场时会发生强制对流。因此，控制磁场强度可产生预期的熔体－固体界面形状。

[0048] 例如，由于磁场会影响导电流体例如硅熔体 109 内的流动型式，所以本发明的一个实施例使用磁体（例如形式为线圈 145、147）来影响熔体对流，从而改变熔体 109 内的温度分布，这继而影响熔体－固体界面形状。如下文所述，本发明的实施例还经由轴向不对称磁场来控制硅熔体 109 的流动，该磁场的形态和场强可连续改变。这样，可控制熔体－固体界面形状、在界面处的轴向温度梯度、以及在界面处或附近在晶体 113 内的轴向温度梯度的径向变化，以便生成预期的界面形状和值。如下文参照图 6A、7A 和 8 详细说明的，本发明的实施例在晶体生长装置内提供可变磁场以便生成预期的熔体－固体界面形状，继而生成预期的晶体特性。

[0049] 如本领域内的技术人员已知的，从熔体生长的硅晶体可能具有过量的晶格空位（“V”）或硅自间隙（“I”）。根据本发明的实施例，可利用在晶体生长期间控制熔体－固体界面形状来控制在凝固前沿（solidificationfront）处的点缺陷的初始分布以及处于不同程度的点缺陷从熔体－固体界面的扩散路径。主要的点缺陷类型通常在临近凝固时确定。因此，如果主要点缺陷浓度达到临界过饱和的程度并且如果点缺陷的迁移率足够高，则很可能发生反应或聚集现象。硅中的聚集本征点缺陷可能影响在制造复杂且高度集成的电路时材料的产出潜力。通过控制熔体－固体界面形状，本发明的实施例减少或避免聚集反应，以生产基本没有聚集本征点缺陷的硅。

[0050] 晶体的拉晶速度 v 与轴向温度梯度 G 的比率表示可能在生长晶体内出现的本征点缺陷的类型。例如，当拉晶速度高时，晶格空位通常是主要点缺陷。或者，当拉晶速度低时，硅自间隙通常是主要点缺陷。因此，在动态生长过程期间（即当 v/G 可根据晶体的半径和/或轴向长度改变时），生长的硅晶体内的点缺陷可从空位为主改变为间隙为主，反之亦然。此外，可识别的空位/自间隙（V/I）转换区与这种改变相关联。在聚集空位缺陷和聚集间隙缺陷之间可存在无缺陷区域。特别地，V/I 转换区在此无缺陷区域内发生。即，此无缺陷区域对应于从过量空位为主的区域到过量间隙为主的区域的转换区域。无缺陷区域可以是空位为主和/或间隙为主的材料。无缺陷区域不包括形成任何缺陷的临界过量点缺陷，并且通常包括 V/I 转换区。

[0051] 当被识别的 V/I 转换区具有如文中提供的特定形状时，晶体 113 在此转换区中基本没有聚集缺陷。例如，在动态生长模拟条件下垂直于拉制轴线 119 的基本平坦的 V/I 转换区对应于晶体 113 的基本没有聚集缺陷的一部分。因此，控制熔体－固体界面形状会改

进基本没有缺陷的单晶硅。具体地，通过根据轴向长度基于目标熔体－固体界面形状来控制熔体－固体界面形状，本发明的实施例可在晶体 113 内生成基本没有聚集缺陷的区域。

[0052] 目标界面形状对于晶体热区设计以及沿晶体 113 的轴向长度的位置是唯一的。因此，针对沿晶体 113 的长度的不同位置处的特定热区确定目标界面形状。抑制或控制聚集反应可得到基本没有不希望的数量或大小的聚集本征点缺陷的硅衬底，而不是限制这种缺陷的形成速率或者试图消除已经形成的缺陷的一部分。抑制或控制聚集反应还可提供这样的单晶硅晶片，该晶片在由每个晶片获得的集成电路数量方面具有外延类 (epi-like) 产出潜力并且不具有与外延工艺相关联的高成本。

[0053] 通过影响熔体－固体界面形状，根据本发明的实施例施加在熔体 109 上的磁场可调节具有较大直径、尤其是处于较低氧浓度的单晶体晶锭的沿轴向和径向方向的氧浓度。电流如图所示穿过上部和下部线圈 146、147（“·”表示电流流出页面，“X”表示电流流入页面），从而使得在坩埚 103 和硅熔体 109 上施加磁场。磁场具有与坩埚 103 的底部和侧壁垂直相交的水平和垂直分量。另外，磁场具有与硅熔体表面 161 垂直相交的垂直分量。与熔融硅表面 161 垂直相交的平均磁场分量可小于与接触熔体 109 的坩埚 103 的底部和侧壁垂直相交的平均磁场分量。即，与熔体表面 161 垂直相交的平均磁场分量可以不大于与接触硅熔体 109 的坩埚 103 的底部和侧壁垂直相交的平均磁场分量的大约十分之一。此外，与熔体表面 161 垂直相交的平均磁场分量可以是零或接近零。即，磁场零面位于硅熔体液面 111 处或附近。两个线圈 145、147 的垂直位置、匝数以及相对电流可将零磁场定位在熔体液面 111 的平面处或附近。

[0054] 本发明的实施例提供了可变的不对称磁场形态（见图 6A 和图 7A），该磁场形态有利地与会切磁场形态（见图 3）使用相同的硬件设置。根据一个实施例，控制单元 143 控制上部和下部线圈电源 149 和 151 以调节上部和下部线圈 145 和 147 的功率分配，从而在上部和下部线圈 145 和 147 内生成的轴向不对称场强将会切点位置移动到熔体液面 111 上方或下方（例如位于熔体－固体界面处）。控制单元 143 还可控制上部和下部线圈电源 149 和 151 以在熔体－固体界面上施加不同的不对称磁场形态，从而可在任何晶体长度处实现轴向主导的不对称磁场形态、水平主导的不对称磁场形态、或者对称的磁场形态（例如会切磁场形态）。因此，本发明的实施例同时提供了所需的熔体流动控制和熔体流动均匀性，其具有提高的效率、灵活性和能力，这结合了三种传统磁场形态的优点同时避免了它们的缺点。

[0055] 为了将会切点位置上下移动以及改变轴向或水平磁场主导的程度（或幅值），控制单元 143 调节上部和下部线圈电源 149 和 151 以改变上部和下部线圈 145 和 147 内的功率分配。在本发明的一个实施例中，上部和下部线圈 145 和 147 制造成：当使用相同功率分配时（例如，均处于最大功率输入的相同百分比），会切点位置保留在熔体表面 111（例如熔体－固体界面）处。使用最大功率输入通常使单个线圈（例如上部线圈 145 或下部线圈 147）能够根据线圈的大小生成数百到数千高斯的磁场。

[0056] 根据本发明的实施例，控制单元 143 构造成通过调节上部和下部线圈 145 和 147 的功率分配的差（例如经由上部和下部线圈电源 149 和 151）使会切点位置移动到熔体液面 111 的上方或下方的可变距离处。控制单元 143 还构造成根据时间或晶体长度调节在熔体液面 111 上方或下方的可变距离，从而可变会切点位置在不同的晶体生长阶段以及不同

的晶体长度处相应地改变。

[0057] 在拉晶过程中，电流通过线圈 145、147 以在硅熔体 109 和坩埚 103 上施加具有预定强度的磁场。该预定强度根据晶体 113 的直径、坩埚 103 的直径、多晶硅装填量、以及预期的氧含量而改变。通常，本发明包含具有例如小于数千高斯 - 例如在大约 400 和 2000 高斯之间 - 的最大预定强度的磁场。随着晶体 113 的长度增加（即，随着固化的熔融填料的比例增加），控制单元 143 通过减小穿过线圈的电流的量（例如通过控制上部和下部线圈电源 149 和 151）、通过相对于坩埚 103 移动线圈，或者通过移动或除去磁屏蔽，来减小场强。

[0058] 随着控制单元 143 减小磁场强度，与坩埚 103 的底部和侧壁垂直相交的磁场分量减小。但是，由于磁场的零平面仍位于硅熔体表面 161 处或附近，与硅熔体表面 161 垂直相交的平均磁场分量和与接触硅熔体 109 的坩埚 103 的底部和侧壁垂直相交的平均磁场分量之间的比率可以不变。

[0059] 根据以下参数，例如单晶体标称直径、晶体长度、坩埚直径、填料尺寸和磁场特性，控制单元 143 控制上部和下部线圈电源 149 和 151 以增加或减小施加在熔体 109 上的磁场的强度。例如，当晶体 113 的长度增加且固化的熔融填料的比例增加时，控制单元 143 可控制上部和下部线圈电源 149 和 151 以将磁场强度调节为小于其初始水平的值。控制单元 143 还可在预定比例的熔融填料凝固之后完全切断磁场。在一个实施例中，控制单元 143 在大约 50％ -80％的熔融填料凝固之后切断磁场。此后，控制单元 143 还可通过相对于单晶体转速增加坩埚转速来调节氧含量。

[0060] 在本发明的一个实施例中，希望通过控制磁场强度将熔体 - 固体界面形状保持在一定的高度偏差率 (HDR) 范围或百分比内。HDR 由下式确定：

[0061] $HDR = [H_c - H_e]/Radius \times 100$，

[0062] 其中 H_c 是晶体中心距熔体液面 111 的高度，H_e 是晶体边缘距熔体液面 111 的高度。例如，本发明的一个实施例控制 200 毫米 (mm) 晶体的熔体 - 固体界面，以便晶体中心和晶体边缘之间的 HDR 是大约正或负 11％、9％、7％或 5％。对于直径不等于 200mm 的晶体，最大 HDR 可通过晶体半径以大约 -0.06 的斜率逐渐减小。

[0063] 本发明的实施例可用于控制具有较低氧浓度（例如小于若干个百万分之一原子密度 (PPMA) 的氧）的单晶体内的氧浓度。这些单晶体晶锭可具有沿径向方向小于 5％且沿轴向方向小于 5％到 10％的氧梯度。

[0064] 作为一个特定示例，本发明的实施例可用于提高 200mm 硅晶片制造工艺的性能。该制造工艺通常依赖以下策略。首先，晶体以接近但稍低于 $(V/G)_c$ 的 $(V/G)_s$ 生长，$(V/G)_c$ 是 $(V/G)_s$ 的临界值，从而晶体稍微富含间隙。然后，将晶体的温度保持在高于 900℃，900℃是间隙缺陷的成核温度，以促进扩散从而湮灭空位和间隙。在晶体生长之后，通过将晶体移动到上部室内对晶体进行骤冷以抑制缺陷成核和生长。通常，希望在熔体 - 固体界面处具有较高的轴向温度梯度，以便能够以较高的拉晶速度和从而以较高的产量获得良好的硅品质。但是，由于热区的限制，较高的轴向温度梯度会伴随在熔体 - 固体界面处或附近的晶体内的轴向温度梯度的较高径向变化。轴向温度梯度的较高变化则会减小晶体内的 $(V/G)_s$ 的均匀性。有时，增加轴向温度梯度会导致所述变化增大，从而造成 V 和 I 缺陷共存。

