



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109155229 B

(45)授权公告日 2020.07.10

(21)申请号 201780032741.X

(22)申请日 2017.05.05

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109155229 A

(43)申请公布日 2019.01.04

(30)优先权数据
15/166,777 2016.05.27 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2018.11.27

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2017/031275 2017.05.05

(87)PCT国际申请的公布数据
W02017/205034 EN 2017.11.30

(73)专利权人 MKS 仪器公司
地址 美国马萨诸塞州

(72)发明人 穆罕默德·卡马雷希 胡朝林
奥利维亚·凯勒

(74)专利代理机构 北京品源专利代理有限公司
11332
代理人 王小衡 胡彬

(51)Int.Cl.
H01J 37/32(2006.01)

(56)对比文件
US 5179264 A,1993.01.12,
EP 1102521 A2,2001.05.23,
US 2002112819 A1,2002.08.22,
CN 1652893 A,2005.08.10,

审查员 黄丽娜

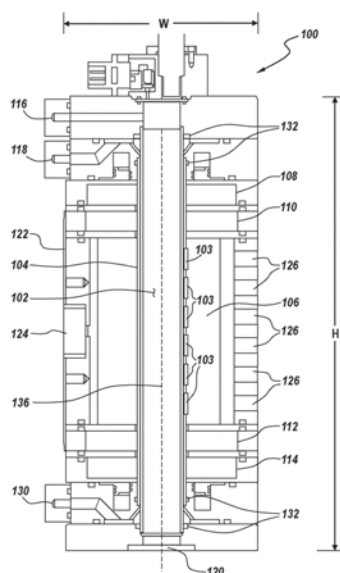
权利要求书2页 说明书12页 附图16页

(54)发明名称

利用结合电场的紧凑型微波等离子体施加器

(57)摘要

一种等离子体施加器包括等离子体放电管和至少部分地环绕等离子体放电管的一部分的微波腔。微波能量经由耦合膜片耦合到微波腔。微波腔的至少两个正交维度被选择为使得微波腔中的微波能量在横电(TE)模式下传播。从微波能量生成的主电场与从耦合膜片生成的消逝电场进行组合,使得微波腔中的组合电场沿等离子体放电管的纵轴基本上是均匀的。多个径向微波扼流圈被设置在等离子体放电管的外部上方。微波扼流圈的位置使得在TE模式和横电磁(TEM)模式下传播的微波能量被衰减。



1. 一种等离子体施加器,包括:

等离子体放电管,在该等离子体放电管中能够生成等离子体,所述等离子体放电管具有用于允许等离子体处理气体进入所述等离子体放电管的处理气体入口,所述等离子体放电管具有纵轴;

微波腔,该微波腔至少部分地环绕所述等离子体放电管的一部分;以及

耦合膜片,在该耦合膜片处微波能量能够被耦合到所述微波腔,使得所述微波能量能够在所述等离子体放电管的所述部分中生成等离子体;

其中,从所述微波能量生成的主电场与从所述耦合膜片生成的消逝电场进行组合,使得所述微波腔中的所组合的电场沿着所述等离子体放电管的纵轴是均匀的。

2. 根据权利要求1所述的等离子体施加器,其中,所述微波腔具有三个正交维度,包括长度、宽度和高度,所述正交维度中的至少两个被选择为使得所述微波腔中的微波能量在横电TE模式下传播。

3. 根据权利要求1所述的等离子体施加器,还包括多个径向微波扼流圈,其被设置在所述等离子体放电管的外部上方并被设置在所述微波腔的端部处,以用于容纳所述微波腔中的微波能量,所述微波扼流圈的位置使得在TE模式和横电磁TEM模式下传播的微波能量被衰减。

4. 根据权利要求3所述的等离子体施加器,其中,所述多个径向微波扼流圈包括位于所述微波腔的第一端部处的第一内扼流圈和第一外扼流圈以及位于所述微波腔的第二端部处的第二内扼流圈和第二外扼流圈,所述第一内扼流圈和所述第一外扼流圈之间的第一间隔以及所述第二内扼流圈和所述第二外扼流圈之间的第二间隔被选择为提供对在所述TE模式和TEM模式下传播的微波能量的衰减。

5. 根据权利要求4所述的等离子体施加器,其中,所述第一间隔和所述第二间隔中的至少一个为0.38英寸。

6. 根据权利要求4所述的等离子体施加器,其中,所述第一间隔和所述第二间隔相等。

7. 根据权利要求1所述的等离子体施加器,其中,所述微波能量具有1kW的功率。

8. 根据权利要求1所述的等离子体施加器,其中,所述微波能量的源包括固态发生器。

9. 根据权利要求1所述的等离子体施加器,其中,所述微波能量的源包括磁控管。

10. 根据权利要求1所述的等离子体施加器,其中,所述等离子体放电管由包括石英、蓝宝石、陶瓷、氮化铝和氮化硼中的至少一个的材料制成。

11. 根据权利要求1所述的等离子体施加器,其中,所述处理气体包括氧气、氮气、氢气、氟化气体以及NH₃中的至少一个。

12. 一种等离子体施加器,包括:

等离子体放电管,在该等离子体放电管中能够生成等离子体,所述等离子体放电管具有用于允许等离子体处理气体进入所述等离子体放电管的处理气体入口,所述等离子体放电管具有纵轴;

微波腔,该微波腔至少部分地环绕所述等离子体放电管的一部分;

耦合膜片,在该耦合膜片处微波能量能够被耦合到所述微波腔,使得所述微波能量能够在所述等离子体放电管的部分中生成等离子体;以及

多个径向微波扼流圈,该多个径向微波扼流圈被设置在所述等离子体放电管的外部上

方并被设置在所述微波腔的端部处,以用于容纳所述微波腔中的微波能量,所述微波扼流圈的位置使得在横电TE模式和横电磁TEM模式下传播的微波能量被衰减。

13. 根据权利要求12所述的等离子体施加器,其中,所述多个径向微波扼流圈包括位于所述微波腔的第一端部处的第一内扼流圈和第一外扼流圈以及位于所述微波腔的第二端部处的第二内扼流圈和第二外扼流圈,所述第一内扼流圈和所述第一外扼流圈之间的第一间隔以及所述第二内扼流圈和所述第二外扼流圈之间的第二间隔被选择为提供对在TE模式和TEM模式下传播的微波能量的衰减。

