



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101582375 B

(45) 授权公告日 2015.06.24

(21) 申请号 200810178907.1

(22) 申请日 2006.10.18

(30) 优先权数据

60/729,314 2005.10.20 US

(62) 分案原申请数据

200610140073.6 2006.10.18

(73) 专利权人 先进热科学公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 丹尼尔·J·霍夫曼

保罗·卢卡丝·比瑞哈特

理查德·弗威尔 哈密迪·塔瓦索里

道格拉斯·A·小布什伯格

道格拉斯·H·伯恩斯 卡洛·贝拉

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公

司 31100

代理人 陆勃

(51) Int. Cl.

H01L 21/00(2006.01)

H01L 21/683(2006.01)

H01J 37/32(2006.01)

(56) 对比文件

US 6353210 B1, 2002.03.05, 说明书第4栏第10行-第6栏第39行, 附图1, 3.

US 5258614 A, 1993.11.02, 说明书第3栏第44行-第4栏第31行, 附图1.

US 5549756 A, 1996.08.27, 说明书第3栏第32行-第9栏第22行, 附图1-3.

审查员 张爽

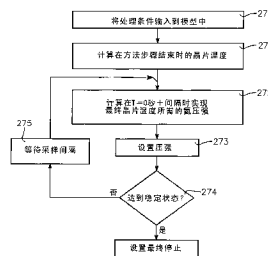
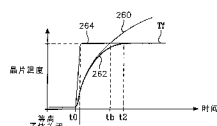
权利要求书1页 说明书24页 附图34页

(54) 发明名称

具有均匀温度分布晶片支撑的电容耦合等离子体反应装置

(57) 摘要

本发明公开具有均匀温度分布晶片支撑的电容耦合等离子体反应装置。用于处理工件的等离子体反应装置包括反应室、在室内用于支撑工件的静电吸盘、耦合用来向静电吸盘施加 RF 功率的 RF 等离子体偏置功率发生器以及具有在静电吸盘内部并且具有入口和出口的热交换器的相变传热 (PCHT) 环路。PCHT 环路可以工作在两种模式之一, 这两种模式是冷却模式和加热模式。PCHT 环路还可以包括至少间接耦合到热交换器的出口的压缩器以及 (在冷却模式中) 耦合到压缩器的出口的冷凝器及耦合在冷凝器的输出和热交换器的入口之间的膨胀阀。优选地, 在热交换器内的相变传热 (PCHT) 介质的一部分是气相和液相的混合物。结果, 静电吸盘和热交换器内的 PCHT 介质之间的传热是恒温过程。



CN 101582375 B

1. 一种用于处理工件的等离子体反应装置,包括:

反应室;

在所述室内的静电吸盘,所述静电吸盘包括具有用于支撑工件的顶表面的上绝缘圆盘层、下金属基底层以及沿轴向延伸穿过所述基底层到达所述圆盘层的探测器孔;

温度探测器,所述温度探测器包括位于所述上绝缘圆盘层中的上部探测器,所述上部探测器包括:

轴向延伸到所述探测器孔中的长的不透明绝缘圆柱形上部探测器壳体,所述探测器孔开始于所述上部探测器壳体的底端,并终止于所述上部探测器壳体的顶端,所述顶端位于所述顶表面下方的所述探测器孔的顶端,所述底端位于所述探测器孔的底部开口处;

在所述上部探测器壳体内的所述顶端处的光响应温度变换器;以及

具有耦合到所述光响应温度变换器的顶端并且径向延伸穿过所述上部探测器壳体的上部光纤;

其中所述温度探测器还包括位于所述下金属基底层下方的下部探测器,所述下部探测器包括:

从面对并接触所述上部探测器壳体的所述底端的顶端轴向延伸的长圆柱形下部探测器壳体;以及

具有耦合到所述上部光纤的底端的顶端并且轴向延伸穿过所述下部探测器壳体的下部光纤。

2. 如权利要求 1 所述的反应装置,其中所述上部探测器壳体具有小于所述反应装置中的等离子体的 Debye 长度的直径。

3. 如权利要求 1 所述的反应装置,其中所述温度探测器还包括:

使所述上部探测器壳体向所述探测器孔的所述顶端偏置的上部螺旋弹簧;以及

使所述下部探测器壳体向所述上部探测器壳体的底端偏置的下部螺旋弹簧,所述上部螺旋弹簧比所述下部螺旋弹簧具有更大的硬度。

4. 如权利要求 1 所述的反应装置,还包括头部电极、等离子体源功率 RF 发生器以及阻抗匹配短截线,所述阻抗匹配短截线具有短截线谐振频率,并且耦合在所述等离子体源功率 RF 发生器和所述头部电极之间,所述头部电极在等离子体-电极谐振频率处与等离子体在所述室中形成谐振,所述等离子体-电极谐振频率、所述短截线谐振频率和所述等离子体源功率 RF 发生器的频率是具有较小偏差的大致相等的 VHF 频率。

5. 如权利要求 1 所述的反应装置,其中所述静电吸盘包括:

在所述绝缘圆盘层下方的静电吸盘电极和耦合到所述电极的 RF 等离子体偏移功率发生器;

轴向延伸穿过所述静电吸盘的所述基底层的用于馈送偏压功率的 RF 导体,所述 RF 导体具有连接到所述静电吸盘电极的馈送点的顶端和耦合到所述 RF 等离子体偏压功率发生器的底端;以及

围绕所述 RF 导体的多个电介质圆柱形套筒,所述多个电介质圆柱形套筒各自具有优化电场沿所述绝缘圆盘层的所述顶表面分布的均匀性的长度和介电常数。

6. 如权利要求 1 所述的反应装置,还包括位于所述圆盘层的所述顶表面的平面上的电介质环,所述电介质环围绕对应于所述静电吸盘的工件直径的圆周。

具有均匀温度分布晶片支撑的电容耦合等离子体反应装置

[0001] 本发明是 2006 年 10 月 18 日申请的中国专利 200610140073.6 的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明一般地涉及等离子体反应装置,更具体而言,本发明涉及具有均匀温度分布的冷却/加热晶片支撑的电容耦合等离子体反应装置。

背景技术

[0003] 在电容耦合等离子体反应装置中,对离解的控制已经利用宽广的阻抗匹配空间在非常高的 RF 源功率和非常宽的室压强范围内实现。这种宽的工作范围至少可部分归因于通过具有以下特征的固定阻抗匹配短截线与 RF 功率源相匹配的头部电极的独特特征。首先,电极电容与在等离子体-电极谐振频率处的等离子体电抗相匹配。短截线谐振频率、等离子体-电极谐振频率和源频率在 VHF 频率处几乎匹配。通过多个特征获得了晶片上的高度均匀的蚀刻速率。这些特征包括对静电吸盘调节偏置功率馈送点阻抗以提供吸盘上径向均匀的 RF 阻抗等等,吸盘既充当 RF 偏置功率的施加器,又充当来自头部电极的 VHF 源功率的 RF 返回路径。该调节是由具有唯一选择的介电常数和长度的偏置馈送线周围的电介质套筒进行的。另一个特征是用于使阴极周边对抗边缘效应的电介质环处理工具箱。可以进一步提高处理或蚀刻速率分布均匀性的其他特征包括双区气体馈送、头部电极的曲线化和等离子体转向磁场。包括许多这些关键特征的等离子体反应装置提供了优于传统技术的蚀刻速率分布均匀性。

[0004] 随着电路特征尺寸的快速缩小,对于蚀刻速率分布均匀性的需求是如此急迫以致于现在必须使晶片上的小的温度变化最小化或消除这种变化,同时附加条件是:被设计为满足最新的迫切需求的未来复杂的处理方法将需要灵敏和高度精确的随时间变化的晶片温度分布特性和/或 RF 热负载分布特性。这些变化必须被实现或补偿以获得最大的晶片上的温度均匀性。如何作到这一点而不会降低当前由反应装置提供的高度均匀的蚀刻速率分布是一个困难的问题。而且,这种高度精确和灵敏的温度控制或分布特性需要在晶片处有精确的温度传感。然而,在晶片附近引入温度探测器会产生寄生 RF 场,这会破坏馈送点阻抗电介质套筒和电介质环处理工具箱的精细效果,从而损害其目的。来源于没有控制的晶片处的温度不均匀性(其程度足以影响蚀刻化学处理)将会具有破坏均匀环境的相同的最终效果。

[0005] 用于调整晶片支撑基座或静电吸盘的温度的传统冷却系统采用了制冷系统,该系统利用传统的热循环冷却制冷剂或冷却剂介质,并通过单独的液体传热介质在冷却剂和静电吸盘之间传热。冷却剂可以是去离子水与其他物质(如乙二醇和/或全氟聚醚)的混合物。该系统的一个问题在于,在高 RF 功率水平(高 RF 偏置功率或高 RF 源功率或这两者)处,这种冷却系统允许晶片温度在 RF 功率开启之后在稳定之前漂移(增大)一段明显的时间。这种温度漂移有两个阶段。在短暂的初始阶段中,当 RF 功率首先施加时静电吸盘处于环境(冷)温度,从而随着 RF 热负载缓慢地加热吸盘,要引入的第一晶片的温度快速向

平衡爬升。这是不希望出现的,因为晶片温度在处理期间不可控地上升。即使在静电吸盘(ESC)已被 RF 热负载加热之后,晶片温度也会向上漂移并缓慢地接近平衡温度。这种漂移代表了晶片温度的缺少控制,并且降低了处理的性能。漂移是由传统冷却处理的低效率引起的。

[0006] 另一个问题是由于两个原因不能执行两个温度水平之间的快速温度变化。首先,提供 ESC 和冷却剂之间的传热的传热流体具有热传播时间,该时间在制冷环路中发起温度变化的时间和晶片实际经历温度变化的时间之间引入了明显的延迟。其次,在 ESC 底座的被冷却部分和 ESC 顶部处的晶片之间有热传播时间延迟,该时间延迟由 ESC 中材料的质量和热容确定。

[0007] 一个最困难的问题是,在晶片上的高 RF 热负载需要通过被冷却的 ESC 的高传热速率的情况下,传热流体的温度在流经 ESC 内的流体通路时发生明显改变,从而 ESC 上的温度分布(因此,晶片上的温度分布)变得不均匀。这种不均匀性在较老的设计规则(较大的半导体电路特征尺寸)下还未表现出明显的问题,因为沿晶片直径的蚀刻速率均匀性在较早的(较大的)特征尺寸/设计规则时还不严格。然而,当前的特征尺寸需要由上述特征(例如,RF 偏置馈送点阻抗调节、处理工具箱电介质边缘环)实现的极其均匀的 ESC 上的电场。然而,某些最新的等离子体蚀刻处理方法所需要的高 RF 热负载导致沿晶片直径产生温度不均匀性(由于 ESC 内的传热流体的可感知加热),这种不均匀性破坏了晶片上的本来均匀的蚀刻速率分布。我们已经发现,在不限制施加到晶片的 RF 功率的情况下,这一问题无法避免。然而,随着蚀刻速率均匀性的需求在未来变得更加迫切,进一步减小 RF 功率限制以满足这些需求将产生更加严重的处理结果,该结果最终是不可接受的。因此,需要一种在高 RF 热负载的条件下提取来自晶片的热量而不会在 ESC 上或晶片上引入温度不均匀性的方式。

发明内容

[0008] 用于处理工件的等离子体反应装置包括反应室、在室内用于支撑工件的静电吸盘、耦合用来向静电吸盘施加 RF 功率的 RF 等离子体偏置功率发生器以及具有在静电吸盘内部并且具有入口和出口的热交换器的相变传热(PCHT)环路。PCHT 环路可以工作在两种模式之一,这两种模式是冷却模式(其中热交换器充当蒸发器)和加热模式(其中热交换器充当冷凝器)。PCHT 环路还可以包括至少间接耦合到热交换器的出口的压缩器(用于泵浦相变传热介质通过环路)以及(在冷却模式中)耦合到压缩器的出口的冷凝器及耦合在冷凝器的输出和热交换器的入口之间的膨胀阀。优选地,热交换器包括分布在静电吸盘的顶面下方的平面中的长的高横截面积通路。可选地,累积器可以耦合在蒸发器的出口和压缩器的输入之间,以用于保持从蒸发器出口接收的任何液体形式的制冷剂,从而允许其在到达压缩器之前转换为气体。优选地,在热交换器内的相变传热(PCHT)介质的一部分是气相和液相的混合物。结果,静电吸盘和热交换器内的 PCHT 介质之间的传热是恒温过程。该特征提高了静电吸盘的直径上的温度分布的均匀性。例如,当 PCHT 环路工作在冷却模式中时,流经热交换器的 PCHT 介质的气相-液相比或质量分数在出口处比在热交换器的入口处更大。结果,从静电吸盘到 PCHT 环路的传热主要通过 PCHT 环路的蒸发潜热发生。在热交换器的入口和出口处的气相-液相比或质量分数之间的差主要是 PCHT 介质的蒸发潜热的

函数, PCHT 介质的蒸发潜热是由来自静电吸盘的热 (以及相应的热交换器上的压强降) 进行的。

附图说明

- [0009] 图 1 示出了实现本发明特征的电容耦合等离子体反应装置。
- [0010] 图 2 是图 1 的反应装置的 RF 偏置功率馈送电路的示意图。
- [0011] 图 3 是对应于图 2 的俯视图。
- [0012] 图 4 是图 2 的电路的同轴馈送部分的细节图。
- [0013] 图 5 示出了图 1 的反应装置中的第一电介质环处理工具箱。
- [0014] 图 6 示出了图 1 的反应装置中的第二电介质环处理工具箱。
- [0015] 图 7 示出了实现本发明的包括图 1 的反应装置的系统。
- [0016] 图 8 是温度与图 7 的蒸发器内部的冷却剂的焓之间的函数关系图, 并且还示出了圆顶形的液相 - 气相边界。
- [0017] 图 9 是本发明的两相恒温冷却处理的流程框图。
- [0018] 图 10 示出了可利用本发明实现的示例性晶片温度 - 时间分布特性。
- [0019] 图 11A 和 11B 是根据用于领先于相应 ESC 温度变化使晶片温度陡降的处理, 晶片温度和晶片背侧气体压强各自的同期定时图。
- [0020] 图 12A 和 12B 是根据用于在相应 ESC 温度变化完成后使晶片温度陡降的处理, 晶片温度和晶片背侧气体压强各自的同期定时图。
- [0021] 图 13 示出了类似于图 7 的系统但是具有管理相应多个温区的多个温度控制环路
- 的系统。
- [0022] 图 14 示出了安装在图 7 或图 13 的 ESC 中的本发明的光学温度传感器。
- [0023] 图 15 示出了图 14 的温度传感器的上部探测器。
- [0024] 图 16 示出了图 14 的温度传感器的下部探测器。
- [0025] 图 17 是示出了上部探测器和下部探测器是如何联结在 ESC 内的图 14 的一部分的放大图。
- [0026] 图 18 是对于三种不同处理的开始于等离子体点火的随时间的晶片温度行为的图。
- [0027] 图 19 是用于控制在等离子体点火时和略晚于等离子体点火后的晶片温度的本发明的处理图。
- [0028] 图 20 是随时间的晶片和 ESC 温度行为以及相应的随时间的背面气体压强分布特性的图。
- [0029] 图 21 是本发明的温度倾斜控制处理的图。
- [0030] 图 22A 和 22B 示出了在图 21 的处理的不同模式中随时间的晶片温度行为。
- [0031] 图 23A-23B 是用于执行图 21 的处理的晶片温度倾斜控制系统的示意性框图。
- [0032] 图 24 是用来执行本发明的某些实施例的 ESC 热模型的简化示意性框图。
- [0033] 图 25 是示出了由图 24 的热模型仿真的温度变化通过 ESC 传播的图。
- [0034] 图 26 示出了对应于一个查找表的 3 维表面, 其中查找表表征了图 24 的热模型的一层。

[0035] 图 27 示出了对于图 24 的热模型中的不同背侧气体压强对应于表征晶片-圆盘表面的查找表的多个 3 维表面。

[0036] 图 28A-28B 是用于适应预定 RF 热负载变化的本发明的前馈处理的框图。

[0037] 图 29 是示出了在图 28A-28B 的处理中温度变化通过 ESC 传播的图。

[0038] 图 30A、30B 和 30C 分别示出了在补偿太晚、及时和太早的情况下, 响应于补偿 RF 热负载变化的 ESC 温度变化的晶片温度行为。

[0039] 图 31A、31B 和 31C 构成了用于实现预定温度变化的本发明的前馈处理的流程图。

[0040] 图 32A 和 32B 是在前馈处理的第一模式中晶片温度、ESC 温度 (图 32A) 和背面气体压强 (图 32B) 的同期定时图。

[0041] 图 33A 和 33B 是在前馈处理的第二模式中晶片温度、ESC 温度 (图 33A) 和背面气体压强 (图 33B) 的定时图。

[0042] 图 34A 和 34B 是在图 31A-31C 的前馈处理的推测环路的操作期间晶片温度、ESC 温度 (图 34A) 和背面气体压强 (图 34B) 的定时图。

[0043] 图 35A、35B 和 35C 构成了对应于图 31A-31C 的处理但是适合于补偿晶片上 RF 热负载的预定变化的前馈处理的流程图。

[0044] 图 36 是能够同时操作图 31A-31C 和 35A-35C 的前馈处理的控制系统的框图。

具体实施方式

[0045] 参考图 1, 等离子体反应装置包括反应室 100, 反应室 100 具有在室底部用于支撑半导体晶片 110 的晶片支撑 105。半导体环 115 包围晶片 110。半导体环 115 通过电介质 (石英) 环 120 支撑在接地的室主体 127 上。室 100 在顶部被盘状的头部电极 125 限制, 电极 125 通过电介质 (石英) 密封 130 以预定的间隙长度支撑在接地的室主体 127 上的晶片 110 上方。RF 发生器 150 向电极 125 施加 RF 等离子体源功率。来自发生器 150 的 RF 功率耦合经过与发生器 150 匹配的同轴电缆 162, 并且进入到与电极 125 相连的同轴短截线 135 中。短截线 135 具有由其长度确定的谐振频率、特性阻抗, 并且提供了电极 125 和 500 Ω 同轴电缆 162 或 RF 功率发生器 150 的 500 Ω 输出之间的阻抗匹配。室主体连接到 RF 发生器 150 的 RF 回路 (RF 地)。从头部电极 125 到 RF 地的 RF 路径受半导体环 115、电介质环 120 和电介质密封 130 的电容的影响。晶片支撑 105、晶片 110 和半导体环 115 为施加到电极 125 的 RF 功率提供了主 RF 返回路径。

[0046] 当源功率频率、等离子体电极谐振频率和短截线谐振频率几乎匹配时, 实现了大的阻抗匹配空间。优选地, 三种频率彼此略有漂移, 其中源功率频率为 162MHz (对于 300mm 晶片最优)、电极-等离子体谐振频率略低于 162MHz, 短截线谐振频率略高于 162MHz, 从而获得有利地减少了系统 Q 的失谐效应。这种系统 Q 的减少使得反应装置的性能更不容易受到室内部条件变化的影响, 从而整个处理更加稳定, 并且可以在宽得多的处理窗口上执行。

[0047] 电极电容与等离子体的负电容的大小匹配, 并且所得到的电极-等离子体谐振频率和源功率频率至少接近匹配。对于典型的金属和电介质蚀刻处理条件 (即, 等离子体密度在 10^9 - 10^{12} 离子/cc 之间, 2 英寸间隙, 电极直径在大约 12 英寸量级), 如果源功率频率是 VHF 频率, 则可能实现匹配。

[0048] 以这种方式选择电极 125 的电容, 然后使所得到的电极-等离子体谐振频率和源

功率频率相匹配的优点在于,电极和等离子体的谐振接近源功率频率提供了更宽的阻抗匹配和更宽的处理窗口,从而提供了更强的对处理条件变化的抵抗力以及更大的性能稳定性。使短截线谐振频率与电极等离子体谐振频率相匹配使得短截线-电极界面处的反射最小。整个处理系统对于操作条件的变化(例如,等离子体阻抗的漂移)敏感性更低,因此更加稳定,并且实现了更大范围的处理适用性。

[0049] 根据又一方面,通过使短截线谐振频率、电极等离子体谐振频率和等离子体源功率频率略微彼此漂移,来减少系统 Q 从而加宽处理窗口。使用较高的 VHF 源功率频率也相应减少了 Q。减少系统 Q 加宽了系统的阻抗匹配空间,从而其性能不容易受到等离子体条件变化或制造偏差的偏离的影响。

[0050] 用于均匀径向等离子体分布的偏置电路调谐:

[0051] 继续参考图 1,工件支撑阴极 105 包括支撑下绝缘层 10 的金属基层 05、下绝缘层 10 上的导电栅格层 15 和覆盖导电栅格层 15 的薄顶部绝缘层 20。半导体工件或晶片 110 放置在顶部绝缘层 20 的顶部。RF 偏置功率耦合到导电栅格层 15 以控制晶片 110 表面处的离子轰击能量。导电栅格 15 还可用于静电夹紧和松开晶片 110,并且在这种情况下可以以公知方式连接到夹紧电压源。因此,导电栅格 15 不一定接地,并且可替换地可以根据传统的夹紧和松开操作具有浮动的电位或固定的 DC 电位。金属基层 05 一般(但是不一定)连接到地,并且形成了由头部电极 125 辐射的 VHF 功率的返回路径的一部分。

[0052] RF 偏置发生器 40 产生了 HF 频带(例如 13.56MHz)中的功率。其 RF 偏置阻抗匹配元件 45 延伸通过工件支撑阴极 105 的细长导体 25(下文中称为 RF 导体)耦合到导电栅格 15。RF 导体 25 与接地导体(如铝基层 05)绝缘。RF 导体 25 具有与导电栅格 15 电接触的顶部终接或偏置功率馈送点 25a。

[0053] 图 2 是对应于图 1 的由 VHF 头部电极 125 组成的电路的示意图,其中通过工件支撑阴极 105 和电极 105 的元件施加 RF 偏置。图 3 是对应于图 1 的晶片 110 的平面的俯视图,其中 RF 导体 25 的终接或馈送点 25a 以隐藏(虚)线示出。由工件支撑阴极 105 提供的 RF 返回路径在晶片 110 的平面中由两个部分组成,即大约以馈送点 25a 为中心并且向外延伸的径向内部部分 30 和径向外部环形部分 35。由两个部分 30、35 提供的 RF 返回路径是不同的,因此两个部分 30、35 对由头部电极 125 辐射的 VHF 功率表现出不同的阻抗。这种不同可能导致对 VHF 功率的阻抗沿晶片表面径向分布的不均匀性,从而导致在接近工件表面处有不均匀的等离子体离子密度的径向分布。

[0054] 为了解决这一问题,电介质圆柱套筒 50(在图 2 的放大图中示出)包围 RF 导体 25。构成套筒 50 的材料轴向长度和介电常数确定了 RF 导体 25 对 VHF 功率表现出的馈送点阻抗。在一个示例中,套筒 50 的长度和介电常数被选择为使得馈送点阻抗在 VHF 源功率频率(例如 162MHz)处接近为 0。由包围馈送点 25a 的外部区域 35 表现出的阻抗在 162MHz 外接近短路(主要由于导电栅格 15 的存在)。因此,在后一示例中,套筒 50 可以使得在源功率频率处的馈送点阻抗为接近于包围区域的阻抗的值。这里,包围馈送点的区域的阻抗主要由导电栅格 15 确定。结果,获得了更加均匀的阻抗径向分布,以实现 VHF 源功率的更加均匀的电容耦合。

[0055] 套筒 50 可以包括附加特征,这些附加特征有利于前述改进 VHF 功率沉积,并同时解决独立问题,即提高由通过 RF 导体 25 施加到晶片 110 的 RF 偏置功率(例如为 13.56MHz)

产生的电场的均匀性。问题是如何调节 VHF 功率的径向分布以实现最大的等离子体离子密度的均匀性,同时调节沿晶片表面的 HF 偏置功率电场分布以实现最大的均匀性。

[0056] 图 4 是对应于图 1-3 的放大图,其示出了套筒 50 如何被划分为三个部分,即顶部 52、中部 54 和底部 56。套筒顶部 52 的长度和介电常数被选择为专门使得 HF 偏置功率沉积最优化并被固定在该值,随后,余下的套筒部分 54、56 的长度和介电常数被选择为通过头部电极使得 VHF 源功率沉积最优化,同时保持 HF 偏置功率沉积最优。

[0057] 用于增强等离子体均匀性的 RF 耦合环

[0058] 通过选择性地增强从头部电极 125 到工件周边附近的等离子体的电容耦合,减少了中央较高的等离子体分布的不均匀性。图 5 对应于图 1 的放大图,其示出了环形 RF 耦合环的附加特征,环形 RF 耦合环放置在晶片支撑阴极 105 的外周边上,并与其电接触。如图 5 所示,顶部绝缘层 20 被可移动环 80 包围,可移动环 80 的顶面 80a 与晶片 110 的顶面共面。可移动环 80 可以由工艺兼容材料(例如硅)制成。可选地,可移动金属接地环 85 包围可移动环 80,其顶面 85a 与可移动环 80 的顶面共面。沿着被接地环 85 的周边限制的晶片支撑阴极 105 的顶部提供了通常较平的表面,其与头部电极 125 的底部的通常较平的表面相互面对。结果,沿由头部电极 125 限制的整个处理区和晶片支撑阴极 105 之间的电容耦合通常是均匀的。为了克服在反应装置的中央较高的等离子体离子密度分布中固有的不均匀性,通过在可移动环 80 和接地环 85 上方放置 RF 耦合环 90,来增强接近工件 110 的外部部分处的通过头部电极 125 进行的电容耦合。RF 耦合环 90 可以是导体、半导体或电介质。如果耦合环 90 是电介质,则通过电介质材料的存在增强了到接近晶片周边的等离子体的电容耦合。如果 RF 耦合环 90 是导体,则其有效地缩短了电极到对电极的间隔,从而增强了接近晶片 110 的周边区域处的电容。从而,在处理区的任何位置处电极到对电极的间隔都是 h_1 ,除了在由 RF 耦合环 90 占据的周边,此处间隔为 h_1 减去耦合环 90 的高度 h_2 。增大的源功率的电容耦合增强了周边处的离子密度。离子密度的增大从 RF 耦合环 90 向内延伸,并且延伸通过工件 110 的周边部分。从而,工件 110 上方的等离子体离子密度在中央没有原来那么高,并且可以趋向于更加均匀,或者可能略微边缘更高。通过仔细选择 RF 耦合环 90 的高度(厚度) h_2 ,可以使得该条件最优。