[0065] 本发明的实施例可用于解决此问题。例如，控制单元 143 可在上部线圈 145 内施加比下部线圈 147 高的功率分配，以便不对称的磁场将会切点位置移动到熔体液面 111 下

方，从而如图 6A 所示在熔体表面 161 处生成水平主导的不对称磁场。这种磁场条件导致较少凹入且更似鸥翼形的熔体－固体界面，其在熔体－固体界面处和附近在晶体 113 内具有较高的轴向温度梯度以及轴向温度梯度的较平坦的径向变化。图 6B 是示出水平主导的不对称磁场内的功率分配的示例性图表。具体地，图 6B 示出与晶体长度的变化有关的上部和下部线圈 145、147 的输入功率百分比的变化。图 6C 是示出水平主导的不对称磁场和标准会切磁场生成的熔体－固体界面形状之间的差别的示例性图表。可以看到，由水平主导的不对称磁场生成的熔体－固体界面形状已经朝预期方向被调节。

[0066] 为了实现更稳定的熔体流动，在一些生长阶段中，例如颈缩、冠顶 (crown)、以及最晚体部（最迟形成的体部，late-body）到端部圆锥的生长，控制单元 143 可通过在下部线圈 147 内施加比上部线圈 145 高的功率分配在熔体表面 161 处生成轴向主导的不对称磁场，从而该不对称磁场将会切点位置移动到熔体液面 111 上方，以如图 7A 所示。这种磁场条件导致更加凸出形状的熔体－固体界面以及晶体 113 内的较低氧浓度。图 7B 示出在轴向主导的不对称磁场内的功率分配的示例性图表。具体地，图 7B 示出与晶体长度的变化有关的上部和下部线圈 145、147 的输入功率百分比的变化。图 7C 示出轴向主导的不对称磁场和标准会切磁场生成的熔体－固体界面形状之间的差别的示例性图表。可以看到，由轴向主导的不对称磁场生成的熔体－固体界面形状已经朝预期方向被调节。图 7D 是示出与晶体长度有关的由轴向主导的磁场和标准会切磁场生成的氧浓度 (Oi) 之间的差别的示例性图表。图 7E 是示出与晶体长度有关的由水平主导的磁场和标准会切磁场生成的氧浓度 (Oi) 之间的差别的示例性图表。

[0067] 在需要标准会切磁场（例如对称磁场）的晶体长度的生长阶段，控制单元 143 可通过在上部和下部线圈 145 和 147 之间施加基本一致的功率分配来设定这种对称设置，以使会切点位置移动到熔体液面 111 附近，如图 8 所示。图 9 是示出当会切点位置高于或低于熔体液面 111（即不对称磁场）时和当会切点位置位于熔体液面 111 附近（即对称磁场）时，与晶体长度的变化有关的变化的氧径向梯度 (ORGs) 的示例性图表。

[0068] 如前文提到的，在不同晶体长度处施加可变的不对称磁场会生成不同的预期界面形状，从而可在预期的体部长度处获得预期的径向和轴向温度梯度以及 v/G_s。图 6A、6B 和 6C 示出在熔体表面 161 处的水平主导的不对称磁场可生成较少凹入且更似鸥翼形的熔体－固体界面。图 10A 是示出在 480mm 的晶体长度处在标准界面与更似鸥翼形状的界面之间的熔体－固体界面比较的示例性图表。图 10B 是示出标准界面与更似鸥翼形状的界面的界面梯度之间的差别的示例性图表。具体地，图 10B 示出与界面上的距轴线的距离的变化有关的标准界面与更似鸥翼形状的界面的轴向温度梯度的变化。图 10C 是示出标准界面和更似鸥翼形状的界面的界面 v/G_s 之间的差别的示例性图表。具体地，图 10C 示出与界面上的距轴线的距离的变化有关的标准界面和更似鸥翼形状的界面的熔体－固体界面上的 v/G_s 的变化。

[0069] 参照图 11，示例性流程图示出与根据直拉法工艺生长单晶体晶锭的晶体生长装置一起使用的根据本发明的一个实施例的工艺流程。晶体生长装置具有包含半导体熔体的被加热的坩埚，从该熔体拉制出晶锭。该晶锭在从熔体拉出的籽晶上生长。熔体－晶体界面的形状根据晶锭的长度形成。在 1002，在晶锭拉制期间在熔体和晶锭之间的熔体－固体界面附近施加外部磁场。例如，外部磁场可由位于熔体－固体界面上方的第一磁体（例如第

一螺线管）和位于熔体－固体界面下方的第二磁体（例如第二螺线管）施加。

[0070] 在1004，在从熔体拉制出晶锭的同时，选择性地调节外部磁场以控制熔体－固体界面的形状。例如，可在熔体－固体界面附近施加水平主导的不对称磁场形态、轴向主导的不对称磁场形态、或对称磁场形态。如果施加水平主导的不对称磁场形态，则本发明的实施例可实现相对于具有较平坦且更多凹入的界面的晶锭的较少凹入且更似鸥翼形的界面形状、在熔体－固体界面处的较高的轴向温度、以及在熔体－固体界面处和附近的晶锭内的轴向温度梯度的较小径向变化。如果施加轴向主导的不对称磁场形态，则本发明的实施例可实现相对于晶锭更凸出的界面形状、基本稳定的熔体流动以及晶锭内的较低氧浓度水平。

[0071] 为了选择性地调节外部磁场，可调节第一磁体和第二磁体的功率分配以利用在第一磁体和第二磁体内生成的磁场强度将会切点位置移动到熔体－固体界面上方或下方（例如位于与晶锭的长度和/或晶锭的生长阶段有关的可变距离处）。因此，可在第一磁体内施加比第二磁体更高的功率分配，以将会切点位置移动到熔体－固体界面下方以获得水平主导的不对称磁场形态。类似地，可在第二磁体内施加比第一磁体更高的功率分配，以将会切点位置移动到熔体－固体界面上方以获得轴向主导的不对称磁场形态。此外，可在第一磁体和第二磁体之间施加基本一致的功率分配，以将会切点位置移动到熔体－固体界面附近以获得对称的磁场形态。

[0072] 为了选择性地调节外部磁场。可在从熔体拉制出晶锭的同时并且根据晶锭的长度和/或晶锭的生长阶段（例如在颈缩、冠顶以及最晚体部到端部圆锥的生长期间），改变外部磁场的形态和/或外部磁场的强度。还可调节外部磁场以控制熔体－固体界面的形状，以便保持晶锭内的氧浓度水平和/或氧径向梯度的水平。还可调节外部磁场以便在晶锭的预期高度处实现预期的熔体－固体界面形状（例如，相对于晶锭的凸出界面形状、相对于晶锭的凹入界面形状、或者鸥翼界面形状）。

[0073] 除非另外规定，否则文中所示和所述的方法执行或操作顺序并不是必要的。即，发明人认为，除非另外规定，否则所述方法的要素可以任何顺序执行，并且所述方法可包括比文中公开的要素更多或更少的要素。

[0074] 当介绍本发明或其实施例的要素时，冠词“一”、“该”和“所述”是指存在一个或多个该要素。术语“包含”、“包括”和“具有”是包容性的，并且是指除了列出的要素之外还可能存在另外的要素。