14. 根据权利要求13所述的等离子体施加器,其中,所述第一间隔和所述第二间隔中的至少一个为0.38英寸。

15. 根据权利要求13所述的等离子体施加器,其中,所述第一间隔和所述第二间隔相等。

16. 根据权利要求12所述的等离子体施加器,其中,所述微波腔具有三个正交维度,包括长度、宽度和高度,所述正交维度中的至少两个被选择为使得所述微波腔中的微波能量在横电TE模式下传播。

17. 根据权利要求12所述的等离子体施加器,其中,所述微波能量具有1kW的功率。

18. 根据权利要求12所述的等离子体施加器,其中,所述微波能量的源包括固态发生器。

19. 根据权利要求12所述的等离子体施加器,其中,所述微波能量的源包括磁控管。

20. 根据权利要求12所述的等离子体施加器,其中,所述等离子体放电管由包括石英、蓝宝石、陶瓷、氮化铝和氮化硼中的至少一个的材料制成。

21. 根据权利要求12所述的等离子体施加器,其中,所述处理气体包括氧气、氮气、氢气、氟化气体以及NH₃中的至少一个。

利用结合电场的紧凑型微波等离子体施加器

[0001] 背景

1. 技术领域

[0002] 本公开涉及等离子体施加器 (applicator), 并且特别涉及利用接合电场的紧凑型微波等离子体施加器。

[0003] 2. 相关技术的讨论

[0004] 在半导体处理中, 通常在处理室的上游使用等离子体发生器。在等离子体发生器中, 能量通常耦合到流过位于微波腔中的等离子体放电管的气体, 并且通过微波能量在气体中激发等离子体。等离子体产物向下游流过等离子体放电管, 进入处理室, 并撞击在诸如半导体晶圆的工件上。

[0005] 在等离子体生成系统中, 能量效率和成本是重要的考虑因素。在传统的高能量 (例如大于 5kW 微波功率) 等离子体发生器中, 等离子体放电管可以达到极高的温度。为了减小高温度的影响, 通常使用冷却系统。通常, 液体冷却剂 (例如水) 循环通过管周围的铜绕组/线圈以除去多余的热量。这些液体冷却系统往往非常昂贵, 但由于在高功率水平下的高温而因此是不可避免的。优选在等离子体发生器中使用空气冷却, 这是因为其降低的复杂性和成本, 但是空气冷却通常仅在使用较低功率 (例如 1kW 或更低微波功率) 的系统中是有用的, 这是因为空气冷却针对等离子体放电管中产生的相对较低温度是有效的。

[0006] 而且, 由于用于激发气体以在等离子体放电管中生成等离子体的非均匀激发能量模式 (例如, 电场), 等离子体可以以非均匀空间模式生成, 造成管中等离子体能量和因此温度特别高的“热点”。这些“热点”在等离子体生成过程中引起低效率。而且, 无论使用空气冷却还是水冷却, 它们都给冷却系统带来了不均匀温度控制负担。出于这个和其他原因, 非常期望的是用于在等离子体放电管中生成等离子体的微波能量并且特别是电场是空间均匀的, 使得所得到的等离子体相对没有热点。

发明内容

[0007] 根据第一方面, 提供了一种等离子体施加器。等离子体施加器包括等离子体放电管, 其中可以生成等离子体, 等离子体放电管具有用于允许等离子体处理气体进入等离子体放电管的处理气体入口, 等离子体放电管具有纵轴。微波腔至少部分地环绕等离子体放电管的一部分。等离子体施加器包括耦合膜片 (iris), 在该耦合膜片处微波能量可以被耦合到微波腔, 使得微波能量可以在等离子体放电管的部分中生成等离子体。该微波腔具有三个正交维度, 包括长度、宽度和高度, 正交维度中的至少两个被选择为使得微波腔中的微波能量在横电 (TE) 模式下传播。

