(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 102112665 B
(45)授权公告日 2012.12.12

(21)申请号 200980129655.6

(22)申请日 2009.08.06

(30)优先权数据
61/087,117 2008.08.07 US

(85)PCT申请进入国家阶段日
2011.01.28

(86)PCT申请的申请数据
PCT/US2009/053002 2009.08.06

(87)PCT申请的公布数据
WO2010/017389 EN 2010.02.11

(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 H·斯里达哈拉默西
M·S·库尔卡尼 H·W·科布

(74)专利代理机构 北京市中咨律师事务所 11247
代理人 杨晓光 于静

(51)Int.Cl.
C30B 15/30(2006.01)
C30B 29/06(2006.01)

(56)对比文件
US 2006144321 A1,2006.07.06,
DE 19529481 A1,1997.02.13,
US 2006144320 A1,2006.07.06,

审查员 林昭春

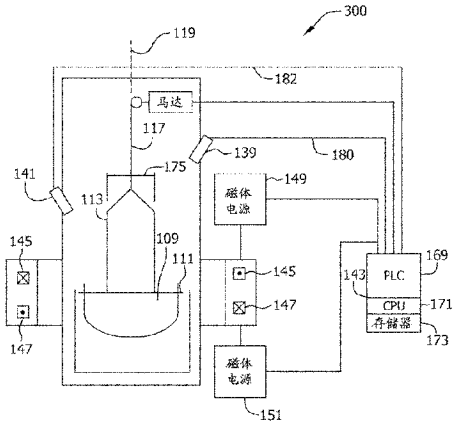
权利要求书 2 页 说明书 13 页 附图 22 页

(54)发明名称

通过施加时变磁场在硅熔体中产生抽吸力

(57)摘要

描述了在晶体生长系统中控制晶体生长。该晶体生长系统包括含有半导体熔体的被加热的坩埚，根据切克劳斯基方法从所述半导体熔体生长单晶锭，并且该锭在从所述熔体拉拔的籽晶上生长。该方法包括通过向上线圈供应第一直流电流(I_{UDC})和向下线圈供应第二直流电流(I_{LDC})而将会切磁场施加到所述熔体。该方法还包括向上线圈供应第一交流电流(I_{UAC})和向下线圈供应第二交流电流(I_{LAC})以产生时变磁场，其中所述时变磁场在所述半导体熔体中产生抽吸力。



CN 102112665 B

1. 一种用于施加时变磁场以抵消在半导体熔体中存在的浮力基元的方法，根据切克劳斯基方法从所述半导体熔体生长单晶锭，所述锭在从所述半导体熔体拉拔的籽晶上生长，所述方法包括：

确定用于抵消所述浮力基元的抽吸力的方向和量值；

限定所述时变磁场的特性，所述时变磁场将在所述半导体熔体中产生所述抽吸力以抵消所述浮力基元；

通过向上线圈供应第一直流电流 I_{UDC} 并向下线圈供应第二直流电流 I_{LDC} 而将会切磁场施加到所述熔体；

向上线圈供应第一交流电流 I_{UAC} 并向下线圈供应第二交流电流 I_{LAC} 以产生限定的所述时变磁场，其中所述时变磁场在所述半导体熔体中产生所述抽吸力；以及

施加所产生的所述时变磁场以抵消所述半导体熔体中的所述浮力基元，从而产生相对于所述锭凹陷的熔体－固体界面形状，其中所述锭具有至少两百毫米的直径。

2. 根据权利要求 1 的方法，其中确定所述抽吸力的所述方向和所述量值还包括确定随着时间由所述半导体熔体中的所述浮力基元引起的浮力。

3. 根据权利要求 2 的方法，其中限定将产生所述抽吸力的所述时变磁场的特性还包括限定对抗并减弱由所述半导体熔体中的所述浮力基元引起的浮力的所述抽吸力。

4. 根据权利要求 2 的方法，其中确定用于抵消所述浮力的所述抽吸力的所述方向和所述量值包括对晶体生长系统的计算机建模和分析。

5. 根据权利要求 4 的方法，其中确定所述抽吸力的所述方向和所述量值包括确定沿与所述半导体熔体中的所述浮力的方向相反的方向产生抽吸力的 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的相位。

6. 根据权利要求 4 的方法，其中确定所述抽吸力的所述方向和所述量值包括确定在所述半导体熔体中产生所述浮力的相反量值的抽吸力的 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的幅值。

7. 根据权利要求 1 的方法，其中施加所产生的所述时变磁场以产生相对于所述锭凹陷的所述熔体－固体界面形状包括产生延伸到所述锭中并且不具有鸥翼形状的抛物线熔体－固体界面形状。

8. 根据权利要求 1 的方法，还包括产生具有至少三百毫米的直径的锭。

9. 一种用于施加时变磁场以抵消在半导体熔体中存在的浮力基元的系统，根据切克劳斯基方法从所述半导体熔体生长单晶锭，所述锭在从所述熔体拉拔的籽晶上生长，所述系统包括：

用于产生磁场的第一组线圈和第二组线圈，其中所述第一组线圈和所述第二组线圈邻近坩埚的外部，所述坩埚被配置为便于产生具有大于两百毫米的直径的锭；以及

包括处理器的控制单元，其被配置为确定：

用于抵消来自所述浮力基元的浮力的抽吸力的方向和量值；以及

限定将产生所述抽吸力的所述时变磁场的特性组；

所述控制单元被配置为实施向所述第一组线圈供应第一交流电流 I_{UAC} 和向所述第二组线圈供应第二交流电流 I_{LAC} 中的至少一者以产生具有所述确定的特性组的所述时变磁场，其中所述时变磁场产生抵消所述浮力基元的所述浮力的所述抽吸力并产生相对于所述锭凹陷的熔体－固体界面形状，

其中所述控制单元还被配置为向所述第一组线圈和所述第二组线圈中的至少一者供

应直流电流。

10. 根据权利要求 9 的系统，其中限定所述时变磁场的所述特性组包括 I_{UAC} 的相位、I_{LAC} 的相位、I_{UAC} 的量值以及 I_{LAC} 的量值中的至少一者。

11. 根据权利要求 10 的系统，其中所述控制单元还被配置为存储 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的多个相位，其中所述相位确定所述抽吸力的所述方向。

12. 根据权利要求 10 的系统，其中所述控制单元还被配置为存储 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的多个量值，其中 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的所述量值确定所述抽吸力的所述量值。

13. 根据权利要求 9 的系统，其中所述控制单元将 I_{UAC} 和 I_{LAC} 中的至少一者叠加在所述至少一个直流电流上。

14. 一种用于在进行单晶硅锭生长的切克劳斯基工艺的半导体熔体中产生抽吸力的方法，所述方法包括：

确定用于抵消在所述半导体熔体中存在的浮力的抽吸力的方向和量值；

通过向上线圈供应第一直流电流 I_{UDC} 并向下线圈供应第二直流电流 I_{LDC} 而将会切磁场施加到所述熔体；

存储第一交流电流 I_{UAC} 和第二交流电流 I_{LAC} 的交流电流分布；

分别用 I_{UAC} 和 I_{LAC} 激励第一线圈和第二线圈以产生时变磁场；以及

将所述时变磁场施加到所述半导体熔体以在所述半导体熔体中产生所述抽吸力。

15. 根据权利要求 14 的方法，其中存储交流电流分布包括存储 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的每一者的量值、频率以及相位角中的至少一者，其中 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的所述量值和相位角确定所产生的所述抽吸力的量值和方向。

16. 根据权利要求 14 的方法，其中将所述时变磁场施加到所述半导体熔体包括在制造具有大于两百毫米的直径的半导体锭的工艺期间将所述时变磁场施加到半导体熔体。

17. 根据权利要求 14 的方法，其中将所述时变磁场施加到所述半导体熔体还包括产生相对于所述锭凹陷的熔体 - 固体界面形状。

通过施加时变磁场在硅熔体中产生抽吸力

背景技术

[0001] 通常根据所谓的切克劳斯基 (Czochralski)(Cz) 法制备单晶硅，单晶硅是用于制造半导体电子部件的大多数工艺中的起始材料。在该工艺中，多晶硅被装入坩埚并被熔化，使籽晶 (seed crystal) 与熔化的硅接触，并通过相对缓慢的提拉而生长单晶（在本文中也称为单晶体）锭。在完成颈部的形成之后，降低拉拔速率和 / 或熔体温度以增大晶体的直径，直到达到希望的或目标直径。然后，通过控制拉拔速率和熔体温度并同时补偿降低的熔体液面 (melt level) 来生长具有近似恒定直径的通常为圆柱形的晶体主体。在生长工艺邻近结束但在坩埚中的熔化的硅变空之前，逐渐减小晶体直径以形成端锥 (end-cone)。典型地，通过增加晶体拉拔速率和对坩埚施加的热而形成端锥。当直径变得足够小时，使晶体与熔体分离。

[0002] 为了制造半导体级单晶硅，更具体而言，大的、基本上没有缺陷的晶体（例如，在二十八英寸直径的坩埚中生长的晶体），必须控制包括正在生长的晶体的周边的固化界面的特性。在本文中，正在生长的晶体的固化界面也称为熔体 - 固体界面。熔体 - 固体界面的形状是获得用于制造单晶硅的适宜工艺窗口的重要因素。

[0003] 各种配置的磁场已经被用于采用 Cz 工艺的硅生长，以便修改熔体流动从而控制杂质和点缺陷的并入。典型地，采用静态或准静态场来在轴对称晶体生长系统中产生力场，该力场会使通过热浮力和旋转的组合而建立的熔体运动减速。然后，通过设计热环境、晶体拉拔器中的旋转以及无源减速力场来确定所产生的熔体流动。因为热环境的设计不容易修改，热浮力也不容易修改，因此限制了工艺适应性。获得这样的附加控制机构是有益的，该控制机制能够在不修改受硬件支配的热环境的情况下调制熔体中的净体积力 (body force) 以构建产生希望的热通量的熔体流动样式。

[0004] 因此，希望在晶体生长工艺期间改善对熔体流动的控制，以为单晶硅的制造提供提高的工艺适应性。

发明内容

[0005] 在一个方面，提供了一种在晶体生长系统中控制晶体生长的方法。所述晶体生长系统包括含有半导体熔体的被加热的坩埚，根据切克劳斯基方法从所述半导体熔体生长单晶锭，并且该锭在从所述熔体拉拔的籽晶上生长。所述方法包括通过向上线圈供应第一直流电流 (I_{UDC}) 并向下线圈供应第二直流电流 (I_{LDC}) 而将会切磁场 (cusped magnetic field) 施加到所述熔体。所述方法还包括向所述上线圈供应第一交流电流 (I_{UAC}) 并向所述下线圈供应第二交流电流 (I_{LAC}) 以产生时变 (time-varying) 磁场，其中所述时变磁场在所述半导体熔体中产生抽吸力 (pumping force)。

[0006] 在另一方面，提供了一种便于控制熔体 - 固体界面的形状的生长硅晶体的系统。所述晶体生长系统包括含有半导体熔体的被加热的坩埚，根据切克劳斯基方法从所述半导体熔体生长单晶锭。所述锭在从所述熔体拉拔的籽晶上生长，并且所述熔体和所述锭在其之间形成所述熔体 - 固体界面。所述系统包括邻近所述坩埚的外部的用于产生会切磁场

的第一组线圈和第二组线圈。所述系统还包括控制单元，所述控制单元被配置为实施向所述第一组线圈供应第一时变交流电流（I_{UAC}）和向所述第二组线圈供应第二时变交流电流（I_{LAC}）中的至少一者以产生时变磁场。所述时变磁场在所述半导体熔体中产生抽吸力。

[0007] 在又一方面，提供了一种用于在进行单晶硅锭生长的切克劳斯基工艺的半导体熔体中产生抽吸力的方法。所述系统包括存储第一交流电流（I_{UAC}）和第二交流电流（I_{LAC}）的交流电流分布（profile）。所述方法还包括分别用 I_{UAC} 和 I_{LAC} 激励（energize）第一线圈和第二线圈以产生时变磁场，其中所述时变磁场在所述半导体熔体中产生抽吸力。

附图说明

[0008] 图 1 和 2 示例出示例性坩埚和柱坐标系统；

[0009] 图 3 为示例出对晶体生长设备中的包含熔体的坩埚施加的轴向（本文中也称为垂直）磁场的框图；

[0010] 图 4 为示例出对晶体生长设备中的包含熔体的坩埚施加的水平（本文中也称为横向）磁场的框图；

[0011] 图 5 为示例出对晶体生长设备中的包含熔体的坩埚施加的会切磁场的框图；

[0012] 图 6 为示例性晶体生长系统的框图；

[0013] 图 7 和 8 示例出示例性熔体 - 晶体界面；

[0014] 图 9 为在晶体生长期间形成的熔体流动基元（melt flow cell）的示意图；

[0015] 图 10 为示例出被配置为施加时变磁场以在熔体中产生抽吸力的晶体生长设备控制系统的部件的框图；

[0016] 图 11-23 为图 10 所示的系统的一部分的局部截面视图；

[0017] 图 24 为示例出相控磁抽吸（PCMP）力对 I_{UAC} 与 I_{LAC} 之间的相位差的依赖性的系统性质的图表；

[0018] 图 25 为示例出 PCMP 力对 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的频率的依赖性的图表；

[0019] 图 26 为用于在晶体生长系统（例如图 10 所示的晶体生长系统）中控制晶体生长的示例性方法的流程图；

[0020] 图 27 为示例性熔体 - 固体界面的示例；

[0021] 图 28 为示例性熔体 - 固体界面的示例；

[0022] 图 29 为未施加时变磁场而生长的晶体的示例性缺陷过渡（defecttransition）图；

[0023] 图 30 为施加了时变磁场而生长的晶体的示例性缺陷过渡图；以及

[0024] 图 31 为图 10 所示的系统的一部分的局部截面视图。

具体实施方式

[0025] 许多现有的晶体生长系统采用轴对称的二线圈磁体，该磁体可用于产生轴向磁场（如果线圈中的电流沿相同方向）或会切形场（如果电流沿相反方向）。磁体典型地操作在准静态模式。在会切形场的情况下，场强度是小的并且在生长界面附近为近似水平的（例如，与水平方向成零度到五度），而在轴附近，场为近似垂直的（例如，与垂直方向成零度到三度）。磁体可以是超导的或是常规的。超导磁体典型地具有每个线圈中的大数目的匝数、

大电感，并且电流不容易被调制。相比而言，常规磁体典型地具有每个线圈中的相对小数目的匝数、中等的电感，并且电流容易被调制。在本文描述的方法和系统中，使用瞬变电流在高导电熔体中（特别地在常规磁体系统中）诱导电流，以通过在熔体中的诱导的电流与瞬时磁场的相互作用产生力场而不与熔体形成电接触。在示例性实施例中，这里描述的技术用于现有的磁体系统以提供对熔体运动的附加程度的控制。

[0026] 控制熔体－固体界面的形状是确定所制造的硅晶体的质量的重要因素。熔体－固体界面的形状依赖于工艺参数，例如但不限于温度、坩埚或晶体旋转以及晶体拉拔速率。通过确定这些工艺参数，熔体－固体界面也被确定。在示例性实施例中，在晶体生长工艺期间施加的磁场也会影响熔体－固体界面的形状。可以使用磁场来使金属和半导体熔体中的对流稳定并抑制自然对流和紊流。存在用于稳定导电熔体中的对流的三种常规类型的磁场配置，即，轴向的、水平的和会切的 (cusped)。

[0027] 图 1 和 2 示例出示例性坩埚 10 和柱坐标系统。柱坐标系统包括坐标 R12、θ 14 以及 Z16。坐标 R12、θ 14 以及 Z16 在本文中被用于描述在硅熔体中产生抽吸力的方法和系统。

[0028] 图 3 为示例出对晶体生长设备中的包含熔体 25 的坩埚 23 施加的轴向（本文中也称为垂直）磁场的框图。轴向磁场配置产生平行于晶体生长方向的磁场。在图 3 中，以截面图示出的磁体线圈 21 向坩埚 23 提供磁场。如所示，坩埚 23 包含硅熔体 25，从该硅熔体 25 生长晶体 27。

[0029] 图 4 为示例出对晶体生长设备中的包含熔体 25 的坩埚 23 施加的水平（本文中也称为横向）磁场的框图。在水平磁场配置中，两个磁极 29 被相对地设置以产生垂直于晶体生长方向的磁场。