[0059] 图 6 示出了图 5 的反应装置的修正,其中第二 RF 耦合吊顶环 95 附接到头部电极 125 的底面的周边,并且在第一 RF 耦合环 90 的上方。如果每个环 90、95 具有 h_3 的厚度(高度),则接近晶片周边的电极到对电极距离减少了 h_3 的两倍,并且该区域中的电容被成比例地增强,如图 5 的反应装置中的一样。

[0060] 利用 RF 耦合环 90 和电介质套筒 50,提高了等离子体离子密度的分布均匀性。任何余下的不均匀性可以通过由等离子体分布控制器 57(在图 1 中示出)控制的等离子体转向磁场来校正,控制器 57 管理驱动头部线圈 60、65 的 DC 电流源 58、59。

[0061] 可用于增强沿晶片 110 的直径的等离子体处理均匀性的另一种修正是将平坦电极表面 125a 改变为凸形弯曲的电极表面 125b。弯曲程度可被选择为补偿可能存在于平坦电极表面 125a 中的不均匀等离子体离子密度径向分布。

[0062] 高效温度控制装置:

[0063] 图 7 是图 1 的晶片支撑基座 105 的放大图,其展现了基座 105 的内部结构。基座 105 实施为如图 2 所述的静电吸盘(ESC),图 7 示出铝底座 5 包含用于 PCHT 介质的具有入

口 201 和出口 202 的流通路 200。内部流通路 200 构成了 PCHT 环路的热交换器,热交换器 200 包含在 ESC 底座 5 的内部。PCHT 环路可以工作在两种模式之一,即冷却模式(其中热交换器 200 充当蒸发器)和加热模式(其中热交换器 200 充当冷凝器)。PCHT 环路的余下元件在 ESC 105 的外部,并且包括(以 PCHT 介质流动方向的顺序,从出口 202 开始)累积器 204、压缩器 206(用于泵浦 PCHT 介质经过环路)和(用于冷却模式工作)冷凝器 208 以及具有可变孔尺寸的膨胀阀 210,其所有元件的类型都是本领域中公知的。将热交换器 200 定位在 ESC 底座 05 内部的优点是消除了在现有技术的传热流体中固有的延迟和损耗。PCHT 环路(即,热交换器 200、累积器 204、压缩器 206、冷凝器 208、膨胀阀 210 和将其耦合在一起的导管)包含传统类型的 PCHT 介质(其在 PCHT 工作在冷却模式中时充当制冷剂或冷却剂),并且可以具有低电导率以避免与反应装置的 RF 特性相互干扰。累积器 204 通过存储液体防止了任何液体形式的 PCHT 介质到达压缩器 206。通过适当地操作旁路阀 214,将该液体转换为蒸气。

[0064] 为了克服在处理期间的热漂移的问题,通过操作 PCHT 环路 200、204、206、208、210 来使 PCHT 环路的效率增大十倍 (ten-fold) 或更多,从而使热交换器内部的 PCHT 介质被划分为液相和气相。在入口 201 处的液相对气相比足够高以允许减小在出口 202 处的该比率。这保证了 ESC 底座 05 和热交换器(蒸发器)200 内的 PCHT 介质(冷却剂)之间的所有(或几乎所有)传热的发生都可归因于 PCHT 介质的蒸发潜热。结果,PCHT 环路的热流超过了单相冷却循环中的热流(超过了因子 10)。该条件可通过减小从入口 201 到出口 202 的 PCHT 介质的液相对气相比率来加以满足,该比率是有限的,从而至少有非常少量的液体残留在出口 202 处(或出口 202 之前)。在冷却模式中,这要求 PCHT 环路的冷却容量不被晶片上的 RF 热负载超过。一种确保这一目的的方式是为 PCHT 环路提供最大冷却容量,其约为晶片上的最大预期热负载的两倍。在图 1-7 所示类型的反应装置的一种实现方式中,PCHT 环路的最大冷却速率约在晶片上的最大预期热负载的三倍和四倍之间。晶片上的热负载约为晶片上施加的 RF 功率的 30%。液相对气相比在入口 201 处约在 40%和 60%之间,在出口 202 处约为 10%。

[0065] 尽管主要参考冷却模式的操作描述了 PCHT 环路,但是其也可以用在希望升高 ESC 的温度的任何时刻的加热模式中(例如,以比仅用等离子体加热更快的速率)。对于加热模式中 PCHT 环路的操作,通过打开旁路阀 212,使至少某些 PCHT 介质旁路过冷凝器 206 和膨胀阀 210,以便允许过热的 PCHT 介质流到热交换器 200。在这种情况下,热交换器 200 充当冷凝器而不是蒸发器。在该模式(加热模式)下,可以通过提供从冷凝器 206 的输出到压缩器 208 的输入的附加旁路(未示出),来防止冷凝器 206 的过热。在加热模式中,热交换器 200 中的液相对气相比可以为 0。

[0066] 图 8 是示出热交换器 200 内部的 PCHT 介质的焓与温度的函数关系的相图。三相(液相、固相、气相)之间的温度-焓边界是液相-气相圆顶(dome)216,在圆顶 216 下面 PCHT 介质既以液相存在,又以气相存在。至圆顶 216 的较低的焓一侧,PCHT 介质是过冷却(100%)的液相,而至圆顶 216 的较高的焓一侧,PCHT 介质是过加热(100%)的气相。在圆顶的顶点是三相点,在该点处 PCHT 介质的所有三相同同时存在。图 7 的 PCHT 环路的可控参数(即,由压缩器 206 建立的 PCHT 介质流率、膨胀阀 210 的孔尺寸和旁路阀 212 的开口尺寸,这将在后面描述)由本领域技术人员选择,从而热交换器 200 内部的 PCHT 介质的温

度和焓保持在图 8 的相图的液相 - 气相圆顶 216 的下方或内部。热交换器 200 内部的压强被维持在恒定水平（假定希望得到恒定的 ESC 底座温度），从而在理论上在冷却剂流经热交换器 200 时没有温度变化，如图 8 的完全水平的恒定压强线 218a、218b 所指示。（在实际中，在 ESC 入口和出口 201、202 之间有可忽略的温度差，在典型操作条件下约为 5 摄氏度或更低。）由于蒸发器 200 内部的 PCHT 介质从 ESC 底座 5 吸热，因此其内部能量 U 增大，导致其焓增大（其中焓是 $U+PV$ ， P 和 V 是蒸发器 200 内部的压强和体积）。为了满足如上定义的通过专门（或几乎专门）的蒸发潜热来进行两相传热的要求，PCHT 介质的焓 / 温度坐标必须保持在图 8 的液相 - 气相圆顶 216 内部。从而，对于恒定压强，PCHT 介质的焓 / 温度坐标遵循恒定压强线（例如线 218a），其以低焓值进入热交换器 200（在图 8 中标为“入口”），并以较高焓值退出（在图 8 中标为“出口”），其中进入和退出的焓值都在液相 - 气相圆顶 216 的内部或其边界上。图 8 表明在较低的冷却剂温度处实现了较大的焓的增加（吸收热）。

[0067] 对 ESC 和晶片上的不均匀问题的解决方法：

[0068] 将图 7 的蒸发器 200 内部的 PCHT 介质（下文中称为“冷却剂”）维持在图 8 的液相 - 气相圆顶内以确保通过蒸发潜热进行热提取几乎专门解决了在高的 RF 热负载下晶片上的温度不均匀问题。这是因为经由蒸发潜热进行的传热是恒稳过程。在 PCHT 环路的冷却模式中，在蒸发器 200 内部的冷却剂吸热时，其不改变温度。相反，其改变相，从液相变为气相。从而，蒸发器 200 内的所有冷却剂（ESC 底座 5 内部的流体通路）处于均匀的温度，无论晶片上的 RF 热负载的大小如何。其优点是晶片温度分布大约与 ESC 上的电场分布一样均匀，从而即使在最高的 RF 热负载下，也维持了由上述电特征（例如，由多个电介质套筒和电介质边缘环处理工具箱实现的 RF 偏置馈送点阻抗调节），在最有利的条件下实现的蚀刻速率均匀性，该结果迄今为止是无法获得的。该结果使图 1-7 的反应装置可用于当前设计规则（小特征尺寸）下的等离子体处理，并且可用于生成若干未来的设计规则（其中特征尺寸可能进一步收缩），这是明显的优点。该优点与（上述）通过蒸发潜热进行的冷却的极高热容相组合，从而提供了比经由冷却剂质量热容进行的传统（可感知）传热约大一个数量级的热流率。

[0069] 以前述方式进行的图 7 的反应装置的操作（其导致通过冷却剂的蒸发潜热进行传热）对应于图 9 中所示的方法。该方法中的第一步是通过将蒸发器 200 内部的冷却剂维持在某一温度和焓的范围内（在该范围内，传热是通过冷却剂的蒸发潜热（或从其减少）进行的），来增强 ESC 温度的径向分布的均匀性或使之最优化。该步骤在图 9 的框 170 中示出。框 170 的步骤可以通过如下方式执行：将膨胀阀 210 的孔尺寸或开口尺寸的变化限制在某一范围内，该范围将蒸发器 200 中的冷却剂的温度和焓约束在图 8 的温度 - 焓图的液相 - 气相圆顶 216 的内部（图 9 的框 171）。对于给定冷却剂和给定的冷却剂流率，很容易确定将冷却剂约束在图 8 的液相 - 气相圆顶 216 内部的膨胀阀的调节范围，并且该范围可例如预先编程到控制整个系统的微处理器中。框 170 的步骤也可以通过如下方式执行：将压缩机到蒸发器旁路流阀 212 调节在某一范围内，在该范围内，蒸发器 200 内部的冷却剂被维持在图 8 的液相 - 气相圆顶 216 内部（图 9 的框 172）。旁路阀 212 的调节（在框 172 的步骤中）和膨胀阀 210 的调节（在框 171 的步骤中）可以组合进行以实现期望的结果。

[0070] 一旦通过框 170 的步骤建立了通过蒸发器 200 中的蒸发潜热进行的传热，下一步

就是控制 ESC 温度（图 9 的框 173）。这可以通过如下方式来实现：将膨胀阀 210 调节在在框 170 的步骤中建立的范围内，直到达到期望的 ESC 温度为止（图 9 的框 174）。或者，可以通过将压缩器到蒸发器旁路阀 212 调节在在框 172 的步骤中建立的范围内，来控制 ESC 温度。后一步骤对应于图 9 的框 175。温度控制也可以通过一起执行框 174 和 175 的步骤来执行。

[0071] 工作示例：

[0072] 尽管膨胀阀 210 的可变孔尺寸是对冷却速率和晶片温度的主要控制因素，但是由压缩器到蒸发器旁路阀 212 提供了附加或替换的温度控制（如果期望的话还提供了晶片加热）。可以利用压缩器到累积器旁路阀 214 来确保累积器 204 中所有液体冷却剂到气相的完全转换。

[0073] 尽管很容易选择合适的冷却剂、压缩器 206 的流率和满足前述条件的膨胀阀的孔尺寸，但是下面被提供作为实现了两相冷却的工作示例：

[0074] ESC 入口温度：-10 到 +50 摄氏度

[0075] ESC 入口压强：160 到 200PSIG

[0076] ESC 入口液相 - 气相比：40% - 60% 液体

[0077] ESC 入口 - 出口最大温度差：5 摄氏度

[0078] ESC 入口 - 出口最大压强差：10PSI

[0079] ESC 出口液相 - 气相比：10% 液体

[0080] 累积器出口温度：60 到 80 摄氏度

[0081] 累积器出口压强：25 到 35PSIG

[0082] 累积器出口液相 - 气相比：100% 气体

[0083] 压缩器流率：4gal/min

[0084] 压缩器出口压强：260-270PSIG

[0085] 压缩器出口温度：80-100 摄氏度

[0086] 压缩器出口液相 - 气相比：100% 气体

[0087] 冷凝器出口温度：20-40 摄氏度

[0088] 冷凝器出口压强：250PSIG

[0089] 冷凝器液相 - 气相比：100% 气体

[0090] 膨胀阀出口液相 - 气相比：80%

[0091] 在膨胀阀出口和 ESC 冷却剂入口 201 之间发生某些蒸发，这解释了从膨胀阀 210 到 ESC 入口 201 液相 - 气相比从 80% 减小到 60% 的原因。尽管优选地可能将热循环约束在图 8 的液相 - 气相圆顶 216 内（如上所述），但是在超过该限制的漂移的情况下也可以实现本发明。具体而言，冷却剂的液相 - 气相比可以至少在蒸发器出口 202 处几乎达到 0，或者可以在刚到达蒸发器出口 202 之前达到 0，这种情况下可以发生少量的可感知热。在这种情况下，大量的传热仍然通过蒸发潜热发生，只有很少一部分通过可感知热发生，因此仍然实现了本发明的优点。

[0092] 大范围温度反馈控制环路：

[0093] 再次参考图 1 和 7，在给定晶片 110 上的 RF 热负载的情况下，晶片温度可以利用温度反馈控制环路控制或保持在期望的温度处，温度反馈控制环路管理膨胀阀 210 和 / 或

旁路阀 212, 尽管最简单的实现方式只控制膨胀阀 210。在温度探测器处感知实际的温度, 温度探测器可以是 ESC 绝缘层 10 中的温度探测器 220、ESC 底座 05 中的温度探测器 221、ESC 蒸发器入口 201 处的温度探测器 222 或 ESC 蒸发器出口 202 处的温度探测器 223 或这些探测器中的任何一个或全部的组合。为此, 反馈控制环路处理器 224 响应于来自一个或多个温度探测器的一个或多个输入而管理膨胀阀 210 的孔开口尺寸。处理器 224 被提供以用户选择的期望温度值, 该期望温度值可以存储在存储器或用户接口 225 中。简而言之, 在每个连续处理循环期间, 处理器 224 将由至少一个探测器 (例如, 由 ESC 绝缘层中的探测器 220) 测量的当前温度与期望温度值相比较。随后, 处理器 224 计算作为期望温度值和测量温度值之间的差的误差值, 并从误差中确定对旁路阀 212 或膨胀阀 210 的孔尺寸的校正, 这可能减少误差。随后, 处理器 224 使得阀的孔尺寸根据校正变化。在晶片处理的整个持续期间重复该循环以控制晶片温度。

[0094] 灵敏晶片温度反馈控制环路:

[0095] 在传统反应装置中, 通过冷却静电吸盘或晶片支撑基座来冷却晶片以避免由于吸收 RF 功率而变得过热。晶片 110 和被冷却的 ESC 105 之间的热导率通过将一定压强的导热气体 (如氦) 喷射到晶片 110 的背面和 ESC105 的顶面之间的界面中而得以增强, 这是本领域中公知的技术。为此, 在 ESC 绝缘层 20 的顶面中形成有气体通道 226, 并且加压的氦供应装置 228 通过背面气体压强阀 229 耦合到内部 ESC 气体通道 226。通过由夹紧电压源 128 施加到栅格电极 15 的 DC 夹紧电压, 将晶片 110 向下静电夹紧到绝缘层 20 的顶面上。晶片 110 和 ESC 顶层 20 之间的热导率由夹紧电压和晶片背面上的导热气体 (氦) 压强确定。根据本发明, 通过改变背面气体压强 (通过控制阀 229) 来执行高度灵敏 (快速) 的晶片温度控制, 以便将晶片温度调节到期望水平。随着背面气体压强的改变, 晶片和 ESC 顶层 20 之间的热导率也改变, 这改变了 (a) 由晶片 110 从施加到栅格电极 15 或耦合到等离子体的 RF 功率吸收的热和 (b) 从晶片导到被冷却的 ESC 的热之间的平衡。改变该平衡必定改变晶片温度。因此, 管理背面气体压强的反馈控制环路可用于灵敏或高度响应性的晶片温度控制。晶片温度对背面气体压强的变化的响应是极为快速的 (温度改变在一秒或更少的时间内达到均衡)。通过比较, 改变 ESC 底座或晶片支撑基座 105 的温度并不导致晶片在分钟量级上 (取决于 ESC 105 的热质量) 达到新的 (升高或降低的) 均衡或稳定状态的晶片温度。因此, 采用背面气体压强的温度调整系统提供了能够对晶片温度进行快速调节的灵敏温度控制。

[0096] 图 7 示出了这种灵敏温度反馈控制系统, 其中反馈控制环路处理器 230 管理背面气体压强阀 229。ESC 的温度传感器 220、221、222 或 223 中的一个 (或多个) 可以连接到处理器 230 的输入。用户接口或存储器 231 可以向处理器 230 提供用户选择的或期望的温度。在每个连续处理循环期间, 处理器 230 计算作为当前温度测量结果 (来自传感器 220、221、222 之一) 和期望温度之间的差的误差信号。处理器 230 从该差中确定对背面气体压强阀的当前设置的校正 (这趋向于减小温度误差), 并根据该校正改变阀的开口。例如, 偏离高于期望温度的晶片温度将要求增大背面气体压强以增大对被冷却的 ESC 的热导率并调低晶片温度。在晶片温度偏离低于期望温度的情况下情形相反。从而, 晶片温度可被控制并被立即设为某一温度范围内的新温度, 该温度范围的下限对应于 ESC 的冷冻温度, 上限由晶片上的 RF 热负载确定。例如, 在缺少 RF 热负载的情况下不能增加晶片温度, 并且晶

片温度不能被冷却低于 ESC 的温度。如果该温度范围足够的话,则任何传统的技术都可用于将 ESC 维持在期望的冷冻温度以有利于灵敏温度反馈控制环路对背面气体压强的管理。

[0097] 双温度反馈控制环路:

[0098] 管理背面气体压强阀 229 的灵敏温度反馈控制环路和管理制冷膨胀阀 210 的大范围温度反馈控制环路可以在控制反馈控制环路处理器 224、230 两者的主处理器 232 的控制下以协同组合方式同时工作。

[0099] 大范围温度反馈控制环路(包括由蒸发器 200、压缩机 206、冷凝器 208 和膨胀阀 210 组成的 PCHT 环路)通过改变静电吸盘 105 的温度来控制工件温度。温度范围仅由 PCHT 环路的热容量限制,因此可以将工件温度设为非常大的范围(例如,-10 摄氏度到 +150 摄氏度)内的任何温度。然而,在特定时刻其可以影响工件温度的期望变化的速率受静电吸盘 105 的热质量的限制。例如,该速率是如此之低,以致于利用用于支撑 300mm 工件或硅晶片的静电吸盘,工件温度的 10 摄氏度的变化可能要求从制冷单元开始改变冷却剂的热条件以满足新的温度的时刻起经过分钟量级或更多的时间,直到工件温度最终达到新的温度。

[0100] 相反地,在对工件温度进行期望的改变或校正时,灵敏温度反馈控制环路并不改变静电吸盘的温度(至少不直接改变),而是仅仅改变工件和静电吸盘之间的热导率。工件温度响应于该变化的速率是极高的,这是因为其仅由背面气体压强可以改变的速率和工件的热质量限制。在典型系统中,背面气体压强在不足一秒内对阀 229 的移动作出响应。对于典型的 300mm 硅晶片,热质量是如此之低,以致于晶片(工件)温度在大约几秒或若干分之一秒内对背面气体压强的变化作出响应。因此,相对于大范围温度反馈控制环路实现工件温度的变化的时间刻度,灵敏反馈环路的工件温度响应是相当即时的。然而,灵敏反馈环路可以改变工件温度的范围非常有限:可以获得的最高工件温度由晶片上的 RF 热负载限制,而最低温度不能低于静电吸盘 105 的当前温度。然而,通过将灵敏和大范围温度控制环路组合在一起,每一种的优点补偿了另一种的限制,因为其组合提供了大的工件温度范围和非常快速的响应。

[0101] 主处理器 232 可被编程,以利用大范围反馈控制环路(处理器 224)实现大范围温度变化,而利用灵敏反馈控制环路(处理器 230)实现快速但是较小范围的温度变化。图 10 是晶片温度行为随时间变化的一个示例的图。实线示出了长期温度行为,其中主处理器 232 利用处理器 224 通过大范围反馈控制环路实现晶片温度的缓慢大范围变化。虚线描述温度的快速扰动,其中主处理器 232 利用处理器 230 通过灵敏反馈控制环路实现晶片温度的快速但是小范围的变化。

[0102] 由主处理器 232 提供的双环路控制可用于(几乎)即时地将晶片温度移动到新的期望水平,并且在 ESC 温度缓慢地改变到新的期望温度的同时保持该温度。这在图 11A 和 11B 中示出。图 11A 中的实线示出了晶片温度行为随时间的变化,其中晶片温度在时刻 t_1 陡降到较低温度,并且保持在该值,此时 PCHT 环路(虚线)开始将 ESC 冷却到较低温度,该较低温度直到时刻 t_2 才被 ESC 达到。晶片温度在时刻 t_1 的快速变化和其随后的温度稳定性是由灵敏控制环路 230 实现的。灵敏控制环路处理器 230 在时刻 t_1 接收到新的(较低的)期望晶片温度,并通过立即增大背面气体压强(图 11B)作出响应以在时刻 t_1 将晶片温度陡降到新的温度。同时,ESC 温度开始降低,以在时刻 t_1 将 ESC 驱动到(或略低于)新的温度,从而处理器 224 增大 ESC 的制冷冷却速率以驱动其温度下降。这迫使灵敏控制环

路处理器 230 在时刻 t_1 后减小背面气体压强以维持期望的晶片温度,直到 ESC 在时刻 t_2 达到校正温度为止,在时刻 t_2 后背面气体压强保持恒定。

[0103] 图 12A 和 12B 的示例示出了在 PCHT 环路被允许缓慢调节到新的温度的同时,如何可以延迟 ESC 温度变化(以适应对约为 50 摄氏度的 ESC 表面的 5 秒的时间滞后)。图 12A 示出了温度行为随时间的变化,而图 12B 示出了相应的背面气体压强分布特性随时间的变化。如图 12A 和 12B 所示,由主处理器 232 提供的双环路控制可用于临时将晶片温度保持恒定(图 12A 的实线)在初始温度水平,同时在时刻 t_1 开始,PCHT 环路使 ESC 经过大的但是缓慢的温度漂移(图 12A 的虚线)。然后,晶片温度被允许陡降到新的 ESC 温度。这是通过冷却 ESC 同时在时刻 t_1 开始一直减小背面气体压强而实现的。然后,在时刻 t_2 达到期望的 ESC 温度后,灵敏温度控制环路陡升背面气体压强以将晶片温度陡降到 ESC 温度。

[0104] 多个温区:

[0105] 大范围温度控制环路:

[0106] ESC 105 可被划分为多个径向区,并且不同的独立反馈控制环路可以单独控制每区中的温度。该特征的优点是晶片 110 的不同径向区可以在处理期间保持在不同的温度,以便进一步减小处理或蚀刻速率分布不均匀性。在图 13 的示例中,ESC 105 被划分为两个温度控制区,即径向内区 234 和径向外区 236,并且为每区 234、236 提供单独的温度控制装置。在具有这种多个径向区的某些实施例中,优选地可以将 ESC 导电栅格或电极 15 划分为多个径向区(例如同心的内区 15a 和外区 15b)。

[0107] 铝底座 05 的径向内区 234 包含具有冷却剂入口 201a 和冷却剂出口 202a 的内区冷却剂流通路 200a。内区冷却剂流通路 200a 构成了内区 PCHT 环路的内区蒸发器,蒸发器 200a 包含在 ESC 底座 05 的内区 234 内部。内区 PCHT 环路的剩余元件在 ESC 105 的外部,并且包括(以冷却剂流动方向的顺序,从冷却剂出口 202a 开始)累积器 204a、压缩机 206a、冷凝器 208a 和具有可变孔尺寸的膨胀阀 210a,所有这些元件都是本领域中公知的类型。铝底座 05 的径向外区 236 包含具有冷却剂入口 201b 和冷却剂出口 202b 的外区冷却剂流通路 200b。外区冷却剂流通路 200b 构成了外区 PCHT 环路的外区蒸发器,蒸发器 200b 包含在 ESC 底座 05 的外区 236 内部。外区 PCHT 环路的剩余元件在 ESC 105 的外部,并且包括(以冷却剂流动方向的顺序,从冷却剂出口 202b 开始)累积器 204b、压缩机 206b、冷凝器 208b 和具有可变孔尺寸的膨胀阀 210b,所有这些元件都是本领域中公知的类型。内区 234 中的温度在下面的内区温度探测器中的一个或多个处感知:ESC 绝缘层 10 的内区 234 中的探测器 220a、ESC 底座 05 的内区中的探测器 221a、内区蒸发器入口 201a 处的探测器 222a 或内区蒸发器出口 202a 处的探测器 223a。

[0108] 内区反馈控制环路处理器 224a 响应于来自一个或多个内区温度探测器的一个或多个输入而管理内区膨胀阀 210a 的孔开口尺寸。内区处理器 224a 被提供以用户选择的期望内区温度值,该值可以存储在存储器或用户接口 225a 中。在每个连续处理循环期间,内区处理器 224a 将由至少一个探测器(例如 ESC 绝缘层中的探测器 220a)测量的当前温度与期望温度值相比较,并据此校正内区膨胀阀 210a 的孔尺寸。外区反馈控制环路处理器 224b 响应于来自一个或多个外区温度探测器的一个或多个输入而管理外区膨胀阀 210b 的孔开口尺寸。外区处理器 224b 被提供以用户选择的期望外区温度值,该值可以存储在存储器或用户接口 225b 中。在每个连续处理循环期间,外区处理器 224b 将由至少一个探测器(例