现有技术

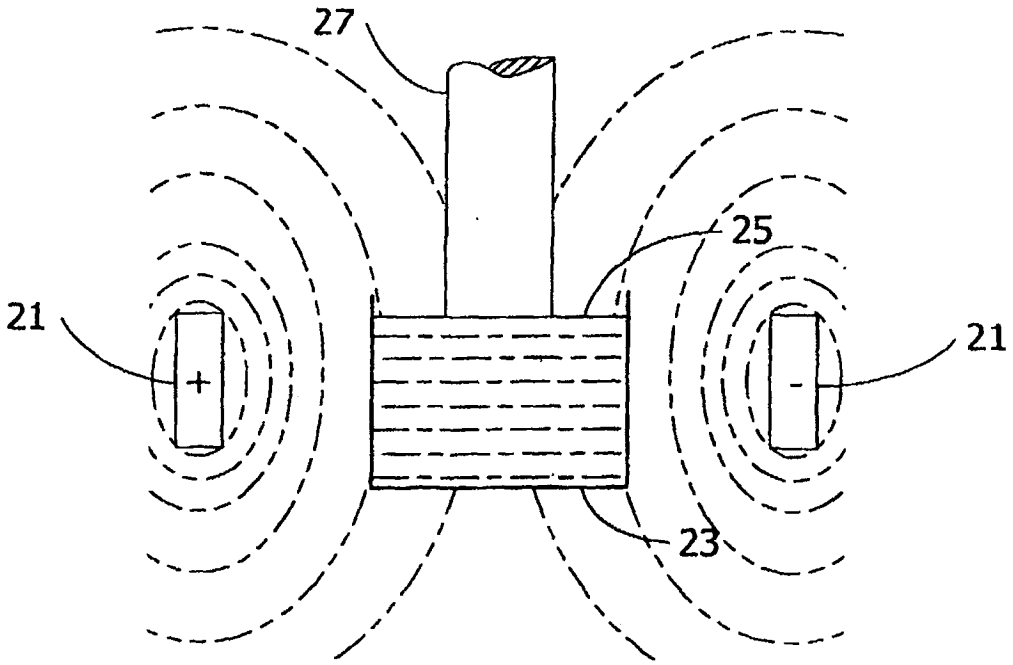


图 1

现有技术

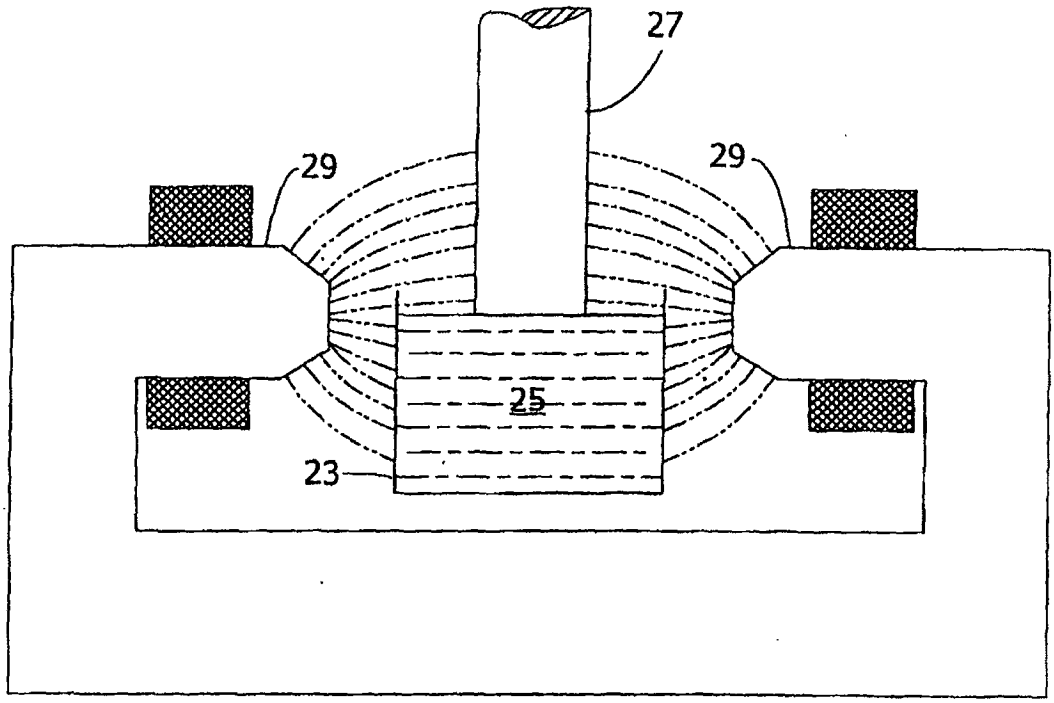


图 2

现有技术

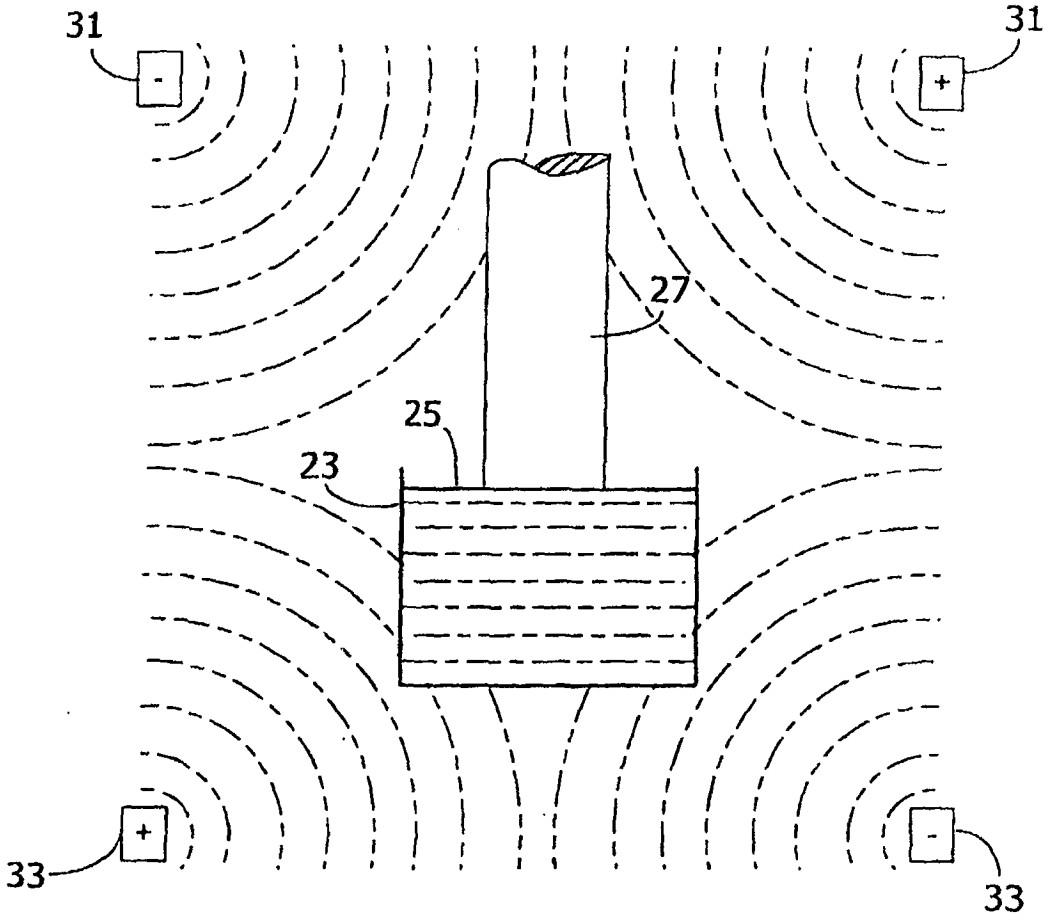


图 3

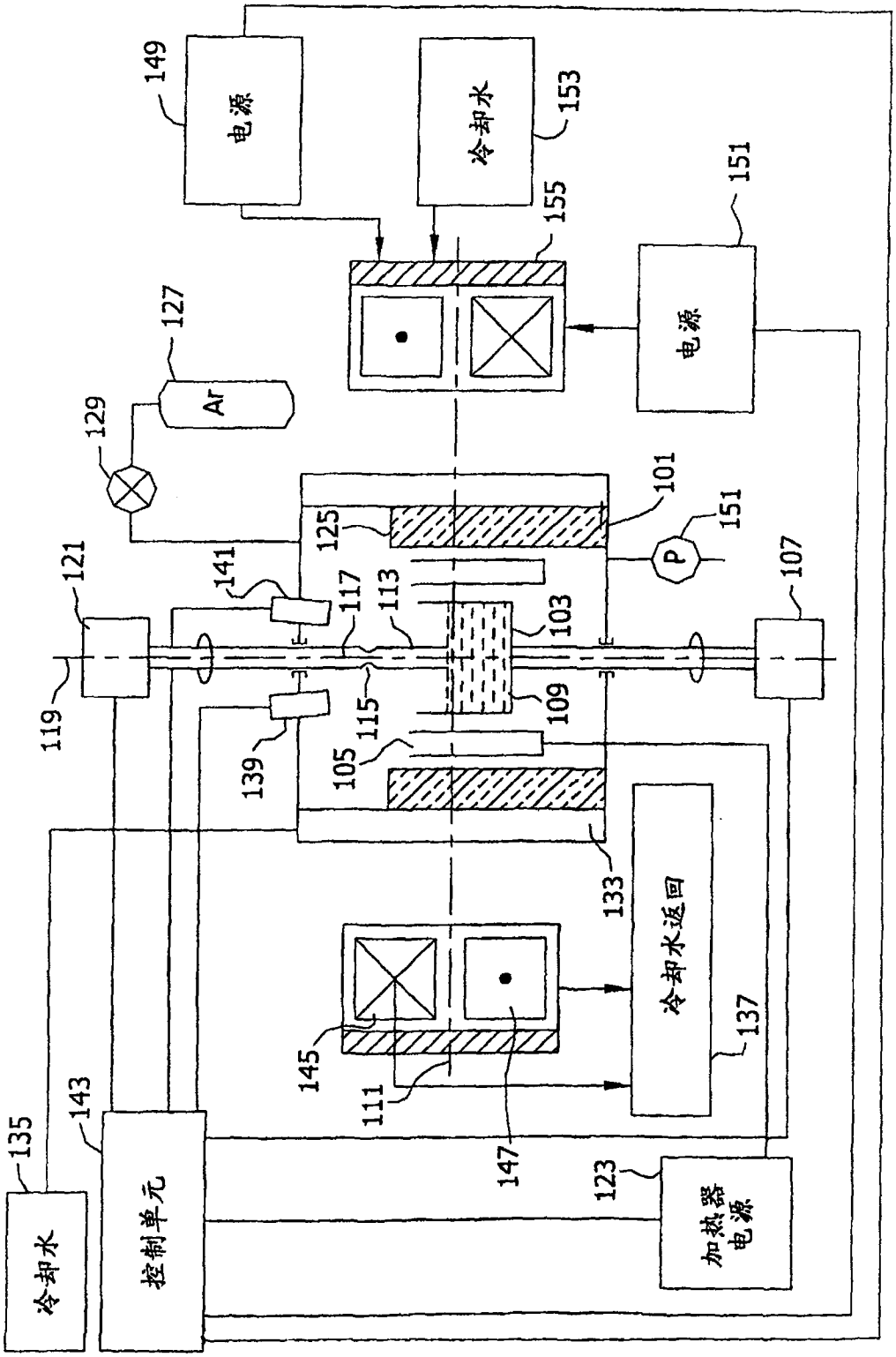

149
电源
153
冷却水
155
151
电源
127
Ar
129
101
125
151
P
121
141
117
113
103
107
119
109
115
139
105
133
冷却水返回
137
145
111
147
123
加热器电源
135
143
冷却水
控制单元