[0008] 在一些实施例中, 从微波能量生成的主电场与从耦合膜片生成的消逝电场进行组合, 使得微波腔中的组合电场沿着等离子体放电管的纵轴基本上是均匀的。

[0009] 在一些实施例中, 微波能量具有大约 1kW 的功率。

[0010] 在一些实施例中, 等离子体放电管的长度大约为 11 英寸。

- [0011] 在一些实施例中,等离子体放电管的外直径大约为1英寸。
- [0012] 在一些实施例中,微波腔的宽度大约为3英寸。
- [0013] 在一些实施例中,微波腔的长度大约为4.5英寸。
- [0014] 在一些实施例中,微波能量的源包括固态发生器。
- [0015] 在一些实施例中,微波能量的源包括磁控管。
- [0016] 在一些实施例中,等离子体放电管由包括石英、蓝宝石、陶瓷、氧化铝和氮化硼中的至少一个的材料制成。
- [0017] 在一些实施例中,处理气体包括氧气、氮气、氢气、氟化气体、合成气体(forming gas)、NF₃、NH₃、C₂F₄和C₂F₆中的至少一个。
- [0018] 在一些实施例中,等离子体施加器还包括多个径向微波扼流圈(choke),其被设置在等离子体放电管的外部上方并被设置在微波腔的端部处,以用于基本容纳微波腔中的微波能量,微波扼流圈的位置使得在TE模式和横电磁(TEM)模式下传播的微波能量被衰减。在一些实施例中,多个径向微波扼流圈包括位于微波腔的第一端部处的第一内扼流圈和第一外扼流圈以及位于微波腔的第二端部处的第二内扼流圈和第二外扼流圈,第一内扼流圈和第一外扼流圈之间的第一间隔(space)以及第二内扼流圈和第二外扼流圈之间的第二间隔被选择为提供对在TE模式和TEM模式下传播的微波能量的衰减。第一间隔和第二间隔可以基本相等,并且在特定的示例性实施例中,间隔中的至少一个大约为0.38英寸。
- [0019] 根据另一方面,提供了一种等离子体施加器。等离子体施加器包括等离子体放电管,其中可以生成等离子体,等离子体放电管具有用于允许等离子体处理气体进入等离子体放电管的处理气体入口,等离子体放电管具有纵轴。微波腔至少部分地环绕等离子体放电管的一部分。等离子体施加器包括耦合膜片,在该耦合膜片处微波能量可以被耦合到微波腔,使得微波能量可以在等离子体放电管的部分中生成等离子体。从微波能量生成的主电场与从耦合膜片生成的消逝电场进行组合,使得微波腔中的组合电场沿着等离子体放电管的纵轴基本上是均匀的。
- [0020] 在一些实施例中,微波腔具有三个正交维度,包括长度、宽度和高度,所述正交维度中的至少两个被选择为使得微波腔中的微波能量在横电(TE)模式下传播。
- [0021] 在一些实施例中,等离子体施加器还包括多个径向微波扼流圈,其被设置在等离子体放电管的外部上方并被设置在微波腔的端部处,以用于基本容纳微波腔中的微波能量,微波扼流圈的位置使得在TE模式和横电磁(TEM)模式下传播的微波能量被衰减。在一些实施例中,多个径向微波扼流圈包括位于微波腔的第一端部处的第一内扼流圈和第一外扼流圈以及位于微波腔的第二端部处的第二内扼流圈和第二外扼流圈,第一内扼流圈和第一外扼流圈之间的第一间隔以及第二内扼流圈和第二外扼流圈之间的第二间隔被选择为提供对在TE模式和TEM模式下传播的微波能量的衰减。第一间隔和第二间隔可以基本相等,并且在特定的示例性实施例中,间隔中的至少一个大约为0.38英寸。
- [0022] 在一些实施例中,微波能量具有大约1kW的功率。
- [0023] 在一些实施例中,等离子体放电管的长度大约为11英寸。
- [0024] 在一些实施例中,等离子体放电管的外直径大约为1英寸。
- [0025] 在一些实施例中,微波腔的宽度大约为3英寸。
- [0026] 在一些实施例中,微波腔的长度大约为4.5英寸。

- [0027] 在一些实施例中,微波能量的源包括固态发生器。
- [0028] 在一些实施例中,微波能量的源包括磁控管。
- [0029] 在一些实施例中,等离子体放电管由包括石英、蓝宝石、陶瓷、氮化铝和氮化硼中的至少一个的材料制成。
- [0030] 在一些实施例中,处理气体包括氧气、氮气、氢气、氟化气体、合成气体、NF₃、NH₃、C₂F₄和C₂F₆中的至少一个。
- [0031] 根据另一方面,提供了一种等离子体施加器。等离子体施加器包括等离子体放电管,其中可以生成等离子体,等离子体放电管具有用于允许等离子体处理气体进入等离子体放电管的处理气体入口,等离子体放电管具有纵轴。微波腔至少部分地环绕等离子体放电管的一部分。等离子体施加器包括耦合膜片,在该耦合膜片处微波能量可以被耦合到微波腔,使得微波能量可以在等离子体放电管的部分中生成等离子体。多个径向微波扼流圈被设置在等离子体放电管的外部上方并被设置在微波腔的端部处,以用于基本容纳微波腔中的微波能量,微波扼流圈的位置使得在横电 (TE) 模式和横电磁 (TEM) 模式下传播的微波能量被衰减。
- [0032] 在一些实施例中,多个径向微波扼流圈包括位于微波腔的第一端部处的第一内扼流圈和第一外扼流圈以及位于微波腔的第二端部处的第二内扼流圈和第二外扼流圈,第一内扼流圈和第一外扼流圈之间的第一间隔以及第二内扼流圈和第二外扼流圈之间的第二间隔被选择为提供对在TE模式和TEM模式下传播的微波能量的衰减。第一间隔和第二间隔可以基本相等,并且在特定的示例性实施例中,间隔中的至少一个大约为0.38英寸。
- [0033] 在一些实施例中,微波腔具有三个正交维度,包括长度、宽度和高度,所述正交维度中的至少两个被选择为使得微波腔中的微波能量在横电 (TE) 模式下传播。
- [0034] 在一些实施例中,从微波能量生成的主电场与从耦合膜片生成的消逝电场进行组合,使得微波腔中的组合电场沿着等离子体放电管的纵轴基本上是均匀的。
- [0035] 在一些实施例中,微波能量具有大约1kW的功率。
- [0036] 在一些实施例中,等离子体放电管的长度大约为11英寸。
- [0037] 在一些实施例中,等离子体放电管的外直径大约为1英寸。
- [0038] 在一些实施例中,微波腔的宽度大约为3英寸。
- [0039] 在一些实施例中,微波腔的长度大约为4.5英寸。
- [0040] 在一些实施例中,微波能量的源包括固态发生器。
- [0041] 在一些实施例中,微波能量的源包括磁控管。
- [0042] 在一些实施例中,等离子体放电管由包括石英、蓝宝石、陶瓷、氮化铝和氮化硼中的至少一个的材料制成。
- [0043] 在一些实施例中,处理气体包括氧气、氮气、氢气、氟化气体、合成气体、NF₃、NH₃、C₂F₄和C₂F₆中的至少一个。
- [0044] 附图的简要描述
- [0045] 通过本公开的实施例的非限制性示例,参考所提到的多个附图,在下面的详细描述中进一步描述本公开,其中,在附图的若干视图中,相似的附图标记表示类似的部分。
- [0046] 图1包括根据示例性实施例的紧凑型低功率等离子体施加器的示意性截面图。
- [0047] 图2A和2B包括根据示例性实施例的包括图1的等离子体施加器的两个等离子体生