如 ESC 绝缘层中的探测器 220b) 测量的当前温度与期望温度值相比较,并据此校正外区膨胀阀 210b 的孔尺寸。

[0109] 灵敏温度反馈控制环路:

[0110] 在两个温区 234 和 236 中,晶片 110 和被冷却的 ESC 105 之间的热导率通过将一定压强的导热气体(如氦)喷射到晶片 110 的背面和 ESC 105 的顶面之间的界面中而得以增强,这是本领域中公知的技术。在内温区 234 中,在 ESC 绝缘层 20 的顶面的内区 234 中形成有内区气体通道 226a,并且加压的氦供应装置 228a 通过内区背面气体压强阀 229a 耦合到内区气体通道 226a。通过由夹紧电压源 128 施加到栅格电极 15(即 15a 和 15b) 的 DC 夹紧电压,将晶片 110 向下静电夹紧到绝缘层 20 的顶面上。晶片 110 和 ESC 顶层 20 之间的热导率由夹紧电压和晶片背面上的导热气体(氦)压强确定。通过控制内区阀 229a 在内温区 234 中执行高度灵敏(快速)的晶片温度控制,以便将晶片温度调节到期望水平。内区灵敏反馈控制环路处理器 230a 管理内区背面气体压强阀 229a。ESC 内区 234 中的内区温度传感器 220a、221a、222a 或 223a 中的一个(或多个)可以连接到内区灵敏处理器 230a 的输入。内区用户接口或存储器 231a 可以向内区灵敏处理器 230a 提供用户选择的或期望的温度。在每个连续处理循环期间,处理器 230a 感知作为当前温度测量结果(来自内区传感器 220a、221a、222a 之一)和期望温度之间的差的误差,并据此改变内区背面气体阀 229a 的开口。

[0111] 在外温区 236 中,在 ESC 绝缘层 20 的顶面的外区 236 中形成有外区气体通道 226b,并且加压的氦供应装置 228b 通过外区背面气体压强阀 229b 耦合到外区气体通道 226b。通过控制外区阀 229b 在外温区 236 中执行高度灵敏(快速)的晶片温度控制,以便将晶片温度调节到期望水平。外区灵敏反馈控制环路处理器 230b 管理外区背面气体压强阀 229b。ESC 外区 236 中的外区温度传感器 220b、221b、222b 或 223b 中的一个(或多个)可以连接到外区灵敏处理器 230b 的输入。外区用户接口或存储器 231b 可以向外区灵敏处理器 230b 提供用户选择的或期望的温度。在每个连续处理循环期间,处理器 230b 感知作为当前温度测量结果(来自外区传感器 220b、221b、222b 之一)和期望温度之间的差的误差,并据此改变外区背面气体阀 229b 的开口。

[0112] 在上述参考图 13 组合灵敏和大范围内反馈控制环路和外反馈控制环路的情况下,可以在大范围上以灵敏响应控制晶片温度的径向分布特性。

[0113] 具有最小 RF 寄生效应或不具有 RF 寄生效应的温度探测器:

[0114] 图 14 示出了安装在图 1 的等离子体反应装置中的优选温度探测器 238。探测器 238 由两个可分离的部分组成,即安装在 ESC 105 中的上部探测器 239 和安装在反应室中位于 ESC 105 下方并用于支撑 ESC 105 的一部分(即室主底座 241)中的下部探测器 240。上部探测器 239 在图 15 的放大图中示出,并位于高 RF 电位区域中(即,ESC 绝缘层或圆盘 10、20 内部)。上部探测器 239 牢固地插入在与上部探测器 239 紧密适配的 ESC105 内的细长轴孔中,并且上部探测器 239 的尖端距离圆盘 20 的顶面非常近(例如,在 3 到 3.5mm 内)。(其优点是探测器 239 与晶片 110 足够近以使温度测量误差最小或消除该误差。)该 ESC 区域在处理期间具有非常高的电场电位,从而上部探测器 239 可能具有的任何电属性都对晶片上的等离子体处理有深刻的影响。因此,上部探测器 239 包括 RF 兼容性特征,其使得探测器 239 可能对电场或 RF 阻抗分布的任何影响最小或消除该影响。这种 RF 兼容性特征确保

了探测器 239 不会扭曲或干扰 ESC 电场或 RF 阻抗分布,这种分布已经利用图 2-4 的反馈点阻抗调节和 / 或 (例如) 图 5-6 的电介质环处理工具箱的特征进行了仔细的调节。上部探测器 239 的 RF 兼容性特征包括在探测器 239 内完全没有任何导电材料、沿轴向方向的探测器方向 (使得其对径向电场或 RF 阻抗分布的影响最小) 以及其较小的直径,直径为室中等离子体的 Debye 长度的若干分之一量级的量级。通过采用不导电的光学温度变换器 242 (例如磷光质材料) 可以实现这些特征,该变换器 242 的黑体辐射光谱是其温度的公知函数。光学温度变换器 242 耦合到包含在薄的轴向上部探测器 239 内的长的薄光纤 243。上部探测器 239 还包括包围光纤 243 并且优选地由浸有玻璃的塑料组成的不透明圆柱形电介质套筒 244。光学温度变换器 242 被某种材料的电介质帽 245 盖住,该材料优选地与 ESC 圆盘 10、20 的电介质材料相同,在优选实施例中该材料是氮化铝。该特征确保了接触光学温度变换器 242 的材料 (即帽 245) 的温度行为与要对其测量温度的材料 (即,与晶片 110 直接接触的 ESC 圆盘层 20) 相同。

[0115] 上部探测器 239 还包括安装板 246,安装板 246 可移动地紧固到 ESC 底座 05 的底面。安装板 246 支撑包含螺旋弹簧 248 的弹簧壳体 247,螺旋弹簧 248 压缩在壳体 247 的肩部 245 和紧固到壳体 247 内的探测器套筒 244 的一部分的环形环 249 之间。在上部探测器 239 被插入到 ESC 105 中并按压 ESC 内的孔的顶端时,螺旋弹簧 248 被压缩以迫使探测器 239 的尖端与孔的顶端自对齐。

[0116] 下部探测器 240 在图 16 的放大图中示出,并且包括被不透明的下部圆柱形套筒 251 包围的光纤 250。由于下部探测器 240 低于接地的导电 ESC 底座 05,因此其位于高 RF 电场的区域外部,因此不需要由不导电材料制成。事实上,下部圆柱形套筒 251 可以例如由铁制成。下部探测器 240 的顶端 252 紧密地容纳在上部探测器 239 的安装板 246 的孔 253 内。下部探测器 240 包括安装板 254,安装板 254 可移动地紧固到室壳体主底座 241 的底面。安装板 254 支撑包含螺旋弹簧 256 的弹簧壳体 255,螺旋弹簧 256 压缩在壳体 255 的肩部 257 和紧固到壳体 255 内的下部探测器套筒 251 的一部分的环形环 258。在下部探测器 240 的尖端 252 被插入到上部探测器安装板 246 的孔 253 中并且按压孔 253 的顶端时,螺旋弹簧 256 被压缩以迫使下部探测器 240 的尖端与孔 253 的顶端自对齐。所得到的下部探测器 240 与上部探测器 239 的自对齐如图 17 所示,图 17 示出了上部探测器光纤 243 和下部探测器光纤 250 的相对端几乎完全对齐。信号调整电路转换在下部探测器光纤 250 的底端处从光纤接收到的光,并将其转换为数字信号以供反馈控制环路处理器之一使用。尽管图 14 示出了其尖端接近 ESC 105 的顶部的单个温度探测器,但是另一个相同的探测器也可以放置在 ESC 的下部部分中,但是与第一探测器处于相同的径向位置。其他相同的探测器也可以放置在 ESC 内的不同径向 (方位) 位置处,但是与其他探测器处于同一高度 (轴向位置)。从而,图 13 的不同温区 234、236 的温度探测器 220a、220b 各自可以是上述图 13-16 中的类型,并且位于同一轴向高度上的不同径向位置处。

[0117] 尽管本发明的某些实施例被描述为包括不同的反馈控制环路处理器,但是这些处理器中的任何一个或全部也可以实现在单个公共处理器中,这单个公共处理器被编程以执行各个反馈控制环路处理器中每一个的功能。类似地,与不同控制环路相关联的其他资源 (如双氦供应装置 228a、228b) 可以实现为具有单独控制的接口的单个供应装置或资源 (例如,单个氦供应装置和双压强控制阀 229a、229b)。而且,如果 (例如) 导电栅格电极 15 被

划分为内电极 15a 和外电极 15b(如上所述),则公共的 RF 偏置功率源可用于向内栅格电极 15a 和外栅格电极 15b 施加不同水平的 RF 偏置功率。或者,分离的 RF 偏置功率发生器可用于实现分离的 RF 偏置功率水平。

[0118] 利用背面气体压强进行工件温度变化:

[0119] 如上所述,大范围温度控制环路通过调整静电吸盘 105 的温度来控制工件温度。因此,其具有可归因于静电吸盘的热质量的缓慢响应。传统的静电吸盘冷却系统的另一个问题是其效率太受限制,而不能避免在晶片温度已达到期望水平后发生向上温度漂移。这导致初始处理期间的工件温度漂移,当在反应装置空闲后处理“第一”晶片时该问题最为显著。该问题由图 18 的图中的标为 260 的曲线示出,图 18 示出了当在时刻 t_0 开启等离子体功率时一般的晶片温度对时间响应。最初,晶片温度和 ESC 温度低于期望温度,并且被冷却的静电吸盘 105 的热质量使晶片温度的反应缓慢降低到晶片上的 RF 热负载。这使得晶片温度达到期望温度的时间从时刻 t_0 延迟到时刻 t_b 。该延迟一般在数十秒或一分钟或更多时间的量级。此后,传统的静电吸盘冷却装置限制了传热效率,从而使其不能补偿来自晶片上的 RF 热负载的热累积,因此晶片温度在时刻 t_b 之后继续增加或漂移超过期望温度。这种温度的不受控制的变化降低了等离子体处理的控制。

[0120] 在时刻 t_b 后温度漂移的问题(对应于图 18 的曲线 260)由图 7 的两相制冷环路的较高效率解决。如上所述,两相制冷环路通过将其蒸发器 200 定位在静电吸盘 105 内部,实现了提高的响应。通过主要利用蒸发潜热在蒸发器 200 中执行传热,其效率的大小进一步提高了一个量级。该提高效率使得制冷环路能够在达到期望温度后阻止晶片温度的增加。该改进的晶片温度行为由图 18 的曲线 262 示出,其中晶片温度在时刻 t_2 达到期望温度后变平,并且此后具有很小的温度漂移或不具有温度漂移。但是,该解决方法在晶片温度达到期望水平时产生了明显的延迟(从时刻 t_0 到时刻 t_2)。

[0121] 在使晶片温度达到期望温度时有延迟(即,从时刻 t_0 到时刻 t_2)的问题通过采用灵敏反馈控制环路处理器 230 来加以解决。当首先开启 RF 功率并且晶片温度低于期望温度时(在时刻 t_0),修正阀 229 以便减小(或关闭)背面气体压强,从而减小晶片到吸盘的电导,进而减小冷却效应和晶片 110 上静电吸盘 105 的热质量。这允许晶片 110 被 RF 热负载快速加热,且来自被冷却的吸盘 105 的反面影响很小或几乎没有,这产生了在时刻 t_0 开始的温度的陡升,如图 18 的标记为 264 的曲线所示。如图 18 的标记为 264 的曲线所示,晶片温度在时刻 t_a 达到期望温度,从时刻 t_0 到时刻 t_a 的时间延迟极短,例如在只有几秒或若干分之一秒的量级。

[0122] 在晶片达到期望温度时,灵敏控制环路处理器 230 必须增大背面气体压强(通过控制阀 229)以增大静电吸盘 105 的冷却效应,从而在时刻 t_0 开始的晶片热量的快速增加不会超过期望温度之上。为了抵消温度漂移,背面气体压强可以连续增大以维持期望的晶片温度。所有这些对背面气体压强的调节必须准确和及时地进行。为了实现这一目的,本发明的优选实施例包括静电吸盘 105 的热模型,该模型仿真了在给定条件下通过静电吸盘的各层之间的传热。该特征预测了最优背面气体压强,以在考虑到主要条件的情况下获得并保持期望晶片温度。图 19 示出了采用热模型的控制处理的一个循环。热模型的示例将在该说明书的后续部分中描述。主处理器 232 可被编程以反复重复图 19 的循环从而执行控制处理。

[0123] 参考图 19, 该循环开始于将当前处理条件输入到热模型中 (框 270)。这些条件可以包括晶片上的 RF 热负载 (其可以表达为施加的总 RF 功率的预定部分)、蒸发器 200 处或附近的静电吸盘温度、静电吸盘晶片夹紧 DC 电压和背面气体压强。下一步 (框 271) 是从热模型获得在当前处理条件下产生的晶片的最终或稳定状态温度 T_f (即, 在图 18 的时刻 t_b 达到的温度) 的预测。例如, 为了实现这一目的, 热模型可以生成函数 $T(z, t)$, 函数 $T(z, t)$ 定义了温度 T 沿经过静电吸盘 105 的轴向方向 z 的分布随时间 t 的演变。作为一种可能的选项, 如果 T_f 不是期望温度, 则可以修正初始条件, 并且重复前述步骤直到热模型产生了满意的 T_f 的预测。然后, 热模型被用于找到将会立即使晶片温度前进到预测的稳定状态温度 T_f 的背面气体压强 (即, 阀 229 的设置) (图 19 的框 272)。这可以通过改变输入到模型中的背面气体压强值并监视预测的稳定状态晶片温度的变化直到预测了期望温度为止 (表明已经找到了最优背面气体压强值) 来实现。然后, 背面气体压强被设为这样识别出的最优值 (框 273)。如果已经达到稳定状态 (框 274), 则处理停止。否则, 时间因子递增 (框 275), 并且处理循环回到框 272 的步骤。

[0124] 图 20 示出了晶片 110、静电吸盘 105 的顶面或圆盘层 20、静电吸盘 105 的底部或底座 5 的温度行为随时间的变化 (分别是标记为 276、277、278 的曲线)。另外, 标记为 279 的曲线示出了实现曲线 276 的晶片温度台阶行为所需的背面气体压强随同一时间刻度的行为变化。为了比较目的, 标记为 280 的曲线示出了在缺少背面气体压强的任何变化的情况下晶片的有问题的温度行为, 其中在晶片处理的重要部分期间, 晶片温度初始非常缓慢地达到期望的处理温度。图 20 的曲线 279 示出了在等离子体点火时的背面气体压强的初始陡降 (该点火提供了晶片温度的同时陡升), 以及其后背面气体压强的缓慢增大 (以补偿对应于曲线 277 的静电吸盘 105 的上升的温度)。在获得由图 20 表示的数据时, 存在下面的处理条件: 100W 的等离子体 RF (VHF) 源功率被施加到头部吊顶电极, 4000W 的等离子体 RF (HF) 偏置功率被施加到 ESC, 室压强是 15Torr, ESC 晶片夹紧 DC 电压是 400V, ESC 蒸发器温度是 40 摄氏度, 冷却剂流率是在第一 500 秒内为 3.75 加仑每分。

[0125] 图 21 示出了背面气体压强倾斜 (通过灵敏控制环路处理器 230 进行) 是如何可以控制整个晶片处理期间的晶片温度的。其目的是将晶片温度维持在恒定的期望温度, 或者精确地遵循可以在用户的处理方法中指定的快速变化的晶片温度分布特性。在图 21 的处理中, 第一步是定义晶片温度的期望时间演变的期望晶片温度特性 (图 21 的框 282)。从分布特性中确定当前时刻的期望温度 (框 283a), 并输入到热模型中 (框 283b)。当前处理条件也被输入到热模型中 (框 284), 例如晶片背面气体压强、当前晶片温度、晶片上的 RF 热负载、ESC 底座温度和静电晶片夹紧力。随后, 热模型被用于获得对晶片背面气体压强的校正 (框 285a), 该校正将使当前晶片温度移动到从用户定义的分布特性中获得的当前期望温度值。然后对晶片背面气体压强执行该校正 (框 285b)。当前时间值被增加为下一采样时刻或处理器循环时刻, 并且处理循环回到框 283a 的步骤 (框 287)。

[0126] 尽管在图 21 描述的方式中背面气体压强可用于热模型以控制晶片温度, 但是其被限制在由低温和高温限定的很窄的温度范围内, 其中低温不低于 ESC 蒸发器温度, 高温由晶片上的 RF 热负载限制。因此, 如果用户指定的温度分布特性需要超过该范围的变化, 则大范围 (制冷) 温度控制环路与灵敏控制环路处理器 230 结合使用。为此, 与框 285a 和 285b 的步骤同时执行以下步骤: 使用热模型来获得对 ESC 蒸发器 (或底座) 温度的校正

(框 286a),该校正将使当前晶片温度移动到从用户定义分布特性中获得的当前期望温度值。然后例如通过调节膨胀阀 210 来对制冷环路执行该校正(框 286b)。

[0127] 使用热模型的双环路温度控制:

[0128] 通过同时执行图 21 的框 285a、285b 和 286a、286b 的步骤,取决于要进行改变的温度而自动选择两个控制环路(由处理器 234 管理的大范围控制环路和由处理器 230 管理的灵敏控制环路)的相应优点,以实现最大的效应。从而,如果下一期望温度变化是超过灵敏控制环路的能力非常大的温度变化,则大范围温度控制环路的效应将占据主导。类似地,如果下一期望温度范围是非常快速的温度变化,这种变化对于大范围温度控制环路 229、230 来说太快,则大范围温度控制环路甚至无法作出响应,而灵敏温度控制环路 229、230 实现了所需的温度变化。

[0129] 这一概念在图 22A 和 22B 的示例中描述。图 22A 示出了处理方法所需的温度-时间分布特性的示例。其包括温度的多次缓慢但非常大的上升(从温度 T1 到温度 T2),该上升由 Ta 和 Tb 之间插入一系列尖锐台阶。在峰值处(T3),温度改变沿着具有负变化速率的圆弧接着是具有正变化速率的另一圆弧(在温度 T4 附近)。图 22A 的温度刻度使得利用在图 21 的步骤 285a、285b 中的背面气体压强,灵敏控制处理器 230 不能从 T1 变化到 T2,因此该大的变化由大范围控制处理器 224 在步骤 286a、286b 中作出。然而,图 21 的时间刻度使得大范围控制处理器 224 不能实现 Ta 和 Tb 之间的尖锐台阶。由这些尖锐台阶代表的小的偏离是由灵敏控制处理器 230 在 285a、285b 的步骤中作出的,这些小的变化叠加在由大范围控制处理器 224 作出的从 T1 到 T2 的长期温度上升上。类似地, T3 和 T4 附近的温度分布特性的尖锐圆弧路径不能通过缓慢地移动大范围温度控制环路来仿真。灵敏温度控制环路处理器 230 提供仿真温度分布特性中的这些弧形路径所需的精细响应(在图 21 的步骤 285a、285b 中)。为此,对应于单个处理循环的时间段的灵敏温度控制处理器 230 的时间分辨率可以在描绘图 22A 的期望温度分布特性的弧形路径时产生一种阶梯效应(如果这些变化发生在较小时间段上),如具有阶梯外观的图 22B 的相应部分中所指示。通常,由灵敏控制处理器 230 在执行图 21 的框 285a、285b 的步骤时实现的校正或小的精细变化被叠加在由大范围温度控制处理器 224 在执行图 21 的框 286a、286b 的步骤时作出的长期的大的温度变化上。

[0130] 图 23A-23B 示出了能够执行图 21 的处理的图 7 的装置的修正。在图 23A-23B 中,上述类型的热模型 288 可由图 7 的装置访问,并且具体而言由以下处理器中的任何一个或全部访问:主控制处理器 232、大范围反馈控制环路处理器 224 和灵敏反馈控制环路处理器 230。如果灵敏和大范围控制环路处理器 230、224 都要访问热模型 288,则灵敏和大范围控制环路处理器 230、224 优选地通过主处理器 232 访问热模型 288,从而使得主处理器 232 能够执行可能必需的任何仲裁。对应于当前处理条件的输入在热模型的输入 289 处接收。基于这些输入,热模型 299 生成随时间演变的空间温度分布 $T(z, t)$, $T(z, t)$ 可例如用于预测稳定状态温度或被搜索以查找可能导致实现期望温度的温度控制设置。

[0131] 如果处理器 230 正在执行图 19 的处理,则其在模型 288 的模型输入 261 处请求从 $T(z, t)$ 获得在等离子体点火后经过某段时间达到的稳定状态晶片温度,并且该稳定状态温度被定义为目标温度。另一方面,如果处理器 230 正在执行图 21 的处理,则根据(例如图 22 的)用户分布特性的当前时刻的期望温度被施加到模型输入 261。在任何一种情况下,

处理器 230 都从热模型 288 的输出 263 获得对背面气体压强的校正,该校正将会使晶片温度更接近于期望温度。到压强阀 229 的相应命令在处理器 230 的输出 265 处发送。

[0132] 图 24 是热模型 288 的一个可能实施例的简化示意性框图。模型被划分为对应于晶片 110 和蒸发器 200 之间的热路径的多层。层 290 代表晶片上的热负载,并且被指定为热流率。该热流率是施加到反应装置的 RF 功率的函数,并且可以由本领域技术人员容易地确定。后续层被表示为热阻和热容。热阻是层的维度及其热阻率或热导率的函数。热容是层的比热、密度和维度的函数。层 291 将晶片 110 表示为热阻 291a 和热容 291b。层 292 将晶片 110 和 ESC 圆盘 20 的顶面之间的界面表示为可变热阻 292a(其随背面气体压强改变)和热容 292b。层 293 将 ESC 圆盘 10、20 表示为圆盘热阻 293a 和热容 293b。层 294 将圆盘 10 和 ESC 底座 5 之间的键合或界面表示为热阻 294a 和热容 294b。层 295 将 ESC 底座 5 表示为底座热阻 295a 和底座热容 295b。可选地,模型 288 可以将内部蒸发器 200 的冷却动作表示为由热流率指定的热沉 296。该热流率可基于查找表从膨胀阀 210 的设置中确定,该查找表由本领域技术人员根据测量数据预先构造。

[0133] 热模型 288 必须被提供以必要的初始条件以仿真通过 ESC 105 的热流。为此,模型 288 的输入 289 接收以下输入,在一个示例中,这些输入可由控制处理器 230 提供:背面气体压强(根据阀 229 的设置)、ESC 底座 5 的初始温度、晶片 110 或圆盘 20 的初始温度、代表晶片 RF 热负载的热源 290 的功率以及(可选的)热沉 296 的冷却速率(功率)。

[0134] 随后可以查询热模型 288(例如通过处理器 230)以查找特定信息,如作为时间的函数的晶片 110 处的温度,以确定或预测在等离子体点火后的稳定状态温度(这仅是示例)。这对应于图 19 的框 271 的步骤。或者,可以搜索热模型 288 以查找使晶片温度倾斜到期望值的最佳背面气体压强(或阀 229 的设置)。该后一特征对应于图 19 的框 272 的步骤和/或图 21 的框 286 的步骤。

[0135] 或者,在热模型 288 的健全版本中,模型 288 可以在选定的时间窗口内,对于每个离散的处理采样时刻 t 产生沿 Z 轴(即,层 291 到 295 的层叠的方向)的温度的空间分布 $T(Z)$ 。这一空间温度分布的收集对应于依赖于时间的空间温度分布 $T(Z, t)$ 。其时间演变在图 25 中定性示出,表明了高温区随时间的进展,高温区在等离子体点火时位于晶片处,并且随时间稳定地向 ESC 底座 5 传播。热模型可以对于不同的假定背面气体压强值产生不同的温度分布 $T(Z, t)$ 。利用这种健全信息,热模型 288 或控制处理器 230 可以搜索对于不同背面气体压强设置获得的不同的分布 $T(Z, t)$,以查找提供了晶片处(或其他指定位置处)的期望稳定状态温度的理想背面气体压强设置。

[0136] 已经参考采用传热方程的集总元件技术描述了图 24 的模型,在传热方程中,从每层的维度和热属性推断出每层的热特性。然而,热响应可以从一组查找表中表征,这组查找表从现有的测量数据中经验地构造,该测量数据定义了作为时间和热流率两者的函数的层响应(例如,层上的温差)。这种查找表代表了在图 26 中示出的三维表面,该表面位于由对应于热流率、时间和层上的温差的三个正交轴限定的空间中。这样,每层可以由一个(或多个)查找表或在图 26 中示出的一类表面来表征。然而,其热响应可由用户可控的外部参数改变的层(如其热阻由背面气体压强控制的晶片-ESC 界面层 292)更加复杂。具体而言,外部参数的每种可能设置生成了不同的查找表或图 26 中所示的一类表面。如图 27 所示,两个表面或查找表代表由阀 229 进行的背面气体压强的许多可能设置中的两种的温度行为。

许多这样的查找表将代表一个背面压强值范围内的热行为。本领域技术人员对于特定的反应装置设计,可以根据测量数据容易地生成这种查找表。

[0137] 再次参考图 23A-23B、图 24 的热模型 288 可以用于图 13 的多温区反应装置,该装置维护了独立的背面气体压强控制下的多个温区,并且独立的冷却剂蒸发器具有独立的每区中的温度传感器组,如上所述。如果图 24 的热模型 288 与图 13 的多区反应装置相组合,则模型 288 可以由多个热模型 288-1、288-2 等组成,这多个热模型仿真静电吸盘 105 的多个相应温区的不同热行为。每个相应的模型被每个温区中的灵敏和大范围反馈温度控制处理器以上述针对图 7 的单个温区反应装置所述的方式采用。从而,对于图 13 的每个温区,个别地、独立地执行图 19 和 21 的处理,并且每区中的处理使用热模型 288-1、288-2 等中的相应一个。

[0138] 用于补偿预定 RF 热负载变化的前馈温度控制:

[0139] 某些等离子体处理方法可能需要改变晶片上的 RF 热负载以在处理中的不同步骤实现不同的处理效果,而不改变晶片温度。问题在于静电吸盘的热质量给冷却系统的温度或冷却速率的改变和因此对晶片温度的影响之间施加了大的(例如,1 到 2 分钟的)延迟。从而,大范围温度控制环路(使用蒸发器 200)具有如此缓慢的响应,以致于其在不允许晶片温度重新获得稳定之前产生明显的漂移的情况下不能补偿晶片上的 RF 热负载的突变。另一方面,取决于初始 RF 热负载和 ESC 底座温度,通过背面气体压强阀 229 进行的灵敏温度控制(例如,灵敏温度控制环路)可能不能补偿晶片上 RF 热负载的大的变化。具体而言,如果 ESC 底座温度太高或初始 RF 热负载太大,则只控制背面气体压强阀 229(“灵敏温度控制”)可能不足以补偿 RF 热负载的突然性的大的增大。相反,如果 ESC 底座温度太低或初始 RF 热负载不足,则灵敏温度控制可能不足以补偿 RF 热负载的突然性的大的减小。

[0140] 根据本发明的一方面,通过分析(在热模型 288 中)RF 热负载的下次预定变化的大小和时间,解决了这些问题。热模型 288 产生 ESC 底座温度的校正,其最可能补偿 RF 热负载的变化并维持恒定的晶片温度。热模型预测该温度校正传播经过 ESC 105 并到达晶片 110 所花费的时间量。温度控制器 228 足够早地(基于所预测的传播时间)实现所推荐的 ESC 底座温度的变化,从而使 ESC 底座的温度漂移在 RF 功率水平 /RF 热负载的预定变化时到达晶片。

[0141] 该前馈特征在图 28A 中示出,并且大部分可以由大范围控制环路和其处理器 230 执行。首先,热模型 288 被提供以当前处理条件,如 RF 功率(RF 晶片热负载)、晶片温度、ESC 底座温度、背面气体压强等等(图 28A 的框 300)。如果当前的等离子体处理方法要求在某个后续时刻进行 RF 功率水平的变化,则该 RF 功率变化的大小和时间被输入到热模型 288(图 28A 的框 301)。随后,热模型 288 仿真该计划的 RF 功率变化对晶片温度的影响。搜索热模型 288 以查找将精确补偿 RF 功率水平的计划变化的 ESC 底座温度的变化。这是通过改变(在到热模型 288 的输入 289 处)ESC 底座温度并观察由模型 288 仿真的对晶片温度行为的改变影响来实现的。选择最佳补偿 RF 热负载的变化的 ESC 底座温度(图 28A 的框 302)。另外,热模型 288 可以计算或指示 ESC 底座 5 的温度变化到达晶片 110 所需的过渡时间(图 28A 的框 303)。然后,补偿 ESC 底座温度的变化,该步骤是在计划的 RF 功率变化的时刻提前定货交付时间(leadtime)执行的,该定货交付时间等于补偿底座温度变化的底座到晶片过渡时间(图 28A 的框 304)。(该时刻的提前可被包括在框 302 的步骤的仿

真中。)为了在 ESC 底座温度的补偿变化从 ESC 底座 5 传播到晶片 110 的时段期间避免晶片温度的漂移,灵敏温度控制环路 229、230 维持恒定的晶片温度(图 28A 的框 305)。例如,如果补偿的底座温度变化使得 ESC 圆盘温度在 RF 功率水平的计划变化之前过早下降,则背面气体压强将被灵敏温度控制处理器 230 自动减小以减小来自晶片的热传导,从而保持该时段期间的晶片温度恒定。

[0142] 因为在计划的 RF 功率水平变化提前某一对应于底座到晶片过渡时间的定货交付时间的时刻在框 304 的步骤中执行了补偿 ESC 底座温度的校正,所以大范围温度控制处理器 230 有机会监视补偿温度漂移的传播,并对底座温度的变化进行多次的精细校正。因此,通过执行图 28B 中所示的反复校正循环提高了性能。该校正循环可包括同时监视沿 ESC 105 内部的 Z 轴呈轴对齐方式周期性放置的多个温度传感器,如图 7 的温度传感器 220、221(尽管在该步中也可以采用多于两个轴向对齐的周期间隔的传感器)。从这些多个同时的测量结果中,可以导出即时温度分布特性 $T(Z)$ (图 28B 的框 306)。该即时温度分布被输入到热模型 288(图 28B 的框 307)。利用框 307 的步骤的即时温度分布作为更新后的“初始”条件,热模型 288 生成随时间演变的温度分布特性 $T(Z, t)$ 的新更新的版本。由此,热模型 288 可以预测在预定 RF 功率水平变化的时刻(t_c)周围晶片温度的行为(图 28B 的框 309)。利用这些结果,将时刻 t_c 的预测晶片温度(或其平均值)与初始晶片温度相比较以确定早先采取的校正动作将会导致晶片温度在时刻 t_c 或略晚于时刻 t_c 是过校正还是欠校正。如果预测到欠校正(框 311),则大范围温度控制环路减小 ESC 底座 5 处的补偿温度变化,而如果预测到过校正(框 312),则增大补偿温度变化。其后时间增加一个循环时间(框 313)。如果时间已到达 t_c ,即 RF 功率预定变化的时刻(框 314 的“是”分支),则中断前馈处理,并且重新恢复正常的晶片温度控制(框 315)。否则(框 314 的“否”分支),处理循环回到框 306 的步骤。

[0143] 图 29 示出了空间温度分布的时间演变,其中图 28A 和 28B 的前馈特征通过在时刻 t_0 减小 ESC 底座温度来对计划的所施加的 RF 功率在未来时刻 t_c 的陡升作出响应。在连续时刻(t_1 、 t_2 、 t_3 等),温度的陡降沿 Z 轴的方向向晶片表面传播。最大温度凹陷区在时刻 t_c 到达晶片表面,从而在该理想化的示例中没有过校正或欠校正。图 30A 到 30C 的同期时间图示出了过校正和欠校正的效果。图 30 示出了施加的 RF 功率与时间的函数关系,其中在时刻 t_c 发生功率的陡升。图 30B 示出了随时间的晶片温度行为,其中 ESC 底座温度的校正性陡降采取的太迟或者温度变化不足量。在任何一种情况下,晶片温度在时刻 t_c 开始爬升到期望温度之上,并且仅在作出明显偏离后才开始向期望水平返回。图 30C 示出了随时间的晶片温度行为,其中 ESC 底座温度的校正性陡降采取的太早或者温度变化过量。在这种情况下,晶片温度在时刻 t_c 开始下降,并且仅在作出明显偏离后才开始向期望水平返回。在理想情况下,晶片温度在时刻 t_c 的 RF 功率陡升的之前、期间和之后都保持恒定。

[0144] 用于温度分布特性的前馈控制:

[0145] 某些等离子体处理方法可能需要在等离子体处理期间改变晶片温度以在处理中的不同步骤处实现不同的处理效果。利用这种改变,处理方法可能使(也可能不使)晶片上的 RF 热负载保持不变。问题在于静电吸盘的热质量给冷却系统的温度或冷却速率的变化和因此对晶片温度的影响之间施加了大的(例如,1 到 2 分钟的)延迟。从而,大范围温度控制环路(使用蒸发器 200)具有如此缓慢的响应,以致于其可能不能按处理方法所要求进

行突然性的晶片温度变化。另一方面,取决于初始 RF 热负载和 ESC 底座温度,灵敏温度控制环路 229、230 可能不能进行可能为处理方法所需的极大的晶片温度变化。具体而言,如果 ESC 底座温度太高或初始 RF 热负载太大,则灵敏控制环路 229、230 可能不能执行处理方法所需的晶片温度的较大降低。相反地,如果 ESC 底座温度太低或初始 RF 热负载不足量,则灵敏控制环路 229、230 可能不能执行处理方法所需的晶片温度的较大升高。

[0146] 根据本发明的一方面,通过分析(在热模型 288 中)处理方法所要求的晶片温度的下一次预定变化的大小和时间,解决了这些问题。如果温度变化超过了灵敏温度控制环路 229、230(背面气体压强控制)的能力,则采用大范围控制环路 224、210(制冷控制)来实现期望的温度变化。在这种情况下,热模型 288 产生最可能实现期望的晶片温度变化的 ESC 底座温度。热模型预测该温度校正传播经过 ESC 105 并到达晶片 110 所花费的时间量。温度控制器 224 足够早地(基于所预测的传播时间)实现所推荐的 ESC 底座温度的变化,从而使 ESC 底座的温度漂移在晶片温度的预定变化时到达晶片。就在这之前,灵敏温度控制环路 229、230(使用背面气体压强)维持晶片温度恒定,直到晶片温度变化的预定时刻为止。

[0147] 然而,如果灵敏温度控制 229、230(背面气体压强)自身能够进行期望的晶片温度变化,则灵敏控制环路 229、230 被要求在预定时刻执行变化,在这种情况下,大范围控制环路 224、210 可以保持 ESC 温度恒定,或者预先改变 ESC 温度以用于随后的晶片温度变化。

[0148] 该前馈特征在图 31A、31B 和 31C(下文中统称为图 31)的流程框图中示出,并且可以由图 7 的主处理器 232 利用图 24-26 的热模型来执行。首先,时间值 t_0 被设为处理开始时刻(图 31 的框 320)。随着晶片的等离子体处理开始,并且在反应装置中建立初始处理方法参数(室压强、源和偏置功率、晶片温度等),处理方法被检查以找到晶片温度的下一次预定变化及其预定时刻 t_1 (图 31 的框 322)。确定灵敏温度控制环路 229、230 是否能够实现计划的晶片温度变化(框 324)。该确定可包括在变化是温度升高的情况下确定晶片上的 RF 热负载是否足够高(框 324a),或者在变化是温度降低的情况下确定 ESC 温度是否足够低(框 324b)。如果计划的温度变化超过了灵敏温度控制环路 229、230 的当前能力(框 324a 或 324b 的“否”分支),则使用大范围温度控制环路 224、210。首先,查询热模型 288 以找到最有可能产生期望的晶片温度变化的 ESC 底座温度的变化(框 326)。该变化(通过修正膨胀阀 210)开始于某一时刻,该时刻足够使期望的温度变化传播经过 ESC 105 并在预定时刻 t_1 到达晶片(框 328)。同时,直到时刻 t_1 为止,灵敏温度控制环路 229、230 被命令将晶片温度维持在初始温度(框 330)。为此,灵敏温度控制处理器 230 修正背面气体压强阀 229(以改变晶片-ESC 界面的热导)以便补偿 ESC 温度的变化。然后,在时刻 t_1 ,灵敏温度控制处理器 230 被命令允许晶片温度跟随 ESC 温度的变化以便实现期望的晶片温度变化(框 332)。使当前时刻前进超过时刻 t_1 (框 334),并且处理循环回到框 322 的步骤。

[0149] 现在返回到框 324 的步骤,如果灵敏温度控制环路 229、230 被发现能够进行期望的晶片温度变化(框 324a 或 324b 的“是”分支),则处理进行到框 336 的步骤,其中灵敏温度控制处理器 230 被命令等待直到时刻 t_1 ,然后进行期望的晶片温度变化(通过修正背面气体压强阀 229)。然而,在时刻 t_1 之前,执行推测步骤(框 338),其主要目的是对于晶片温度的非常大的预定摆动确保及时准备好 ESC 温度,以便允许经过 ESC 105 的热传播延迟。该步骤使得要求 ESC 温度相应变化的晶片温度的大的预定摆动没有被及时解决以便允

许从 ESC 蒸发器 200 到晶片 110 的热传播延迟的可能性最小（或消除了这种可能性）。在图 31B 的框 338 的推测步骤中，处理方法被在时刻 t_1 前扫描以找到晶片温度的下一次变化及其发生的预定时刻 t_2 。确定灵敏温度控制环路 229、230 是否能够进行该下一次变化。该确定可包括在变化是温度升高的情况下确定晶片上的 RF 热负载是否足够高（框 338a），或者在变化是温度降低的情况下确定 ESC 温度是否足够低（框 338b）。如果确定灵敏温度控制环路 229、230 能够进行期望的晶片温度变化（框 338a 或 338b 的“是”分支），则通过修正背面气体压强阀 229 来实现变化以实现期望的温度变化（框 339）。使当前时刻前进超过 t_1 （框 340），并且处理循环回到框 322 的步骤。然而，如果确定灵敏温度控制环路 229、230 不能进行期望的晶片温度变化（框 338 的“否”分支），则 ESC 温度必须被大范围温度控制环路 228、210、200 等改变，以实现期望的温度变化。为此，热模型 288 被用于确定将产生期望的晶片温度变化的 ESC 底座温度的变化（框 342），并且该变化是通过在当前时刻或某一后续时刻修正膨胀阀 210 来执行的，该后续时刻足够早以允许经过 ESC 105 的热传播延迟（框 344）从而实现预定时刻 t_2 所需的变化。在间歇期间，灵敏温度控制处理器 230 被命令按如下方式调整晶片温度（图 31C 的框 346）：从当前时刻直到时刻 t_1 ，按需要改变背面气体压强以使晶片温度对 ESC 温度的任何变化保持恒定（框 346a）。在时刻 t_1 ，背面气体压强陡变以使晶片温度在时刻 t_1 按处理方法中规定的变化（框 346b）。从时刻 t_1 直到时刻 t_2 ，改变背面气体压强以补偿 ESC 温度的变化，并使晶片温度保持恒定在新的温度（框 346c）。在时刻 t_2 ，灵敏温度控制处理器 230 停止其保持晶片温度恒定的努力，并允许（通过增大背面气体压强以增加热导）新的 ESC 温度根据时刻 t_2 规定的变化驱动晶片温度（框 346d）。然后，使当前时刻前进超过时刻 t_2 （框 348），并且处理循环回到框 322 的步骤。处理以这种方式继续，直到处理方法完成。

[0150] 在图 31 的处理中，在处理方法中指定每个连续的温度变化，并且框 324 的步骤确定灵敏温度控制环路 229、230（使用背面气体压强）自身是否能够进行期望的晶片温度变化，如上所述。如果答案总是“是”（至少对一定数目的连续温度变化），则 ESC 底座温度可被归于恒定角色，并且进行的只有这些变化是背面气体压强阀 229 的连续变化。这对应于图 31 的处理中的连续反复地采取框 324a 或 324b 的“是”分支的情形。该结果在图 32A 和 32B 中示出，其中 ESC 底座温度保持在由图 32A 的虚线指示的恒定水平（例如，通过使图 7 的膨胀阀 210 保持在恒定设置），而背面气体压强（图 32B）处于修正状态以跟随由处理方法指定的晶片温度的连续变化。在 ESC 充当晶片上的 RF 热负载的热沉的通常情况下，相应的晶片温度行为（图 32A 的实线）表现得与背面气体压强行为（图 32B）相反。（有一种特殊的但是少有的情形，其中所需的晶片温度是如此之高，或者 RF 热负载是如此之低以至于 ESC 105 被用作热源。）因此，图 32A 和 32B 对应于本发明的简单模式，其中 ESC 底座温度被保持在恒定水平，而晶片背面气体压强按处理方法需要的改变。该模式可以利用耦合到 ESC 105 的任何冷却设备实现，如本发明的图 7 的恒温制冷环路或传统的现有技术的制冷装置。

[0151] 图 33A 和 33B 示出了在步骤 324 发现灵敏控制环路 229、230 不能进行需要的晶片温度变化的情况下，底座和晶片温度行为以及背面气体压强分布特性。在这种情况下，大范围控制环路 228、210、200 等在框 328 的步骤中在预定时刻变化之前开始改变 ESC 底座温度。这使得 ESC 底座温度改变（即，在晶片温度降低的即将到来的温度变化的情况下是下

降),如图 33A 中的虚线所示。同时,在框 330 的步骤中,灵敏控制环路 229、230 保持晶片温度恒定,直到规定的变化时刻(图 33A 的实线)。这是通过利用背面气体压强的相应变化(减小)来使 ESC 底座温度变化偏移而实现的,如图 33B 所示。在变化时,使背面气体压强陡升以使得晶片能够跟随 ESC 温度的最新变化。

[0152] 图 34A 和 34B 示出了图 31 的框 338-346 的推测环路的操作。在时刻 t_0 ,框 338 的步骤发现,即使灵敏温度控制环路可以进行下一次晶片温度变化(在时刻 t_1 预定的变化),其也不能进行后续的在时刻 t_2 预定的变化。因此,判断使用图 7 的大范围温度控制环路 224、210、200 等来实现期望的晶片温度变化。而且,在该示例中,发现所需的 ESC 底座温度的变化必须立即开始以便使其完全的效果在时刻 t_2 到达晶片。因此,在时刻 t_0 进行膨胀阀 210 的所需位置的变化,从而使 ESC 温度开始改变(例如在该示例中是降低),如图 34A 的虚线所示。图 34A 示出了 ESC 温度(在晶片附近处测量)刚好在时刻 t_2 之前达到所需水平,因此其后被保持在该新的温度。然而,根据图 31 的步骤 346a,从时刻 t_0 到时刻 t_1 ,背面气体压强(图 34B)减小以保持晶片温度恒定。根据图 31 的框 346b 的步骤,在时刻 t_1 背面气体压强陡变到不同水平以实现在时刻 t_1 预定的晶片温度变化。根据图 31 的框 346c 的步骤,从时刻 t_1 到时刻 t_2 ,通过改变背面气体压强使晶片温度保持在该新的水平,以弥补改变 ESC 温度对晶片的影响。最终,在时刻 t_2 ,背面气体压强被恢复到高的热导水平,以允许新的 ESC 温度带来在时刻 t_2 预定的晶片温度变化。

[0153] 使用灵敏和大范围温度控制环路两者来补偿预定 RF 热负载变化的前馈温度控制:

[0154] 尽管图 31 的前馈处理被描述为执行晶片温度的预定变化,但是其也可被修正为抵消晶片上 RF 热负载的预定变化。这种处理在图 35 中示出,现在加以描述。第一步(框 420)定义当前时刻 t_0 为处理开始时刻。下一步(框 422)从处理方法的温度分布特性中确定在其规定的发生时刻(时刻 t_1)时即将到来的晶片上 RF 热负载的变化。在框 424 的步骤中,确定灵敏控制环路 229、230 是否能够抵消 RF 热负载的变化以保持晶片温度恒定。为此,可以进行下面的确定:变化是否是 RF 热负载的增大,当前的 ESC 底座温度是否足够低(框 424a);变化是否是 RF 热负载的减小,当前的 RF 热负载是否足够高,或者变化后的 RF 热负载是否足够高(框 424b)。

[0155] 如果发现灵敏温度环路不能满足 RF 热负载的变化(框 424a 或 424b 的“否”分支),则必须替代使用控制 ESC 温度的大范围温度控制环路 224、210、200 等。因此,下一步(框 426)是从热模型 288 中确定抵消 RF 热负载的变化并保持晶片温度恒定所需的 ESC 底座温度的变化。然后及时执行该 ESC 底座温度的变化(通过控制制冷环路膨胀阀 210),以使温度变化在时刻 t_1 或时刻 t_1 之前到达晶片,时刻 t_1 是规定的发生时刻(框 428)。同时,直到时刻 t_1 为止,使用灵敏温度控制环路 229、230 来针对 ESC 温度的变化将晶片保持在其当前温度下(框 430)。

[0156] 在时刻 t_1 ,RF 热负载改变的预定时刻,灵敏温度控制环路处理器 230 允许变化后的 ESC 温度抵消 RF 热负载的变化(框 432)。然后使时间因子(当前时刻)前进超过时刻 t_1 (框 434),并且处理循环回到框 422 的步骤。

[0157] 如果框 424 的步骤确定灵敏控制环路 229、230 能够满足 RF 热负载的变化(框 438a 或 438b 的“是”分支),则随后,在时刻 t_1 ,灵敏温度控制环路 229、230 改变背面气体压强以

满足 RF 热负载的变化 (框 436)。同时,在时刻 t_1 之前,处理推测 (在处理方法的 RF 功率时间分布特性中) 下一次 (例如第二次) RF 热负载的预定变化及其发生的预定时刻 (时刻 t_2), 并确定灵敏控制环路 229、230 是否能够抵消该下一次的 RF 热负载变化 (框 438)。该确定以非常类同于框 424 的步骤的方式执行。如果确定是肯定的 (框 438 的“是”分支), 则不采取动作, 并且使时间前进超过当前时刻 t_1 (框 440), 且处理循环回框 422 的步骤。

[0158] 否则, 如果发现灵敏控制环路 229、230 不能满足在时刻 t_2 预定的 RF 热负载的变化 (框 438 的“否”分支), 则必须替代使用控制 ESC 温度的大范围温度控制环路。因此, 在下一步中, 热模型 288 被用于确定抵消下一次 RF 热负载变化 (即, 在时刻 t_2 预定的变化) 以保持晶片温度恒定所需的 ESC 底座温度的变化 (框 442)。然后利用大范围控制环路 224、210、200 及时执行该 ESC 底座温度的变化, 以使温度变化在晶片温度的下一次变化的预定时刻 (时刻 t_2) 或在时刻 t_2 之前到达晶片 (框 444)。在该时间期间, 灵敏温度控制环路 229、230 针对改变的 ESC 温度调整晶片温度 (框 446)。其这样进行操作: 保持晶片温度恒定直到时刻 t_1 (即, 利用背面气体压强变化掩蔽 ESC 温度的变化) (框 446a); 在时刻 t_1 , 补偿在时刻 t_1 预定的 RF 热负载的变化 (使背面气体压强陡变到新的水平) (框 446b); 在时刻 t_1 后保持晶片温度恒定直到时刻 t_2 (即, 利用背面气体压强变化掩蔽 ESC 温度的变化) (框 446c); 在时刻 t_2 , 允许 ESC 温度的变化抵消在时刻 t_2 预定的 RF 热负载的变化 (即, 通过增大背面气体压强来增加晶片-ESC 热导) (框 446d)。其后, 使当前时间因子前进超过时刻 t_2 (框 448), 并处理循环回到框 422 的步骤。

[0159] RF 热负载和晶片温度的预定变化的同时控制:

[0160] 在某些应用中, 可能有必要同时适应由处理方法指定的某种晶片温度随时间的分布特性 (如图 32A 的实线的复杂分布特性) 以及复杂的 RF 功率 (或晶片热负载) 随时间的分布特性, 后一分布特性可能以完全不同于温度分布特性的方式变化。换句话说, 复杂的晶片温度时间分布特性可能必须在适应晶片上的 RF 热负载的预定摆动的情況下实现。这可以通过以下方式实现: 使用主处理器仲裁或叠加从两个前馈环路到大范围控制环路处理器 224 (管理图 7 的膨胀阀 210) 的不同控制命令以及从两个前馈环路到灵敏控制环路处理器 230 (管理图 7 的背面气体压强阀 229) 的不同控制命令, 同时操作图 28A-28B 的 RF 热负载前馈环路和图 31 的温度分布特性前馈环路。这种组合在下述的图 36 中示出。

[0161] 在图 36 中, (图 28A-28B 和 31 的) 两个前馈处理是基于从反应装置前进通过主处理器 232 馈送的温度测量结果实现的。在图 36 中, RF 热负载前馈处理 350 (对应于图 28A-28B) 被提供以由处理方法指定的 RF 功率或热负载的变化安排 351。温度分布特性前馈处理 352 (对应于图 31) 被提供以由处理方法指定的晶片温度变化的安排 353。这产生了用于调制冷环路膨胀阀 210 的同时命令和用于调节背面气体压强阀 229 的同时命令。主处理器 232 组合这些同时命令, 并分别通过大范围控制处理器 224 和灵敏控制处理器 230 将其转发到膨胀阀 210 和背面气体压强阀 229。