图 4

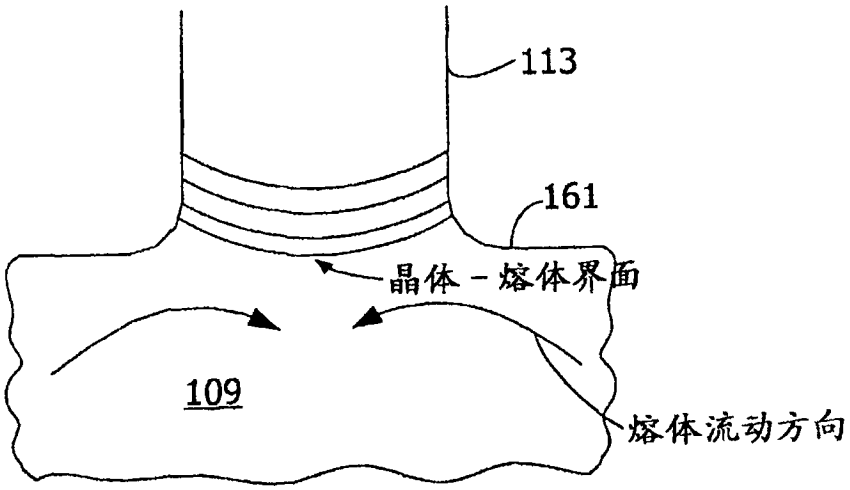


图 5A

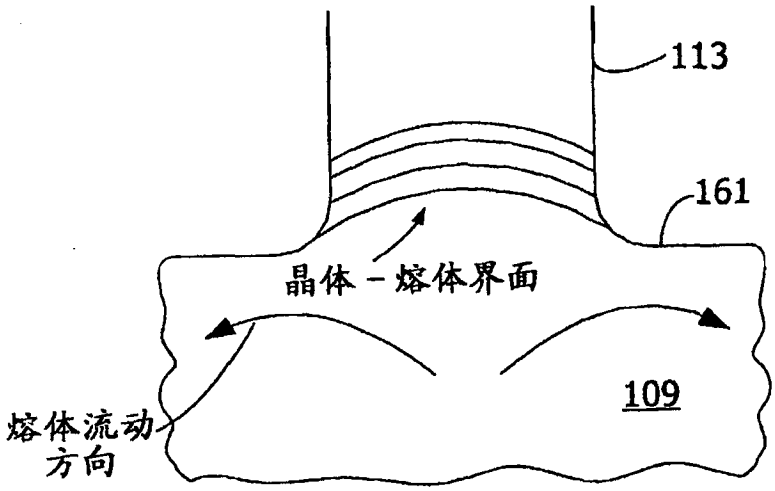


图 5B

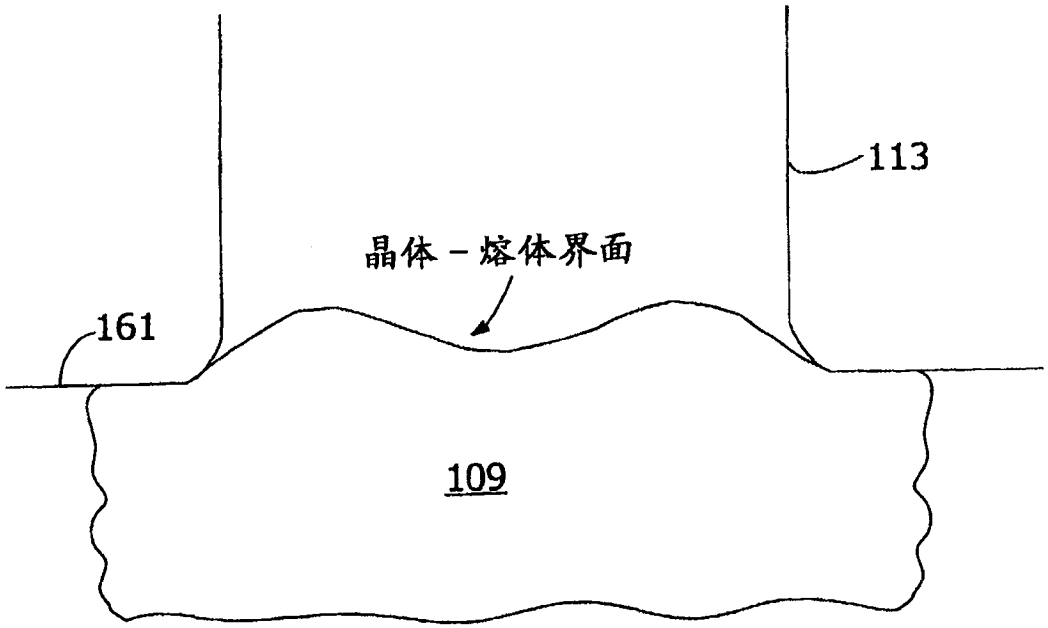


图 5C

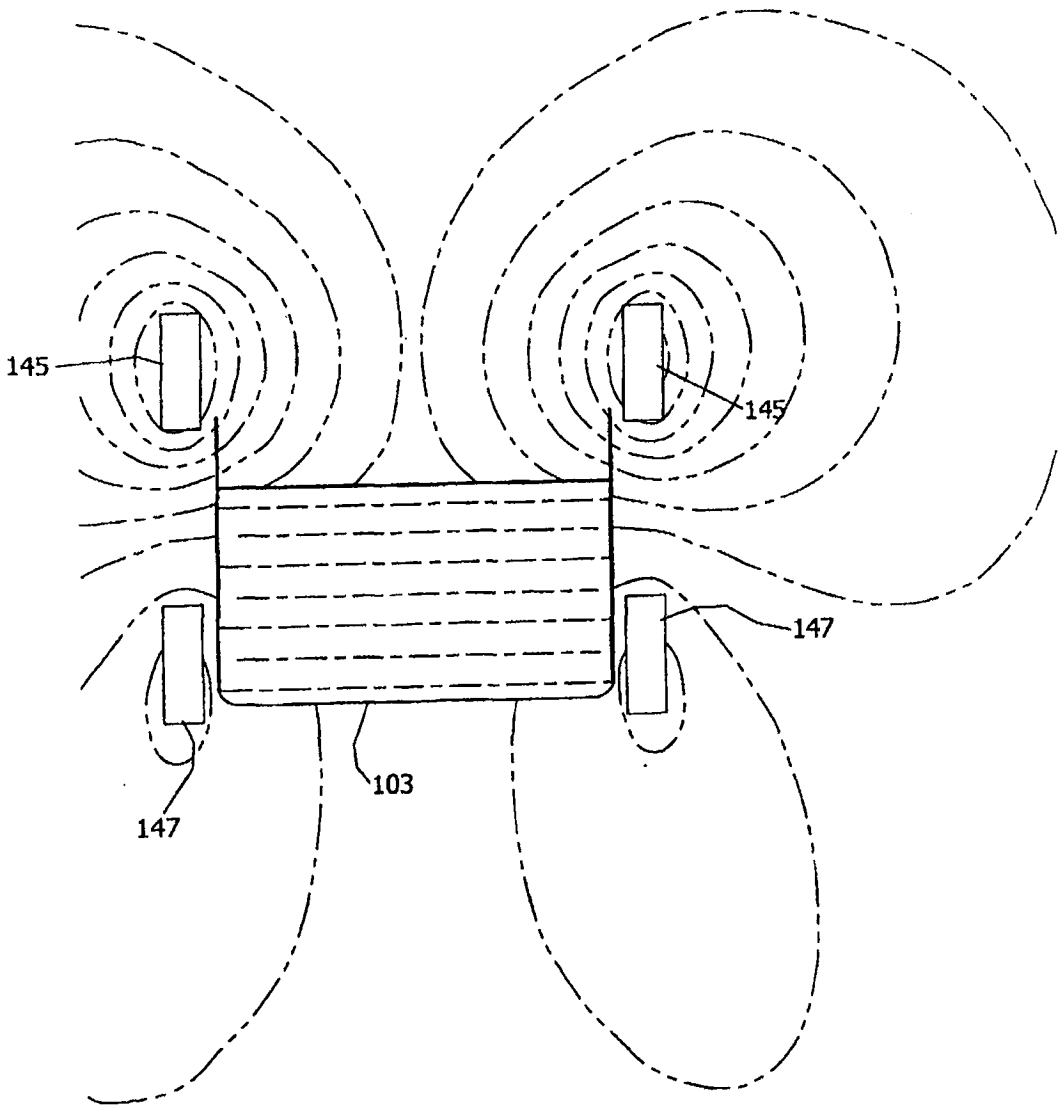


图 6A

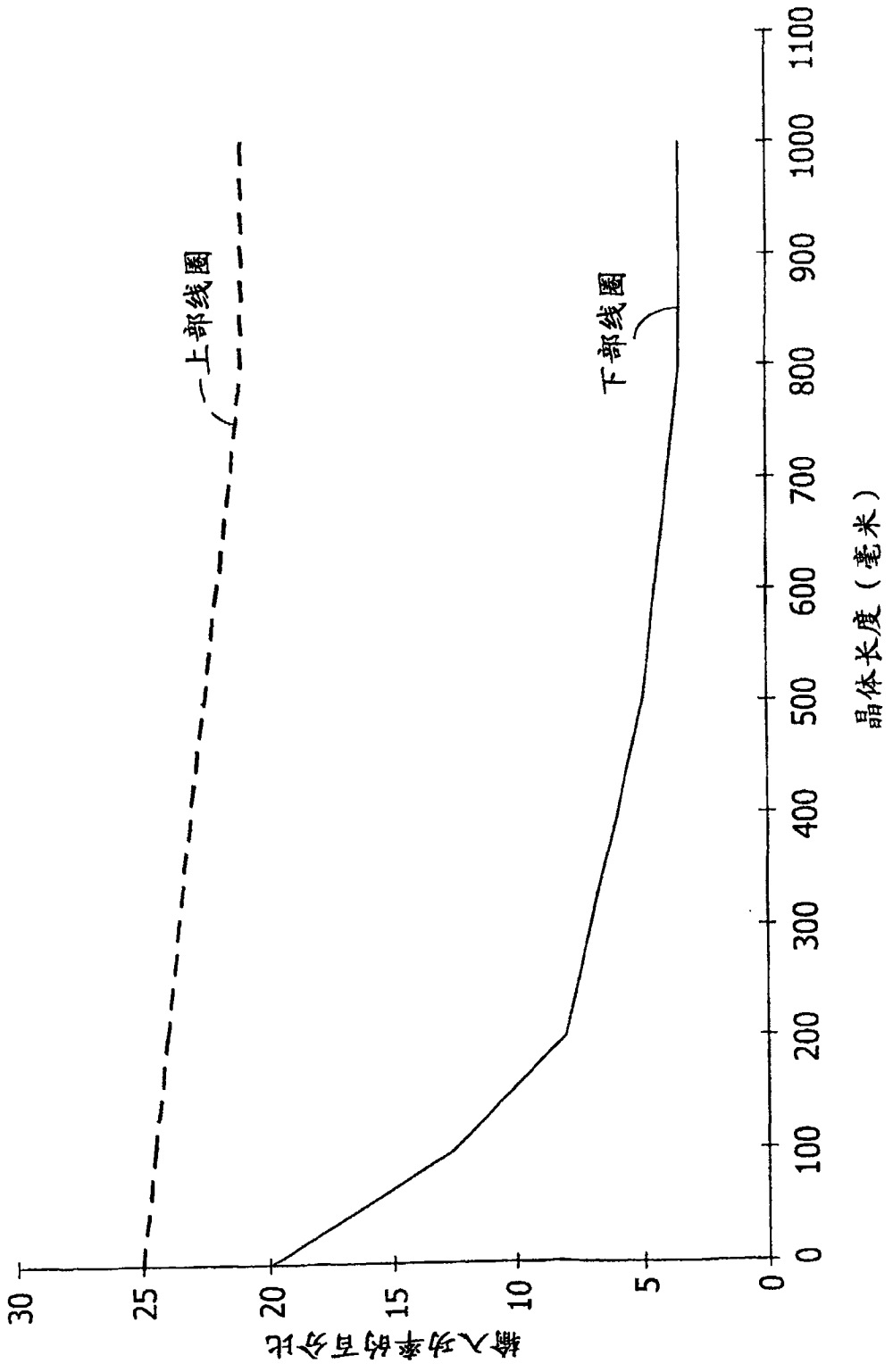

上部线圈
下部线圈
掺入功率的百分比
晶体长度（毫米）
0
5
10
15
20
25
30
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100