[0030] 图 5 为示例出对晶体生长设备中的含有熔体 25 的坩埚 23 施加的会切磁场的框图。该会切磁场配置被设计为克服轴向和水平磁场配置的缺陷。一对线圈 31 和 33（例如，亥姆霍兹 (Helmholtz) 线圈）被同轴地设置在熔体表面 36 上方和下方并操作在相反电流模式下以产生这样的磁场，该磁场具有在熔体表面 36 附近的纯径向场分量和在熔体 25 的中心 38 附近的纯轴向场分量。由线圈 31 和 33 分别产生的上磁场 40 和下磁场 42 的组合产生了轴向和径向的会切磁场分量。

[0031] 图 6 为示例性晶体生长系统 100 的框图。系统 100 采用切克劳斯基晶体生长法制造半导体锭。在示例性实施例中，系统 100 被配置为产生具有约三百毫米 (300mm) 的直径的半导体锭。在另外的实施例中，系统 100 被配置为产生具有两百毫米 (200mm) 的直径或四百五十毫米 (450mm) 的直径的半导体锭。通常，晶体生长系统 100 包括包围坩埚 103 的真空室 101。加热器 105（例如，电阻加热器）围绕坩埚 103。在加热和晶体拉拔期间，坩埚驱动单元 107（例如，马达）使坩埚 103 沿例如由箭头示出的顺时针方向旋转。坩埚驱动单元 107 还可在生长工艺期间根据需要升高和 / 或降低坩埚 103。在坩埚 103 内为具有熔体液面 111 的硅熔体 109。在操作时，系统 100 从附到拉拔杆 (shaft) 或缆 (cable)117 上的籽晶 115 开始而从熔体 109 拉拔单晶 113。拉拔杆或缆 117 的一端通过滑轮（未在图 6 中示出）而被连接到卷筒 (drum)（未在图 6 中示出）或任何其他适宜类型的提升机构（例如，升降杆），而另一端被连接到卡盘（未在图 6 中示出），该卡盘保持籽晶 115 和从籽晶 115 生长的晶体 113。

[0032] 坩埚 103 和单晶 113 具有公共对称轴 119。随着熔体的耗尽，坩埚驱动单元 107 可以沿轴 119 升高坩埚 103 以将熔体液面 111 保持在希望的高度。晶体驱动单元 121 相似地使拉拔杆或缆 117 沿与坩埚驱动单元 107 旋转坩埚 103 的方向相反的方向（例如，反向旋转）旋转。在使用同转 (iso-rotation) 的实施例中，晶体驱动单元 121 可以使拉拔杆或缆 117 沿与坩埚驱动单元 107 旋转坩埚 103 的方向相同的方向（例如，沿顺时针方向）旋转。同转也称为“共转 (co-rotation)”。此外，晶体驱动单元 121 在生长工艺期间根据需要使晶体 113 相对于熔体液面 111 升高和降低。

[0033] 根据切克劳斯基单晶生长工艺，一定量的多晶体硅或多晶硅被装载到坩埚 103 中。加热器电源 123 激励电阻加热器 105，并且绝缘体 (insulation) 125 为真空室 101 的内壁加衬。当真空泵 151 从真空室 101 去除气体时，气体源 127（例如，瓶）通过气流控制器 129 将氩气供给到真空室 101。外室 133 围绕真空室 101，来自贮水池 (reservoir) 的冷却水 135 被馈送到外室 133。

[0034] 然后，冷却水被排出到冷却水返回集流管 (manifold) 137。典型地，诸如光电管 (photocell) 的温度传感器 139（或，高温计）测量熔体 109 的表面处的温度，并且直径传送器 (transducer) 141 测量单晶 113 的直径。控制单元 143 可包括处理器 144，该处理器 144 处理由光电管 139 和直径传送器 141 产生的信号。控制单元 143 可以为编程的数字或模拟计算机，其控制坩埚驱动单元 107、晶体驱动单元 121、加热器电源 123、真空泵 131 以及气流控制器（例如，氩气流控制器）。本文中使用的术语处理器是指中央处理单元、微处理器、微控制器、精简指令集电路 (RISC)、专用集成电路 (ASIC)、逻辑电路以及能够执行这里描述的功能的任何其他电路或处理器。在示例性实施例中，系统 100 不包括上加热器。上加热器的存在与否可以改变晶体 113 的冷却特性。

[0035] 在示例性实施例中，诸如螺线管线圈的上磁体 145 和诸如螺线管线圈的下磁体 147 分别位于熔体液面 111 的上方和下方。在示例性实施例中，以截面形式示出的线圈 145 和 147 围绕真空室 101 并共享对称轴 119。在一些实施例中，上和下线圈 145 和 147 具有单独的电源，即，上线圈电源 149 和下线圈电源 151，这两个电源中的每一个均被连接到控制单元 143 并受控制单元 143 的控制。

[0036] 在示例性实施例中，电流在两个螺线管线圈 145 和 147 中沿相反方向流动以产生磁场。贮水池 153 向上和下线圈 145 和 147 提供冷却水，之后通过冷却水返回集流器 137 排出。铁屏蔽物 155 围绕线圈 145 和 147 以减小杂散磁场并增强所产生的场的强度。

[0037] 在示例性实施例中，系统 100 产生适用于器件制造的硅晶锭。有利地，系统 100 可被用于产生硅晶体 113，硅晶体 113 的主要部分或全部基本上没有团聚的本征点缺陷。也就是，所产生的晶体 113 的主要部分或全部具有小于约 1×10^4 缺陷 /cm^3、小于约 5×10^3 缺陷 /cm^3、小于约 1×10^3 缺陷 /cm^3 的缺陷密度，或者甚至没有可检测到的团聚的本征点缺陷。此外，系统 100 可被用于制造这样的晶体 113，该晶体 113 基本上不具有直径大于约六十纳米 (nm) 的团聚的缺陷。

[0038] 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 / 或抑制团聚的本征点缺陷的形成。图 7 和 8 示例了从熔体表面 161 延伸的示例性熔体 - 固体界面。熔体 109 与硅晶体 113 之间的熔体 - 固体界面的形状可以为相对于晶体 113 的凹陷形状（如图 8 所示）或凸起形状（如图 7 所示）、或凹陷与凸起二者的组合（也称为“鸥翼 (gull-wing)”

形状）。如下所述，控制熔体－固体界面形状有助于减少晶体生长缺陷。

[0039] 在示例性实施例中，采用熔体对流来影响熔体－固体界面形状。对流是指通过液体自身的移动而导致的在液体中的传热过程。通常，存在两种类型的对流：自然对流和强制对流。当熔体 109 的移动归因于例如会引起密度梯度的加热器 105 的存在时，则发生自然对流。当熔体 109 的移动归因于在坩埚 103 中的诸如磁场的外部诱因 (agent) 时，则发生强制对流。因此，控制磁场以及由此控制熔体 109 的移动，有助于产生希望的熔体－固体界面形状。

[0040] 图 9 为在晶体生长期间形成的熔体流动基元 200 和 202 的示意图。在示例性实施例中，从保持在坩埚 208 内的熔体 206 拉拔晶体 204。坩埚 208 包括顶部 210、底部 212 以及坩埚壁 214。在示例性实施例中，在晶体 204 和坩埚 208 沿相同方向旋转（即，同转）的同时发生晶体 204 生长期间，在熔体 206 中形成熔体流动基元 200 和 202。更具体而言，在熔体 206 中形成的两种类型的流动基元为卡曼 (Karman) 基元 200 和浮力基元 (buoyancy cell)202。卡曼基元 200 被直接形成在晶体 204 下方，而浮力基元沿坩埚壁 214 形成。在反向旋转条件下，形成包括埃克曼基元 (Eckmann cell)（未在图 9 中示出）的不同的流动基元。埃克曼基元的存在并不像像卡曼基元 200 的存在那样有助于形成凹陷的熔体－固体界面 216。

[0041] 增强卡曼基元 200 有助于形成相对于晶体 204 更加凹陷的熔体－固体界面 216 形状（如图 8 所示）。可以通过施加轴向磁场或增大所施加的会切磁场中的轴向磁场分量来使卡曼基元 200 更强。轴向磁场还具有升高坩埚 208 的底部 212 处的熔体温度、产生更多的热的效果，这同样有助于形成更加凹陷的熔体－固体界面 216 形状。

[0042] 图 10 为用于在熔体 109 中产生抽吸力的示例性晶体生长系统 300 的框图。在示例性实施例中，系统 300 包括控制单元 143（示于图 6 中）。控制单元 143 可包括可编程逻辑控制器 (PLC)169、诸如但不限于中央处理单元 (CPU)171 的处理器 144（示于图 6 中）以及连接到一个或多个输入／输出 (I/O) 装置（例如 139 和 141）的存储器 173，该一个或多个输入／输出装置用于接收表示所感测的生长参数（例如，熔体 109 的温度和／或晶体 113 的直径 175）的输入信号。图像处理器（未在图 10 中示出）处理熔体－固体界面的图像以确定直径 175。当直径 175 变得足够小时，则使晶体 113 从熔体 109 分离。在示例性实施例中，CPU 171 被配置为确定抽吸力的方向和量值以抵消来自浮力基元的浮力，并且还确定一组特性，该组特性限定将产生抽吸力的时变磁场。CPU 171 可实时地、周期地、在设定的时刻、或在允许系统 300 如这里所述地起作用的任何其他适宜的时刻进行确定。在示例性实施例中，CPU 171 位于控制单元 143 内，然而，CPU171 可以被设置在远离控制单元 171 的位置处，只要 CPU 171 可以被通信耦合到控制单元 143 即可。

[0043] 在示例性实施例中，存储器 173 存储目标生长参数数据，例如，目标直径和／或目标轮廓 (profile) 数据。目标轮廓数据包括，例如，根据晶体长度而变化的用于每个磁体电源 149 和 151 的输出电流设定点。通过磁体电源 149 和 151 激励上和下线圈 145 和 147，以产生会切磁场。理想的会切磁场具有在熔体表面 111 处的近似水平的径向分量和在晶体拉拔器（例如，拉拔杆）117 的轴 119 上的近似垂直的轴向分量。控制单元 143 控制电源 149 和 151，电源 149 和 151 分别向上和下线圈 145 和 147 供应量值基本相等而极性相反的电流。这样的电流有助于产生会切磁场。例如，控制单元 143 有助于通过控制电源 149 向上

线圈 145 供应具有 -100 安培的值的电流并控制电源 151 向下线圈 147 供应具有 +100 安培的值的电流而产生会切磁场。注意,“-”和“+”用于表示在上和下线圈中的电流沿相反方向流动。

[0044] 上和下线圈 145 和 147 被制造为当以相同的功率分布操作(例如,操作在最大电流输入的相同百分比处)时,会切位置保持在熔体液面 111(例如,熔体 - 固体界面)处。CUP 171 响应于通过链路 180 和 182 接收的所产生的信号和 / 或所存储的目标数据而修改上和下线圈 145 和 147 的功率分布,以使会切位置向上或向下移动并改变磁场的轴向或径向分量的相对量值。例如,为了将磁场为水平的平面移动到熔体液面 111、熔体液面 111 的上方或下方,控制单元 143 控制功率分布以分别相对于径向分量增加或减小磁场的轴向分量。

[0045] 控制单元 143 控制电源 149 和 151 以改变沿相同代数方向供给到上和下线圈 145 和 147 的电流,从而实现具有增加的轴向场分量的名义会切磁场。例如,控制单元 143 控制上电源 149 以使供给到上线圈 145 的电流的量从约 -100 安培 (amp) 朝向约 -95 安培(即,较低电负性)增加,并控制电源 151 以使供给到下线圈 147 的电流的量从约 +100amp 朝向约 +105amp 增加。作为备选实例,为了实现具有减小的轴向场分量的名义会切磁场,控制单元 143 控制电源 149 以使供给到上线圈 145 的电流的量从约 -100amp 朝向约 -105amp(即,较高电负性)减小,并控制电源 151 以使供给到下线圈 147 的电流的量从约 +100amp 朝向约 +95amp 减小。如下面将描述的,增加或减小磁场的轴向分量在改变磁场的轴向分量的同时在熔体 109 中诱导电流。诱导的电流与正被施加到熔体 109 的磁场相互作用而在熔体 109 中产生有助于熔体的通常由全局热对流引起的常规滚动或对抗 (oppose) 该滚动的力。

[0046] 图 11 为系统 300(示于图 10 中)的一部分的局部截面视图。更具体而言,图 11 为轴对称模型,其代表了可以被操作为产生会切磁场(由多个“流线”306 和多个箭头 308 示出)的典型 Cz 系统。在示例性实施例中,系统 300 包括装有 250kg 的硅熔体 109 的二十八英寸外径坩埚 103。系统 300 还包括具有不同线圈尺寸的上线圈 145 和下线圈 147、包围线圈 145 和 147 的高磁导率磁分路器 310、以及包围熔体 109 和晶体 113 的柱形不锈钢容器 312(如图 10 所示)。数字标记表示通过相反方向的 100 安培线圈电流(即,上线圈 145 被供给具有 180 度的相位的电流,而下线圈 147 被供给具有零相位的电流)在熔体 109 中实现的磁通密度 (B) 的最小(例如,～ 0 特斯拉 (T)) 和最大(例如,0.03T) 量值。流线 306 示出施加到坩埚 103 的磁通密度。

[0047] 磁体线圈 145 和 147 被示出为大的实体,而在示例性实施例中,他们为多匝线圈。当每个线圈在其包括线圈的导体中的每一个中具有相同的电流并且导体具有一致的 (uniform) 截面积时,在每个线圈中的方位电流密度 (azimuthal current density) 是一致的,因此作为具有一致的电流密度的单个大实体的表示是精确的。通过由来自电源的线圈电路除以导体截面积(例如,$1.72\times10^{-4}m^2$)来确定电流密度。系统中除了磁体分路器 310 之外的每个部分都是线性的,因此这里为了简化,只要可能,就用 100A 的线圈电流进行计算,这允许容易地将结果缩放到其他电流。

[0048] 在表 1 中示出了在该模型中使用的一些材料参数。分路器材料的磁导率的值被选择为在所计算的通量密度值与沿实际系统的三个轴测量的值之间提供良好的吻合(例如,～ 1%)。

[0049]

参数	符号	硅熔体	磁分路器
电导率	σ	1.46×10^{6}	
相对介电常数	ε	12.1	
相对磁导率	μ		500
体积膨胀系数 (K^{-1})	β	1.5×10^{-5}	

[0050] 表 1 示例性材料参数

[0051] 如本文所使用的,“有用力场 (useful force field)”的定义被选择为在熔体中的热生浮力 (thermally generated buoyancy)。如果 ρ 为密度,g 为重力加速度,ΔT 为超过熔点的温度差,则使用式 1 或 2 计算每单位体积的浮力。

[0052] $F_{浮力}= \rho \beta g \Delta T$ (1)

[0053] $F_{浮力}= 0.375 \Delta TN/(m^3K)$ (2)

[0054] 如果 ΔT 为 100K,那么 $F_{浮力}$为 $37.5N/m^3$。因此,可与该值相比较的任何力均在确定熔体流动时具有实际重要性。

[0055] 在示例性实施例中,正弦电流信号在例如线圈 145 和 147(如图 10 所示)中的静态电流上的叠加在熔体 109 中产生有助于修改熔体流动的有用力场。在一些实施例中,本文描述的方法和系统使用相控磁抽吸 (PCMP) 来控制所施加的正弦瞬变电流的相位。相似地,线性电流斜坡 (ramp) 在线圈 145 和 147 二者上的叠加有助于修改熔体 109 中的熔体流动。图 12 为系统 300(如图 10 所示)的一部分的局部截面视图 350。更具体而言,图 12 示例了通过在会切磁场上叠加斜坡轴向场(由线性电流斜坡产生)而在熔体 109 中产生的体积力(例如由箭头 352 所示)。在磁体电流相等并且相反,下电流的量值正在增加且上电流的量值正在减小时的瞬时,捕获所示出的值。

[0056] 参考图 12,在至少一个实施例中,对线圈 145 施加 100A 静态电流,而沿相反方向对线圈 147 施 100A 静态电流。沿相同方向在线圈 145 和 147 中叠加 10A/ 秒的电流斜坡。叠加的电流斜坡产生了叠加在静态会切磁场上的渐增轴向场。换言之,如果在静态电流上叠加沿相同方向在两个线圈中的 10A/ 秒的电流斜坡,则渐增轴向场被叠加在静态会切磁场上。熔体 109 中的线性渐增轴向通量密度 (B_z)(具有通过熔体 109 的表面的对应渐增磁通量)在熔体 109 中诱导沿 -θ 方向(如图 1 所示)的恒定电场。电流将在熔体 109 中沿 -θ 方向流动并与瞬时磁场 B 相互作用而在熔体 109 中产生力 352。力 352 垂直于磁通量密度 B 的瞬时方向,并且在示例性实施例中,力 352($PCMP_{斜坡力}$)的量值在其最大值的位置处为 $37.5N/m^3$。已知系统 300 的对称性和线性,如果叠加渐减轴向场而不是渐增轴向场,则 J_θ 的符号将反转,B 的方向将不反转,并且 F_r 和 F_z 的符号将反转。量值将保持相同。