[0162] 尽管通过参考优选实施例详细描述了本发明, 但是应当理解, 在不脱离本发明的真实精神和范围的前提下, 可以进行变化和修改。

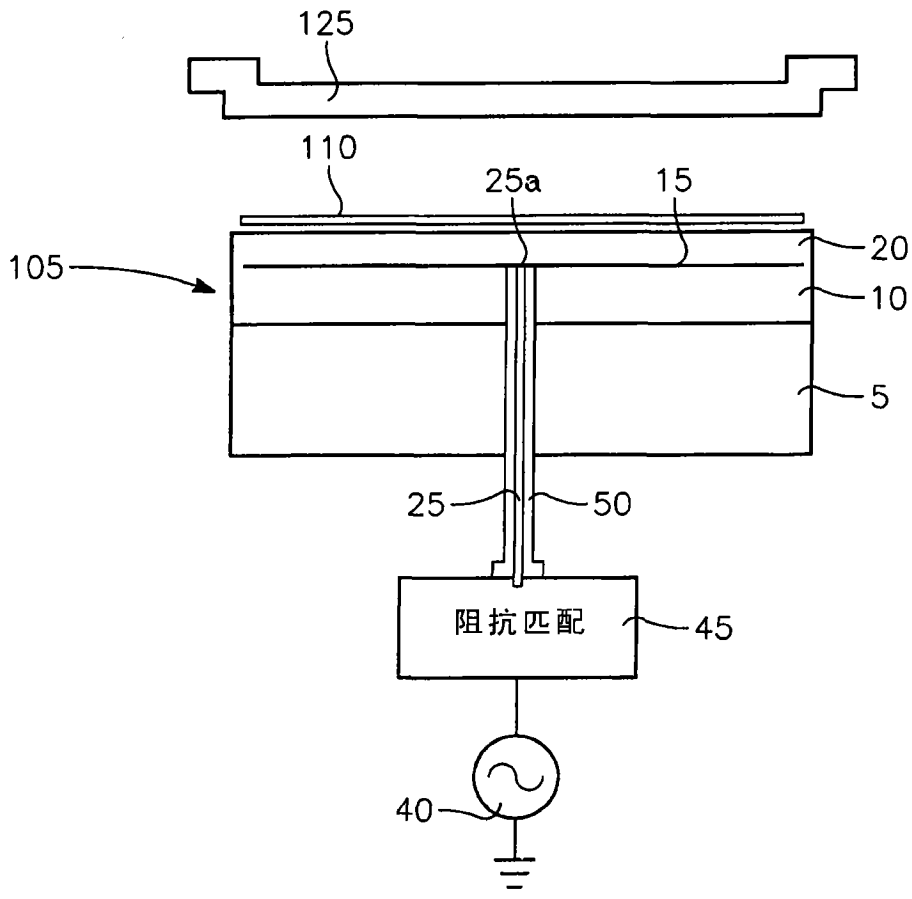


图 2

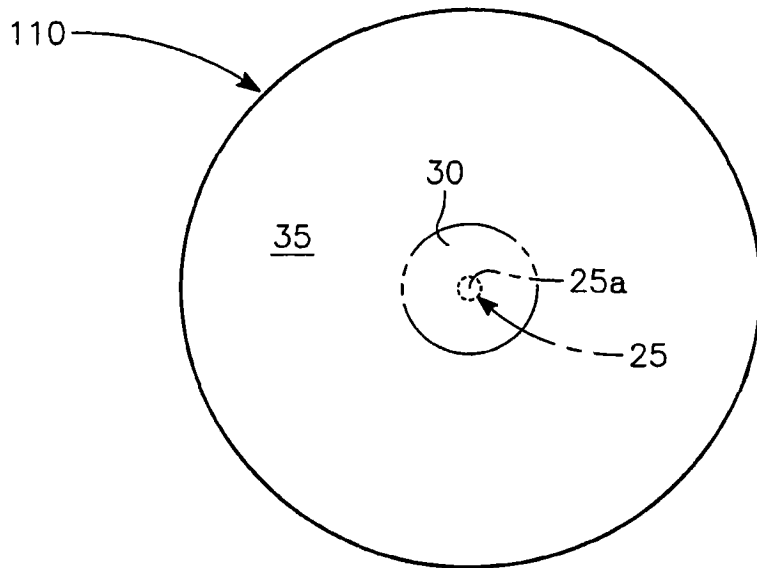


图 3

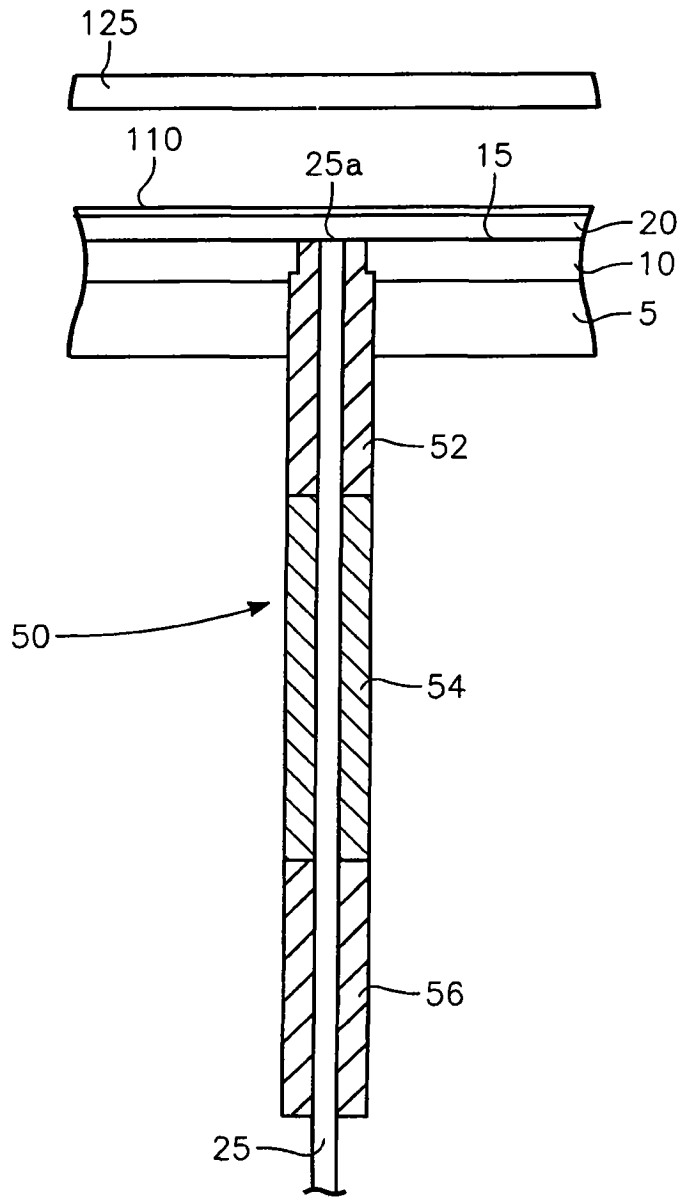


图 4

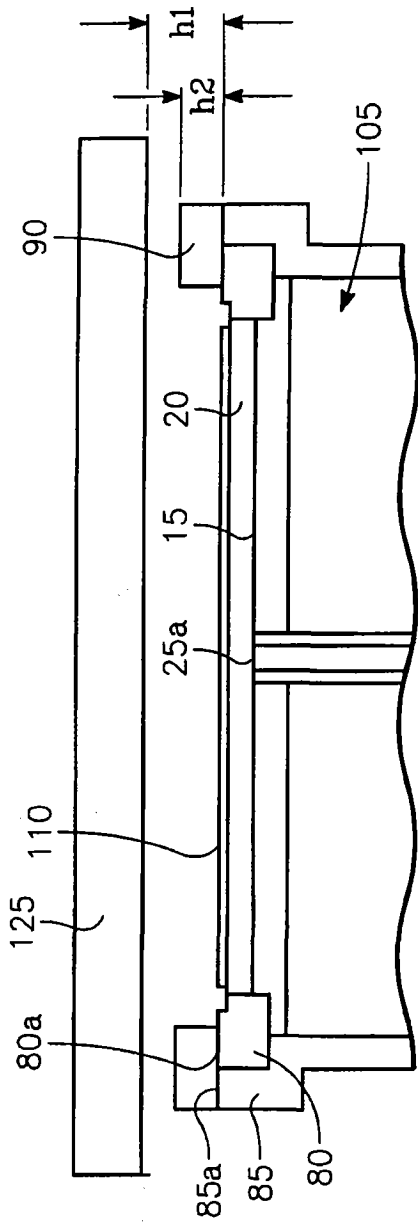


图5

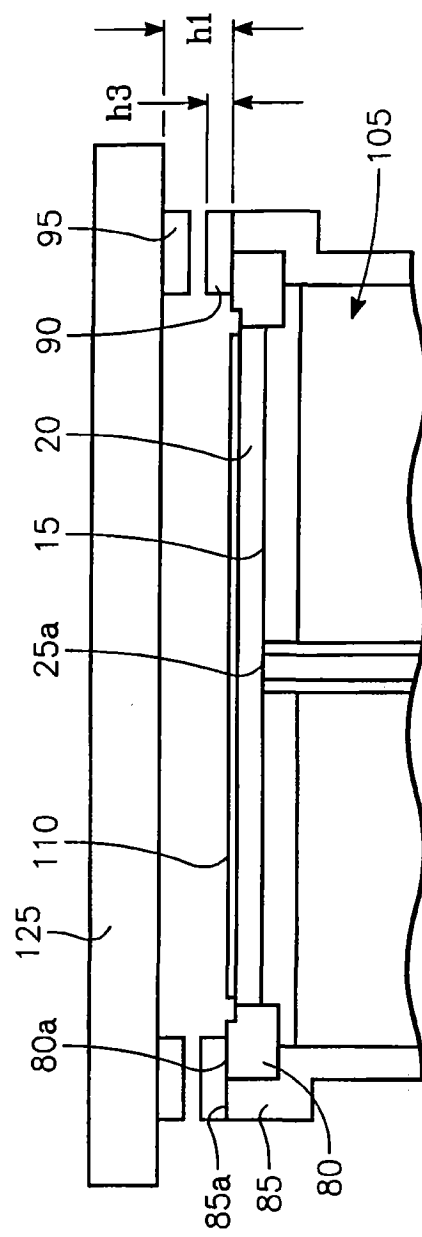


图6

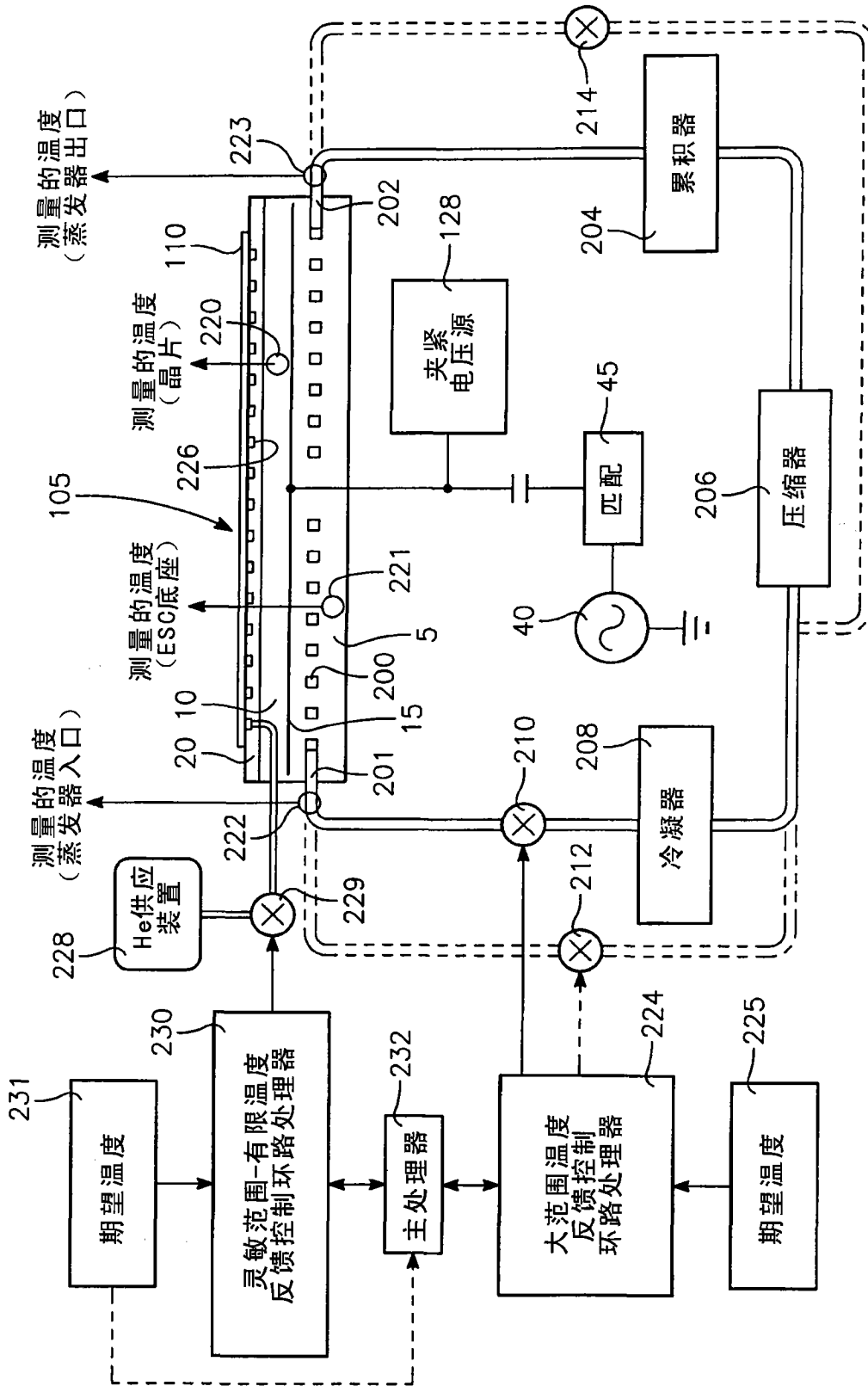


图7

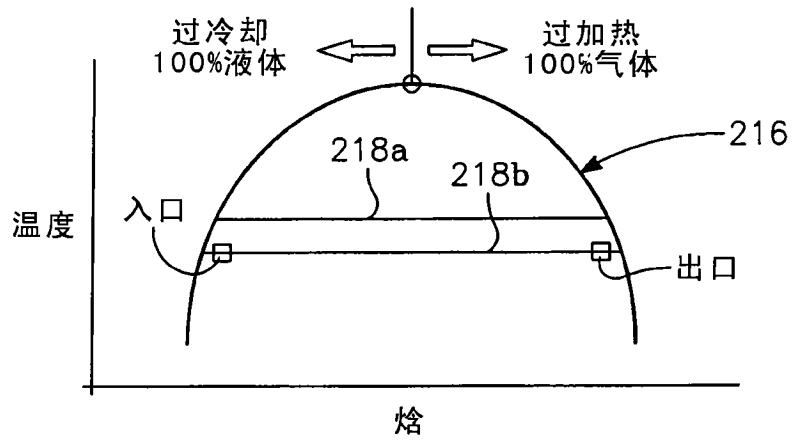


图 8

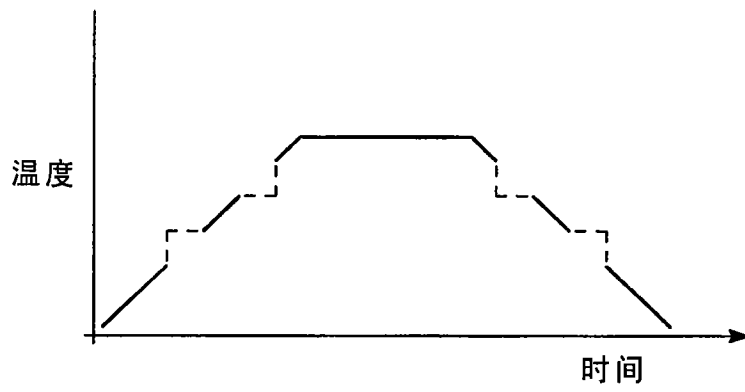


图 10

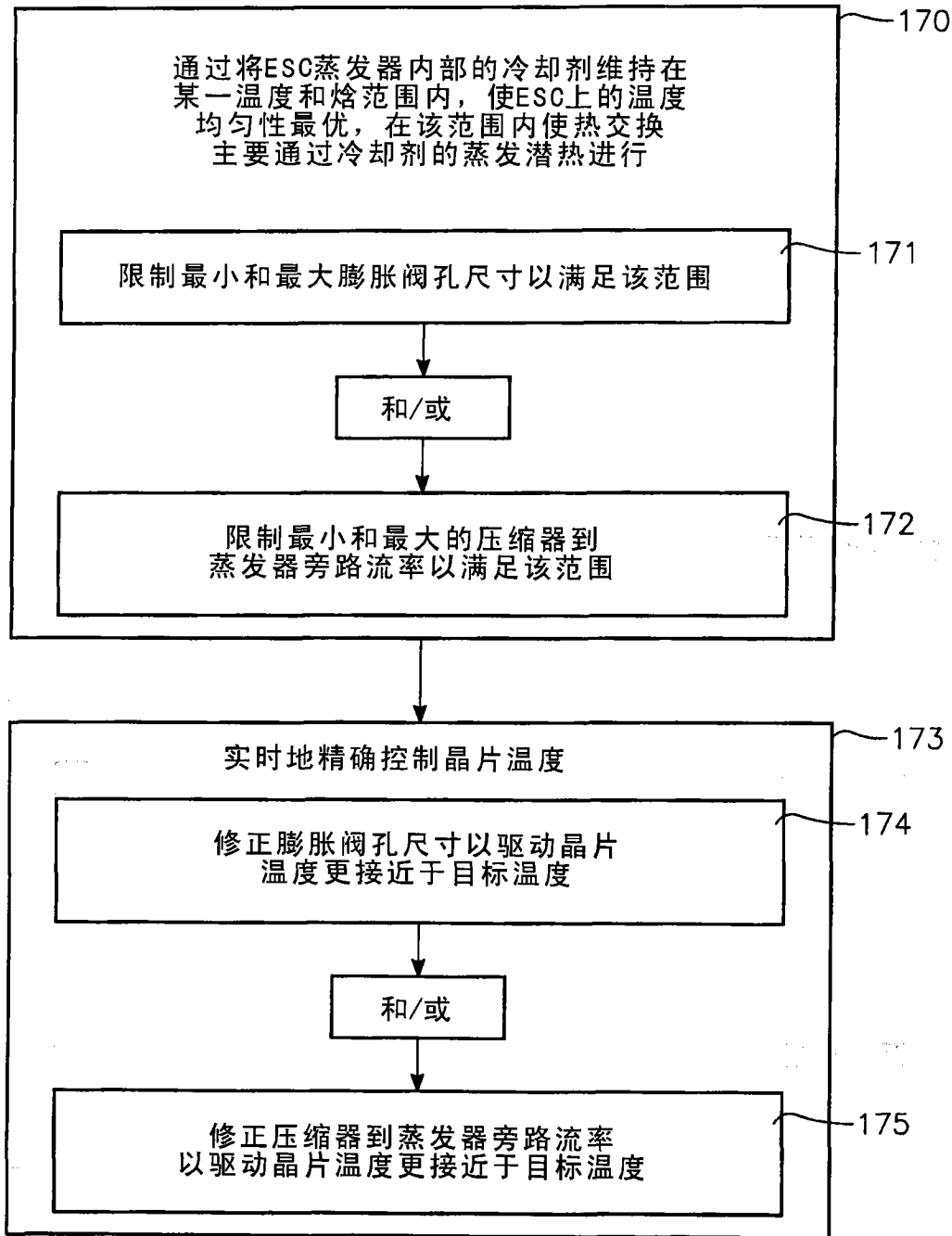


图 9

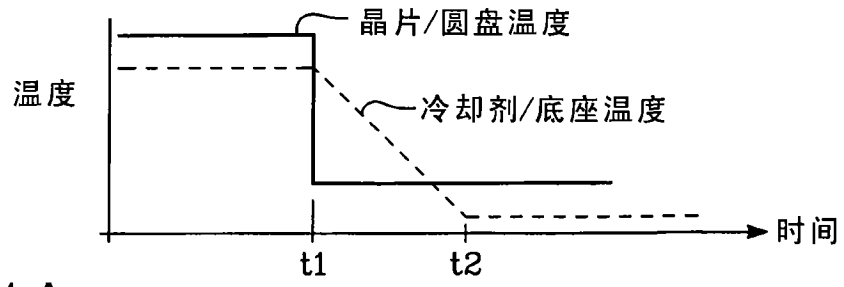


图11A

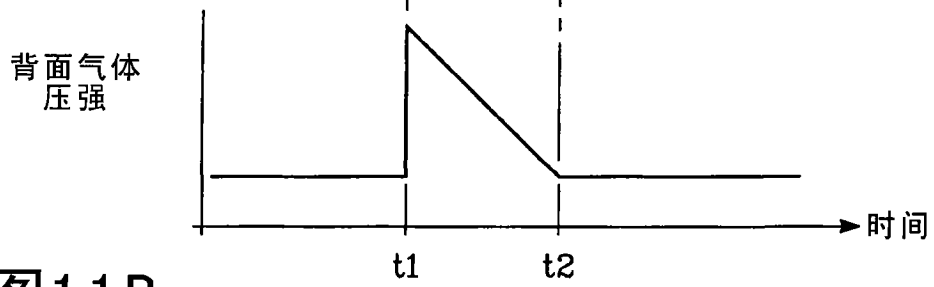


图11B