图 6B

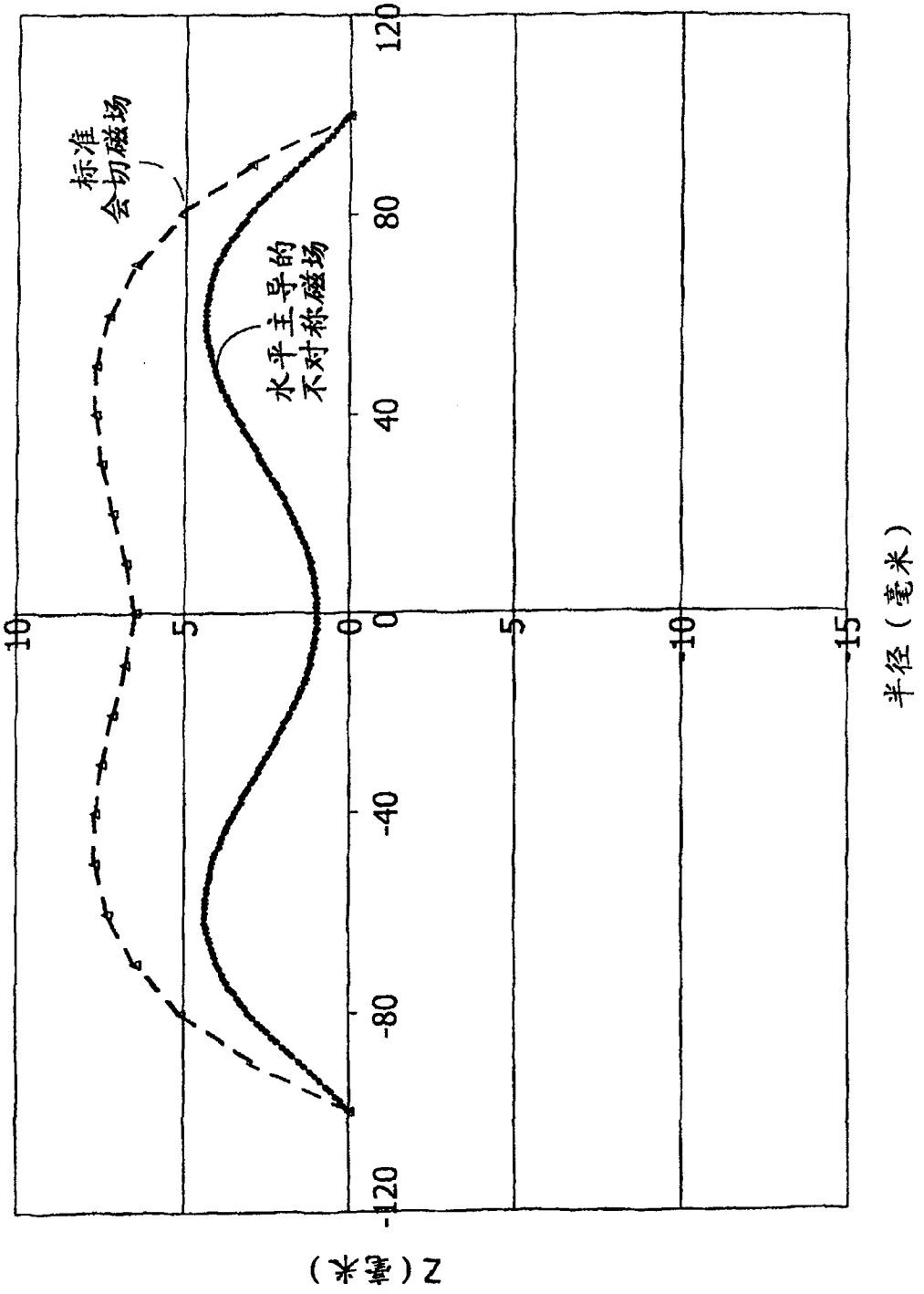


图 6C

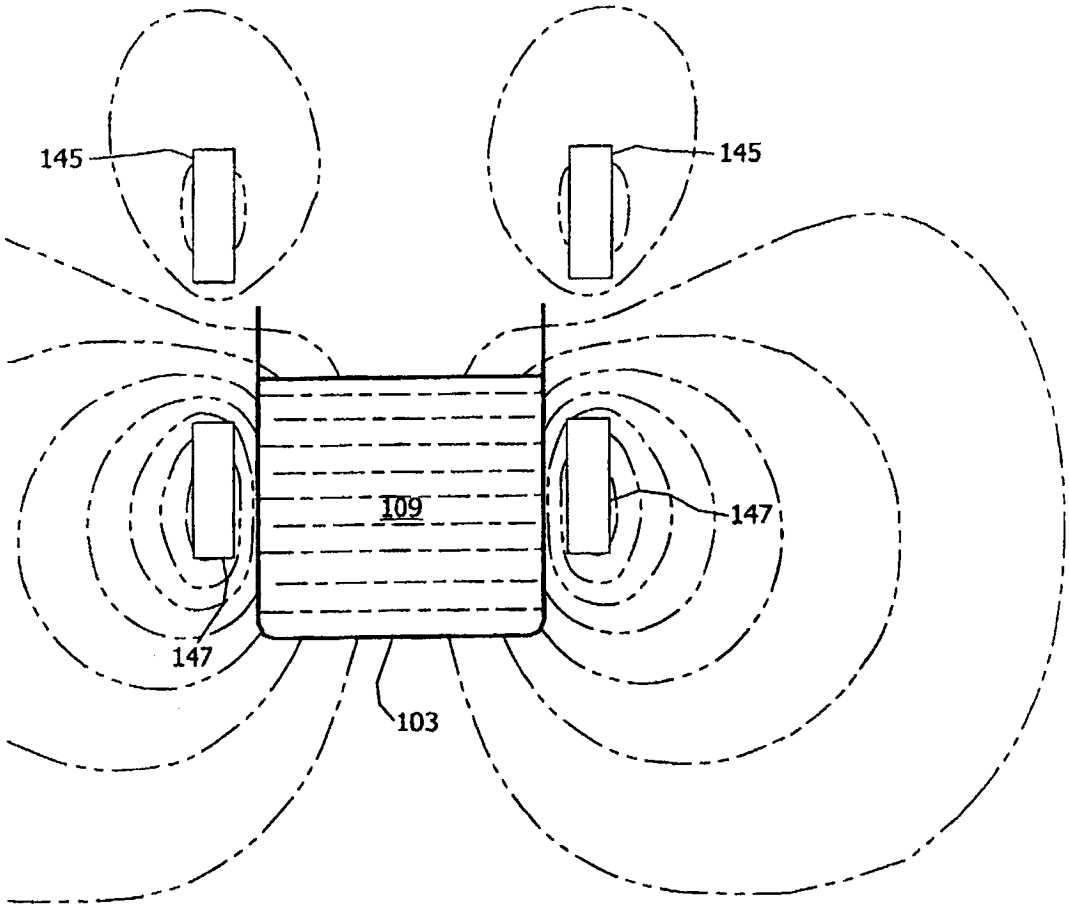


图 7A

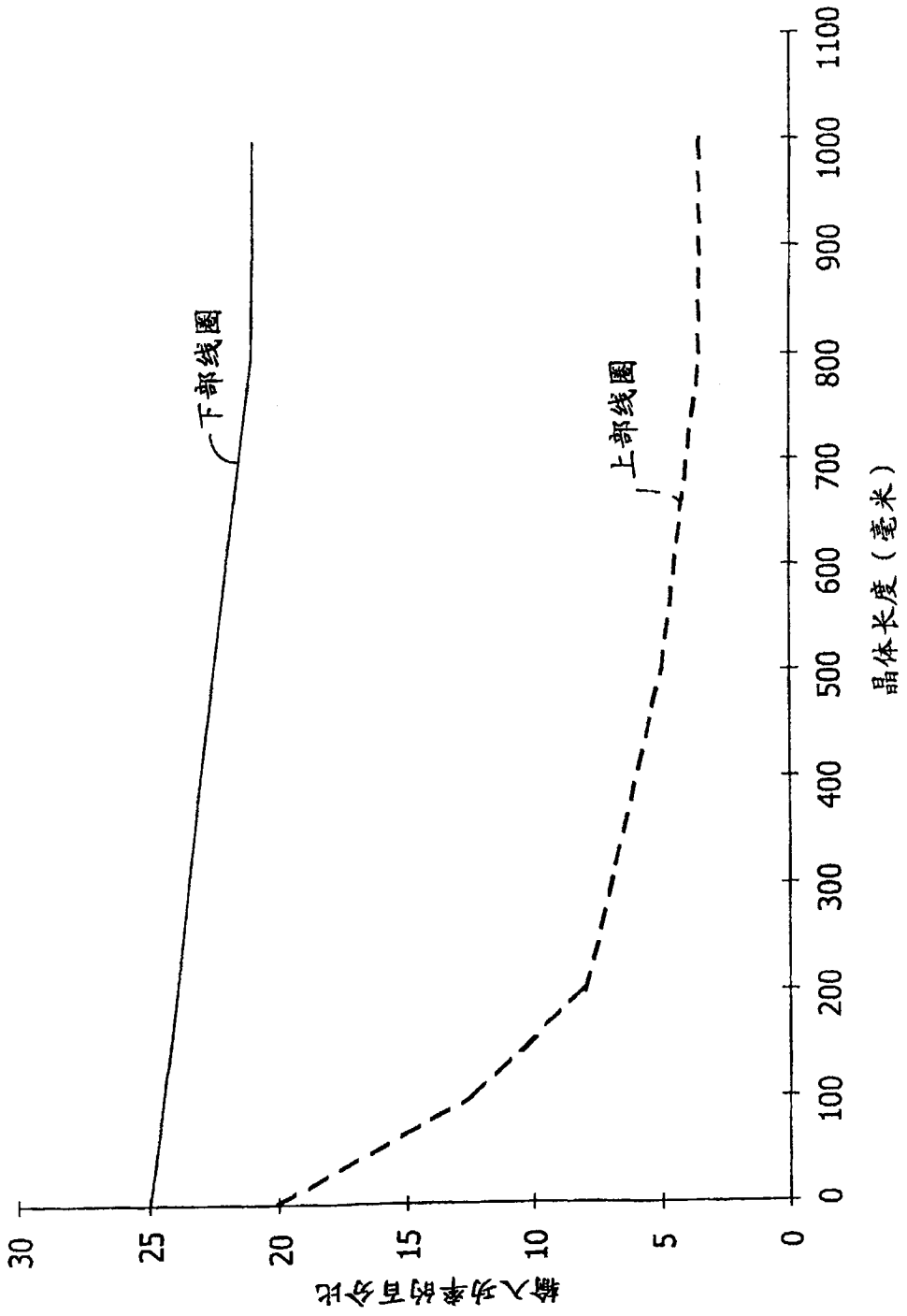

下部线圈
上部线圈
输入功率的百分比
晶体长度（毫米）
0
5
10
15
20
25
30
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100