成系统的示意性框图。

[0048] 图3A和3B是示出了针对矩形TE₁₀模式波导的传播和场模式的示意图。

[0049] 图4A是等离子体施加器的示意图,其中扼流圈相对于彼此未被最佳定位。

[0050] 图4B包括示出了针对从图4A中所示的扼流圈位置得到多个等离子体密度条件的在等离子体施加器的微波腔中所得到的电场衰减的曲线图。

[0051] 图5A是根据示例性实施例的等离子体施加器的示意图,其中扼流圈相对于彼此被最佳地定位。

[0052] 图5B包括示出了针对从图5A中所示的扼流圈位置得到的多个等离子体密度条件的在等离子体施加器的微波腔中所得到的电场衰减的曲线图。

[0053] 图6A包括根据示例性实施例的示出了IR透明窗口的冷却套的一部分的示意性透视图。

[0054] 图6B包括根据示例性实施例的图6A中所示的IR透明窗口中的一个的示意性透视图。

[0055] 图7是根据示例性实施例的用于等离子体生成系统的冷却系统的操作的示意性功能图。

[0056] 图8是根据示例性实施例的具有本文所述的优化冷却的等离子体施加器的示意性截面图。

[0057] 图9是示出了等离子体放电管壁厚度与温度之间的关系关系的示意图。

[0058] 图10是根据示例性实施例的另一等离子体施加器的示意性截面图,示出了根据示例性实施例的在等离子体施加器200的优化冷却中所使用的设计和测试参数。

[0059] 图11是根据示例性实施例的图10中所示的等离子体施加器的详细示意性截面图。

[0060] 图12包括根据示例性实施例的基本圆柱形的等离子体施加器的示意性图示透视图。

[0061] 图13包括根据示例性实施例的基本矩形的等离子体施加器的示意性图示透视图。

[0062] 优选实施例的详细描述

[0063] 图1包括根据示例性实施例的紧凑型低功率等离子体施加器100的示意性截面图。参考图1,等离子体施加器100包括具有纵轴136的等离子体放电管102,其中一个或多个处理气体被微波能量激发,微波能量耦合到至少部分地环绕等离子体放电管102的微波腔106中。在一些示例性实施例中,处理气体包括氧气、氮气、氢气、氟化气体、形成气体、NF₃、NH₃、C₂F₄和C₂F₆中的至少一个,或者一个或多个其他处理气体。微波能量经由耦合膜片124从微波波导(未示出)被引导到微波腔106中,所述微波波导在耦合膜片124处被耦合到膜片等离子体施加器100的外壳122。在示例性实施例中,等离子体施加器100包括空气填充的径向波导扼流圈108、110、112、114,其尺寸和位置如在等离子体放电管102的相对端处和周围成对所示,以提供对微波腔106内的微波能量的容纳。也就是说,相对于微波腔106和彼此的尺寸和相对位置使得基本上防止微波能量传播到微波腔106之外。用于生成等离子体的处理气体在处理气体入口116处进入等离子体放电管102。所得到的等离子体产物通过出口120离开等离子体放电管102,以供在期望的应用处理中使用。

[0064] 等离子体施加器100还包括至少部分地环绕等离子体放电管102的冷却套104。冷却套104包含在等离子体放电管102的外部周围进行循环的冷却流体,以控制等离子体放电

管102的温度,即提供冷却。根据示例性实施例,等离子体施加器100在相对低的功率(例如,大约1kW)下操作,使得在冷却套104中循环的冷却流体可以是气体,诸如空气。也就是说,在一些示例性实施例中,由于等离子体施加器100的低功率操作,不需要液体(即水)冷却。冷却套104包括空气冷却入口118,冷却空气通过空气冷却入口128进入冷却套104。空气通过冷却套104进行循环并在空气冷却出口130处离开冷却套104。冷却套104可以通过O形环密封件132而被密封到等离子体放电管102的外部。

[0065] 如上所述,等离子体施加器100是紧凑型低功率发生器,具有高度H和宽度W。在一些示例性实施例中,高度H可以是大约11英寸,并且宽度W可以是大约3.5英寸。如上所述,等离子体施加器100可以在相对低的微波功率下操作,在一些特定的示例性实施例中,微波功率大约为1kW,并且可以高达1.5kW。

[0066] 图2A和2B包括根据示例性实施例的包括图1的等离子体施加器100的两个等离子体生成系统150A和150B的示意性框图。图2A示出了可用于经由同轴电缆143集成了固态微波发生器141的两个不同的可替选的耦合结构。一个结构包括经由同轴连接器直接耦合到施加器100的同轴馈电(coax feed) 142,在同轴连接器处可以连接同轴电缆143。另一结构包括用于经由耦合膜片124将微波激发能量耦合到微波腔106的波导馈电138。同轴至波导的过渡140将来自固态微波发生器141的微波能量经由同轴电缆143耦合到波导馈电138。波导馈电提供了固定调谐短截线142或二进制调谐的额外优点,其用于提供用于等离子体的点火(ignition)的一个调谐位置和用于操作的一个固定位置。此结构提供了对由固态发生器141进行的自动频率调谐的额外的调谐增强。要注意的是,图2A示出了经由同轴电缆143连接到同轴至波导的过渡140的固态微波发生器141。在使用同轴馈电142的情况下,同轴电缆143直接连接到同轴连接器,在同轴连接器上,同轴电缆143经由波导馈电142上的同轴连接器直接耦合到施加器100。

[0067] 图2B示出了使用磁控管而代替图2A的固态发生器141的等离子体生成系统150B。参考图2B,高电压DC电源153经由高电压电缆155向磁控管头151施加功率。隔离器149将磁控管头151与施加器100隔离,使得从施加器100反射回来的任何功率被阻挡以防止对磁控管头151的损坏。双向耦合器147测量并耦合磁控管头151和施加器100之间的功率。耦合到施加器100的微波能量由三重短截线自动调谐器157调谐。