[0057] 图 13 为系统 300(如图 10 所示)的一部分的局部截面视图 360。更具体而言,图 13 示例了通过使会切磁场的量值平稳地斜坡化而在熔体 109 中产生的体积力(例如由箭头 362 所示)。在对线圈 145 施加的电流基本上等于对线圈 147 施加的电流且两个电流的量值正在增加的瞬时,捕获所示出的值。

[0058] 在可选实施例中，增加会切磁场的量值，而不是在静态会切磁场上叠加轴向场（如图 12 所示）。在该可选实施例中，以 10A/ 秒的相同斜坡速率沿适宜的方向增加线圈 145 和线圈 147 中的电流，以保持磁场分布的相同形状但却平稳地增加其量值。在图 13 中示出了产生的体积力 362。在示例性实施例中，力 362 的最大值小于力 352（如图 12 所示），并且尤其地减小了沿会切点的轨迹在熔体表面 111 附近产生的力 362。与之前一样，如果斜坡的方向反转，力 362 将沿与图 13 示出的方向相反的方向，并且其量值等于在两个线圈 145 和 147 中电流都为 100A 的瞬时所示出的量值。

[0059] 这两种示例性情况示例了适度的线圈电流瞬变（例如，10A/ 秒）在熔体 109 中产生有意义的体积力（例如，力 352 和 362）。在与线圈 145 和 147 中的 100A 的瞬时电流值对应的时刻，绘制力 352 和 362 以及场形状。然而，线性电流斜坡具有有限的可持续性，并且磁场形状和强度正发生显著改变，导致力 352 和 362 随时间显著改变。在示例性实施例中，可能地叠加在线圈中的静态电流上的正弦磁体电流的使用有助于减少这些限制。

[0060] 如果每个线圈 145 和 147（如图 10 所示）具有静态电流 I_{DC} 和幅值为 I_{AC}、角频率为 ω 以及相位为φ的电流的正弦微扰，则施加到下线圈 147 的总电流 (I_L) 和施加到上线圈 145 的总电流 (I_U) 分别在式 3 和 4 示出：

[0061]

$$I_L=I_{LDC}+I_{LAC}\cos(\omega_L t+\varphi_L) \quad (3)$$

[0062]

$$I_U=I_{UDC}+I_{UAC}\cos(\omega_U t+\varphi_U) \quad (4)$$

[0063] 或复数表示为：

[0064]

$$I_L=I_{LDC}+I_{LAC}\mathrm{Re}\{e^{i(\omega_L t+\varphi_L)}\} \quad (5)$$

[0065]

$$I_U=I_{UDC}+I_{UAC}\mathrm{Re}\{e^{i(\omega_U t+\varphi_U)}\} \quad (6)$$

[0066] 一些实施例在相同频率下以 I_{UAC} 和 I_{LAC} 操作，因此 $\omega_U=\omega_L=\omega$。

[0067] 对于具有时谐 (time-harmonic) 特性的系统，实场 F(r, t) 可以表达为：

[0068]

$$F(r,t)=F_1(r)\cos(\omega t+\varphi)=\mathrm{Re}\{F_1(r)e^{i\varphi}e^{i\omega t}\}=\mathrm{Re}\{F'(r)e^{i\omega t}\} \quad (7)$$

[0069] 其中 $F_1(r)$ 为实数，并且相量 (phasor)F'(r) 为复数并包含与 F(r,t) 有关的幅值和相位信息。F(r, t) 的时间相关性包含在因子 $e^{i\omega t}$ 中。

[0070] 在两个场相互作用的情况下，例如计算洛伦兹 (Lorentz) 力 F = J×B，要小心处理复数表达，因为实数量对彼此进行运算。在示例性实施例中，要关心在熔体中形成的瞬时力的时间平均。如果 I_{LDC} 和 I_{UDC} 产生静场 (static field)B_{DC}，并且 I_{LAC} 和 I_{UAC} 产生谐波场 B_{AC}，则总磁通量密度为：

[0071] $B_{总}=B_{DC}+B_{AC}$ (8)

[0072] 并且 B_{AC} 可以在式 9 中以相量形式表示为 $\mathrm{Re}\{B'(r)e^{i\omega t}\}$：

[0073] $B_{总}=B_{DC}+B_{AC}=B_{DC}+\mathrm{Re}\{B(r)e^{i\omega t}\}$ (9)

[0074] 其中 B_{DC} 为静场。由于 J 也是时间依赖性的，其可被表达为 $\mathrm{Re}\{J'(r)e^{i\omega t}\}$，因此可以通过下式给出瞬时力：

[0075] $F(r) = J \times B_{总} = [Re\{J'(r)e^{i\omega t}\}] \times [B_{DC}(r) + Re\{B'(r)e^{i\omega t}\}]$ (10)

[0076] 其中 J'(r) 和 B'(r) 为复数，而 $B_{DC}(r)$ 为实数。已知计算出的 J'(r) 和 B'(r)，则示例性实施例计算力的时间平均。任何复数的实部可被表示为 $Re(z) = 0.5(z+z^*)$，因此式 10 可以展开为：

[0077] $F(r) = 0.5\{J'(r)e^{i\omega t} + J'^*(r)e^{-i\omega t}\} \times \{B_{DC}(r) + 0.5[B'(r)e^{i\omega t} + B'^*(r)e^{-i\omega t}]\}$ (11)

[0078] 通过显性地 (explicitly) 进行所有叉乘而进一步展开该式会产生包含 $e^{i\omega t}$、$e^{-i\omega t}$、$e^{2i\omega t}$、$e^{-2i\omega t}$ 或 e^0 的项。在计算 F(r) 的时间平均时，包含 e^0 的项提供非零贡献。对各项进行最终的整理，结果如式 12 所示：

[0079] $F_{AV}(r) = 0.5Re\{J'(r) \times B'^*(r)\}$ (12)

[0080] 如果 $\omega_U \neq \omega_L$，则在式 11 的表达式中存在具有和与差频率 $\omega_U \pm \omega_L$ 的项，但不存在具有零频率的项，因此时间平均为零。如果 ω_U 和 ω_L 近似相等，则熔体上的力将呈现拍频，这对晶体生长是有害的。

[0081] 在示例性实施例中，B_{DC} 对 $F_{AV}(r)$ 的确定没有贡献。在分析时不考虑 I_{LDC} 和 I_{UDC} 简化了对个案的分析。

[0082] 如本文描述的，$F_{AV}(r)$ 将被称为相控磁抽吸 (PCMP) 力。通过在熔体 109 中的瞬时磁场上施加正弦瞬变电流而产生 PCMP 力。通过在静态电流 I_{LDC} 和 I_{UDC} 上叠加正弦电流 I_{LAC} 和 I_{UAC} 获得的 PCMP 力 ($F_{AV}(r)$) 不依赖于 I_{LDC} 和 I_{UDC} 以及静场 $B_{DC}(r)$。可以通过使用 PCMP 方法调制利用“基线 (baseline)”磁场 $B_{DC}(r)$ 的任何晶体生长工艺以“调节”基线工艺。

[0083] 在一些实例中，除非另外声明，电流输入 I_{LAC} 和 I_{UAC} 被设定为 100A 的幅值，I_{LDC} 和 I_{UDC} 被设定为零。注意，100A 电流是相当大的。图 11 中的 DC 值为 100A，给出 0.03T 的静场 B 量值。但是，由于所有这些结果均可被缩放，因此 100A 是方便用于计算的值。并且，实际电流除以磁体线圈中的导体的截面积给出线圈中的电流密度，该电流密度是物理相关参数。相位φ_L被限定为零，而相位φ_U被设定为相对于φ_L的各种值。示出了系统响应的几个实例以示例该特性（参见图 14-18）。注意，这些瞬时力值忽略了静场 B 的影响，但时间平均的力值仍是有效的，如式 12 所示。

[0084] 图 14 为系统 300（如图 10 所示）的一部分的局部截面视图 370。更具体而言，图 14 示出了通过在谐波周期的零度处的幅值为 100A 且频率为 0.25Hz 的正弦磁体电流在熔体中产生的瞬时电流、磁通量方向以及 PCMP 力。例如，图 14 示出了当 I_{UAC} 领先 I_{LAC}90 度并且 I_{LAC} 在其最大值处（即，具有的相位＝谐波周期中的零）时在熔体中的瞬时结果。因为 I_{UAC} 领先 I_{LAC}90 度，I_{UAC} 为零并正在减小，因此其在熔体中诱导沿 $+\theta$ 方向的电流。该诱导的局部电流 J_θ 与 B 相互作用而产生被表示为 (F_r, F_z) 的瞬时力场。

[0085] 在示例性实施例中，J_θ 的最大值为约 $1.3 \times 10^4 A/m^2$。在熔体 109 的上拐角 380 附近处熔体中的最大局部力密度为约 $267N/m^3$，并且方向实质上为径向的。使用该图解以显示各种结果（参见图 15-18）。

[0086] 图 15-18 为系统 300（如图 10 所示）的一部分的局部截面视图 390、400、410 以及 420。更具体而言，图 15-18 示例了 I_{UAC} 和 I_{LAC} 具有不同相位时的幅值为 100A 且频率为 0.25Hz 的正弦磁体电流在熔体中产生的瞬时电流、磁通量方向以及 PCMP 力。图 15 示出了 I_{UAC} 领先 I_{LAC}90 度时幅值为 100A 且频率为 0.25Hz 的正弦磁体电流在熔体中产生的瞬时电

流、磁通量方向以及 PCMP 力。

[0087] 当进行谐波循环 (cycle) 时，I_{LAC} 和 I_{UAC} 保持其 90 度的相位关系，并且 I_{LAC} 和 I_{UAC} 二者的相位都随时间前进。图 15 示出了在 AC 循环中的零度处在熔体 109 中的瞬时电流、磁通量方向以及 PCMP 力。图 16 示出了在 AC 循环中的 45 度处在熔体 109 中的瞬时电流、磁通量方向以及 PCMP 力。图 17 示出了在 AC 循环中的 90 度处在熔体 109 中的瞬时电流、磁通量方向以及 PCMP 力。图 18 示出了在 AC 循环中的 135 度处在熔体 109 中的瞬时电流、磁通量方向以及 PCMP 力。在图 15-18 中示出了半个 AC 循环的瞬时电流、通量和力值。在一个循环内，体积力的最大值在 250 与 300N/m^3 之间变化，但方向旋转，并且熔体 109 中的力分布改变。在附加 45 度之后，结果看起来与图 15 的情况再次相同。对于谐波电流的每半个循环，J 和 B 二者的方向都将反转，因此在半个循环之后，力的方向不变。在该实例中，AC 频率为 0.25Hz，这导致力场的频率为 0.5Hz。

[0088] 图 19 为系统 300（如图 10 所示）的一部分的局部截面视图 440。更具体而言，图 19 示例了 I_{UAC} 领先 I_{LAC}90 度时幅值为 100A 且频率为 0.25Hz 的正弦磁体电流在熔体 109 中产生的时间平均力场。熔体运动在某种程度上瞬时受到所示出的瞬时力的影响，但对熔体运动的更显著影响是由使用式 12 计算出的时间平均力导致的。在示例性实施例中，图 19 示出了 PCMP 力（即，时间平均力）的空间分布。在示例性实施例中，PCMP 力通常向下，其中在熔体 109 的上拐角 442 附近具有 105N/m^3 的最大量值。如果该力按比例缩小为原来的三分之一，该力的最大量值将约为对于 $\Delta T = 100K$ 时由式 2 计算的浮力的值，并且该空间分布将与浮力场的空间分布不同。

[0089] 图 20-23 为系统 300（如图 10 所示）的一部分的局部截面视图 450、460、470 和 480。更具体而言，图 20-23 示例了由幅值为 100A 且频率为 0.25Hz 的正弦磁体电流在熔体 109 中产生的时间平均力场，其中 I_{UAC} 与 I_{LAC} 之间的相位关系改变。在图 20 中，I_{UAC} 的相位领先 I_{LAC} 的相位 90 度。在图 21 中，I_{UAC} 的相位领先 I_{LAC} 的相位零度。在图 22 中，I_{UAC} 的相位领先 I_{LAC} 的相位 180 度。在图 23 中，I_{UAC} 的相位领先 I_{LAC} 的相位 270 度。

[0090] 在图 20-23 中示出了对于四种不同的相位关系的时间平均力。图 20 与图 19 相同，具有 90 度的相位差。在图 21 中，两个电流的相位彼此一致，这对应于循环轴向场，并且平均力仅为 16N/m^3。在图 22 中，两个电流具有相反的相位，这对应于循环会切场，并且平均力仅为 2.3N/m^3。在图 23 中，I_{UAC} 领先 I_{LAC}270 度，并且 PCMP 力增加至约 104N/m^3，但力现在是向上的。图 20-23 示例了通过改变 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的幅值和相对相位来控制 PCMP 力的量值和方向二者的能力。

[0091] 图 24 为示例了 PCMP 力对 I_{UAC} 与 I_{LAC} 之间的相位差的依赖性的系统性质的图表 490。图 24 示出了熔体中的时间平均力场的峰值与 I_{UAC} 和 I_{LAC} 之间的相位差的关系，特别地，(I_{LAC}, I_{UAC}) = (100,100)。在熔体中的其中 F_z 的量值最大的点处绘制轴向分量 F_z。还绘制熔体中的 F_z 的最大量值。对于$\varphi_U - \varphi_L$=90 度，还示出了 (I_{LAC},I_{UAC}) = (200,50) 时的力。

[0092] 对于 (I_{LAC}, I_{UAC}) = (100,100)，示出了$\varphi_U - \varphi_L$的所有值处的熔体中的力的最大量值和 F_{z_av} 的峰值。此外，示出了当$\varphi_U - \varphi_L$=90 度时对于不相等的电流 (I_{LAC},I_{UAC}) = (200,50) 和 (I_{LAC}, I_{UAC}) = (50,200) 的 F_{z_av} 的值。这示例了 PCMP 力正比于 ($I_{LAC} \times I_{UAC}$)。

[0093] 图 25 为示例了 PCMP 力对 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的频率的依赖性的图表 500。图 25 示例了熔

体中的时间平均力场的峰值量值与频率的关系。在示例性实施例中，从线性的偏移是不明显的，直到频率大于 3Hz。PCMP 力与频率成线性，直到频率大于 3Hz。在 3Hz 处，趋肤深度约 0.25m，并且趋肤深度的进一步减小开始对特性产生影响。

[0094] 图 26 为用于在晶体生长系统（例如晶体生长系统 300（如图 10 所示））中控制晶体生长的示例性方法的流程图 800。该方法包括通过向上线圈供应第一直流电流（I_{UDC}）并向下线圈供应第二直流电流（I_{LDC}）而将会切磁场施加到熔体的步骤 810。该方法还包括向上线圈供应第一交流电流（I_{UAC}）并向下线圈供应第二交流电流（I_{LAC}）以产生时变磁场的步骤 812，其中时变磁场在半导体熔体中产生抽吸力。时变磁场的特征在于固定的幅值、频率以及相位角。在示例性实施例中，抽吸力随频率与 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的量值的积而增加。如上所述，线圈的上和下电流的相位限定了抽吸力的方向。在表 2 中提供了利用不同组的时变磁场参数产生的预测的抽吸力。在假定流动的相关时标（time scale）与磁场发生改变的时标显著不同的情况下计算抽吸力。

[0095]

频率 (Hz)	I_{UAC}（%）	I_{LAC}（%）	I_{UAC} 相位（度）	I_{LAC} 相位（度）	最大加速度 (m/ 秒 ^{2})
0.25	20	20	90	0	-0.049
0.25	10	30	90	0	-0.037
0.25	10	20	90	0	-0.024
0.125	10	20	90	0	-0.013
0.5	10	20	90	0	-0.045
0.25	10	20	270	0	0.021
0.125	10	20	270	0	0.010
0.5	10	20	270	0	0.044

[0096] 表 2 时变磁场参数的实例

[0097] 在晶体生长期间，由时变磁场产生的抽吸力影响在液体硅熔体中存在的熔体流动。具体而言，由浮力导致的熔体流动受到抽吸力的影响。强的浮力基元典型地具有在熔体的中心与熔体的外边缘之间的半路（half-way）保持晶体熔体界面较热而不是在熔体中心处较热的效果。在熔体的中心与熔体的外边缘之间的半路的较高温度会导致晶体－熔体界面的鸥翼形状。