图 7B

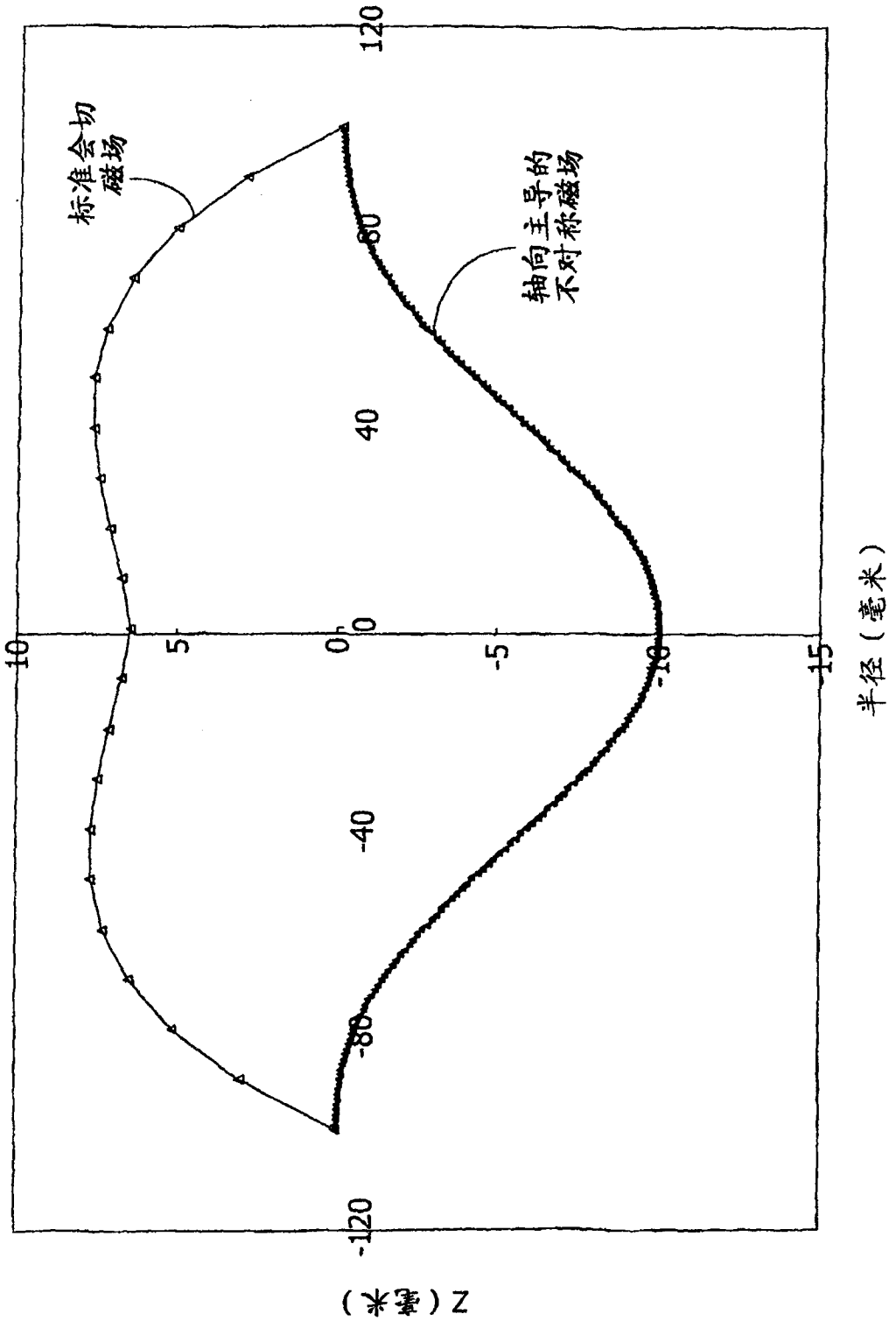


图 7C

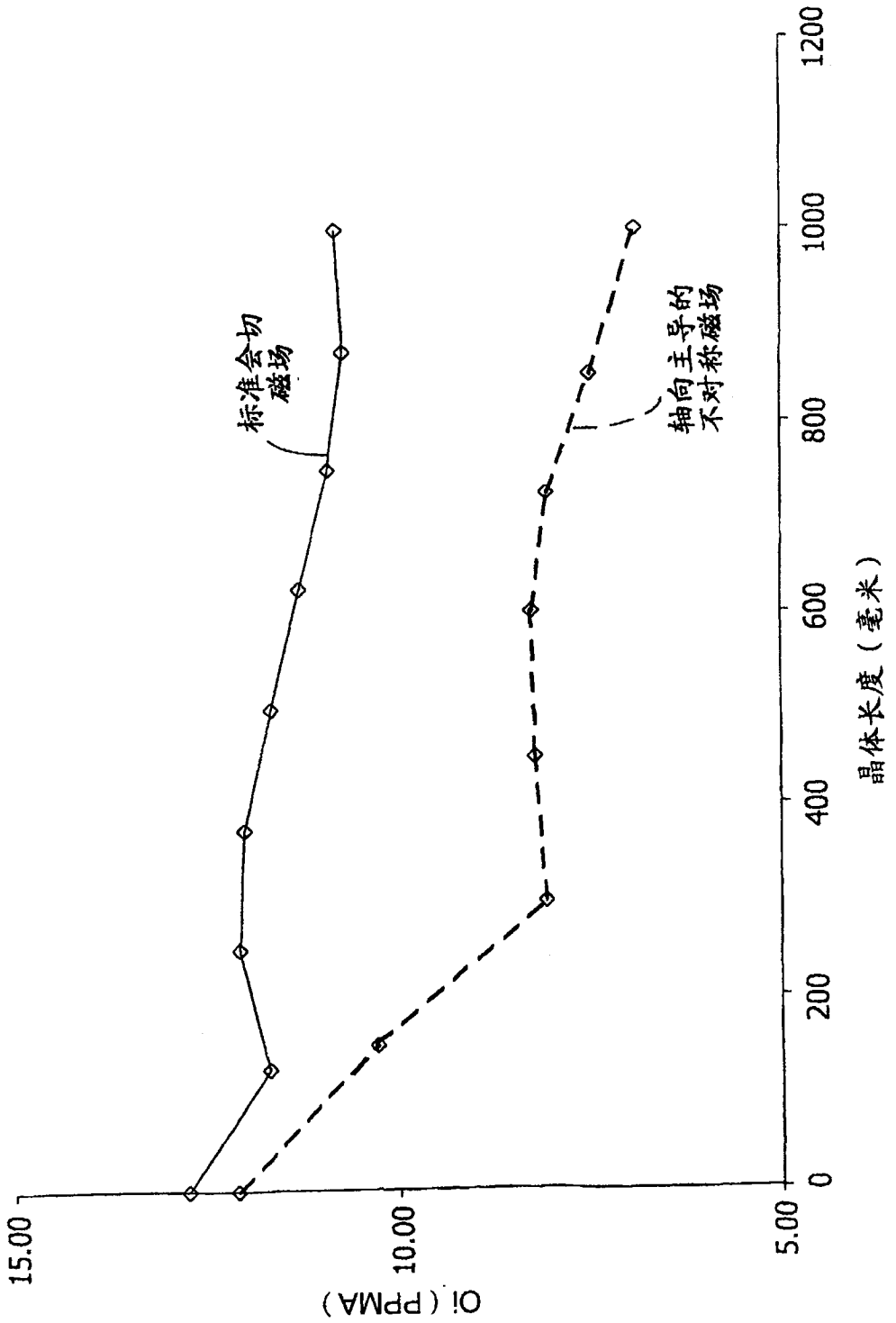

15.00
10.00
5.00
Oi (PPMA)
0
200
400
600
800
1000
1200
晶体长度（毫米）
标准会切磁场
轴向主导的不对称磁场

图 7D

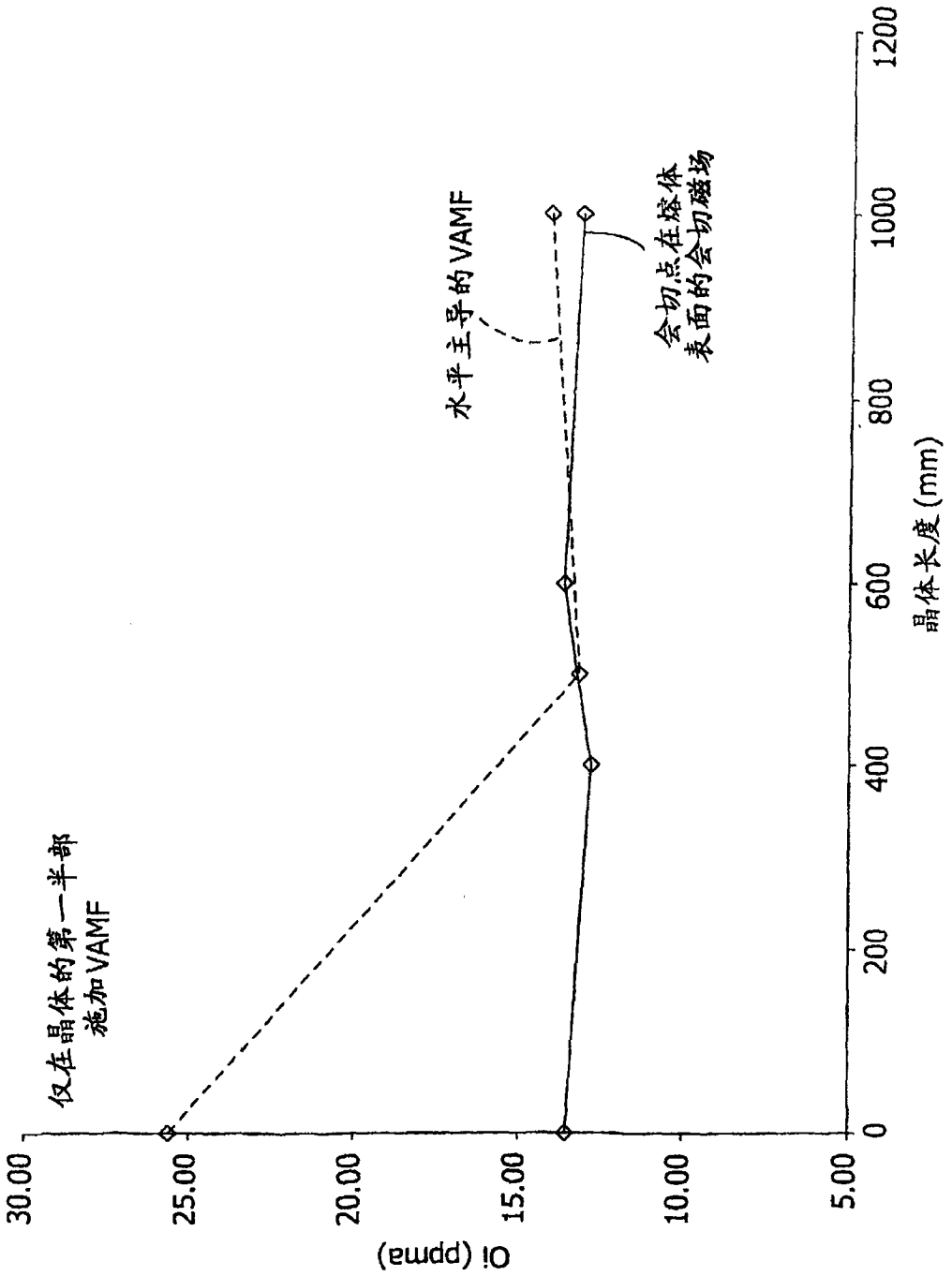

仅在晶体的第一半部施加VAMF
水平主导的VAMF
会切点在熔体表面的会切磁场
Oi (ppma)
晶体长度(mm)
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0
200
400
600
800
1000
1200