[0068] 在美国专利号5961851;7183514;5498308;6263830;8048329;7562638;7554053;和6439155中描述了各种等离子体施加器。那些美国专利(均以本申请中命名的至少一个发明人命名)通过引用以其整体并入本文。在现有的等离子体施加器中,例如,美国专利号5,961,851中描述的等离子体施加器,多个微波腔在 TM_{mnp} (横磁)模式下操作以创建拉长的激发场。微波腔内的等离子体收缩是处理气体压力的函数,并且随着压力增加,等离子体倾向于集中在单独腔中的每个的中心部分中。

[0069] 此外,在先前已知的技术中,如例如在美国专利号5,961,851和8,048,329中所描述的,微波扼流圈以单配置或双配置使用以降低TEM(横电磁)模式的E场强度。双配置被设计成使得扼流圈被彼此相邻地配置,以减少经过等离子体放电管的微波穿透。主要基于四分之一波长设计的这些相邻配置提供了仅对TEM模式配置高效的衰减。

[0070] 相反,在示例性实施例的等离子体施加器100中,在TE(横电)模式下在微波腔106中产生微波激发。示例性实施例的微波扼流圈108、110、112、114同时衰减TE模式和TEM模式

两者的电场。如本文详细描述，扼流圈108、110、112、114相对于微波腔106和相对于彼此的位置被选择为实现扼流圈108、110、112、114对TE模式和TEM模式两者的衰减的高效操作。

[0071] 期望的是，微波腔中的电场是均匀的，使得所得到的等离子体也是均匀的。在先前的等离子体施加器中，为了实现电场的均匀性，构造彼此相邻的多个腔，其可以是庞大的且长度很长。在这些系统中，每个单独的施加器管内的等离子体形成都取决于压力。随着压力增加，等离子体倾向于在管内收缩并在等离子体管的中心部分内塌缩或集中。这是因为没有足够的电场可用来防止等离子体收缩的事实。

[0072] 而且，在这些现有系统中，微波扼流圈彼此相邻进行设计，而没有对扼流圈之间的距离进行任何优化以实现期望的电场衰减。这些现有配置的性能是基于谐振或非谐振四分之一波长拓扑的，并且不如本实施例的性能高效。

[0073] 根据图1和2中所示的示例性实施例，等离子体施加器100具有TE_{mnp}（横电）类型电场配置，与现有施加器和现有技术中使用的TM_{mnp}（横磁）类型配置相反。根据示例性实施例，两个接合电场基本上覆盖了等离子体放电管102的整个长度。接合场中的仅存在与耦合膜片124横向相邻的部分场的一部分以由耦合膜片124生成的“近场”强度被填充并完成。因此，根据示例性实施例，等离子体放电管102内的接合电场经由主模式加上由耦合膜片124生成的消逝场的组合来实现。

[0074] 根据示例性实施例，以下等式(1)定义了微波腔106内的三维空间(x, y, z)中的磁场强度和电场强度。

$$[0075] \quad H_y = -\frac{C}{k_c^2} \left(\frac{p\pi}{d} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{d}$$

$$[0076] \quad E_x = \frac{j\omega\mu C}{k_c^2} \left(\frac{n\pi}{b} \right) \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{d}$$

$$[0077] \quad E_y = -\frac{j\omega\mu C}{k_c^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{d}$$

$$[0078] \quad k_c^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2$$

$$[0079] \quad \beta = \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 - k_c^2 \right]^{1/2} = \frac{p\pi}{d}$$

$$[0080] \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

(1)

[0081] 下面的等式(2)定义了针对矩形TE₁₀模式波导的电场和磁场模式。图3A和3B是示出了针对矩形TE₁₀模式波导的传播和场模式的示意图。

$$[0082] \quad E_y = E_0 \sin \frac{\pi x}{a}$$

$$[0083] \quad H_x = -\left(\frac{E_0}{Z_{TE}}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$$

$$[0084] \quad H_z = \frac{jE_0}{\eta} \left(\frac{\lambda}{2a}\right) \cos \frac{\pi x}{a}$$

$$[0085] \quad H_y = 0 = E_x$$

$$[0086] \quad Z_{TE} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}$$

$$[0087] \quad v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}$$

$$[0088] \quad v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$$

$$[0089] \quad \lambda_c = 2a$$

$$[0090] \quad f_c = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}}.$$

(2)

[0091] 参考等式(1),对于此特定实施例,整数p被选择为0(零),使得谐振不依赖于微波腔106的高度,在纵轴136的方向上测量该高度。通过将高度调整到足够大的值,获得示例性实施例的两个接合电场。在一些特定示例性实施例中,微波腔106的大约宽度为3英寸,并且大约高度为4.5英寸。利用这些腔尺寸,实现了示例性实施例的两个接合电场。

[0092] 因此,根据示例性实施例,在单个微波腔106中生成接合电场以沿着等离子体放电管102生成拉长的场。通过从耦合膜片124生成的“近场”消逝辐射而将接合场连接并完成为均匀场。由两个单电场和消逝辐射形成的这种均匀拉长的场使得等离子体施加器100能够在高达和超过10托的较高压下进行操作,而同时保持等离子体形成和均匀性。均匀拉长的场还提供沿着等离子体放电管102的均匀的等离子体形成和均匀的温度,使得能够使用通常被认为是脆弱的并且在先前更恶劣的等离子体形成环境中受到损坏的这种管材料。例如,根据示例性实施例,等离子体放电管102可以由诸如蓝宝石、石英、陶瓷、氮化铝、氮化硼的材料和/或其他类似材料形成。

[0093] 根据示例性实施例,等离子体放电管102内的等离子体形成不依赖于压力并且随着过程压力的增加而保持其形成。等离子体将在等离子体放电管102的中心部分内不塌陷并且不集中。均匀拉长的场防止了等离子体的集中,并且迫使等离子体在等离子体放电管102内保持其形成。