[0098] 该方法还包括确定由半导体熔体中的浮力基元导致的浮力的步骤 814 和存储用于使 I_{UAC} 和 I_{LAC} 产生对抗并减弱半导体熔体中的浮力的抽吸力的 I_{UAC} 和 I_{LAC} 的交流电流分布（profile）的步骤 816。通过产生抽吸力以对抗浮力并减弱浮力的强度，有助于希望的熔体－固体界面形状。更具体而言，由离心作用（centrifugal effect）驱动的中心流动基元扩展并允许熔体朝向晶体的中心升高，沿固化前沿（solidification front）流动并在熔

体的边缘附近下降。作为减弱的浮力的结果，在熔体的中心与熔体的外边缘之间的半路，晶体－熔体界面处的温度降低，这减轻了熔体－固体界面的鸥翼形状。减轻鸥翼形状有助于形成越来越为抛物线形状的熔体－固体界面。

[0099] 在示例性实施例中，PCMP 力场的特性是规则的和可预测的。幅值依赖性、相位依赖性以及频率依赖性都是规则的且良态的 (well-behaved)，并被总结在这里描述的图中。首先，图 24 和 25 中的结果捕获了整体特性：对于特定的系统 i，熔体中的最大轴向力由下式给出：

[0100]

$$F_z(\text{峰值})=-C_i(I_{LAC}\ I_{UAC})f\sin(\varphi_U-\varphi_L) \qquad (13)$$

[0101] 其中 Ci 是系统 i 专有的常数。

[0102] 这里没有详细处理 PCMP 力的方向，但图 20、21、22 和 23 表明了方向是可连续变化的。可以使用在 90 度和 270 度附近的相位差改变来将 PCMP 力场的方向精细调节到近似直下 (straight downward) 或直上 (straight upward)。图 24 示出了对于相位差$\varphi_U-\varphi_L$的小的调节，力场的量值不会显著减小。

[0103] 图 27 是对示例性熔体－固体界面 850 的示例。更具体而言，示例性熔体－固体界面 850 为在存在会切磁场而不存在上述时变磁场的条件下生长的晶体的熔体－固体界面的实例。在该示例性实施例中，在不存在上述时变磁场的条件下生长的熔体－固体界面 850 具有鸥翼形状。

[0104] 图 28 是对示例性熔体－固体界面 860 的示例。更具体而言，示例性熔体－固体界面 860 为在存在上述时变磁场的条件下生长的晶体的熔体－固体界面的实例。在该示例性实施例中，熔体－固体界面 860 是抛物线的，与熔体－固体界面 850 的鸥翼形状形成对比。

[0105] 图 29 为在未施加时变磁场的条件下生长的晶体的示例性缺陷过渡图 870。图 30 为在施加了时变磁场的条件下生长的晶体的示例性缺陷过渡图 880。在示例性实施例中，由二维缺陷模型预测缺陷分布。正数的分布表示空位团 (vacancy cluster)，而负数的分布表示间隙团。缺陷过渡 882（如图 30 所示）比缺陷过渡 884（如图 29 所示）更平坦，导致比工艺窗口 888（如图 29 所示）更大的工艺窗口 886（如图 30 所示）。此外，通过在晶体生长期间施加时变磁场而促进的抛物线熔体－固体界面形状还有助于相对于工艺窗口 888 增大工艺窗口 886。

[0106] 图 31 为系统 300（如图 10 所示）的一部分的局部截面视图 890。更具体而言，并且如上所述，图 31 示出了磁场线 892 的瞬时方向和在熔体 109 中诱导的瞬时方位角电流 (azimuthal current)。图 31 示例了当上线圈中的 AC 领先下线圈中的 AC 90 度时磁场线 892 的瞬时方向和在熔体中诱导的瞬时方位角电流。在该示例性实施例中，熔体 109 中的电流在轴 894 处近似为零，并在熔体 109 的边缘 896 处增加到近似 6,986A/m2 的最大值。

[0107] 如在此所述，为了简单，使用 I_{UAC} 和 I_{LAC} 作为工艺变量，假设特定的磁体导体截面积为例如 $1.72\times10^{-4}m^2$。该方法的方便之处在于，磁体电源将设计为供应不依赖于线圈电阻和电感的特定的电流。对于静电流 (staticcurrent)，电感是不相关的，但对于正弦电流，电感却是重要的因素。不同的磁体将具有不同的详细的线圈设计，包括磁体的尺寸、导体的尺寸和电导率、线圈电阻、匝数以及自感和互感，因此电源的特性被认为是工艺设计的一部分。

[0108] 虽然为了该分析而对特定的商业系统建模(model)以确保结果计及(account for)实际的几何和材料特性，但该分析是以可允许外推到其他晶体生长系统的方式进行的。ΔT＝100K的任意值被选择为评估熔体中的代表性浮力，但可以直接缩放为其他的ΔT值。对于DC和AC这两个分量，电流都被设定为100A。可以缩放几何尺寸以及电流和频率值，以便允许计算任何晶体生长系统的精确结果。

[0109] 正弦电流信号在C_z晶体拉拔器上的轴对称会切磁体系统的线圈中的静电流上的叠加提供了一种在硅熔体中产生有用力场以修改熔体流动的方式。力场依赖于各磁体线圈中的正弦电流的量值、相位以及频率，但与在其上叠加正弦电流的静电流无关。在此描述了AC参数的作用，其表明可以通过实际的磁体电流程序来产生等于或大于热浮力的力，并且可以对时间平均力的量值和方向二者进行编程。可以在不对热或电磁子系统进行硬件修改的情况下实现总力场(浮力+PCMP力)的改变。如果由自然和设备设计者提供的浮力不是最优的，则该浮力可被调节或被取代。

[0110] 在此示例并描述的方法的执行或实施的次序不是重要的，除非另有说明。也就是，除非另有说明，发明人预期以任何次序实施本方法的要素，并且所述方法可以包括比这里公开的要素更多或更少的要素。此外，虽然本发明在以上被描述为用于硅熔体，本发明预期可被用于任何其他的液体半导体、液体金属和/或液体导体。

[0111] 本文描述的方法和系统可包括一个或多个计算机可读介质，其中每个介质可被配置为在其上包括数据或用于操纵数据的计算机可执行的指令。计算机可执行的指令包括数据结构、对象、程序、程式、或处理系统可以访问的其他程序模块，例如，与能够执行各种不同的功能的通用计算机关联的模块，或与能够执行有限数目的功能的专用计算机关联的模块。计算机可执行的指令使处理系统执行特定的功能或功能组，并是用于实施本文公开的方法步骤的程序代码装置的实例。此外，可执行的指令的特定序列提供了可被用于执行这样的步骤的相应动作的实例。计算机可读介质的实例包括随机存取存储器(“RAM”)、只读存储器(“ROM”)、可编程只读存储器(“PROM”)、可擦除的可编程只读存储器(“EPROM”)、电可擦除的可编程只读存储器(“EEPROM”)、致密盘只读存储器(“CD-ROM”)、或能够提供由处理系统存取的数据或可执行指令的任何其他装置或部件。

[0112] 当介绍本发明或其实施例的要素时，冠词“一”、“一个”、“该”和“所述”旨在表示存在一个或多个所述要素。术语“包含”、“包括”和“具有”旨在是开放性的，意味着可以存在除了所列出的要素之外的附加要素。

[0113] 该书面说明书使用实例公开了包括最佳实施方式的本发明，还使本领域的任何技术人员能够实施本发明，这包括制造和使用任何装置或系统以及实施任何所包含的方法。本发明的可专利性范围由权利要求限定，并可包括本领域的技术人员可以想到的其他实例。如果其具有的结构要素不与权利要求的字面语言不同，或者其包括具有与权利要求的字面语言相比的非实质性差异的等价结构要素，则这些其他实例旨在在权利要求的范围内。