图 7E

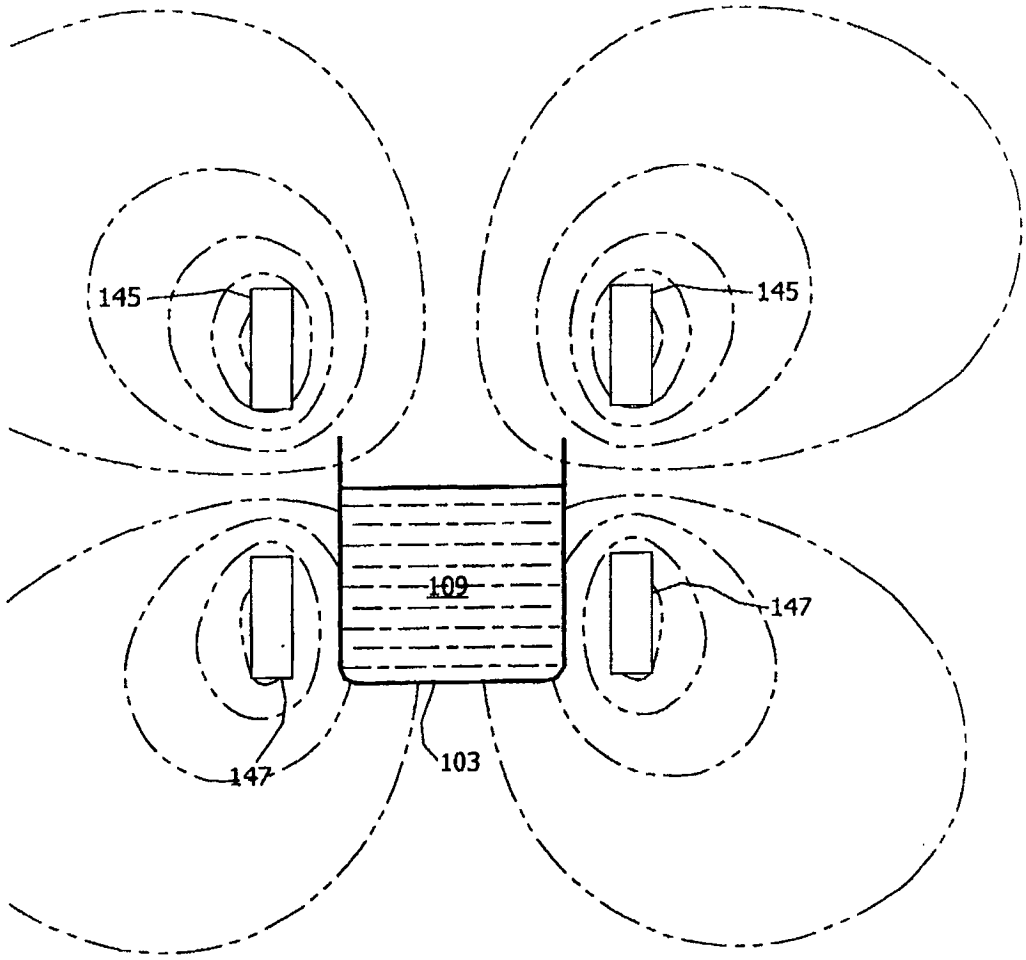


图 8

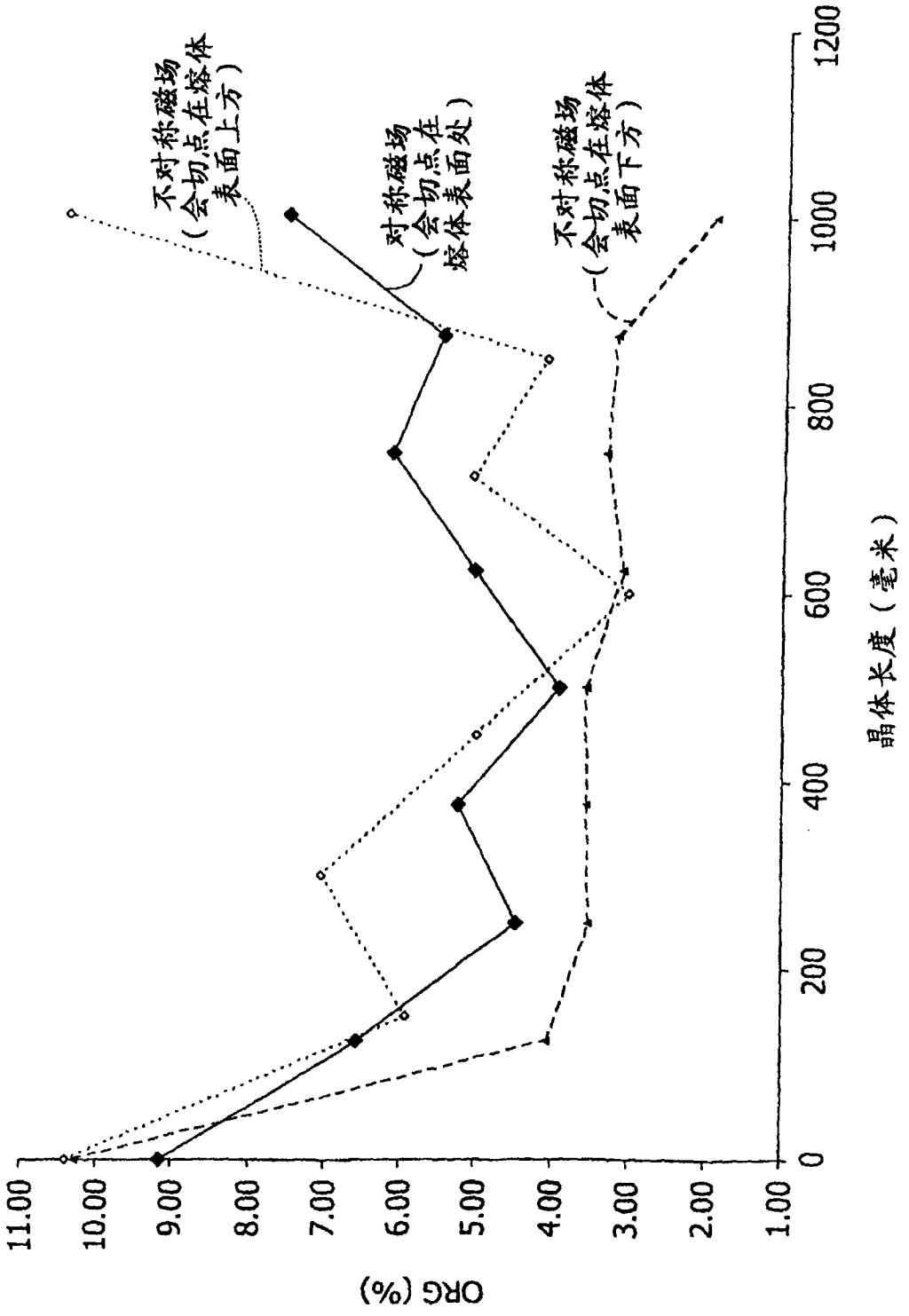

不对称磁场
（会切点在熔体
表面上方）
对称磁场
（会切点在
熔体表面处）
不对称磁场
（会切点在熔体
表面下方）
ORG (%)
晶体长度（毫米）
11.00
10.00
9.00
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0
200
400
600
800
1000
1200

图 9

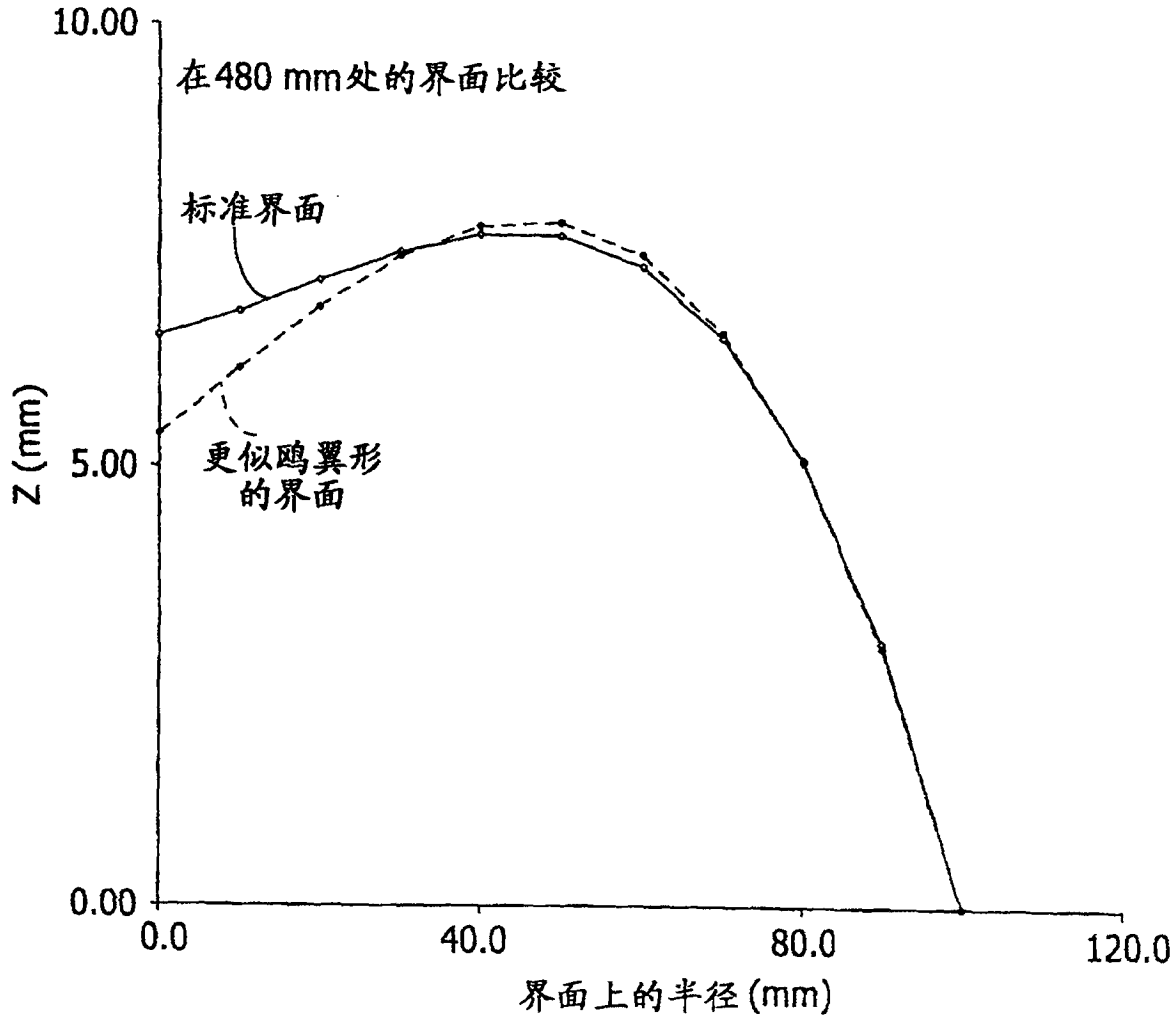

10.00
在480 mm处的界面比较
标准界面
更似鸥翼形
的界面
Z (mm)
5.00
0.00
0.0
40.0
80.0
120.0
界面上的半径 (mm)