[0094] 根据示例性实施例,微波能量经由耦合膜片124耦合到微波腔106中。要注意的是,

在等式 (1) 和等式 (2) 中, 指数 x 、 y 、 z 分别表示微波腔 (波导) 的宽度、深度和高度 (长度)。在一些示例性实施例中, 波导腔 106 的尺寸根据等式 (1) 和 (2) 如上所述来选择, 其中等式 (1) 计算并定义了 TE_{mnp} 的微波腔 106 内的接合场形成, 并且等式 (2) 计算并定义了用于来自微波功率源的能量的传递的 TE_{10} 波导参数, 如以上详细描述, 所述微波功率源可以是例如固态发生器 141 或磁控管 151。

[0095] 根据示例性实施例, 在等离子体放电管 102 中生成两个接合电场。如上所述, 接合场中的仅存在位于与耦合膜片 124 横向相对的局部场的部分以由耦合膜片 124 生成的“近场”强度来填充并完成。因此, 如上所述, 经由主模式加上由耦合膜片 124 生成的消逝场的组合来实现接合电场, 从而产生沿着等离子体放电管 102 的纵轴延伸的基本均匀的电场。

[0096] 如上面详细描述, 示例性等离子体施加器 100 在 TE_{mnp} 模式下操作。在特定示例性实施例中, 整数 m 、 n 和 p 分别为 1、1 和 0。由于限定高度的整数 p 被设置为零 (0), 因此微波腔 106 的高度不依赖于模式。因此, 通过选择 TE_{110} 高度的两倍的长度, 可以形成由小段距离分开的两个独立的电场, 在组合端处由每个电场的残差强度进行弱连接。被设计为将微波能量传递并耦合到等离子体施加器 100 的耦合膜片 124 具有非常强的近场消逝模式, 其可以深入延伸到等离子体施加器 100 的内部部分, 其中两个独立的电场经由 TE_{110} 模式的弱残差场被设置并进行弱连接。两个独立的电场通过从耦合膜片 124 发射出的较强的消逝模式而被结合并组合, 从而创建了沿着等离子体放电管 102 的纵轴 136 的基本均匀的电场。

[0097] 图 4A、4B、5A 和 5B 示出了根据示例性实施例的微波扼流圈 108、110、112、114 的位置对微波腔 106 中的电场衰减的影响和因此对微波腔 106 内电场的容纳的影响。具体地, 图 4A 是根据示例性实施例的其中扼流圈相对于彼此未被最佳定位的等离子体施加器 100 的示意图, 并且图 4B 包括示出了针对多个等离子体密度条件在微波腔 106 中得到的电场衰减的曲线图。图 5A 是根据示例性实施例的其中扼流圈相对于彼此被最佳定位的等离子体施加器 100 的示意图, 并且图 5B 包括示出了针对多个等离子体密度条件在微波腔 106 中得到的电场衰减的曲线图。

[0098] 参考图 4A、4B、5A 和 5B, 内扼流圈 110 和 112 被称为“扼流圈 1”, 并且外扼流圈 108 和 114 被称为“扼流圈 2”。第二扼流圈 108 和 114 相对于第一扼流圈 110 和 112 的相对距离根据示例性实施例分别被识别为增强组合结构的衰减效率。而且, 扼流圈中的场强度非常低, 表明显著的衰减。如图中所示, 在示例性实施例中, 扼流圈 108、110、112、114 被设置在微波腔 106 的两端处。在一些实施例中, 扼流圈 108、110、112、114 填充有石英材料, 使得径向波导结构的直径可以做得相对小, 以增强系统的紧凑性。可以使用其他扼流圈填充材料, 诸如例如陶瓷、蓝宝石和其他介电材料。而且, 例如, 在其他实施例中, 扼流圈 108、110、112、114 填充有空气。

[0099] 参考图 4A 和 4B, 该配置不包括内部扼流圈 110、112 和相应的外部扼流圈 108、114 之间的优化间距。在图 4A 的示例性图示中, 相应的内部扼流圈和外部扼流圈之间的标称间隔大约为 0.08 英寸。参考图 4B 的对应强度曲线, 所示的在扼流圈 (即扼流圈 1 和扼流圈 2) 处产生的衰减是不显著的。也就是说, 在没有扼流圈 (特别是扼流圈之间的间距) 的优化定位的情况下, 实现了非常小的电场衰减或没有电场衰减。

[0100] 相反, 参考图 5A 和 5B, 该配置包括内部扼流圈 110、112 和相应的外部扼流圈 108、114 之间的优化间距。在图 5A 的示例性图示中, 相应的内部扼流圈和外部扼流圈之间的标称

间隔大约为0.38英寸。参考图5B的对应强度曲线,所示的在扼流圈(即扼流圈1和扼流圈2)处产生的衰减比图4A和4B的情况要显著得多。也就是说,在扼流圈(特别是扼流圈之间的间距)的优化定位的情况下,实现了电场衰减的实质性改善。

[0101] 根据示例性实施例,导致扼流圈之间的距离影响了两个相邻扼流圈之间的最佳衰减的性能的特征是存在 TE_{mnp} 模式,其具有根据等式(1)中的最后一行描述的波长:

$$[0102] \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d} \right)^2 \right]^{1/2}$$