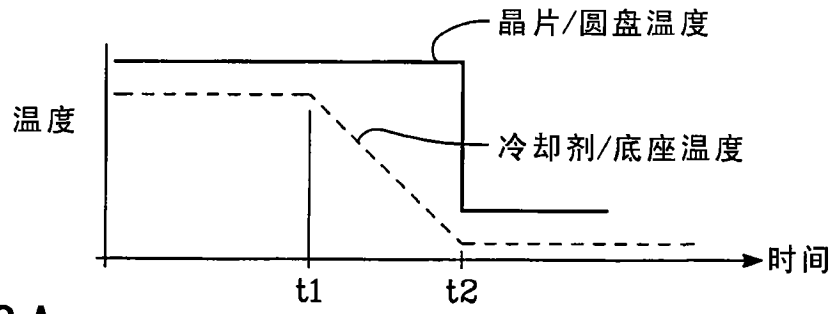


图12A

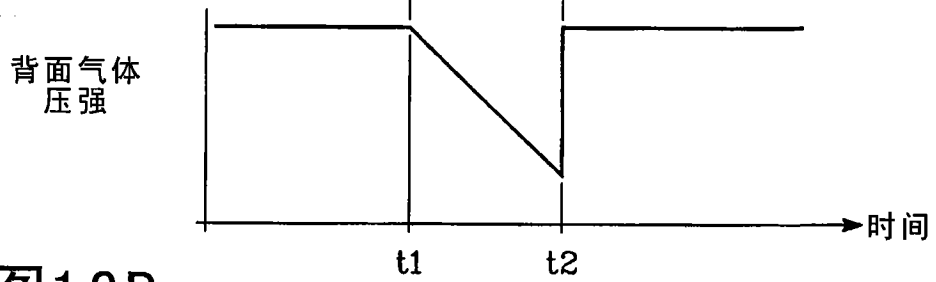


图12B

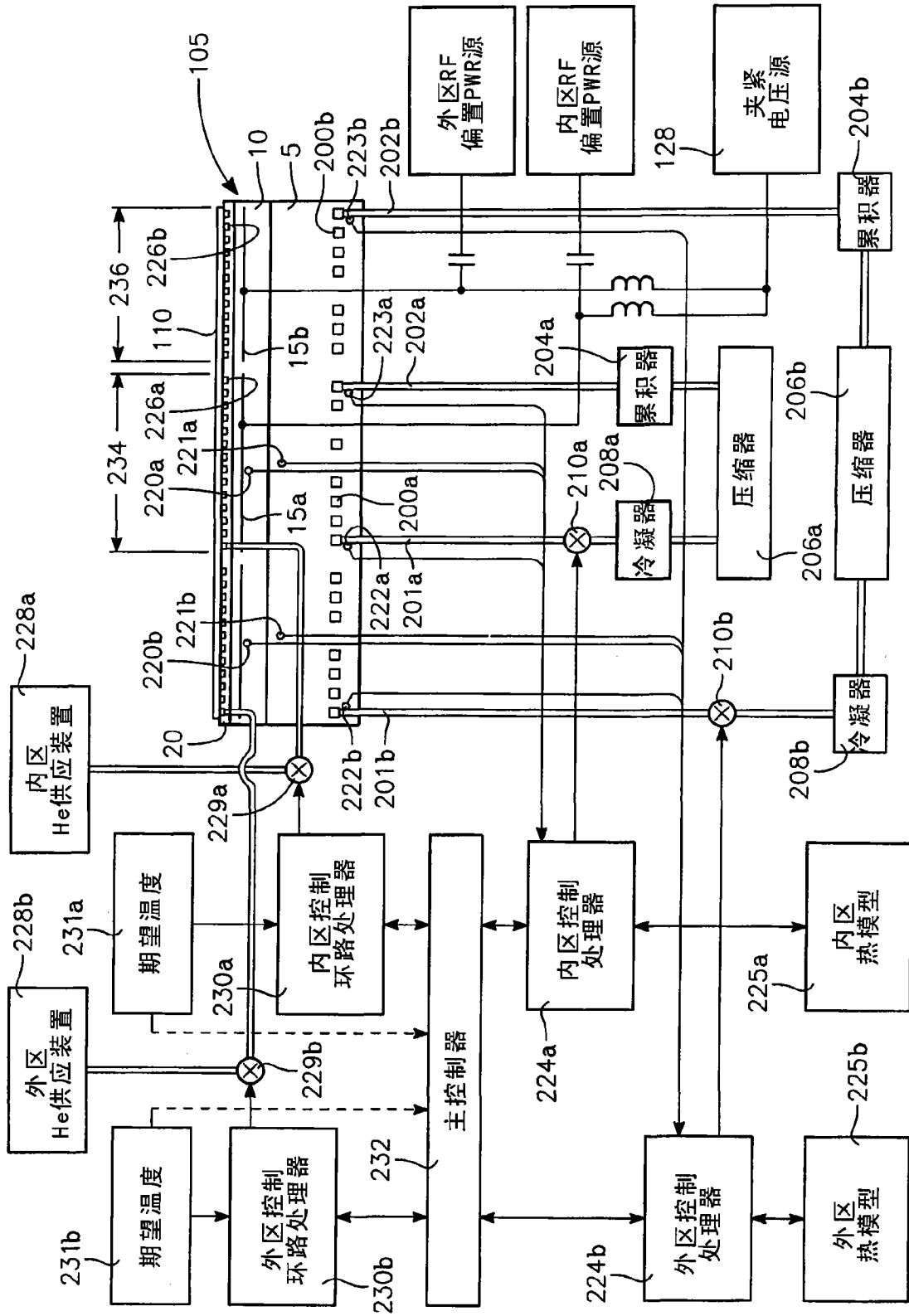


图13

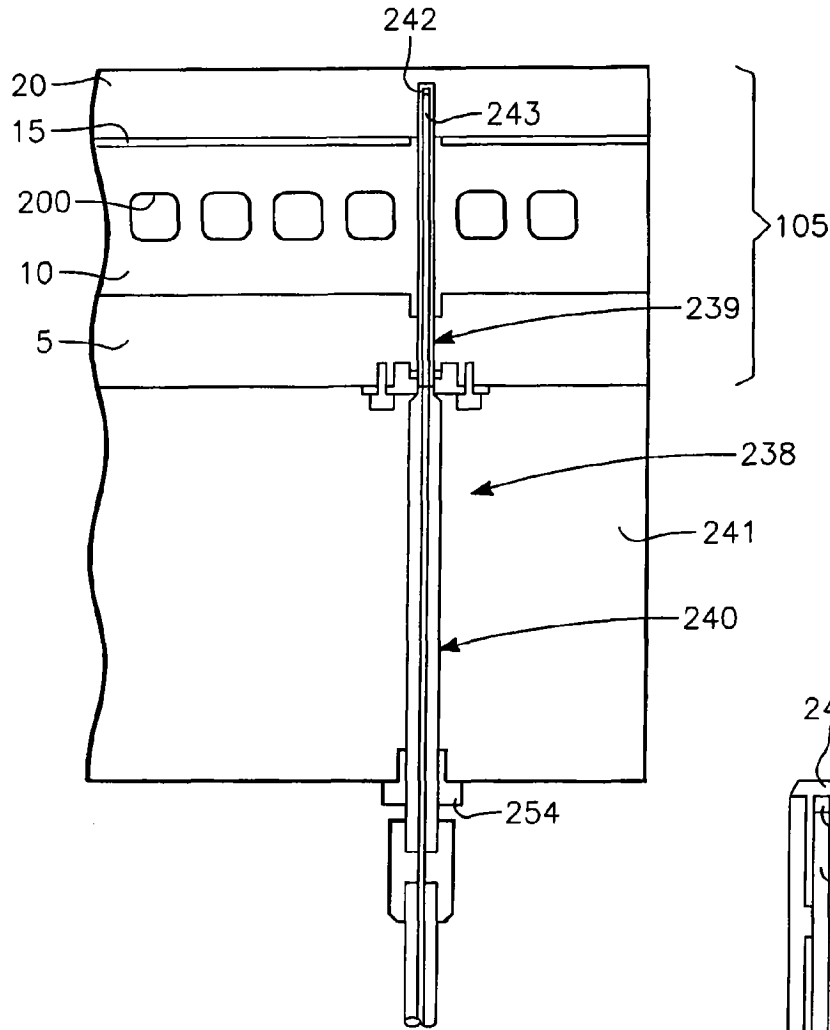


图14

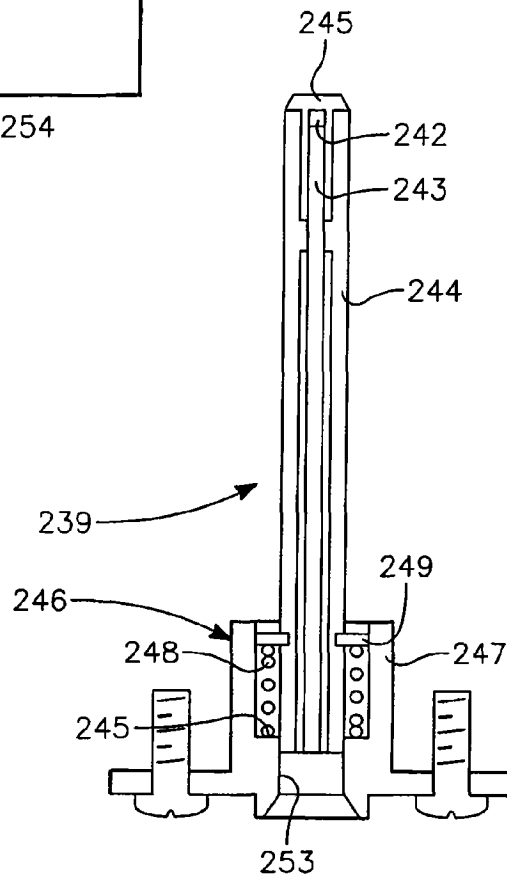


图15

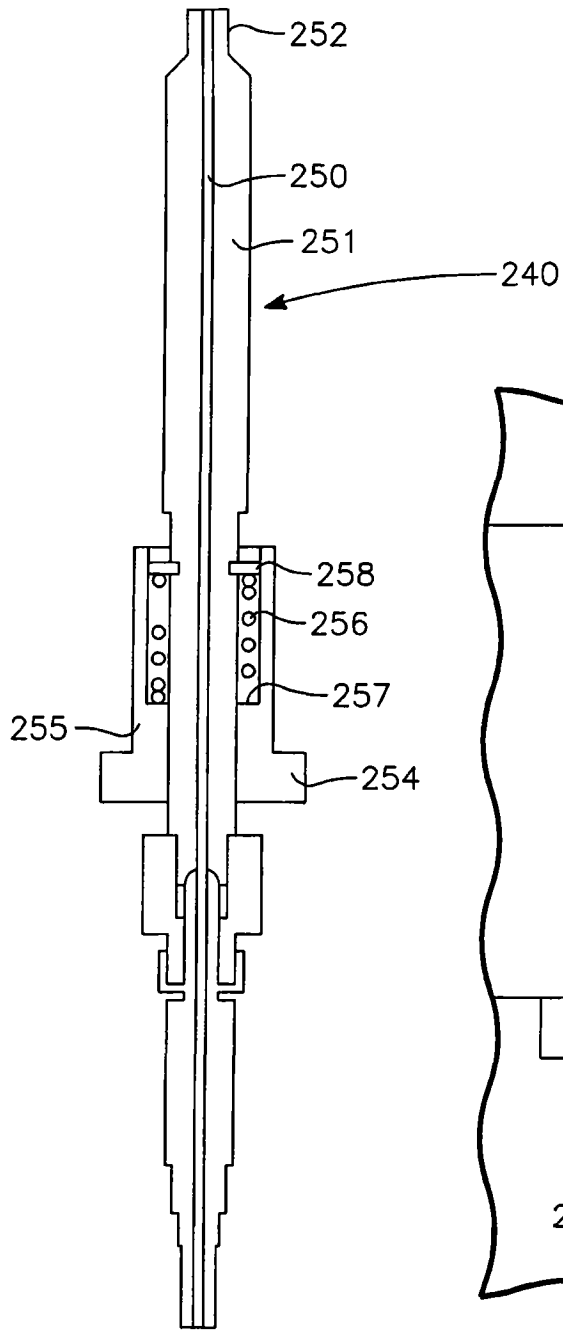


图16

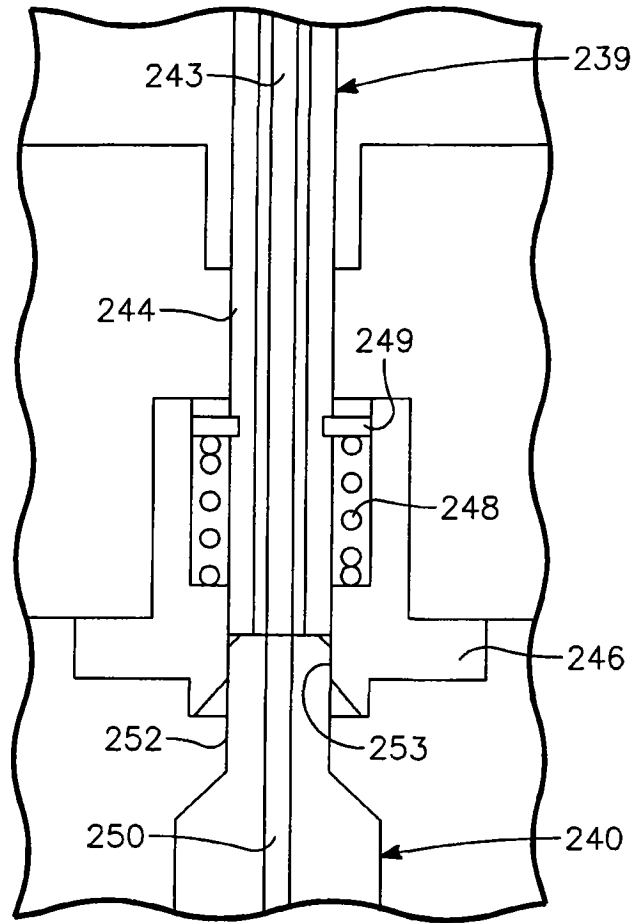


图17

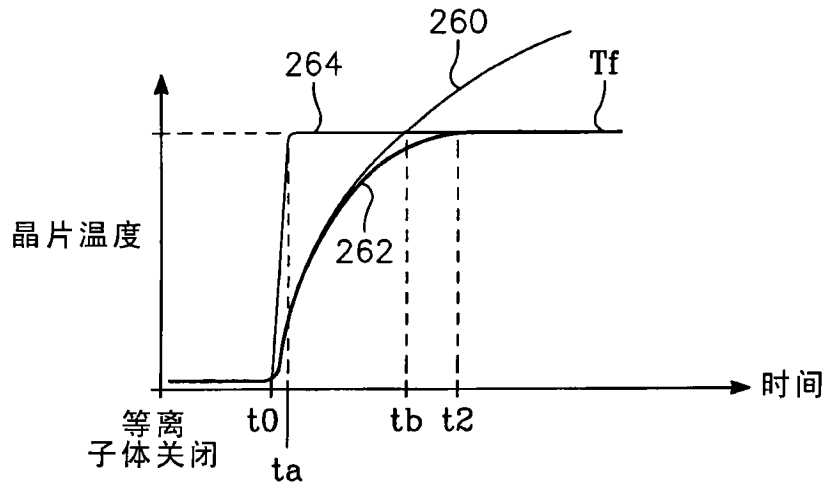


图 18

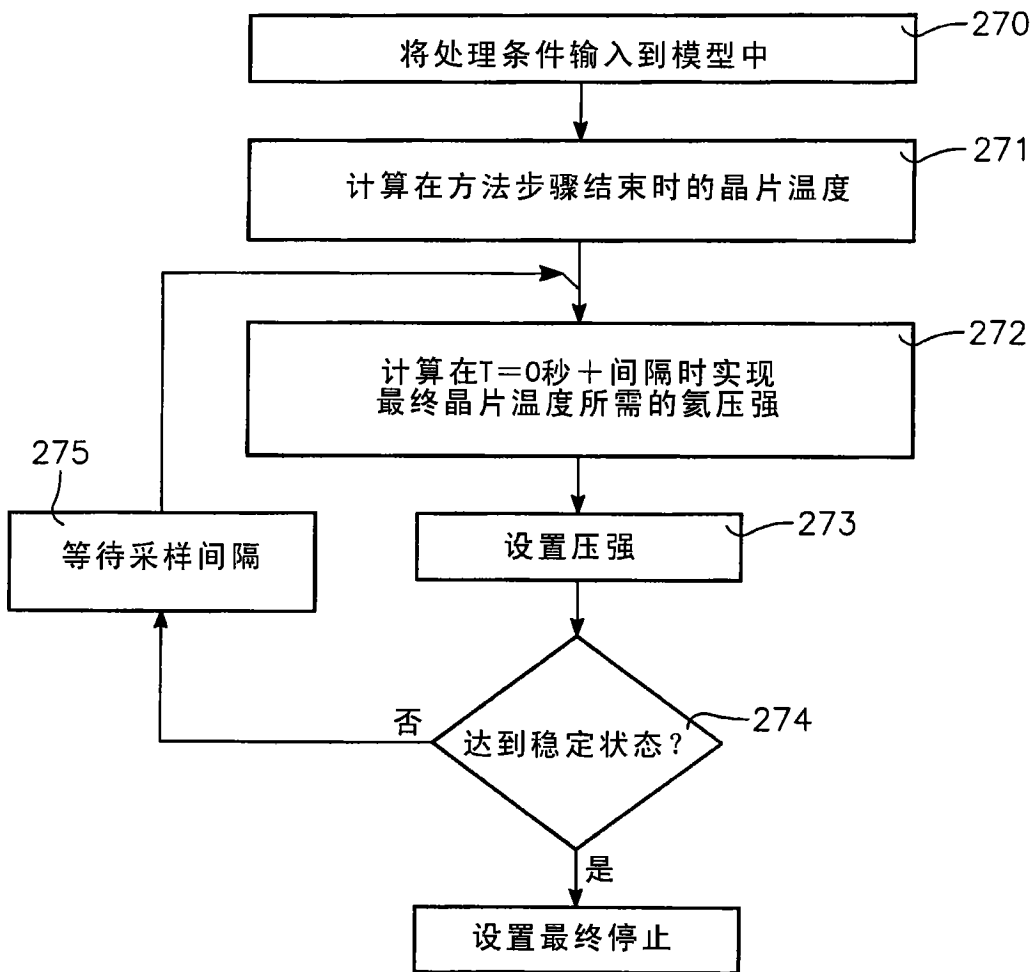


图 19

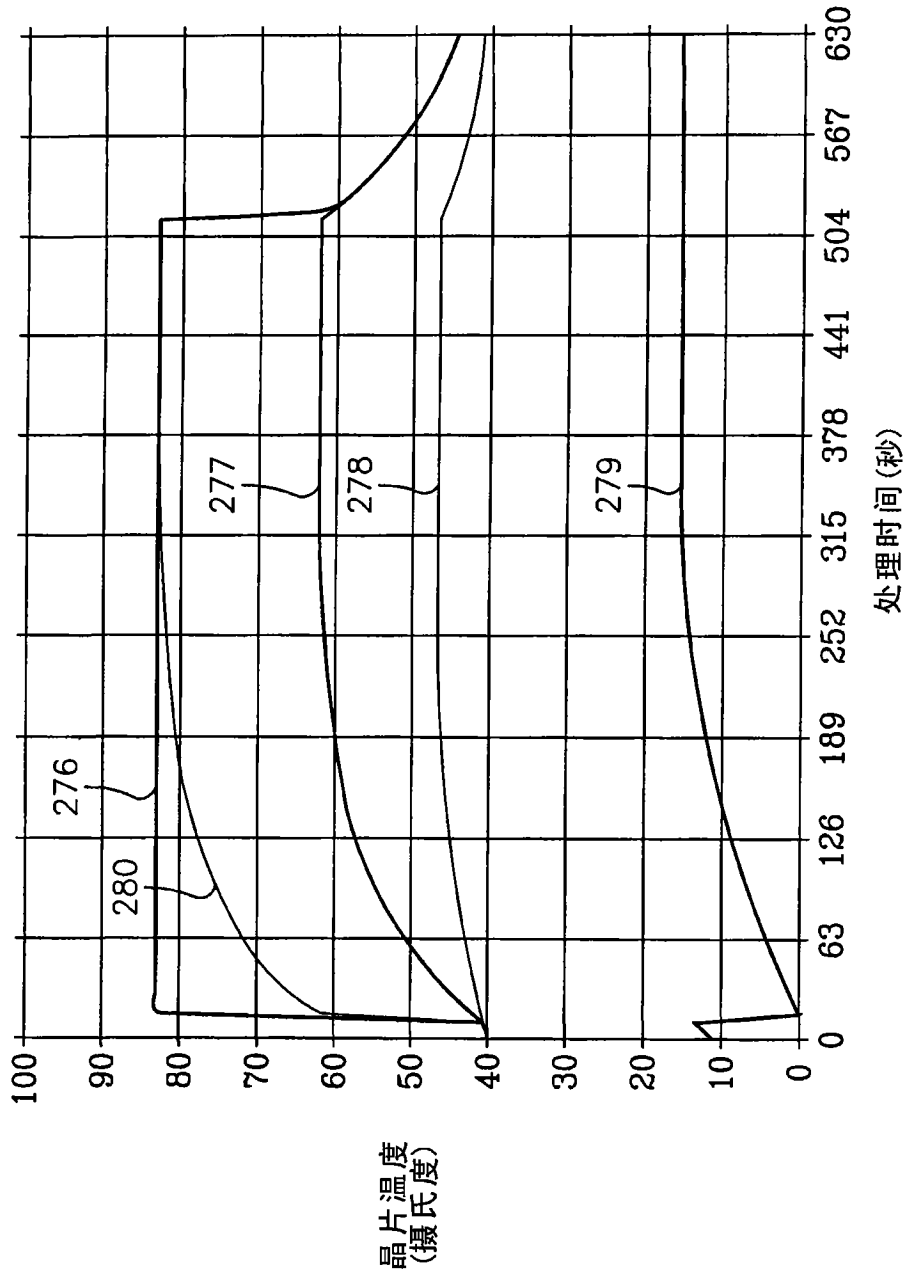


图20

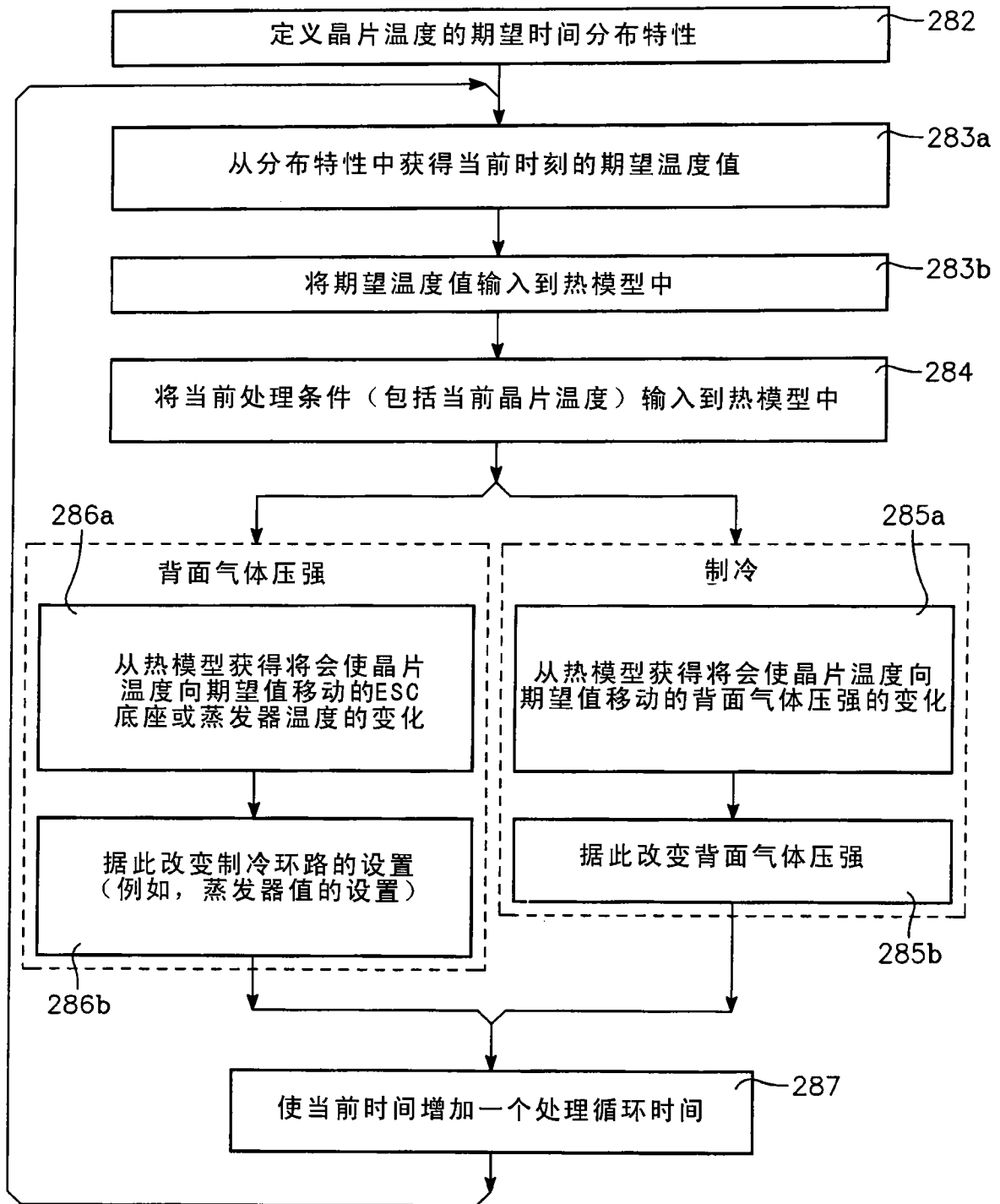


图 21

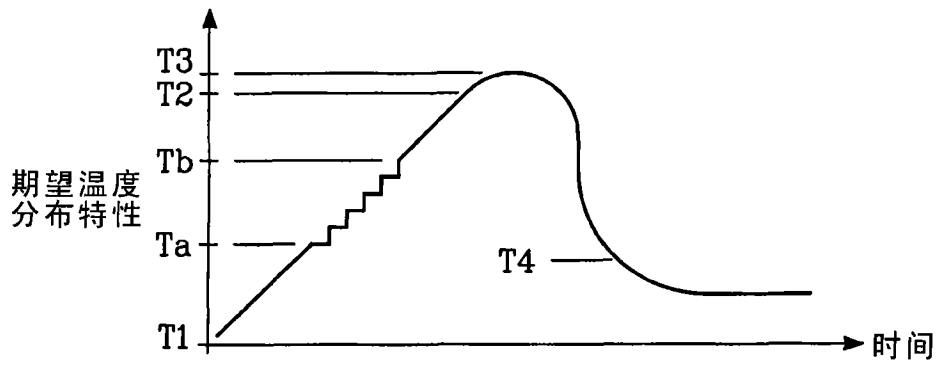


图 22A

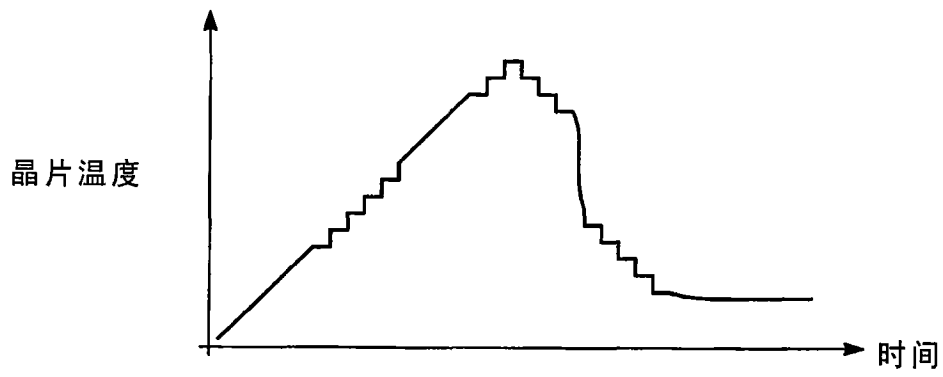