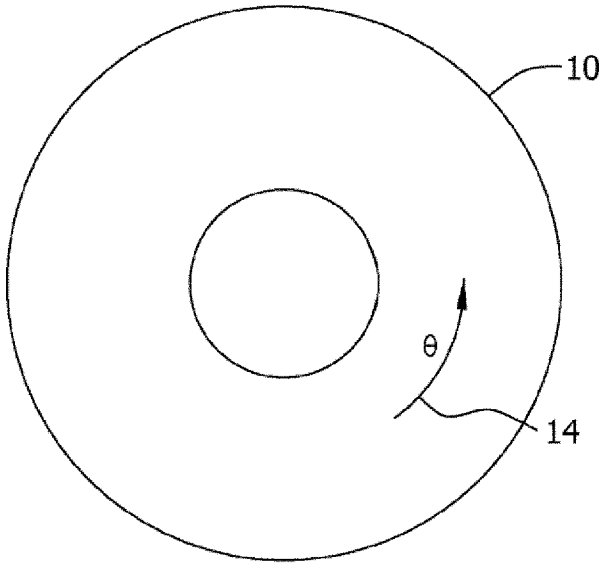


图 1

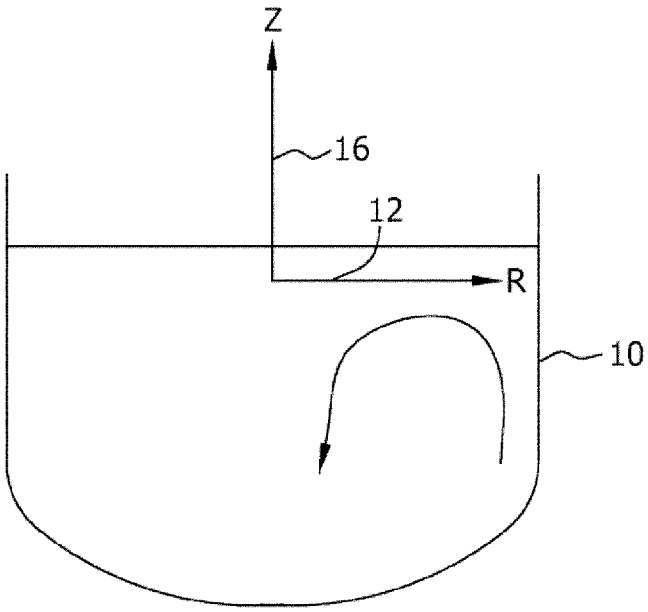


图 2

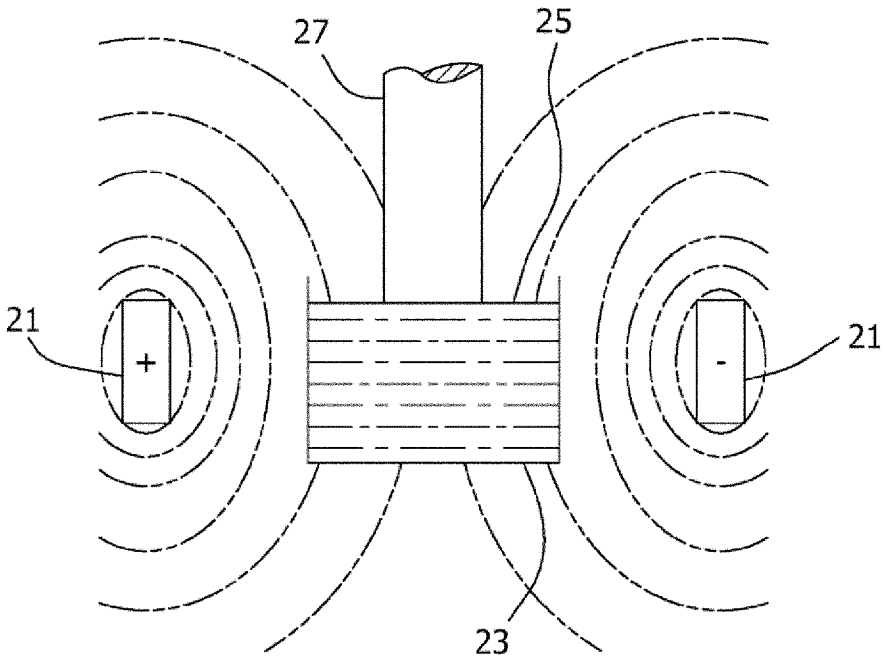


图 3 现有技术

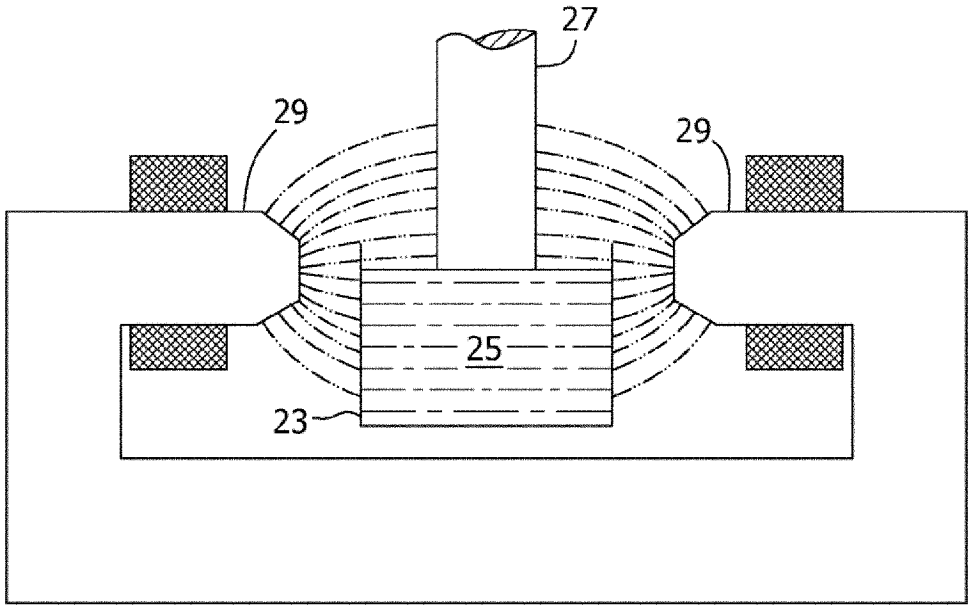


图 4 现有技术

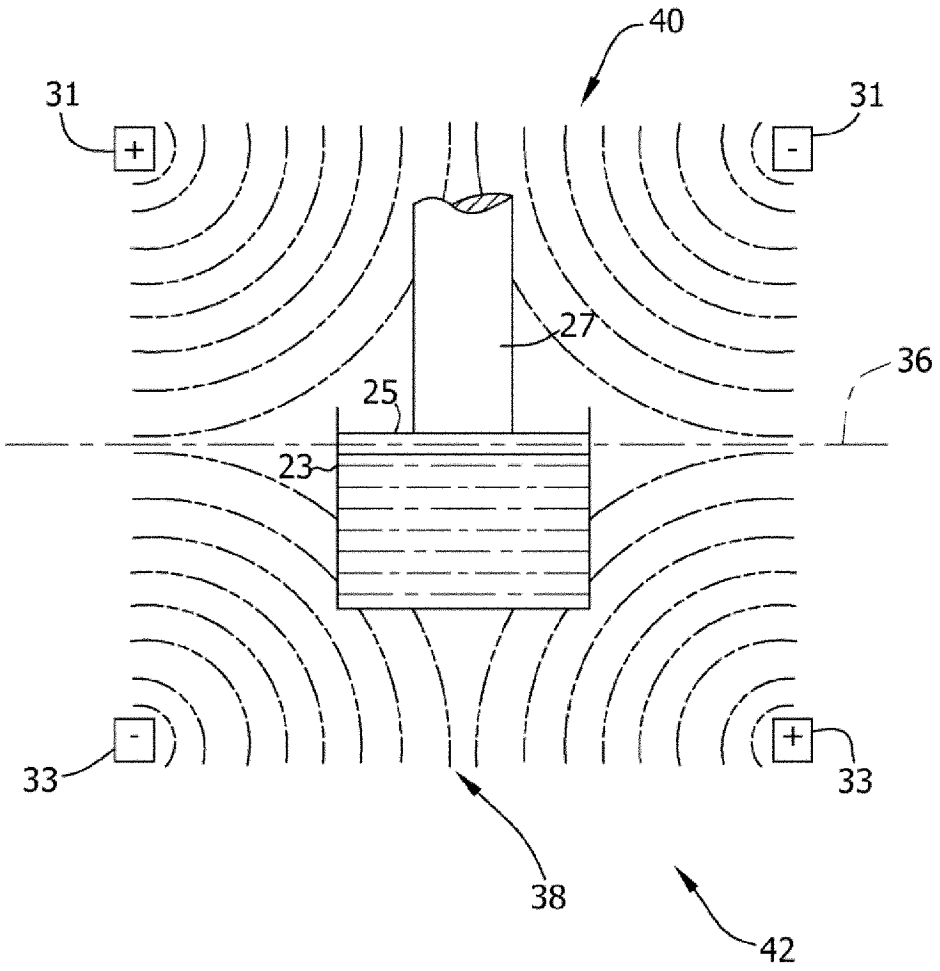


图 5 现有技术

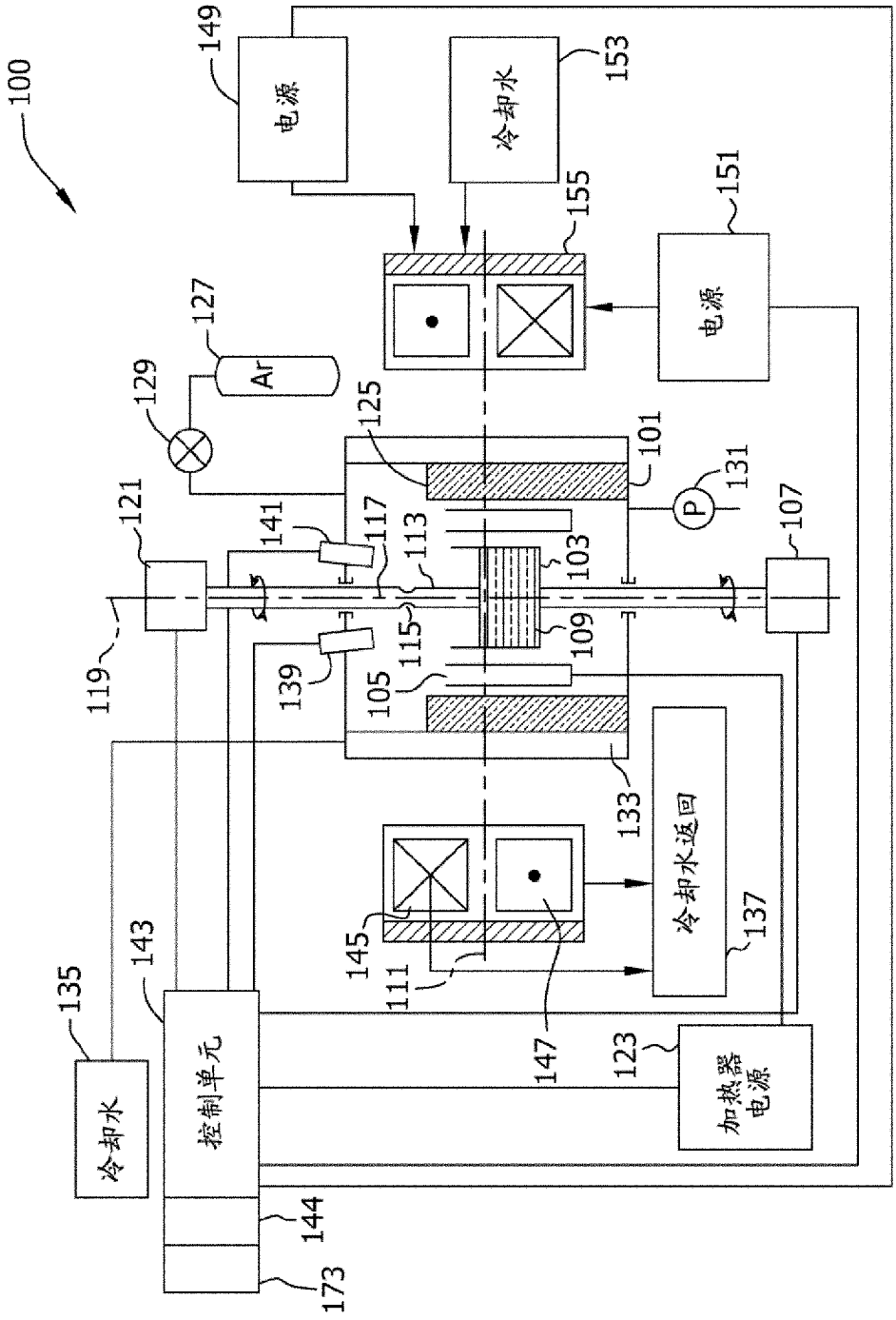

100
149
电源
153
冷却水
155
151
电源
127
Ar
129
125
101
131
P
107
121
141
117
113
103
119
115
109
139
105
133
冷却水返回
137
145
111
147
123
加热器电源
135
冷却水
143
控制单元
144
173

图 6

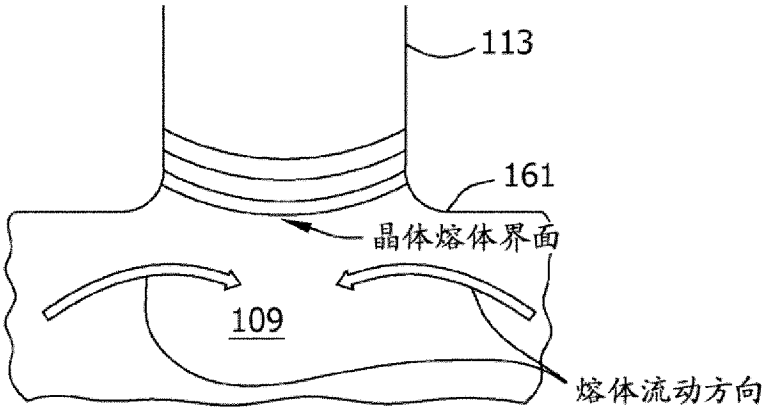


图 7

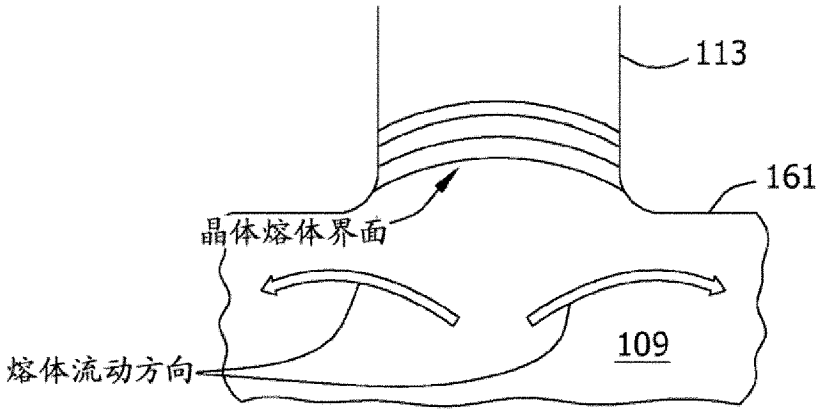


图 8

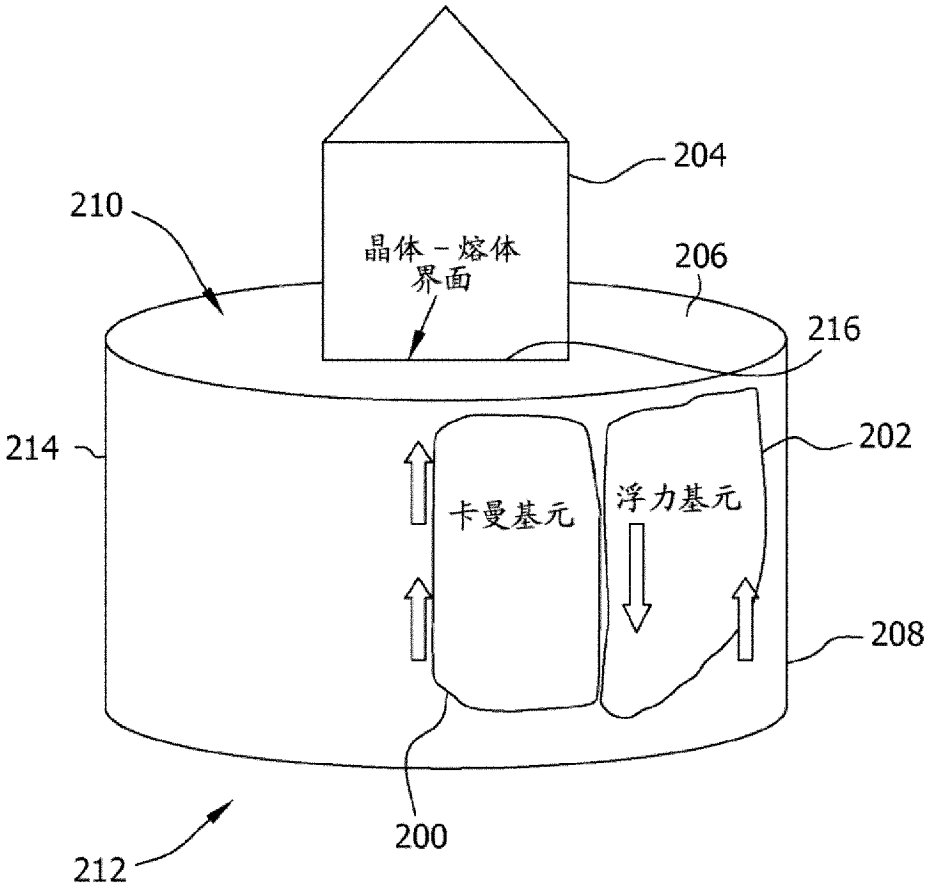


图 9

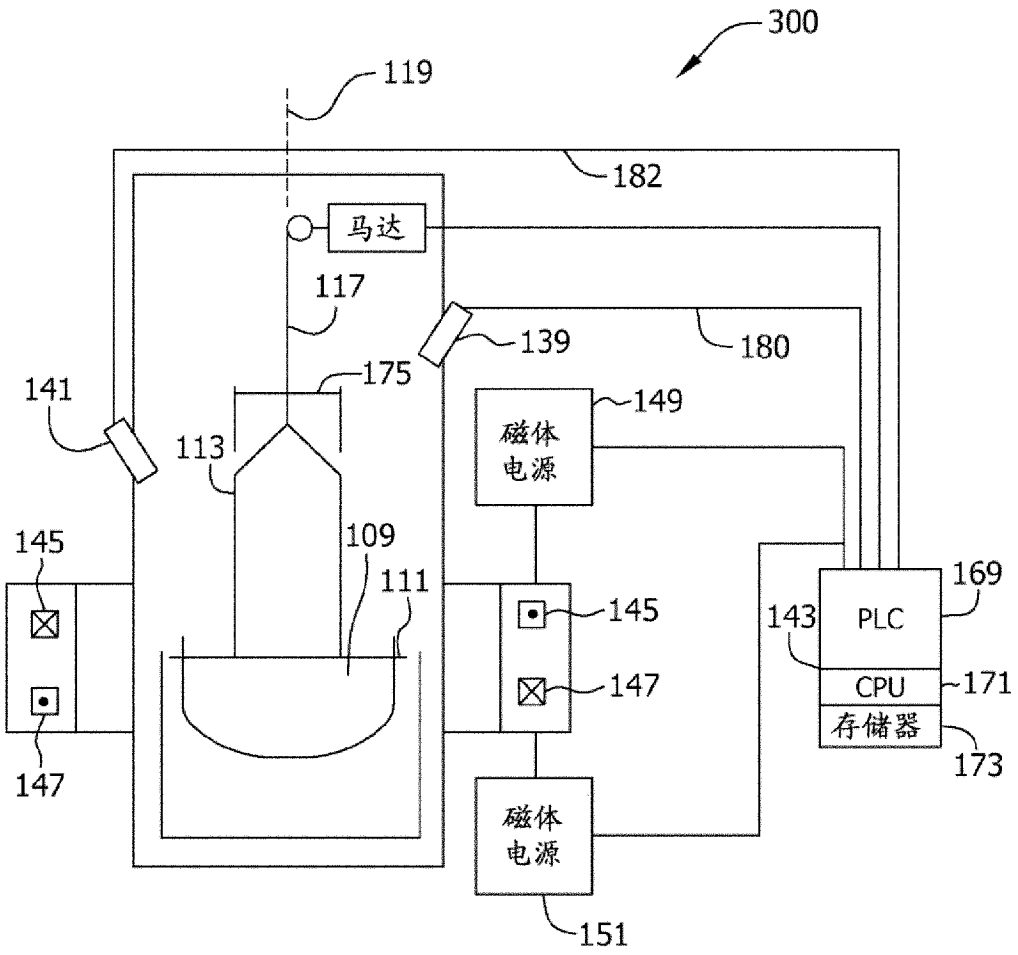

300
119
182
马达
117
139
180
175
141
149
磁体
电源
113
145
109
111
169
145
143
PLC
147
CPU
171
存储器
173
147
磁体
电源
151