[0103] 在特定的示例性实施例中,对于 TE_{110} 的模式,可以将波长计算为4.243",其中等式(1)的整数 m 、 n 和 p 分别是1、1和0。在此示例性实施例中,尺寸 a 和 b 均为3.0英寸,并且频率 $f = 2450\text{MHz}$ 。将 $m=1$ 、 $n=1$ 、 $p=0$ 、 $a=3.0$ 和 $b=3.0$ 代入上述 k 的等式中,并且求解 λ 得 $\lambda = 4.243$ 英寸。根据现有方法,波长计算如下: $\lambda = c/f$,其中 λ 是波长, c 是光速,并且 f 是频率。此计算适用于TEM模式。相反,根据示例性实施例,对于2450MHz的设计频率,示例性系统的波长是4.243英寸。根据示例性实施例,扼流圈分离距离是波长(即频率)的函数。对于给定的示例性实施例,在4.243英寸的微波等离子体激发波长和0.38英寸的扼流圈分离距离下,获得 $0.38/4.243 = 0.0896$ 的线性乘因子(即斜率)。根据示例性实施例,发现0.38英寸的扼流圈分离距离提供最佳衰减。然而,0.125-0.625英寸范围内的扼流圈分离距离也已被确定为提供可接受的衰减。

[0104] 因此,根据示例性实施例,与现有系统的TM模式相反,微波扼流圈配置被用于衰减在TE模式下在腔106中传播的微波能量。该扼流圈配置还限制或衰减在TEM模式下传播的微波能量。

[0105] 参考图4A、4B、5A和5B,衰减被计算为在等离子体放电管102的圆周上平均的扼流圈内部的电场和扼流圈外部的电场的比率。在10-100S/m的等离子体电导率范围内评估扼流圈性能,以确保在操作空间内的稳定性能。在特定的示例性实施例中,如图5B中所示,取决于等离子体阻抗,电场被衰减50-71倍。由于功率根据电场强度的平方而变化,因此功率衰减大约为2500-5000。

[0106] 因此,在微波腔106的相对端处的具有径向波导拓扑的两个相邻扼流圈以距彼此优化的距离而隔开,以同时衰减TE模式和TEM模式两者的组合。这至少是唯一的,因为同时针对TE模式和TEM模式两者,微波表面电流在扼流圈处接近零。在示例性实施例中,扼流圈具有匹配微波腔106的外尺寸的直径并且填充有石英材料,以为了紧凑性而进一步减小直径。如图5B中所示,对于TE模式和TEM模式两者,示例性实施例的该微波扼流圈配置(即以预先确定的距离隔开的径向波导配置)有效地降低了电场强度。相反,如图4B中所示,对于TE模式和TEM模式两者,在两个扼流圈的分离未被优化的情况下,电场衰减弱并且最小。这是因为,在没有优化分离的情况下,扼流圈处的TE模式的微波表面电流不为零,且因此实现了最小的衰减。

[0107] 如上所述,等离子体施加器100包括至少部分地环绕等离子体放电管102的冷却套104。在一些实施例中,期望通过某种形式的视线监视来监视等离子体放电管102的温度,诸如使用一个或多个红外(IR)检测器的温度检测。为了便于这种监视,等离子体冷却套104可以可选地包括一个或多个窗口,其对监视辐射(例如IR辐射)可以是透明。图6A包括根据示

例性实施例的示出了IR透明窗口103的冷却套104的一部分的示意性透视图。图6B包括根据例性实施例的图6A中所示的IR透明窗口103中的一个的示意性透视图。参考图1、6A和6B，等离子体放电管102可以可选地形成有如所示出的多个开口。相应的多个IR透明窗口103可以结合到冷却套104的外表面，该结合在窗口103和冷却套104之间提供密封。窗口103可以与可选的监视孔126对准，使得等离子体放电管102的内部可以例如通过一个或多个IR检测器来监视。窗口103的材料可以是IR透明材料，诸如硒化锌(ZnSe)、溴化钾(KBr)或类似材料。

[0108] 因为等离子体施加器100在低气压下操作，所以从等离子体放电管102去除足够的热量可能是具有挑战性的。根据例性实施例，冷却套104和等离子体放电管102之间的间隙被优化以用于最佳的热量去除效率。现在将详细描述提供等离子体施加器100特别是等离子体放电管102的冷却的方法。根据例性实施例，在施加器的相对侧处两个基本对称的构造为施加器提供空气冷却并为凸缘提供水冷却。

[0109] 根据例性实施例，等离子体施加器100中的强制空气冷却系统在压缩空气系统的大范围容量内获得等离子体放电管102处的最低温度。图7是根据例性实施例的用于等离子体生成系统150的冷却系统的操作的示意性功能图。参考图7，处理气体在第一端处进入等离子体放电管102，与微波腔106中的微波能量耦合以生成等离子体，并在等离子体放电管102的相对端处离开。冷却套104(其是直径大于等离子体放电管102的另一个管)与等离子体放电管102同心对准，以至少部分地环绕和包封等离子体放电管102。等离子体放电管102和冷却套104之间的间隙(g) 107为强制空气提供了通道以冷却等离子体放电管102。

[0110] 根据例性实施例，等离子体放电管102和冷却套104之间的间隙g是优化的尺寸。对于给定的空气系统，g确定传热系数(h)和空气流速(f)。随着g增加，f也增加，但h减小。间隙g的大小被选择为优化空气流速和传热系数。在一些例性实施例中，等离子体放电管具有1.00英寸(25.4mm)的外直径(OD)。具有不同内直径(ID)(诸如26mm、27mm、28mm、29mm和30mm)的各种标准尺寸的冷却套104将与1.00英寸OD等离子体放电管102一起操作。在这些可能的冷却套104中，已经通过模拟和经验数据确定了具有27mm的ID的冷却套在等离子体放电管102处提供最低温度。这导致间隙g的大小大约为0.8mm。

[0111] 图8是根据例性实施例的具有本文所述的优化冷却的等离子体施加器100的示意性截面图。参考图8，一旦确定了g的值，就可以通过增加管冷却部分C2外部的流导率(flow conductance)来进一步增强冷却。施加器100的三个不同部分中的每个中的流导率(被表示为C1、C2和C3)通常是不同的。施加器100的总导率可以被写为

$$[0112] \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}; \quad (3)$$

[0113] 其中C是总导率，C1是施加器100的上游部分的导率，C2是管冷却部分的导率，并且C3是施加器100的下游部分的导率。在例性实施例中，C1和C3被进一步最大化以获得最高的总导率和流速，并因此使施加器100中的冷却性能最大化。这包括在可能时使用最大数量的最大注入孔、最短的冷却空气通道和最大的横截面面积。