图 22B

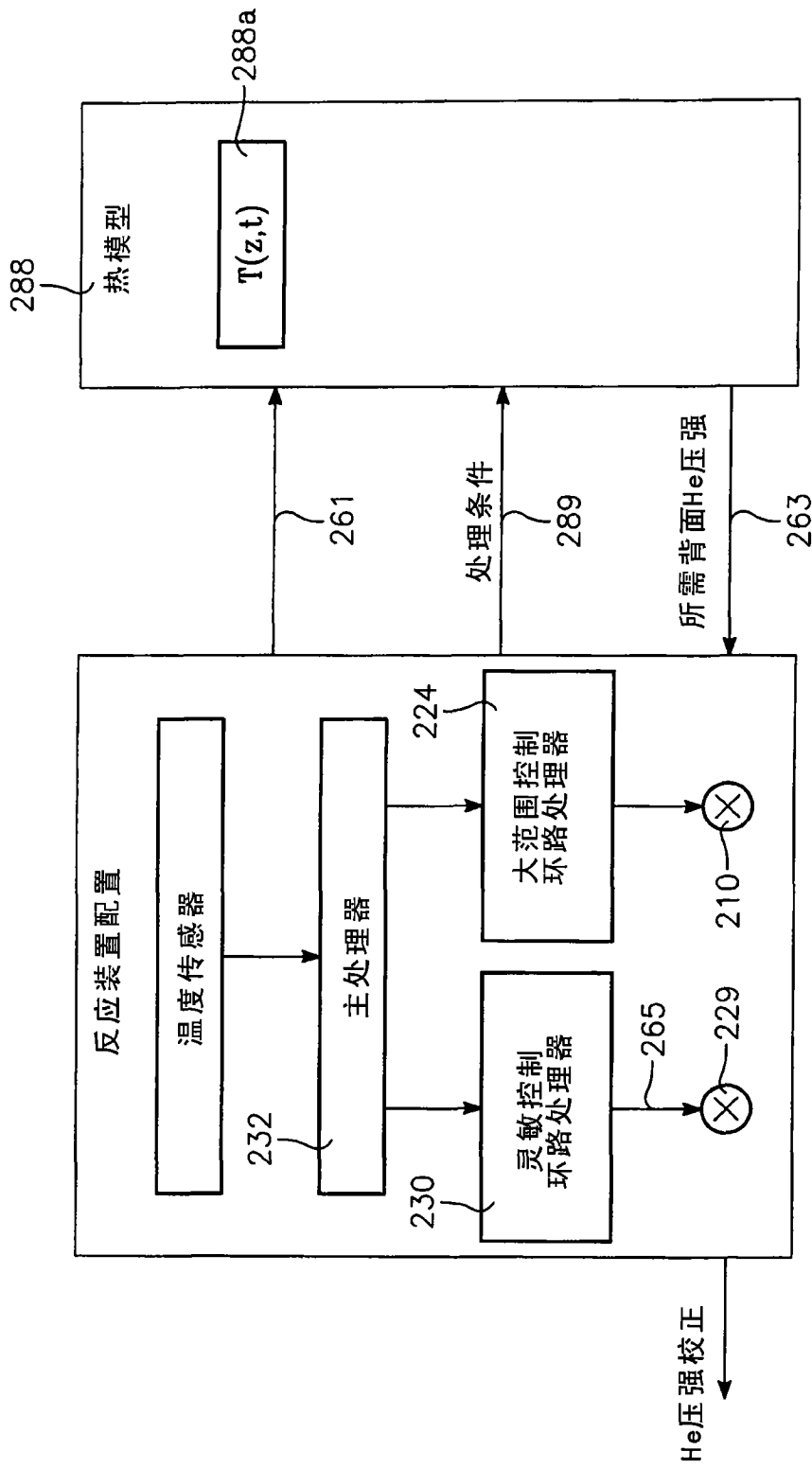


图23A

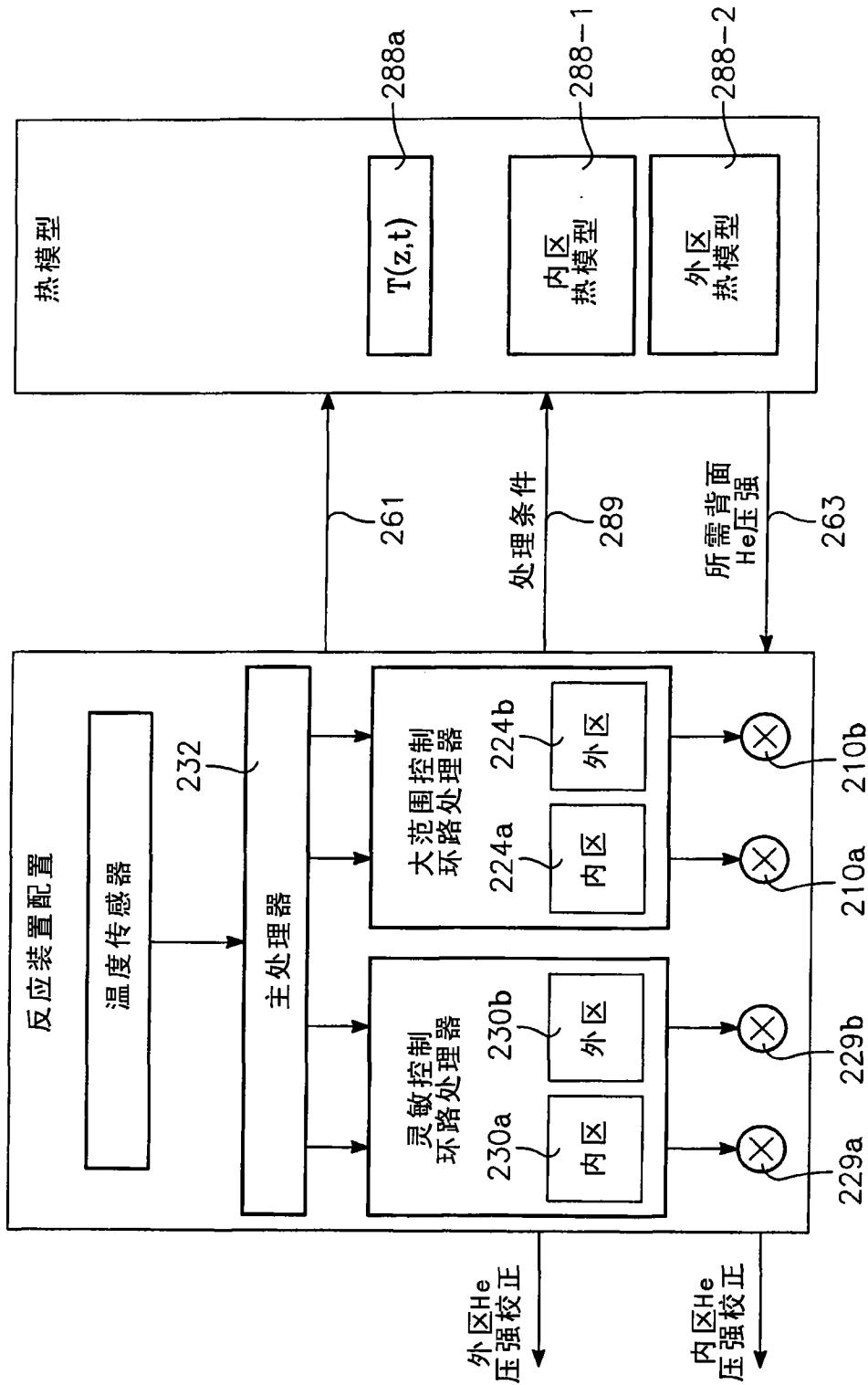


图23B

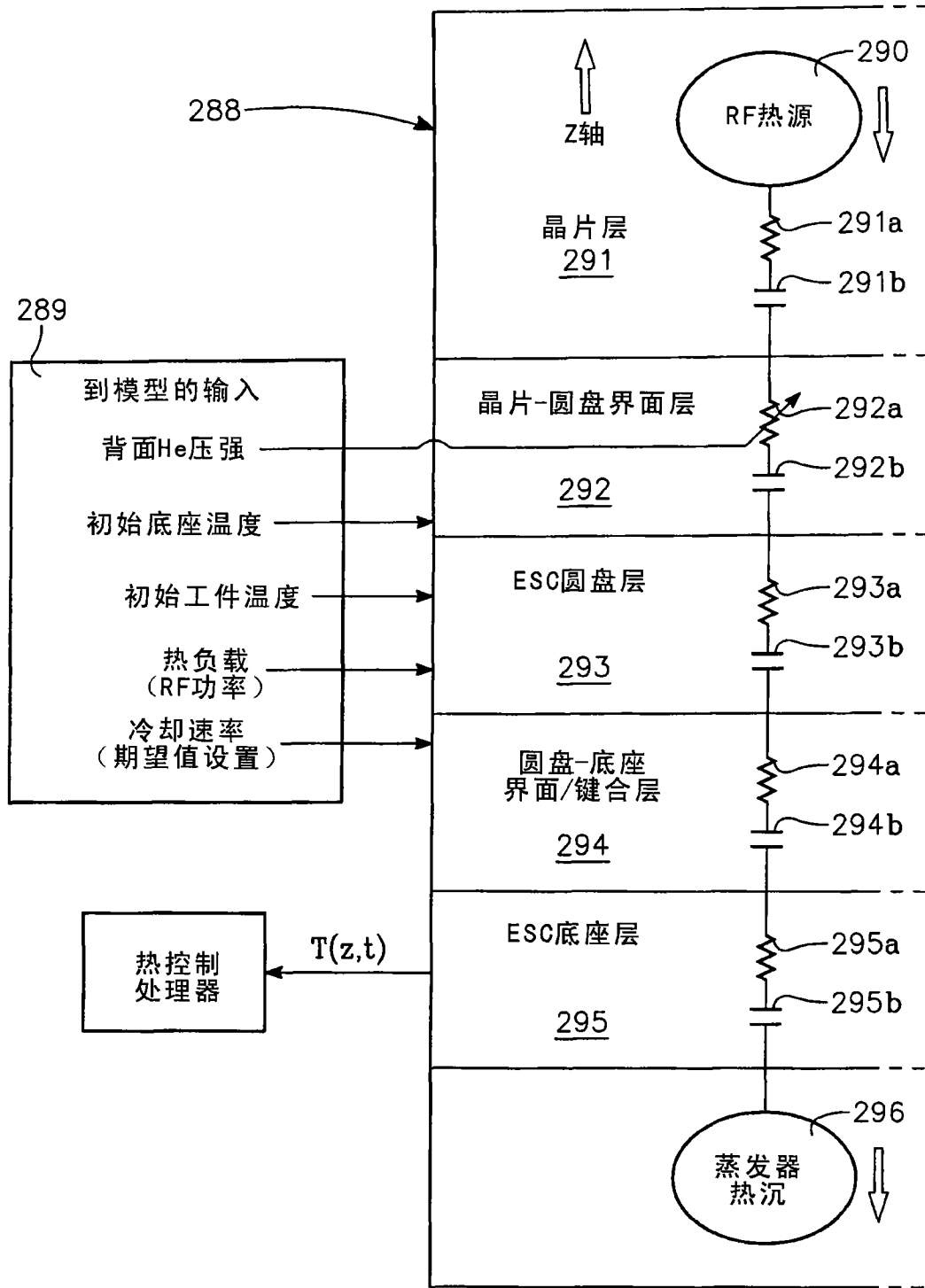


图 24

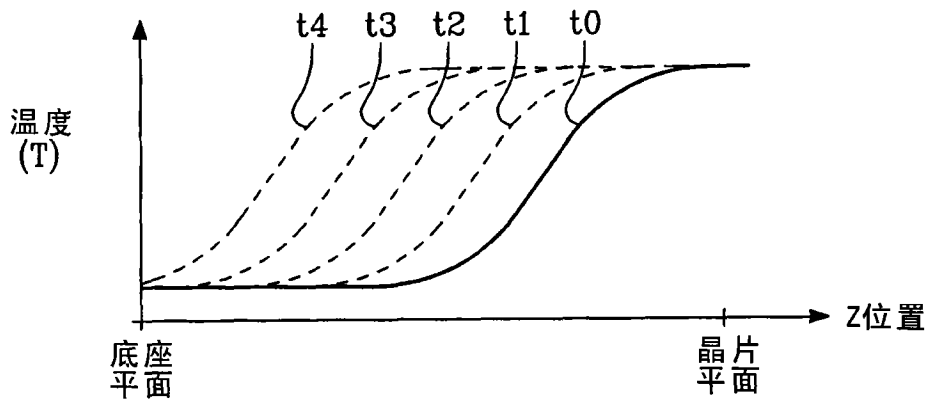


图 25

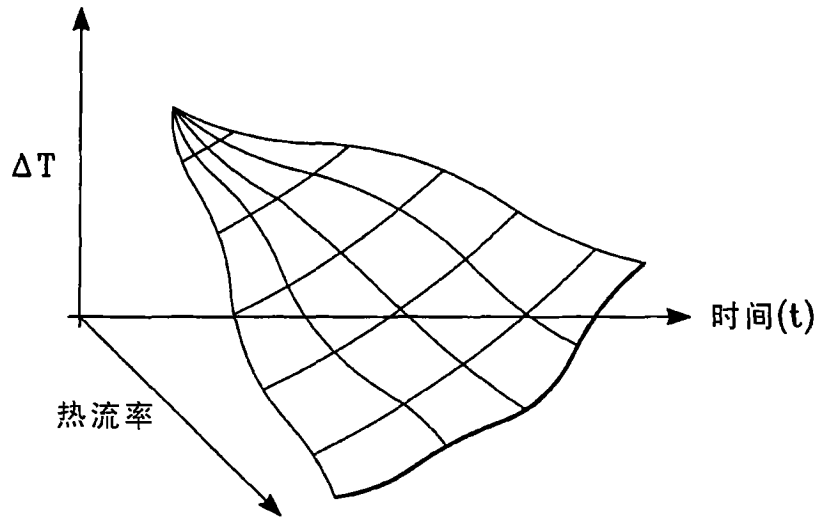


图 26

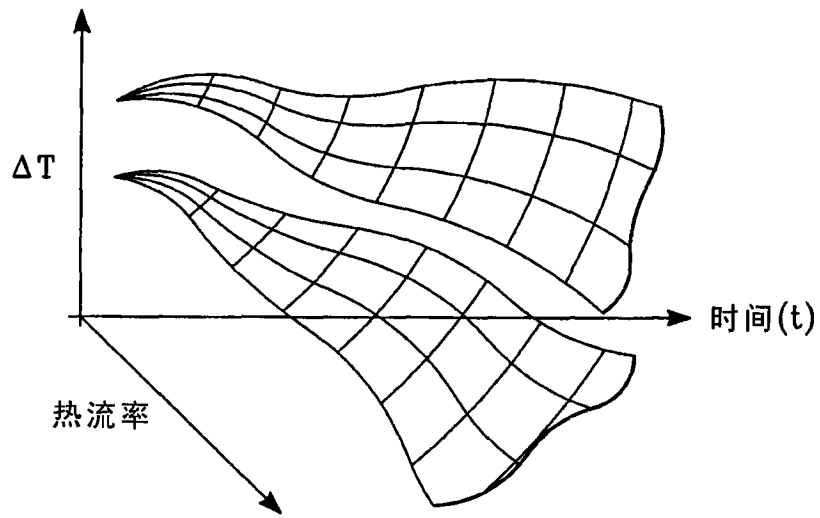


图 27

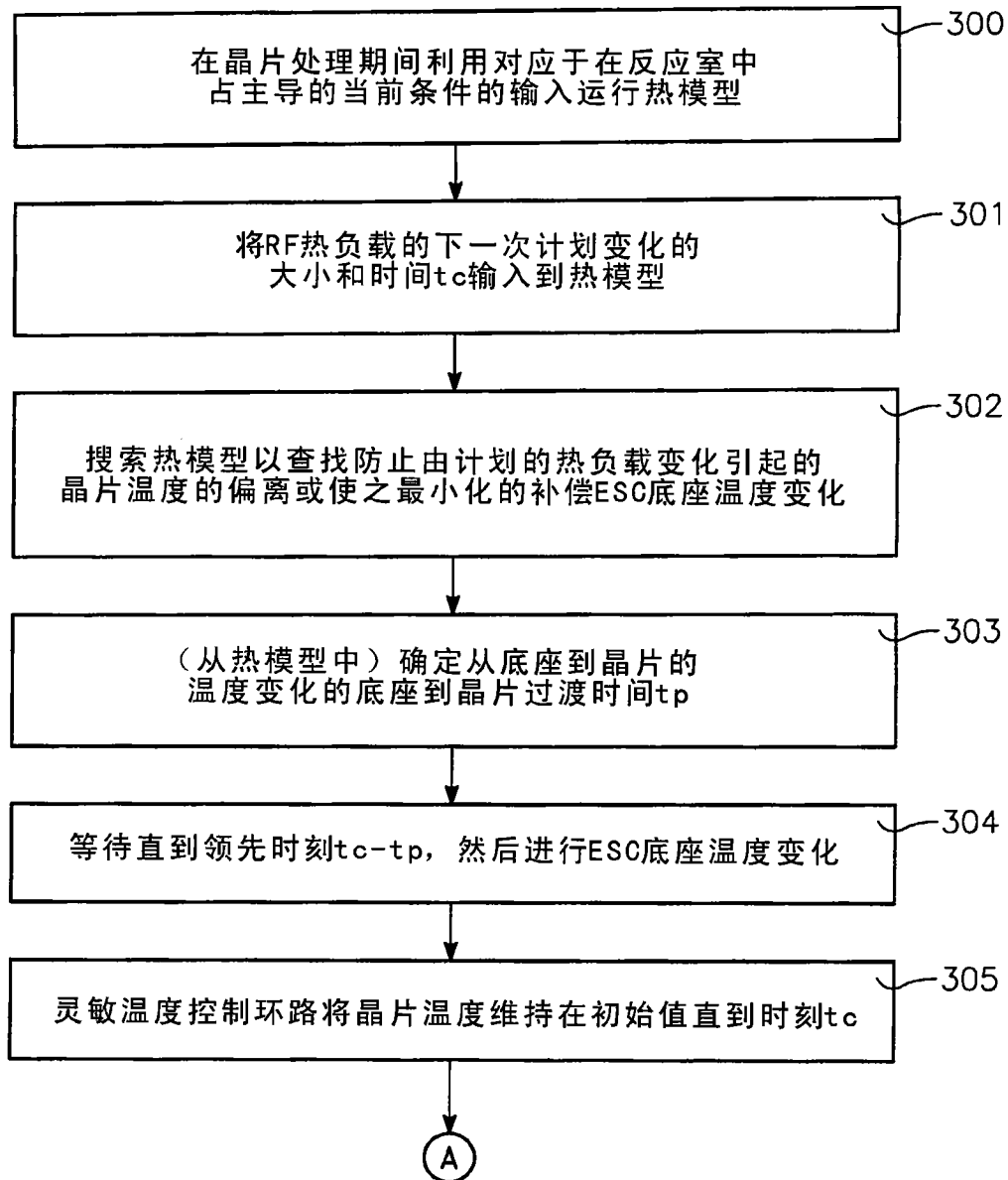


图 28A

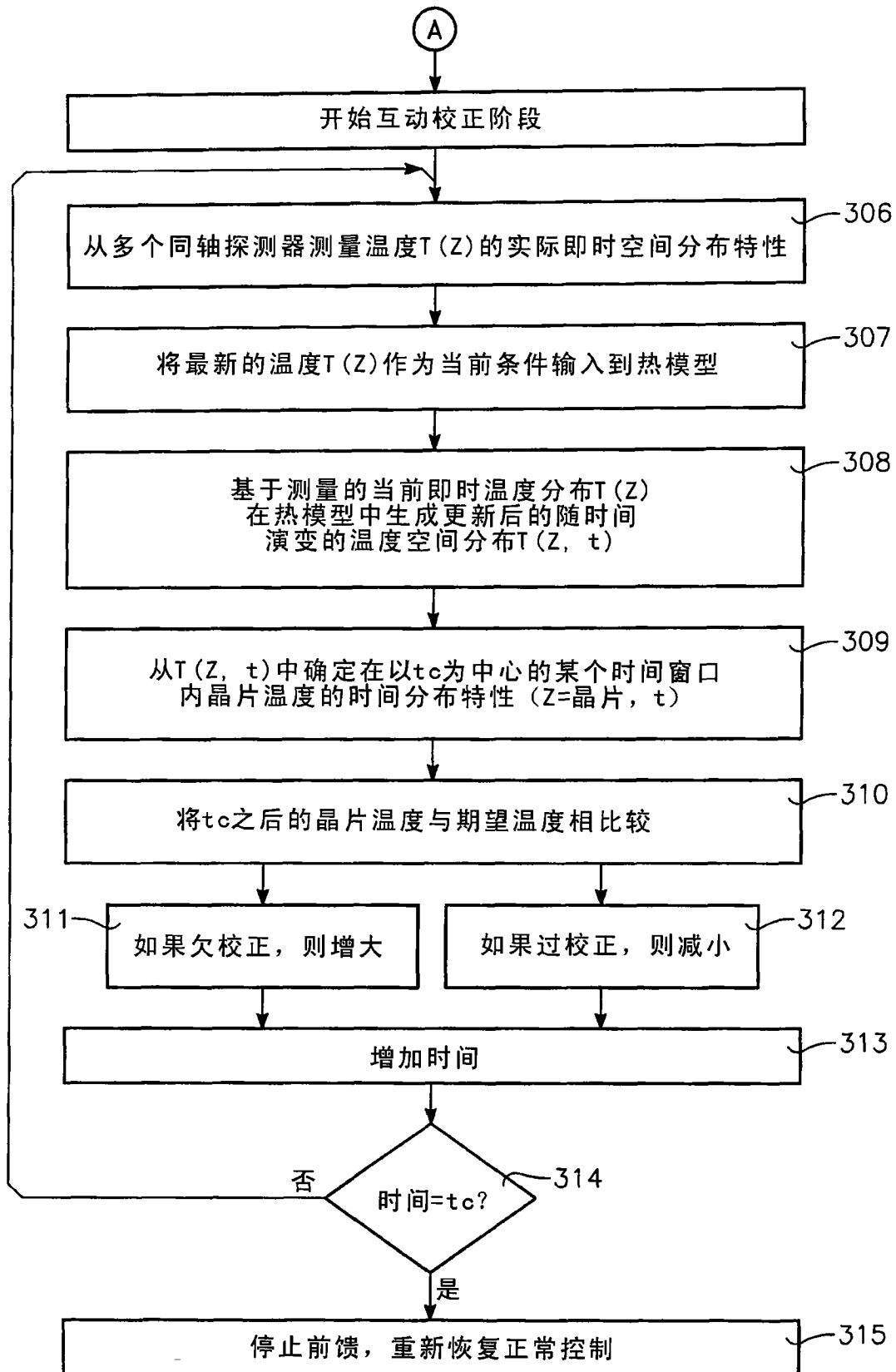


图 28B

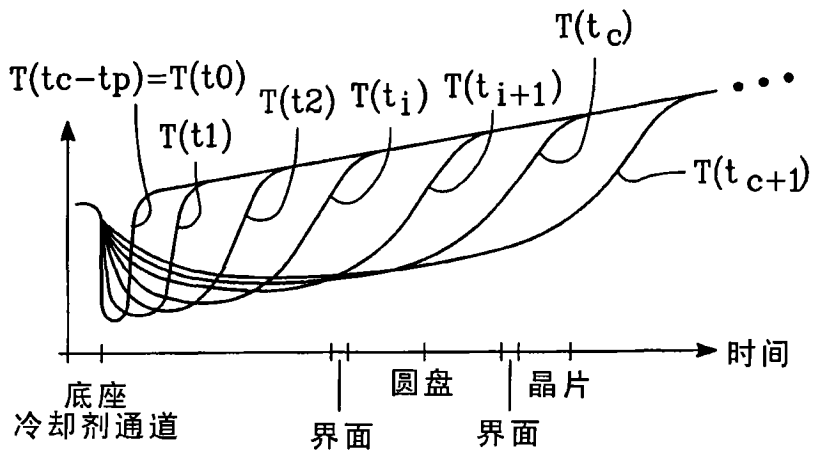


图 29

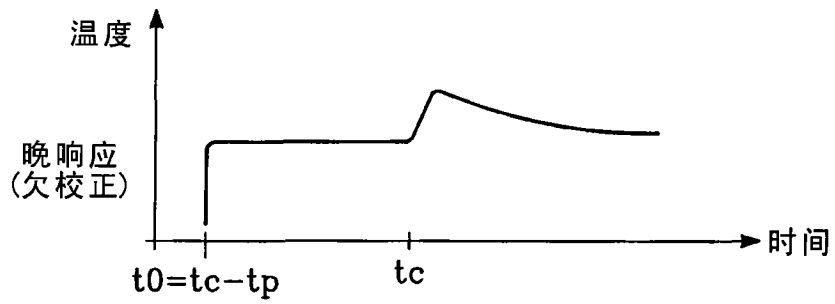


图 30A

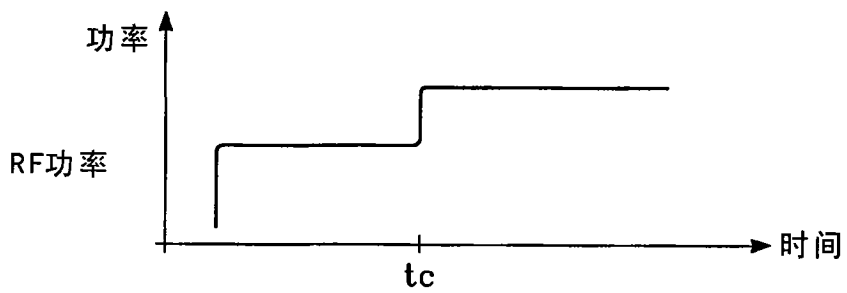


图 30B



图 30C

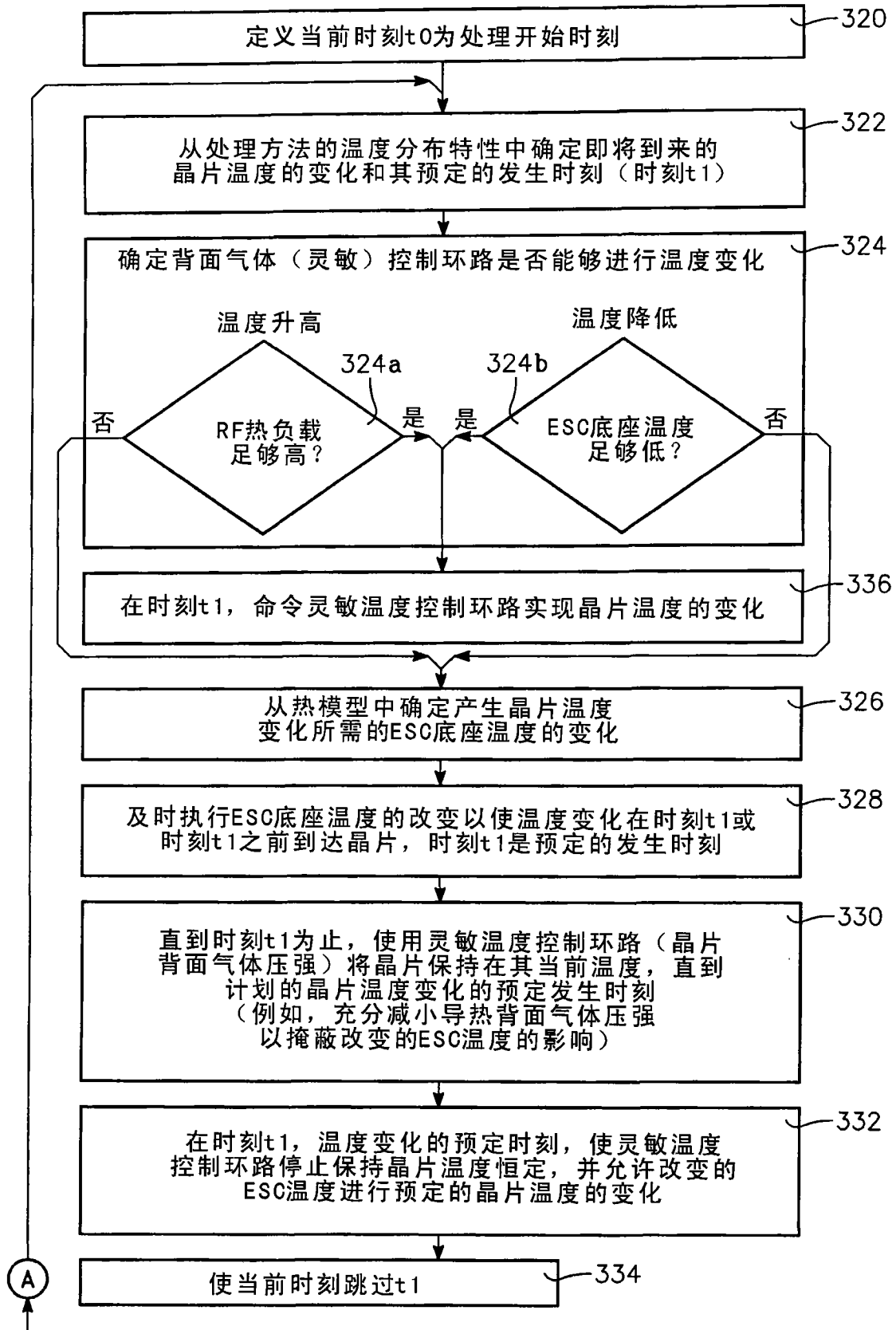