图 10

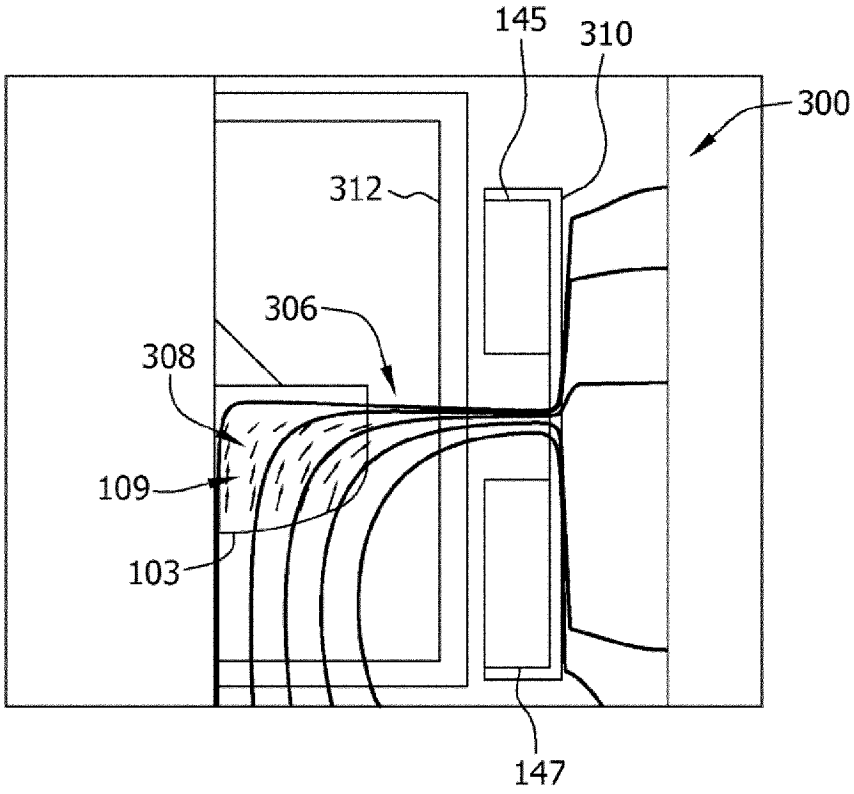


图 11

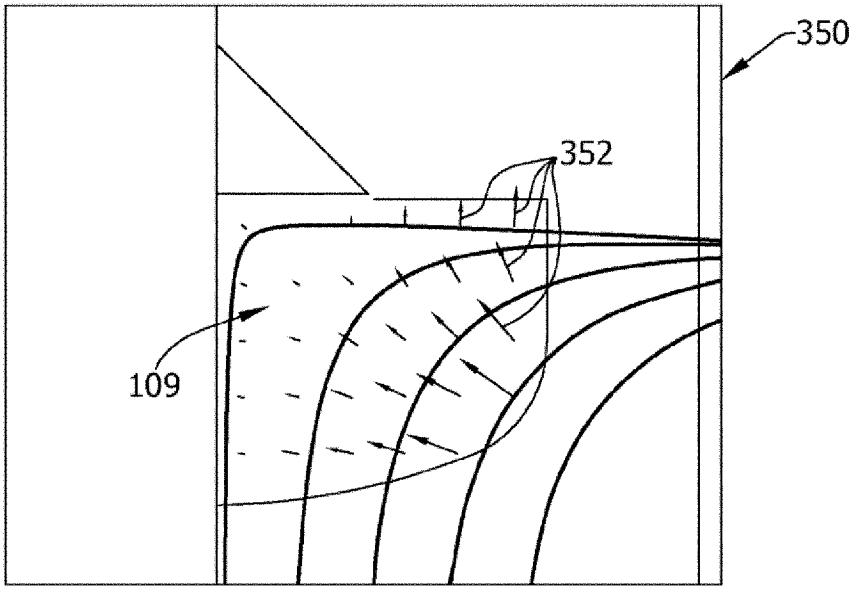


图 12

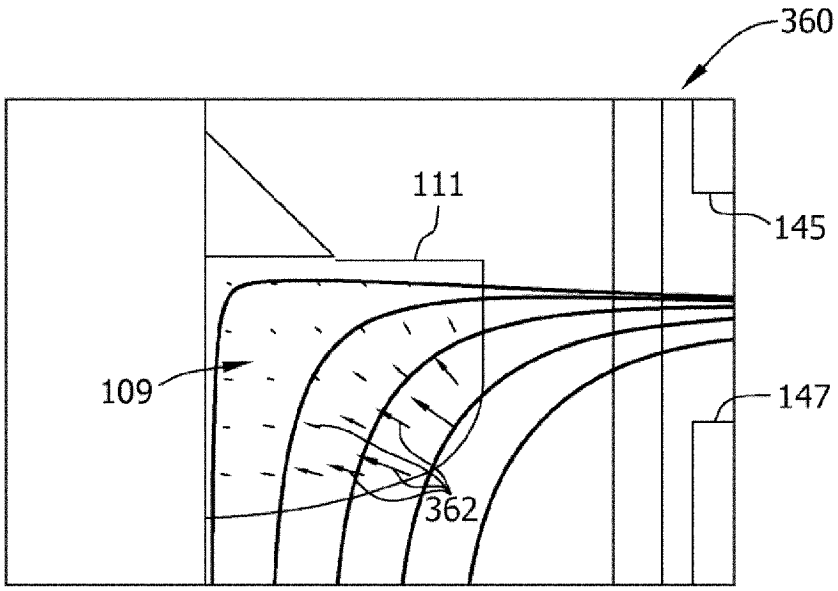

360
111
145
109
147
362
箭头：(Fr, Fz)
流线：磁通量密度

图 13

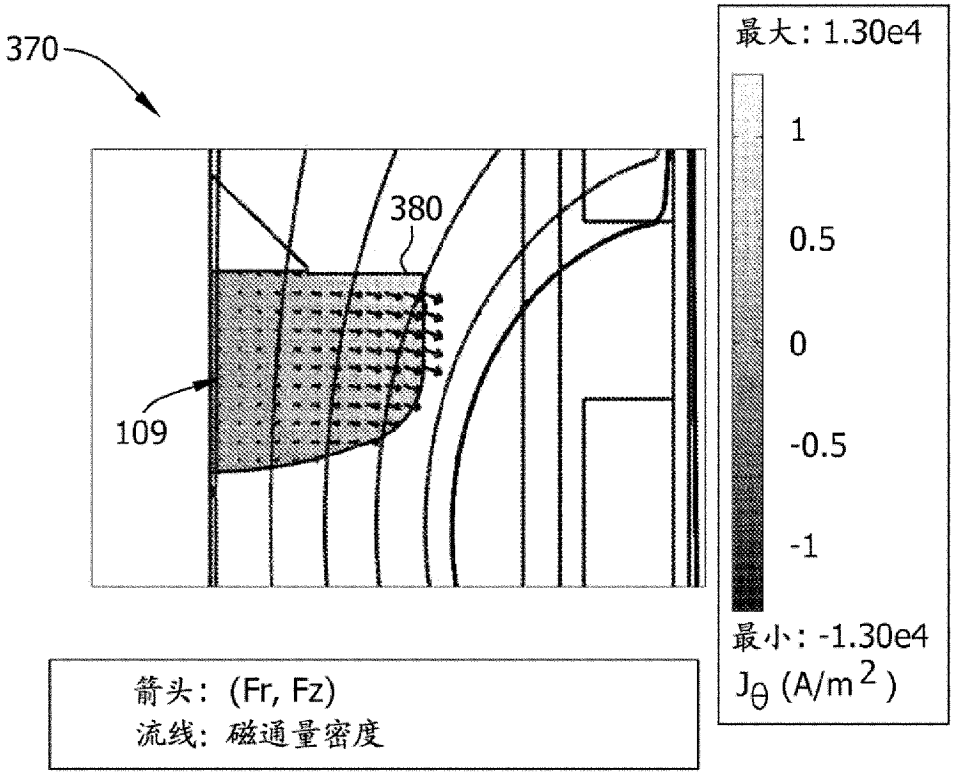

370
380
109
最大：1.30e4
1
0.5
0
-0.5
-1
最小：-1.30e4
J_θ (A/m^2)
箭头：(Fr, Fz)
流线：磁通量密度

图 14

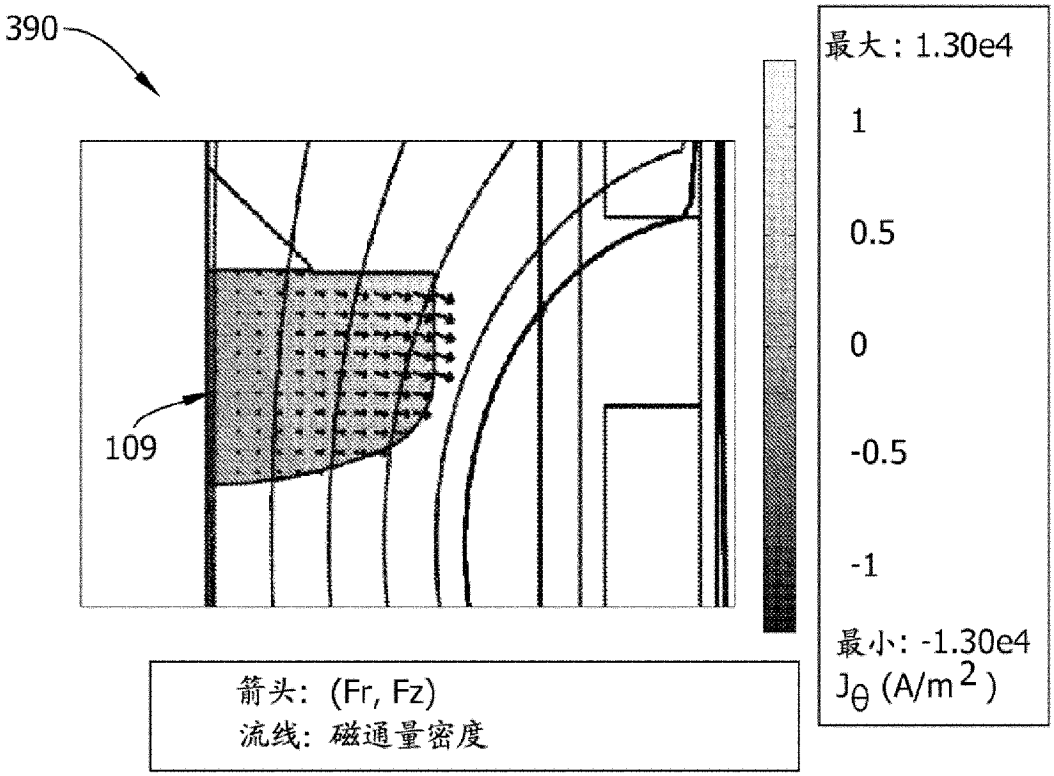

390
109
最大：1.30e4
1
0.5
0
-0.5
-1
最小：-1.30e4
J_θ (A/m^2)
箭头：(Fr, Fz)
流线：磁通量密度

图 15

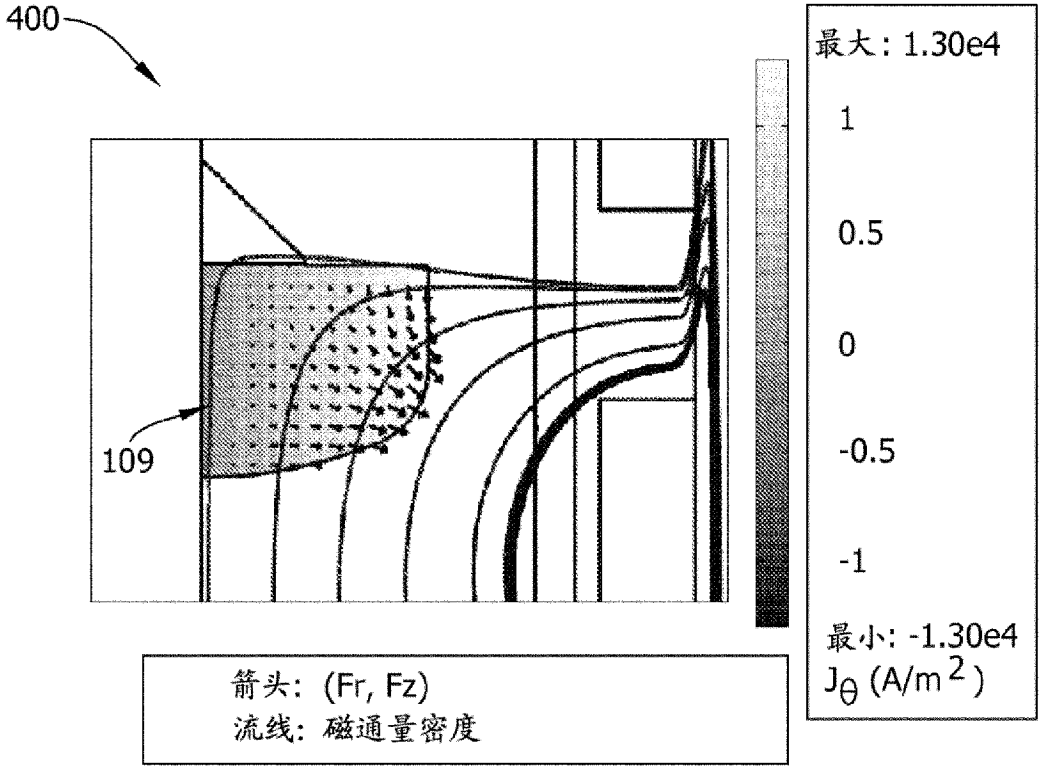

400
109
最大：1.30e4
1
0.5
0
-0.5
-1
最小：-1.30e4
J_θ (A/m^2)
箭头：(Fr, Fz)
流线：磁通量密度

图 16

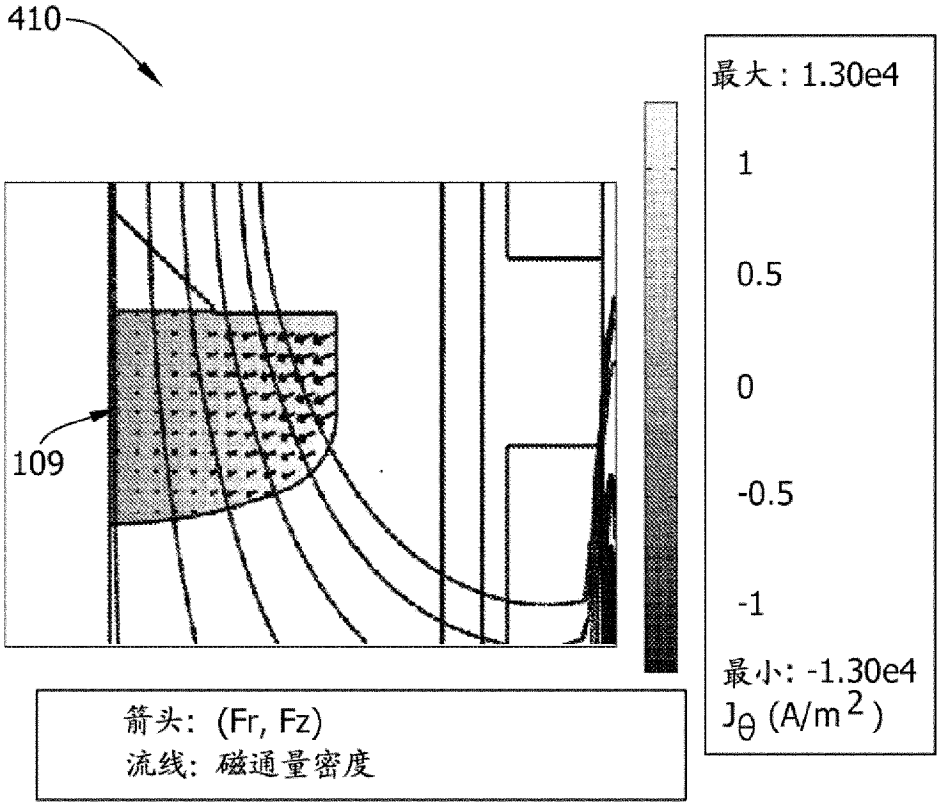


图 17

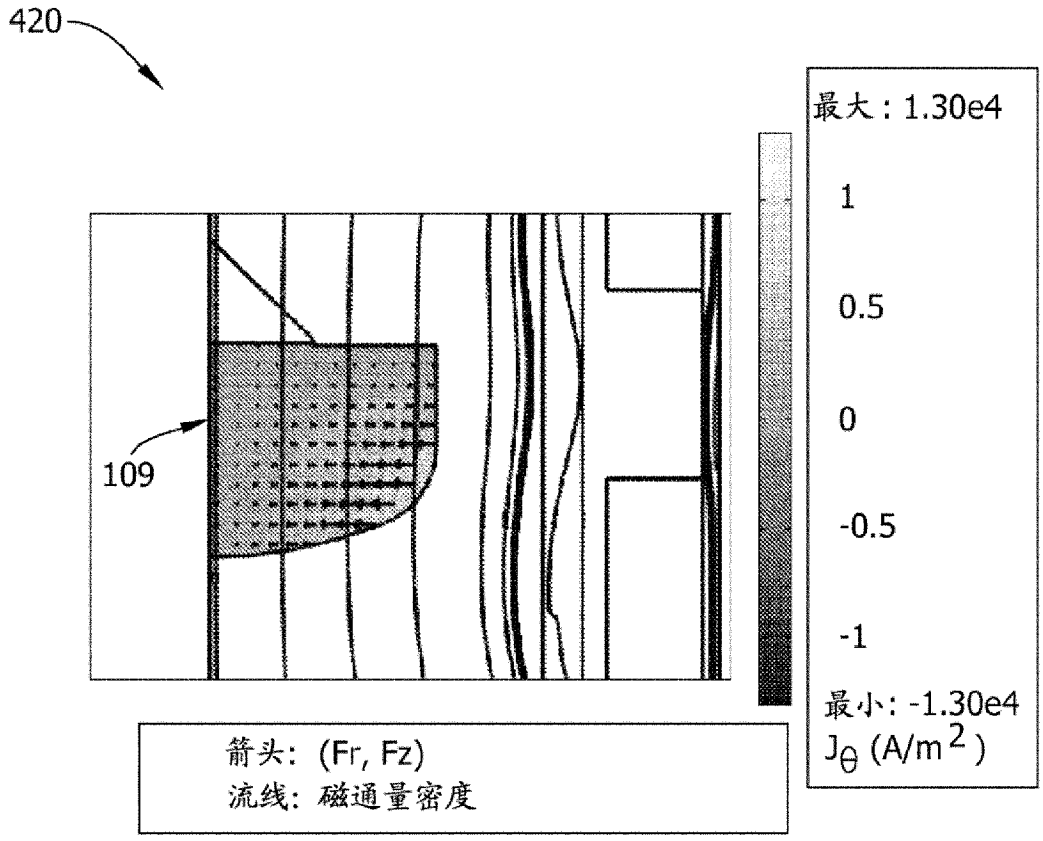


图 18

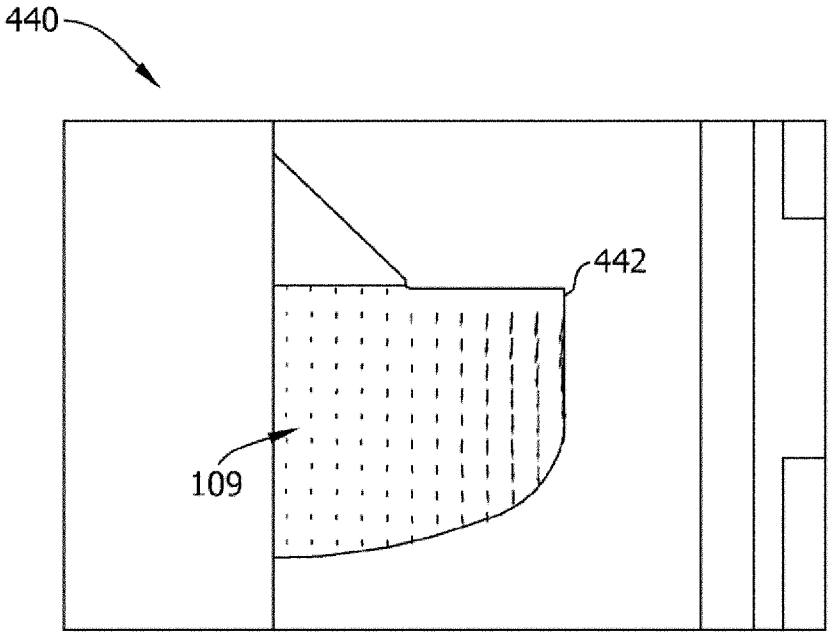

440
442
109
箭头：(Fr, Fz)
子域标记：PCMP 力(N/m3)