图 10A

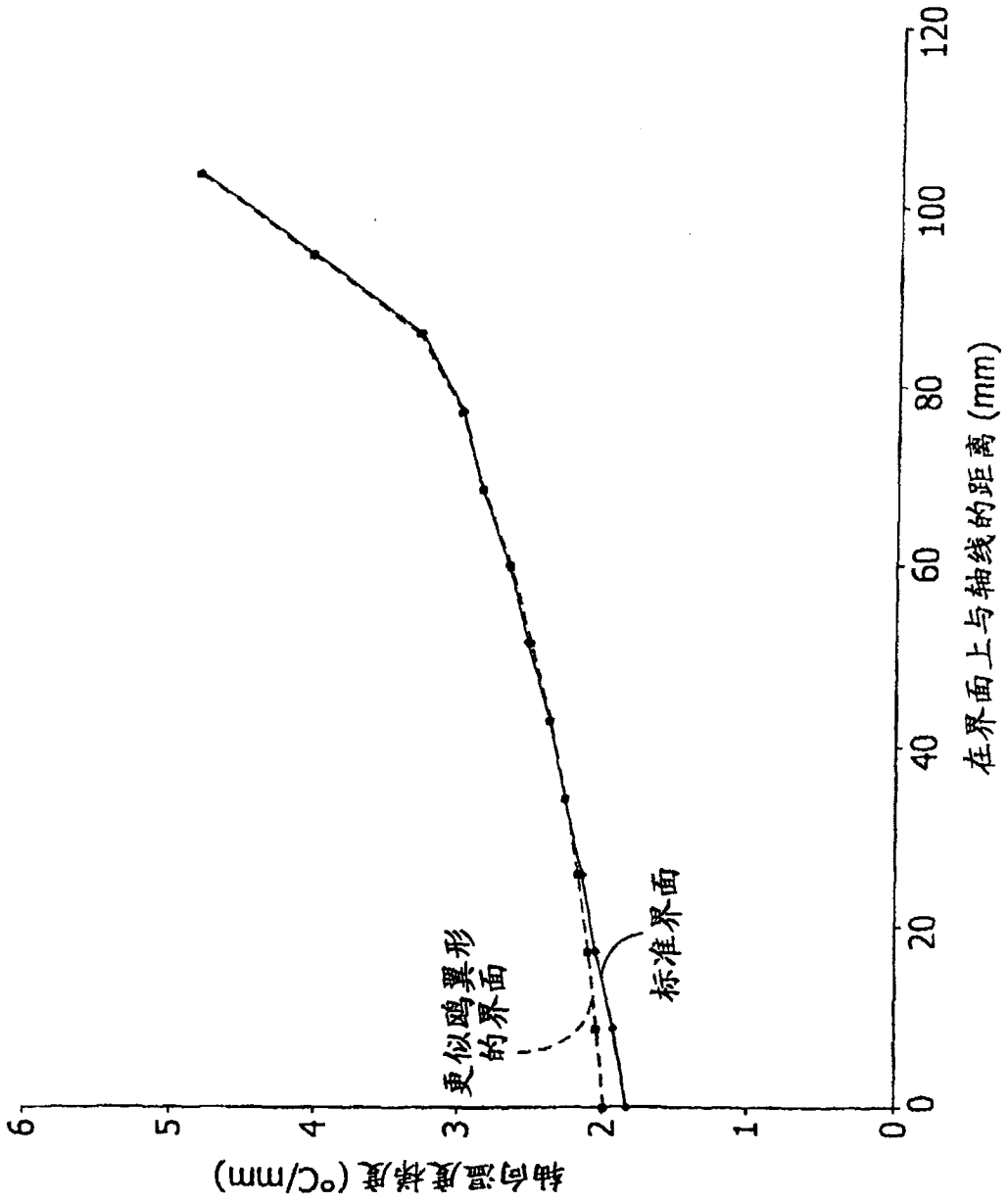

轴向温度梯度 (°C/mm)
在界面上与轴线的距离 (mm)
更似鸥翼形的界面
标准界面
0
1
2
3
4
5
6
0
20
40
60
80
100
120

图 10B

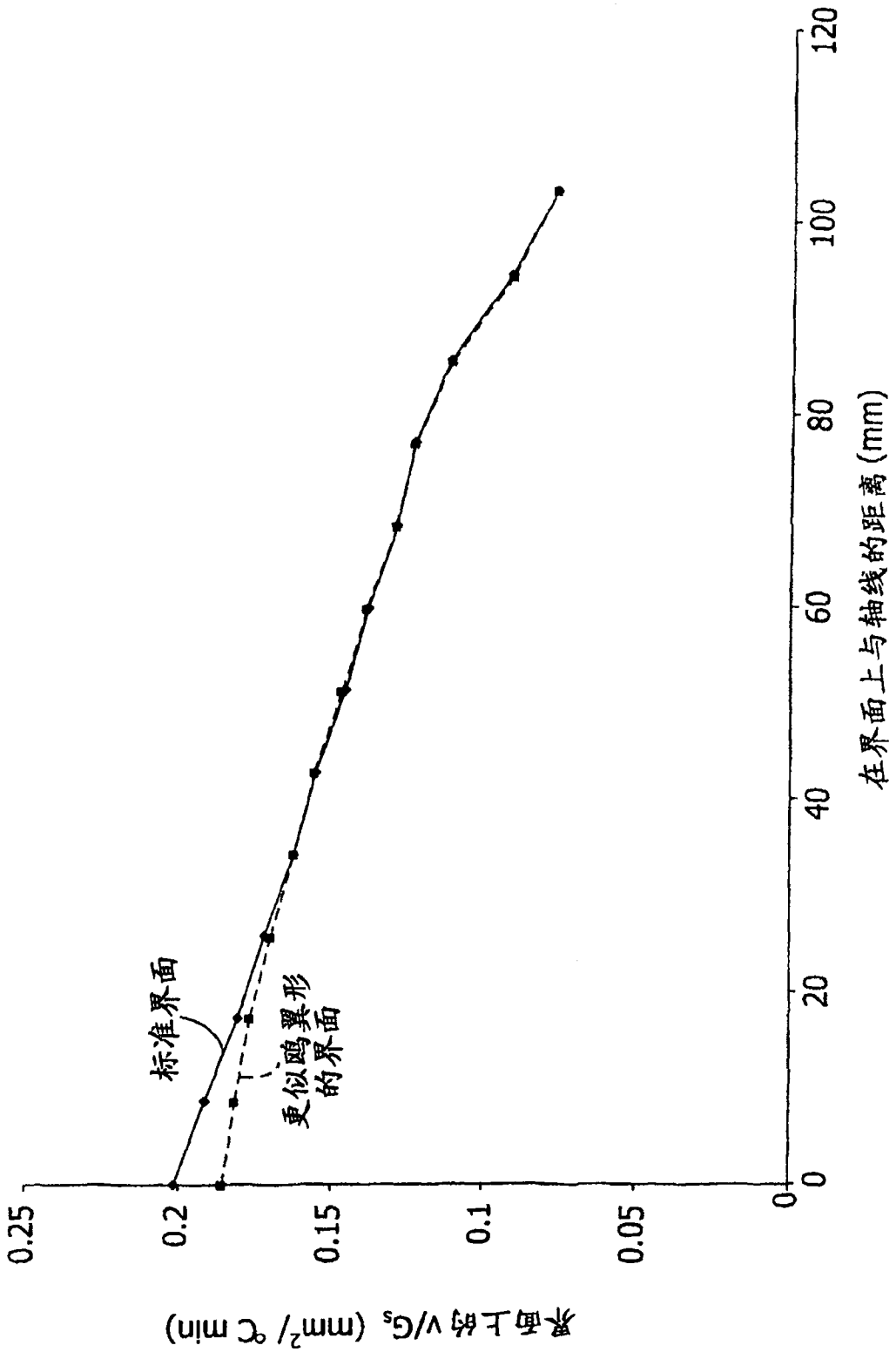

界面上的 v/G$_s$ (mm^2/ °C min)
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
20
40
60
80
100
120
在界面上与轴线的距离 (mm)
标准界面
更似鸥翼形的界面

图 10C

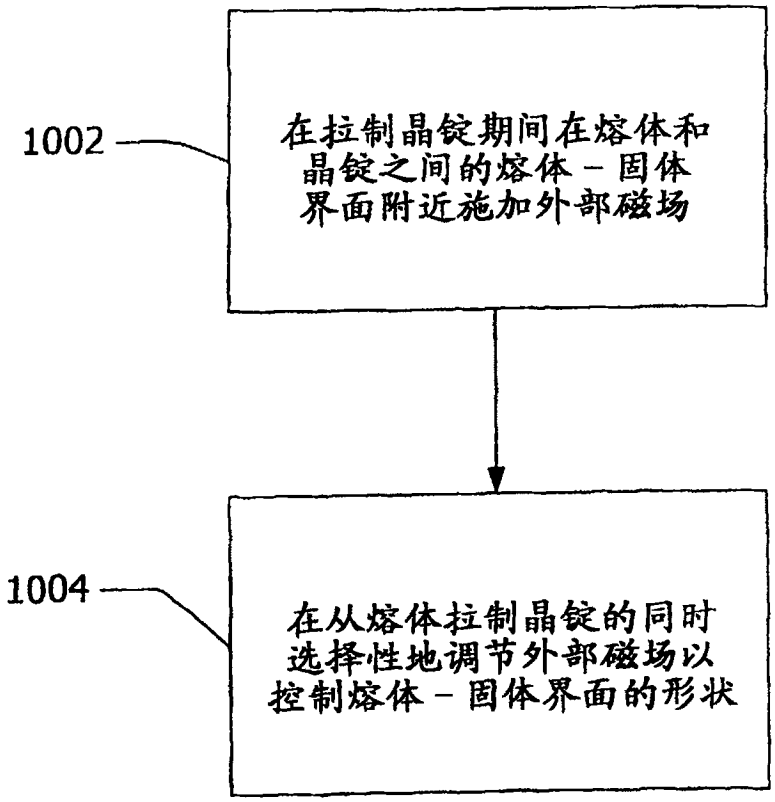

1002
在拉制晶锭期间在熔体和晶锭之间的熔体－固体界面附近施加外部磁场
1004
在从熔体拉制晶锭的同时选择性地调节外部磁场以控制熔体－固体界面的形状

图 11