图 31A

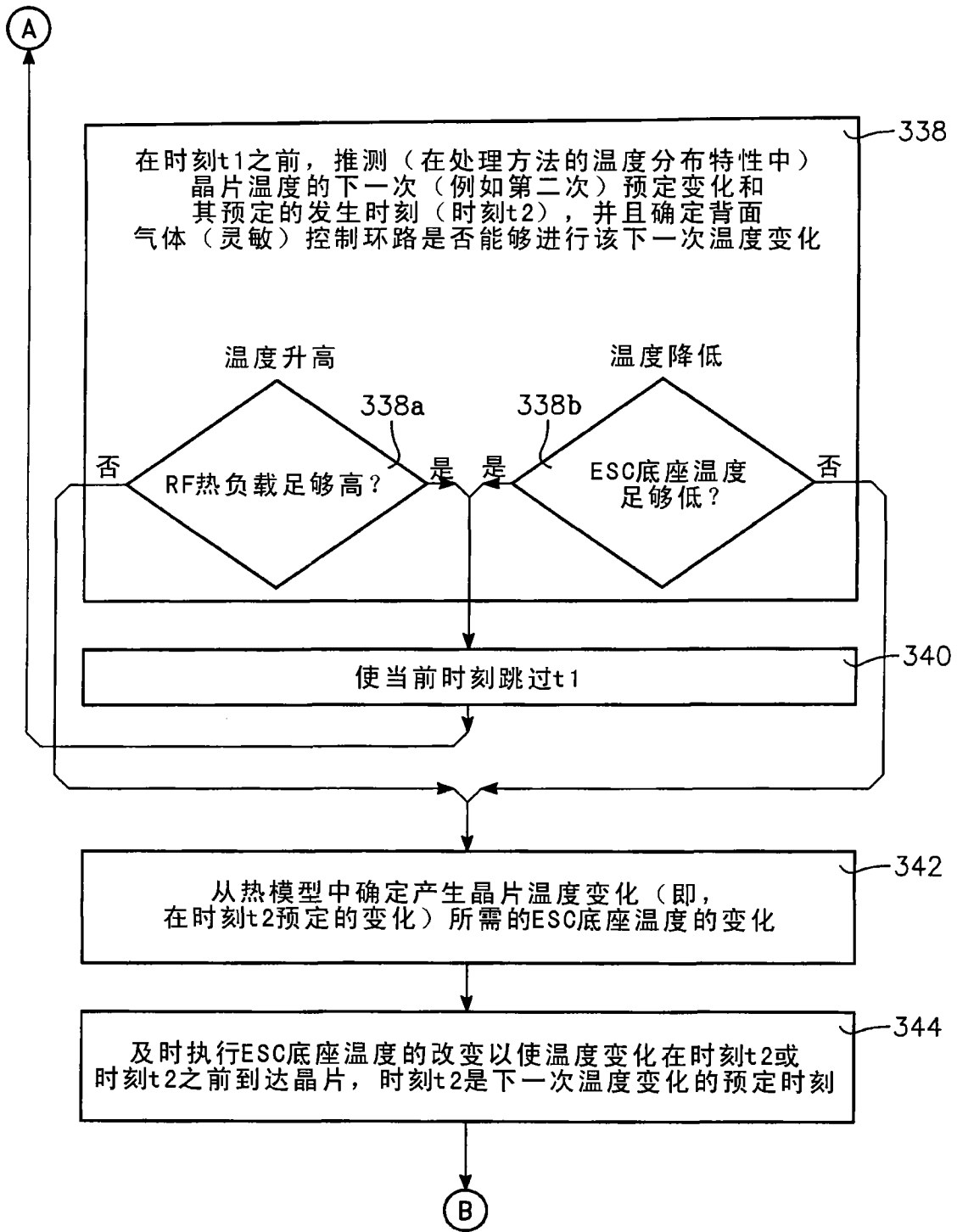


图 31B

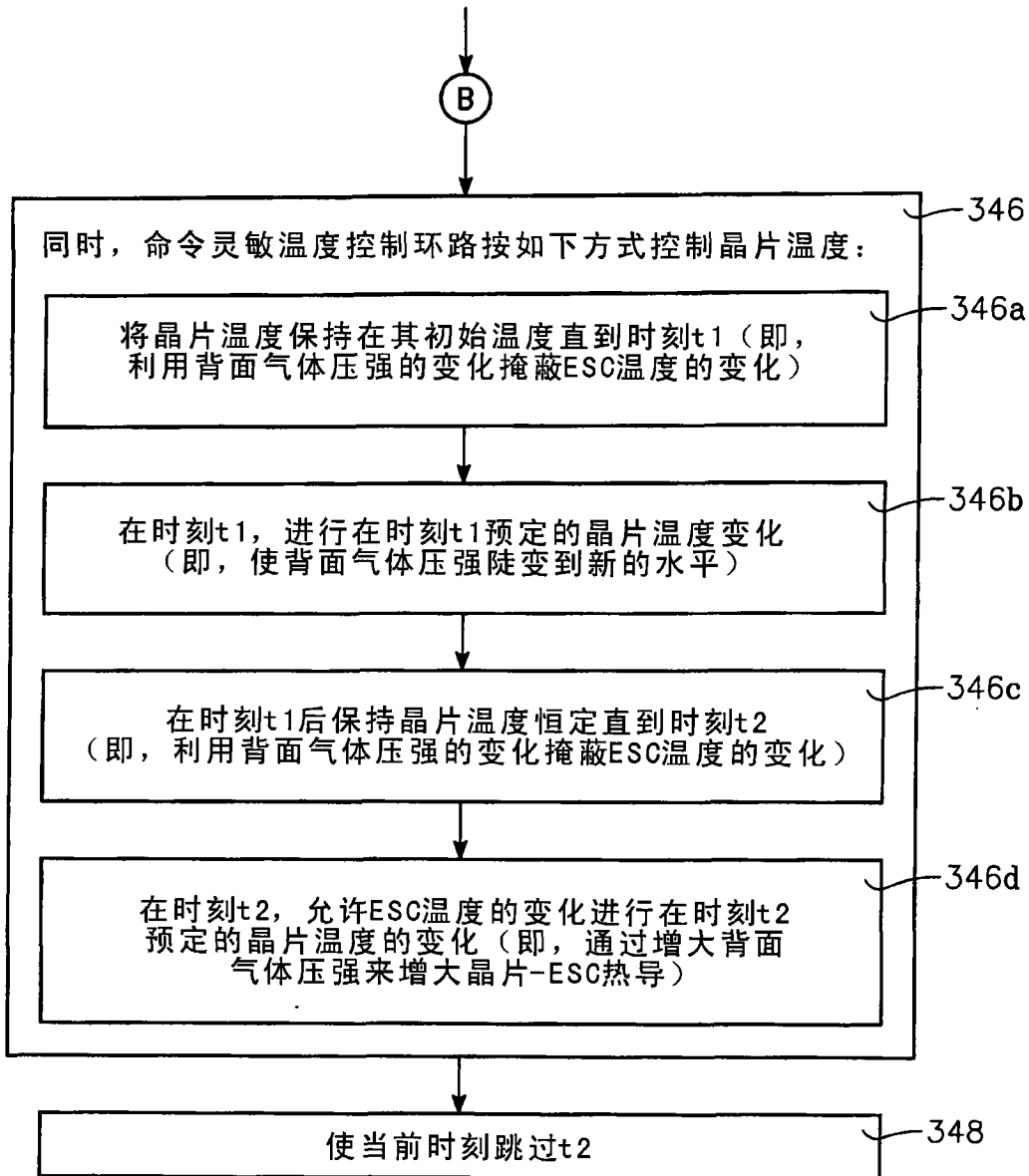


图 31C

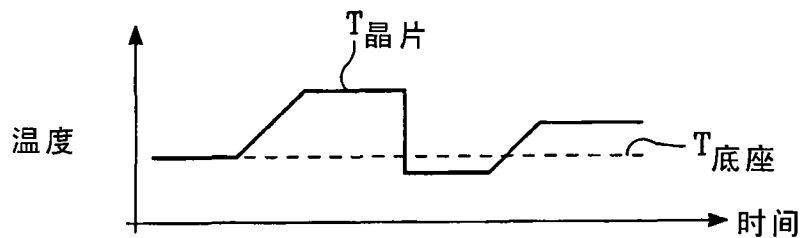


图 32A

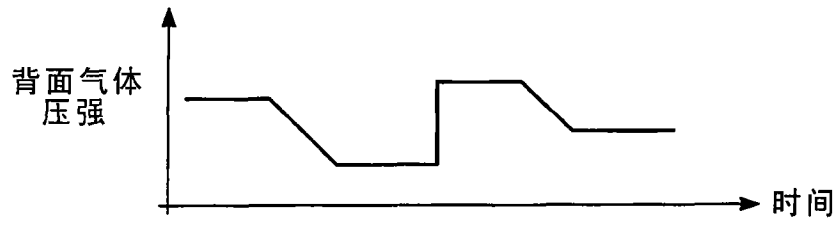


图 32B

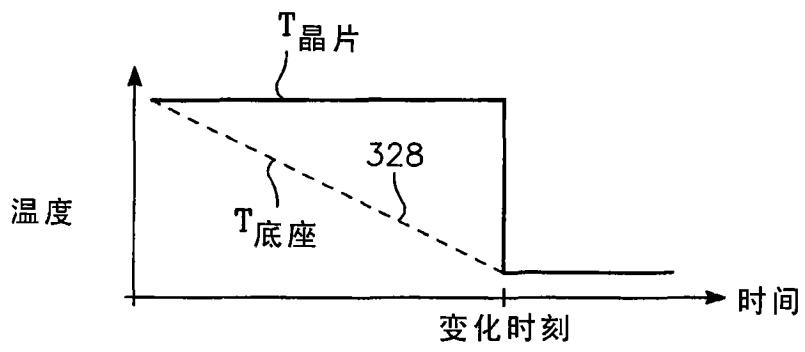


图 33A

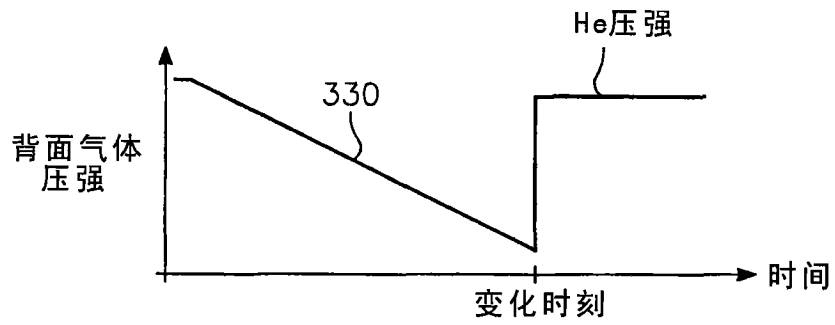


图 33B

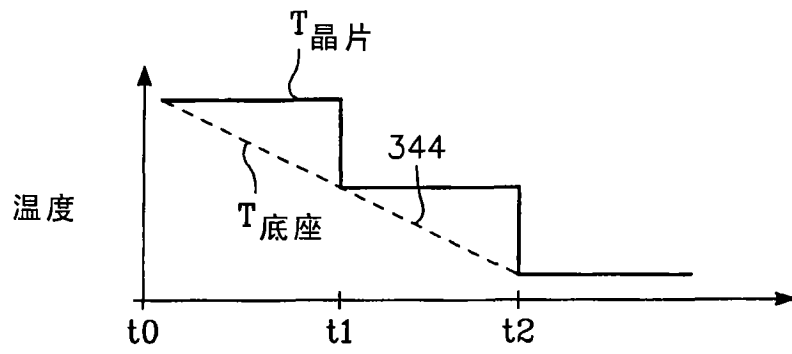


图 34A

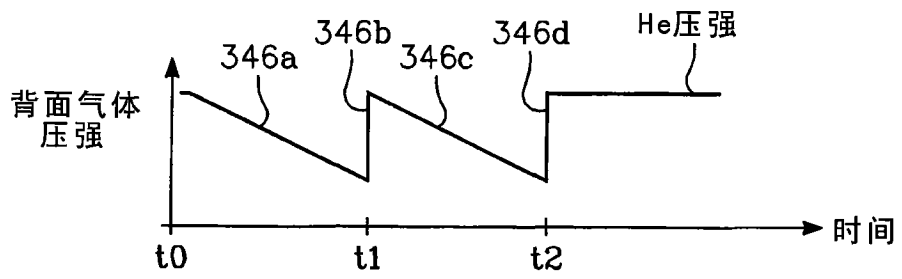


图 34B

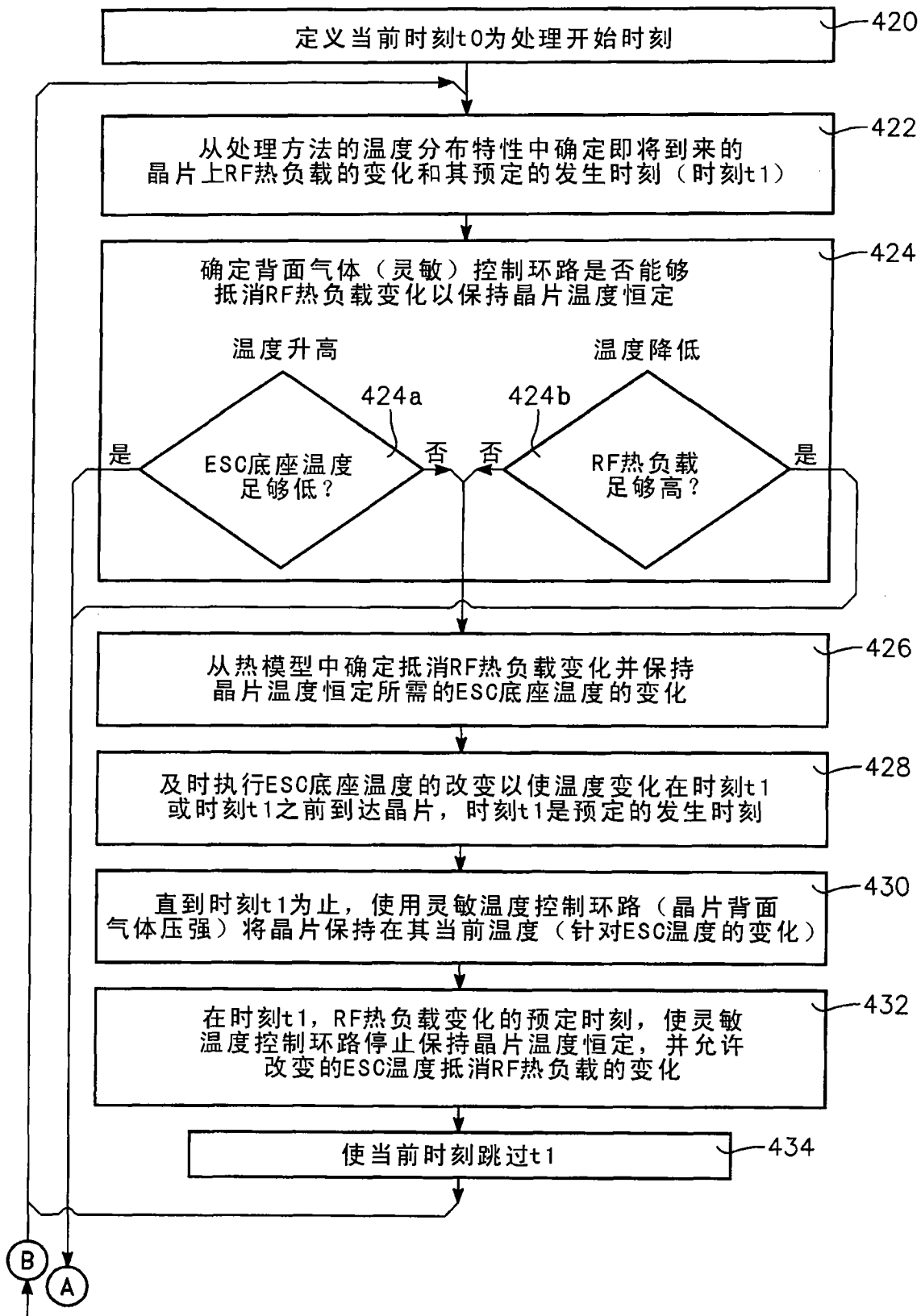


图 35A

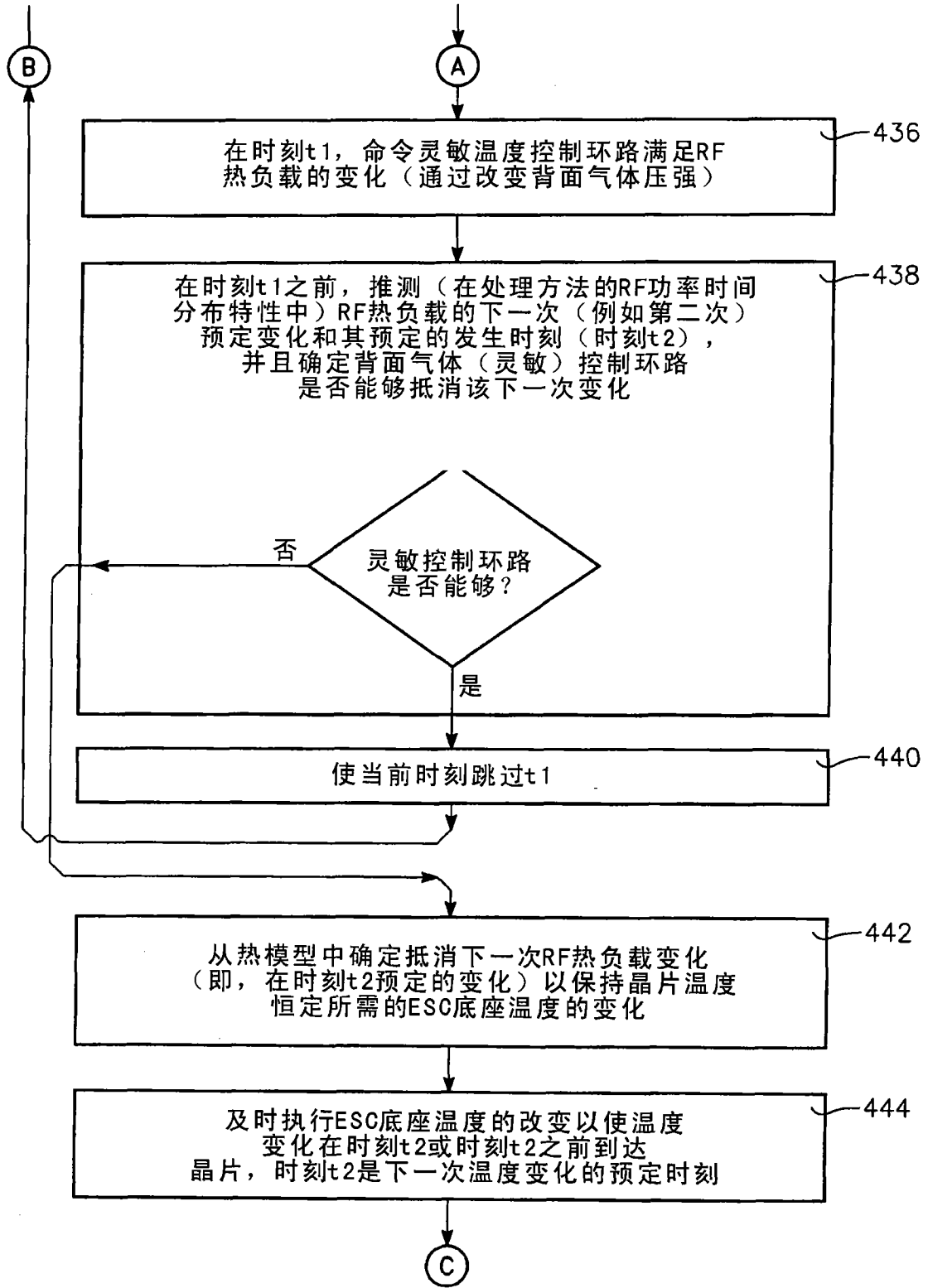


图 35B

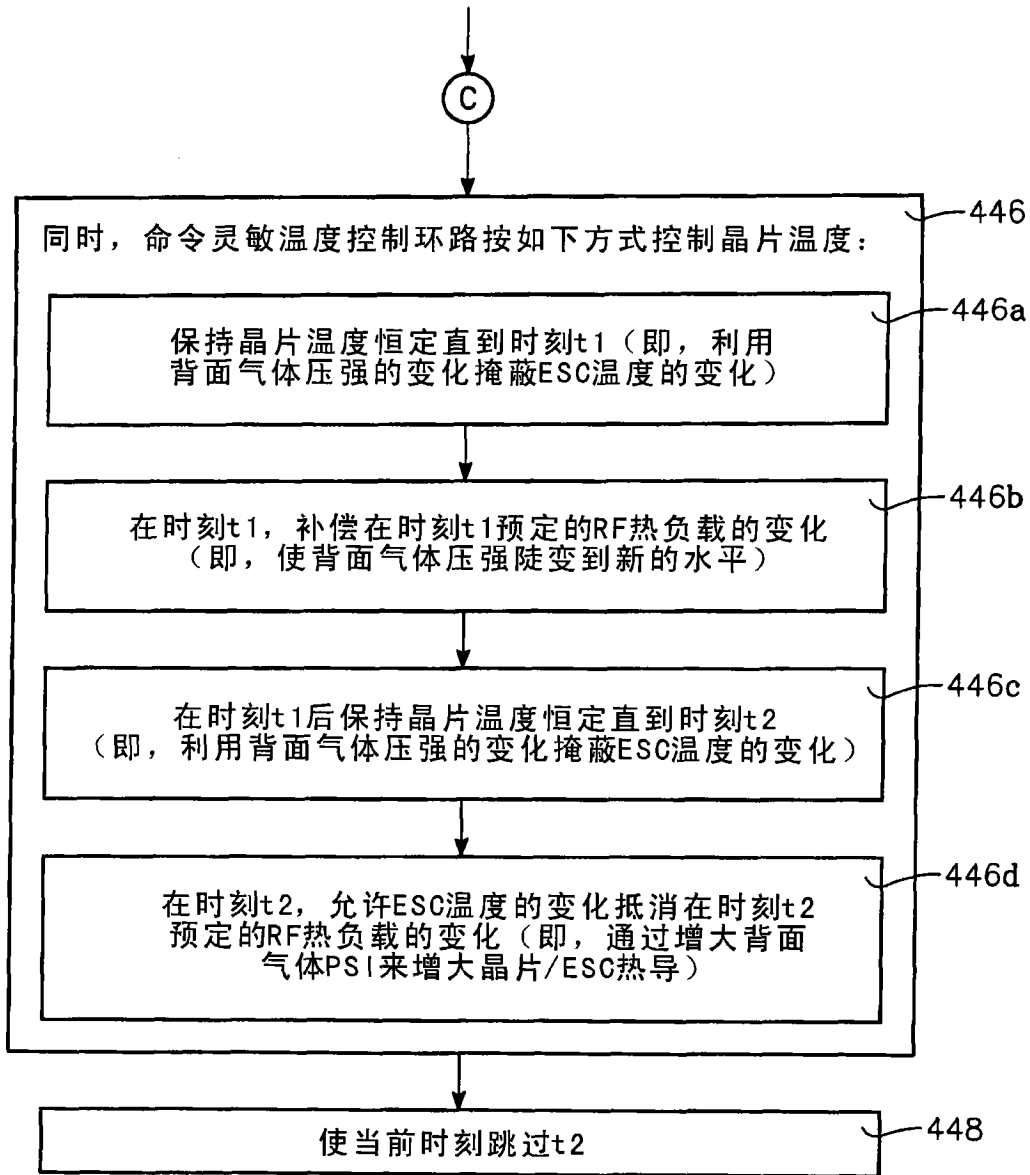


图 35C

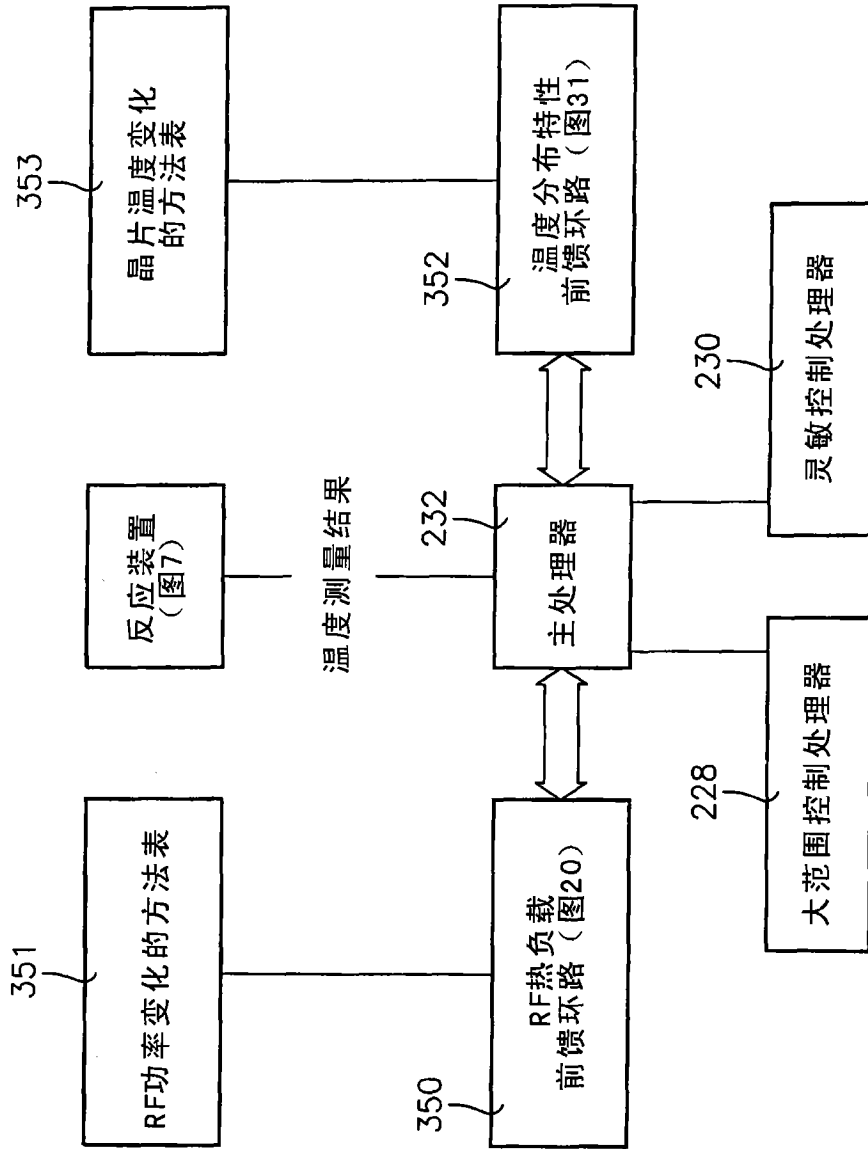


图36