图 19

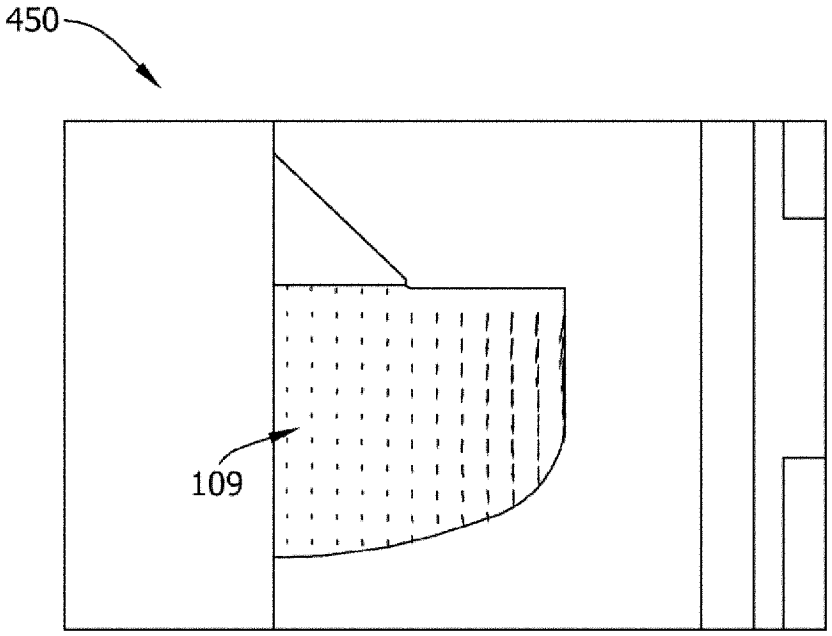

450
109
箭头：(Fr, Fz)
子域标记：PCMP 力(N/m3)

图 20

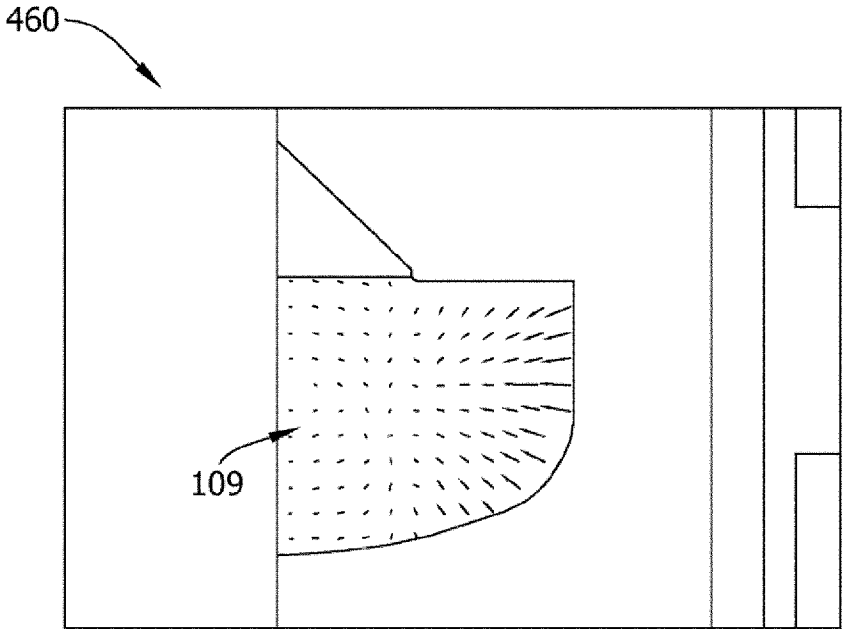


图 21

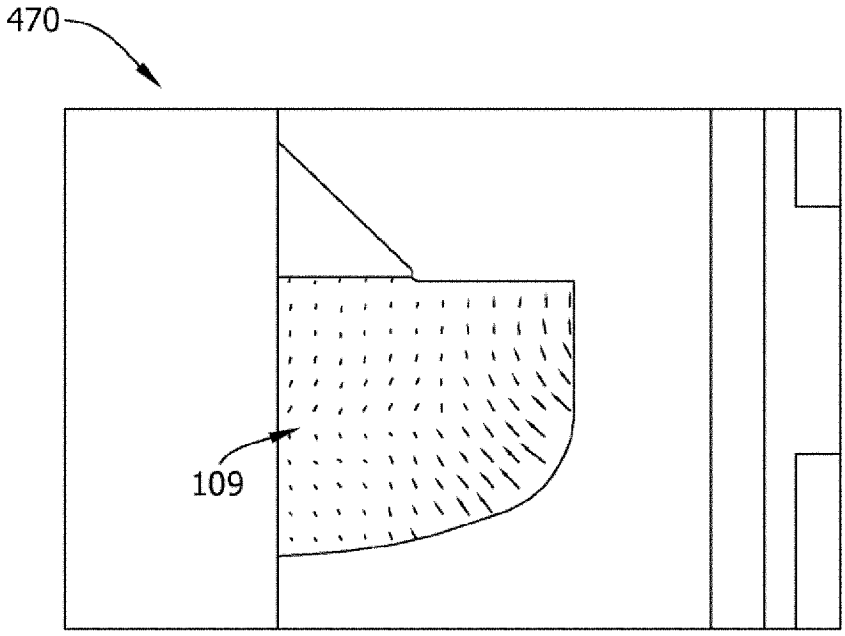


图 22

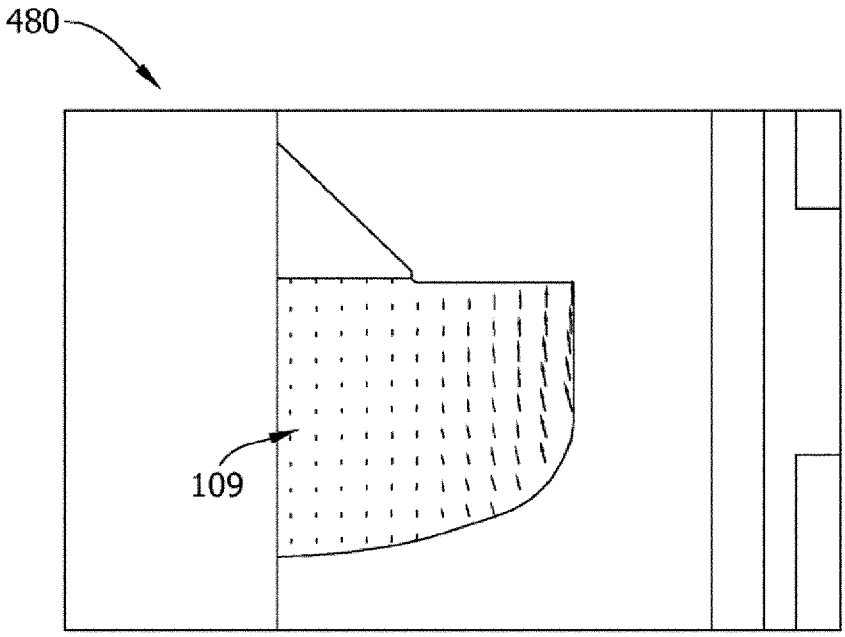

480
109
箭头：(Fr, Fz)
子域标记：PCMP 力(N/m3)

图 23

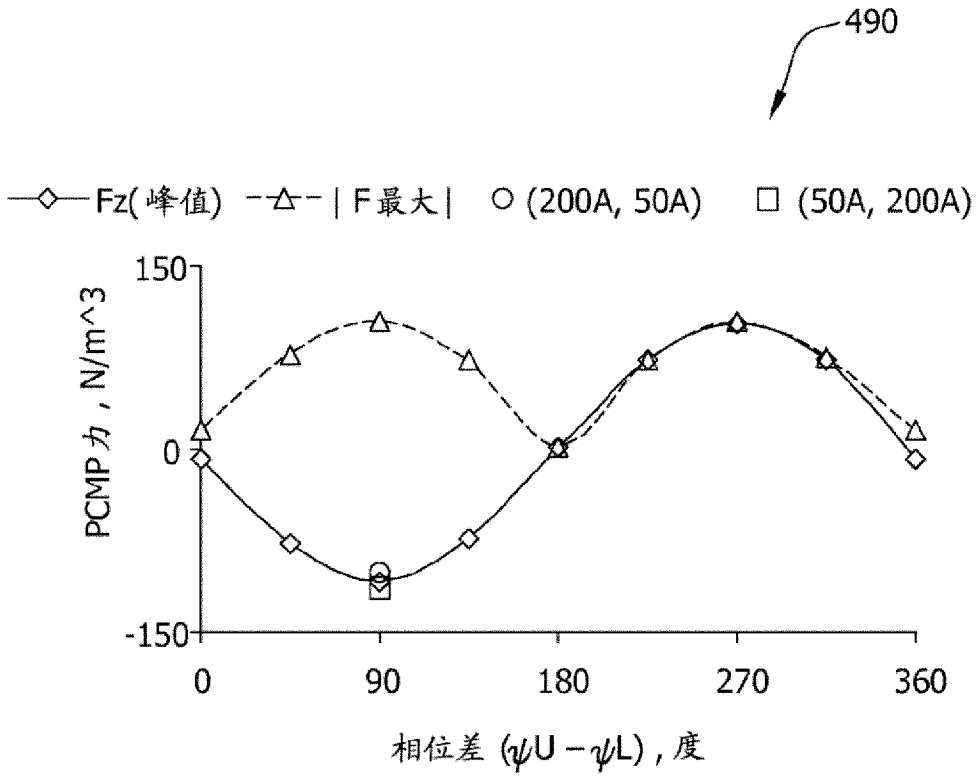

490
Fz(峰值)
|F最大|
(200A, 50A)
(50A, 200A)
150
0
-150
PCMP力，N/m^3
0
90
180
270
360
相位差 (ψU－ψL)，度

图 24

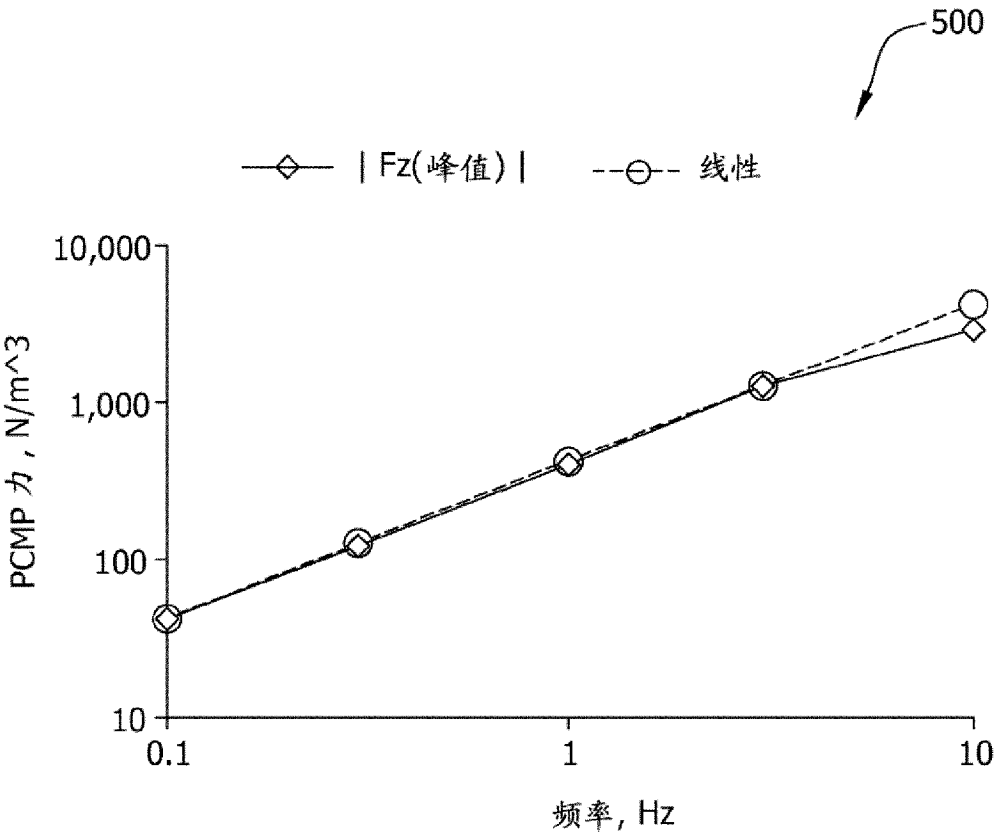


图 25

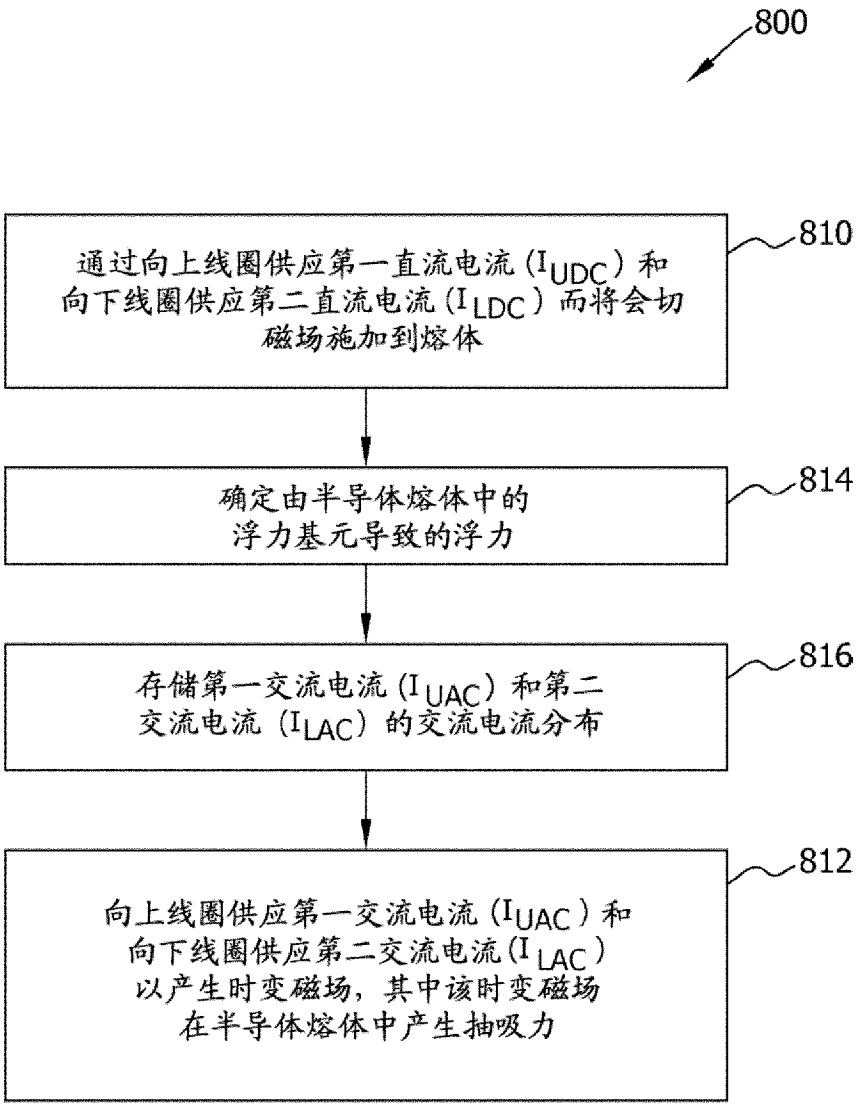

800
通过向上线圈供应第一直流电流（I_{UDC}）和向下线圈供应第二直流电流（I_{LDC}）而将会切磁场施加到熔体
810
确定由半导体熔体中的浮力基元导致的浮力
814
存储第一交流电流（I_{UAC}）和第二交流电流（I_{LAC}）的交流电流分布
816
向上线圈供应第一交流电流（I_{UAC}）和向下线圈供应第二交流电流（I_{LAC}）以产生时变磁场，其中该时变磁场在半导体熔体中产生抽吸力
812

图 26

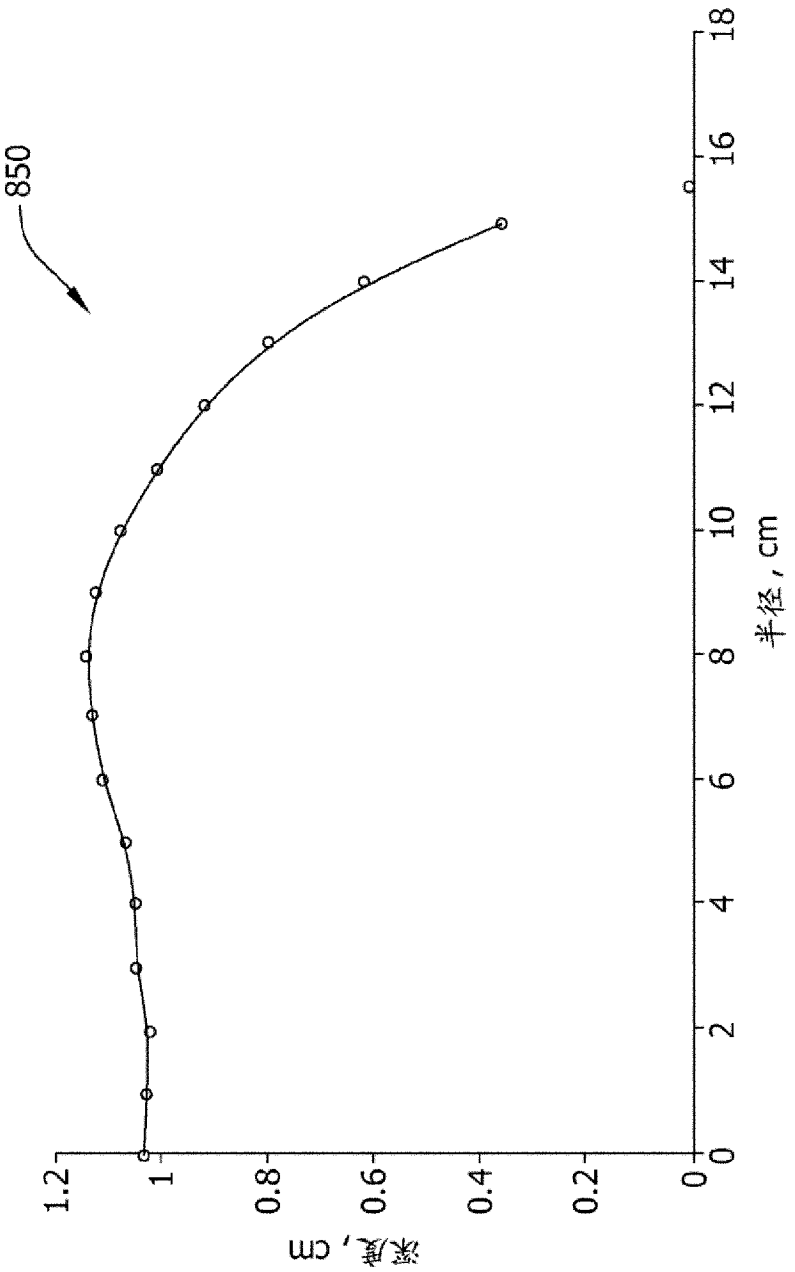


图 27

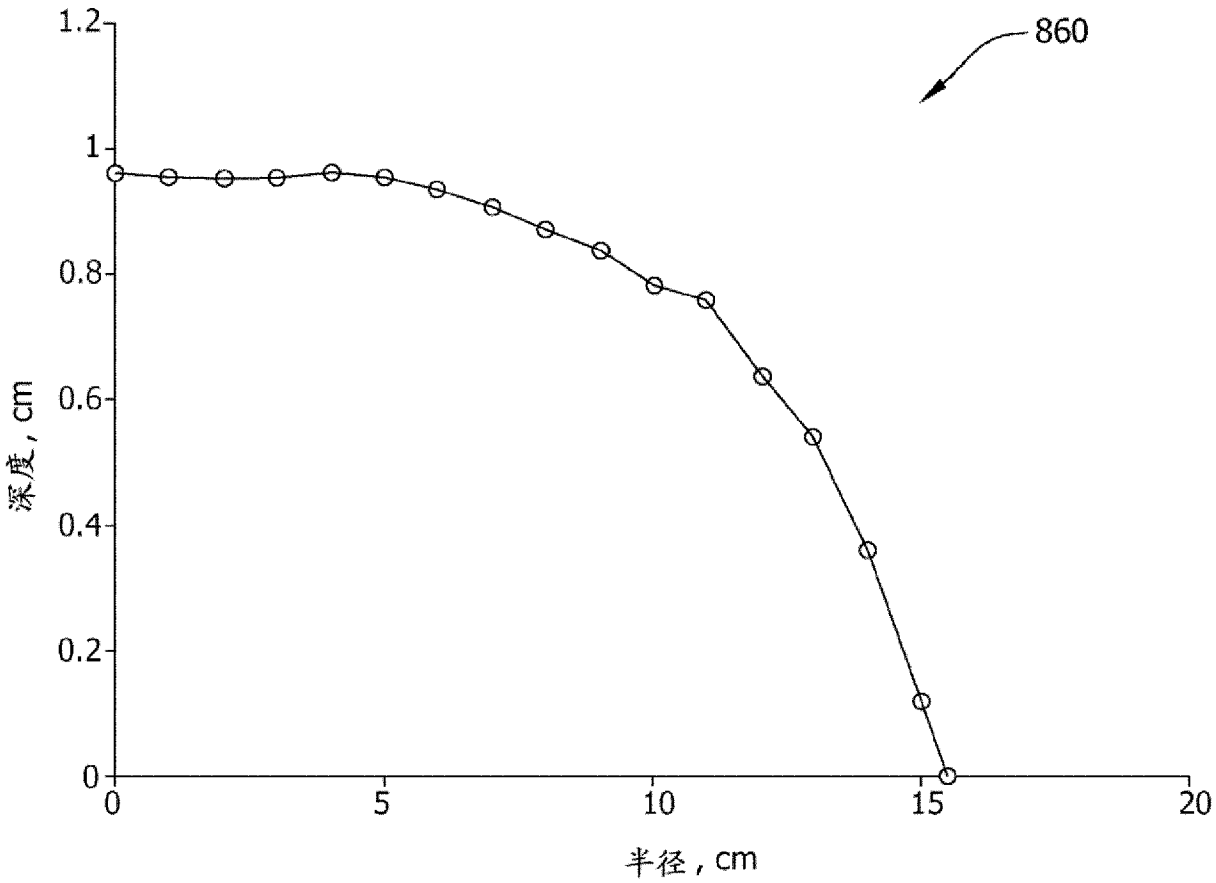


图 28

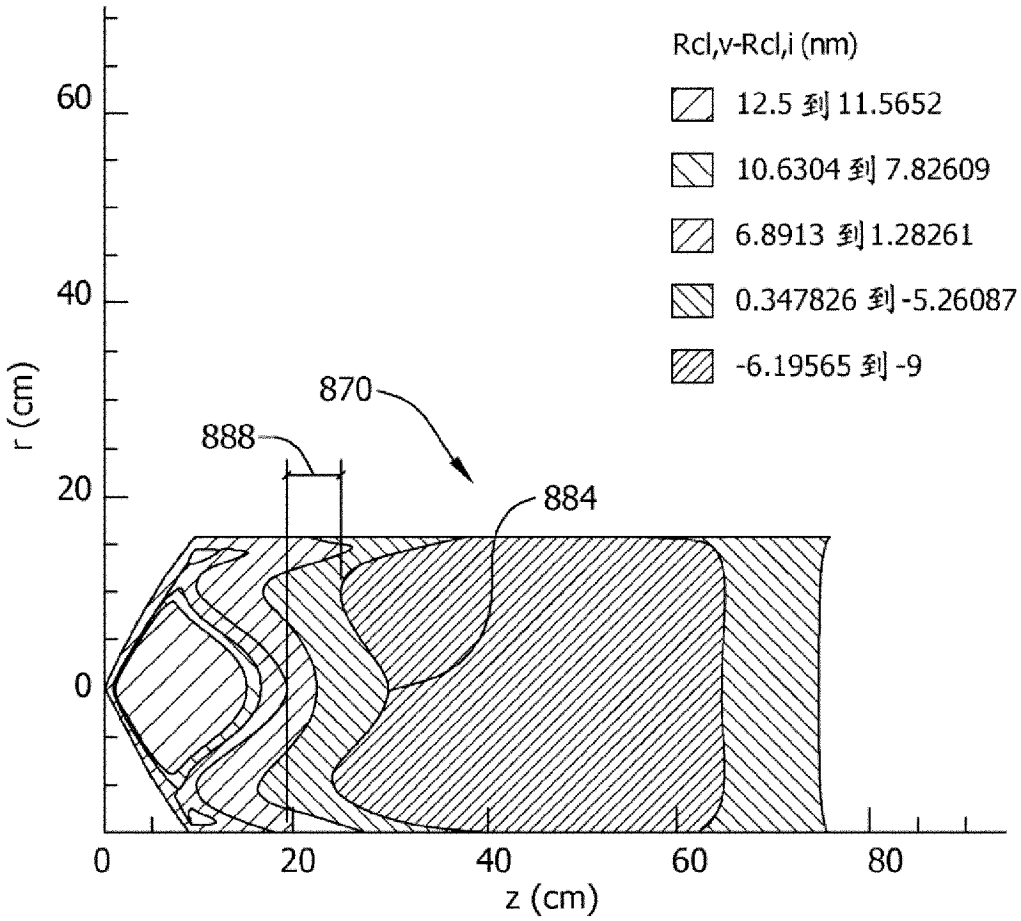

Rcl,v-Rcl,i (nm)
12.5 到 11.5652
10.6304 到 7.82609
6.8913 到 1.28261
0.347826 到 -5.26087
-6.19565 到 -9
870
888
884
r (cm)
z (cm)
0
20
40
60
80

图 29

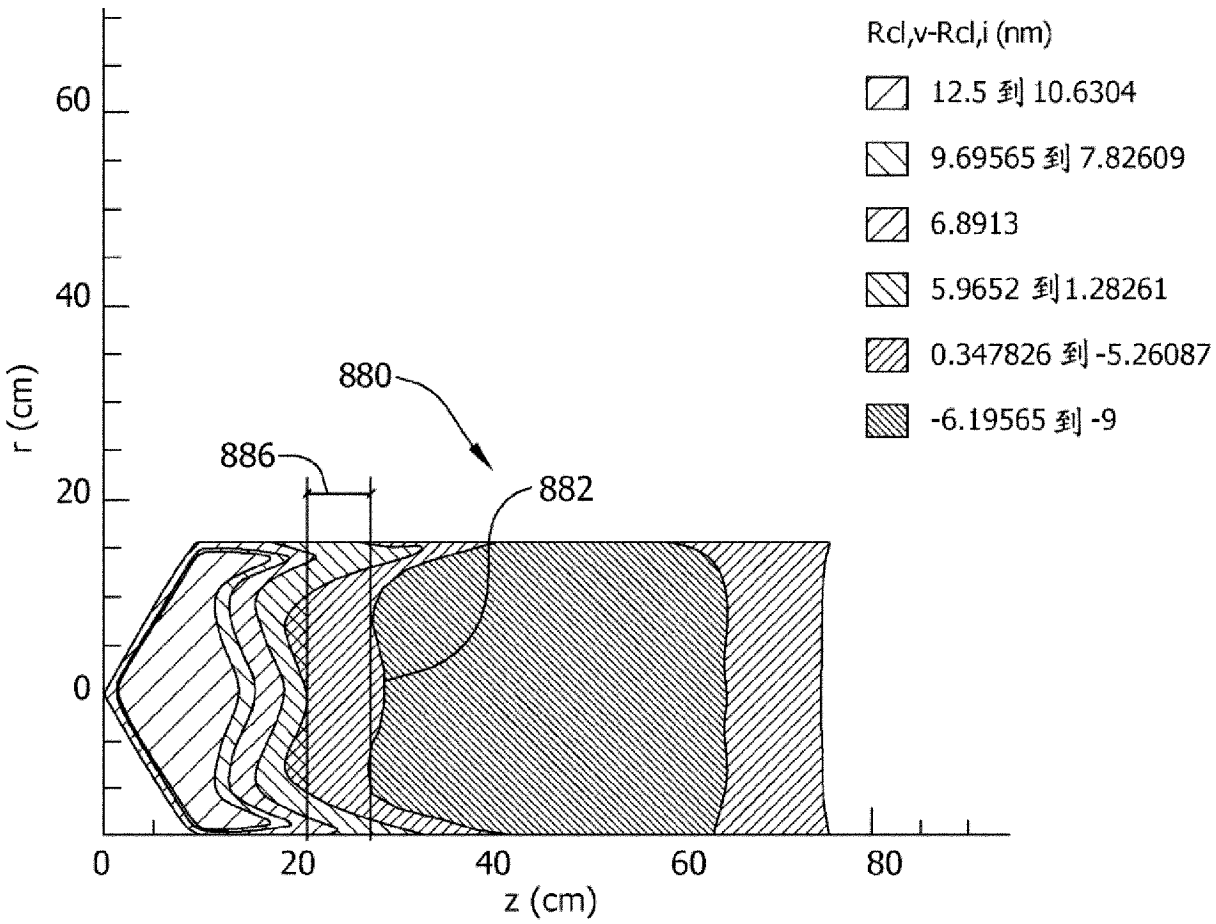

Rcl,v-Rcl,i (nm)
12.5 到 10.6304
9.69565 到 7.82609
6.8913
5.9652 到1.28261
0.347826 到 -5.26087
-6.19565 到 -9
880
886
882
r (cm)
z (cm)
0
20
40
60
80

图 30

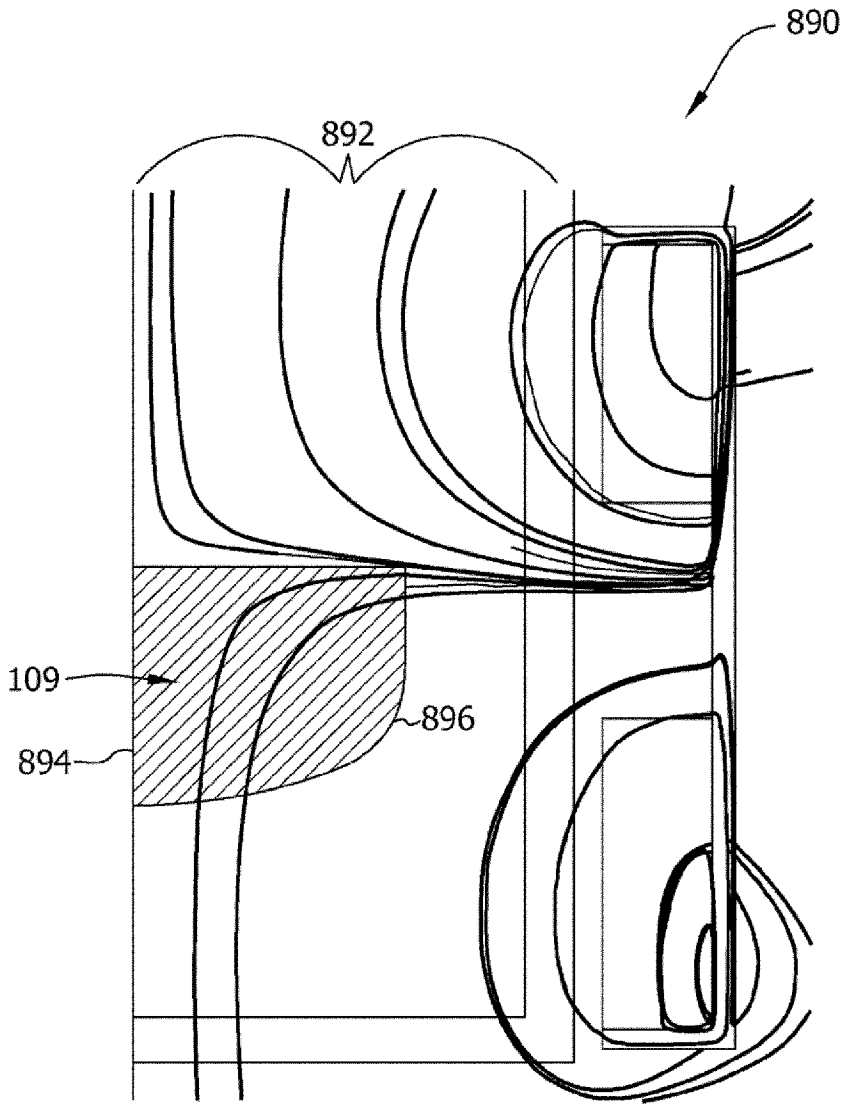


图 31