[0114] 与其他冷却方法相比，例性实施例的冷却方法对等离子体放电管102提供低热应力。由于所提供的改善的冷却，因此等离子体放电管102具有高的壁厚度来作为对来自不均匀冷却表面引起的高热应力的损害的防护是不必要的。根据例性实施例，对于等离

子体放电管102的内表面上的给定热通量和给定的管材，较薄的壁导致较低的管温度。这允许等离子体放电管102具有相对小的壁厚，从而实现进一步的温度降低。

[0115] 图9是示出了等离子体放电管102壁厚与温度之间的关系示意图。参考图9，

$$[0116] \quad q = k \frac{T_i - T_o}{\Delta x}; \quad (4)$$

[0117] 其中 q 是热通量， T_i 是内部管温度， T_o 是外部温度， k 是热导率，并且 Δx 是等离子体放电管102的厚度。等式(4)也可以被写作

$$[0118] \quad T_i = T_o + \frac{q\Delta x}{k}。 \quad (5)$$

[0119] 如等式(4)和等式(5)所示，较小的壁厚导致较低的内部管温度。

[0120] 图10是根据示例性实施例的另一等离子体施加器200的示意性截面图，示出了根据示例性实施例的在优化等离子体施加器200的冷却中所使用的设计和测试参数。参考图10，确定了大范围的压缩空气系统的容量的最佳冷却性能。具体地，使用如图10中所示的设置来设计和测试等离子体施加器100和200，其中 P_1 是上游压力， P_2 是下游压力， C_4 是上游流导率，并且 C_5 是由于连接引起的下游流导率。为了验证这种设计在流量设置不同的情况下是最佳的，使用理论设置来提供压缩空气系统的最高容量，即设置 $C_4 = C_5 = 0$ 。然后计算出流速，基于该流速来模拟当前设计的热性能并且发现其在等离子体放电管102的最低温度方面是最佳的。

[0121] 为了描述优化，由总热量等式：

$$[0122] \quad Q = C_p F (T_{out} - T_{in}); \quad (6)$$

[0123] 其中 Q 是每秒由空气去除的总热量， C_p 是空气的比热(W/kg)， F 是空气流速， T_{out} 是出口处的空气温度，并且 T_{in} 是入口处的空气温度。 Q 随着 F 的增加而增加。 F 随着气压的增加而增加，并且对于恒定的压力，等离子体管和套管之间的大间隙导致了较高的 F 。

[0124] 由传热，

$$[0125] \quad Q = hk (T_{wall} - T_{air}); \quad (7)$$

[0126] 其中 h 是传热系数， k 是空气的热导率， T_{wall} 是等离子体放电管102的温度，并且 T_{air} 是空气的温度。 Q 随着 h 的增加而增加。 h 也随着压力的增加而增加，并且当压力恒定时，等离子体放电管102和冷却套104之间的较窄间隙将导致较高的 h 。但是，在给定的压缩空气系统中，最高压力是恒定的。因此，根据示例性实施例，提供了等离子管102和冷却套104之间的优化的间隙。

[0127] 开发了两个测试条件，从中开发出系统中流导率的所有值。在所有可能条件和设计下的空气流被预测。基于所选择的可适用于所有压力范围的示例性商业压缩空气系统而生成优化的管间隙 g ，以对等离子体放电管102提供最佳的冷却结果。

[0128] 图11是根据示例性实施例的图10中所示的等离子体施加器200的示意性截面图。参考图11，等离子体施加器200类似于本文描述的等离子体施加器100，除了施加器200中的凸缘的水冷却之外。等离子体施加器100和200中的相同元件使用相同的附图标记来标识。

[0129] 参考图11，微波腔106包括围绕等离子体放电管102和冷却套104的外部的径向腔凸缘202A和202B。径向入口凸缘208A围绕等离子体放电管102和冷却套104的外部被设置在等离子体施加器200的入口端处。径向出口凸缘208B围绕等离子体放电管102和冷却套104

的外部被设置在等离子体施加器200的出口端处。

[0130] 除了等离子体施加器200经由冷却套104提供的空气冷却之外,等离子体施加器200还通过诸如水的液体提供对凸缘202A、202B、208A和208B的冷却。为此,等离子体施加器200包括径向水配件206A和206B,水可以通过所述径向水配件206A和206B进出循环水通道204A和204B。

[0131] 图12和图13包括根据示例性实施例的等离子体施加器的可替代实施例的示意性图示透视图。具体地,图12包括根据示例性实施例的基本圆柱形的等离子体施加器300的示意性图示透视图,并且图13包括根据示例性实施例的基本矩形的等离子体施加器400的示意性图示透视图。除非上下文另有指示,否则本文的整个详细描述分别适用于图12和13中的等离子体施加器300和400的实施例。

[0132] 参考图12和图13,等离子体施加器300和400包括用于启动等离子体点火的点火器灯组件311、411。等离子体施加器300、400包括处理气体入口316、416、以及用于根据上面详细描述示例性实施例提供空气冷却的空气冷却入口318、418和空气冷却出口330、430。等离子体施加器300、400还包括用于根据上面详细描述示例性实施例提供对凸缘的水冷却的水冷却端口3063、406。等离子体施加器300、400还包括耦合膜片324、424,在该耦合膜片324、424处可以安装波导以将微波能量耦合到微波腔306、406中以生成等离子体。根据示例性实施例,等离子体施加器300、400还包括微波扼流圈或阻波器308、310、312、314和408、410、412、414,如上面详细描述的。

[0133] 虽然已经参考本发明的示例性实施例特别示出和描述了本发明构思,但是本领域普通技术人员将理解的是,在不脱离由下面的权利要求所限定的本发明构思的精神和范围的情况下,可以在形式和细节方面做出各种改变。

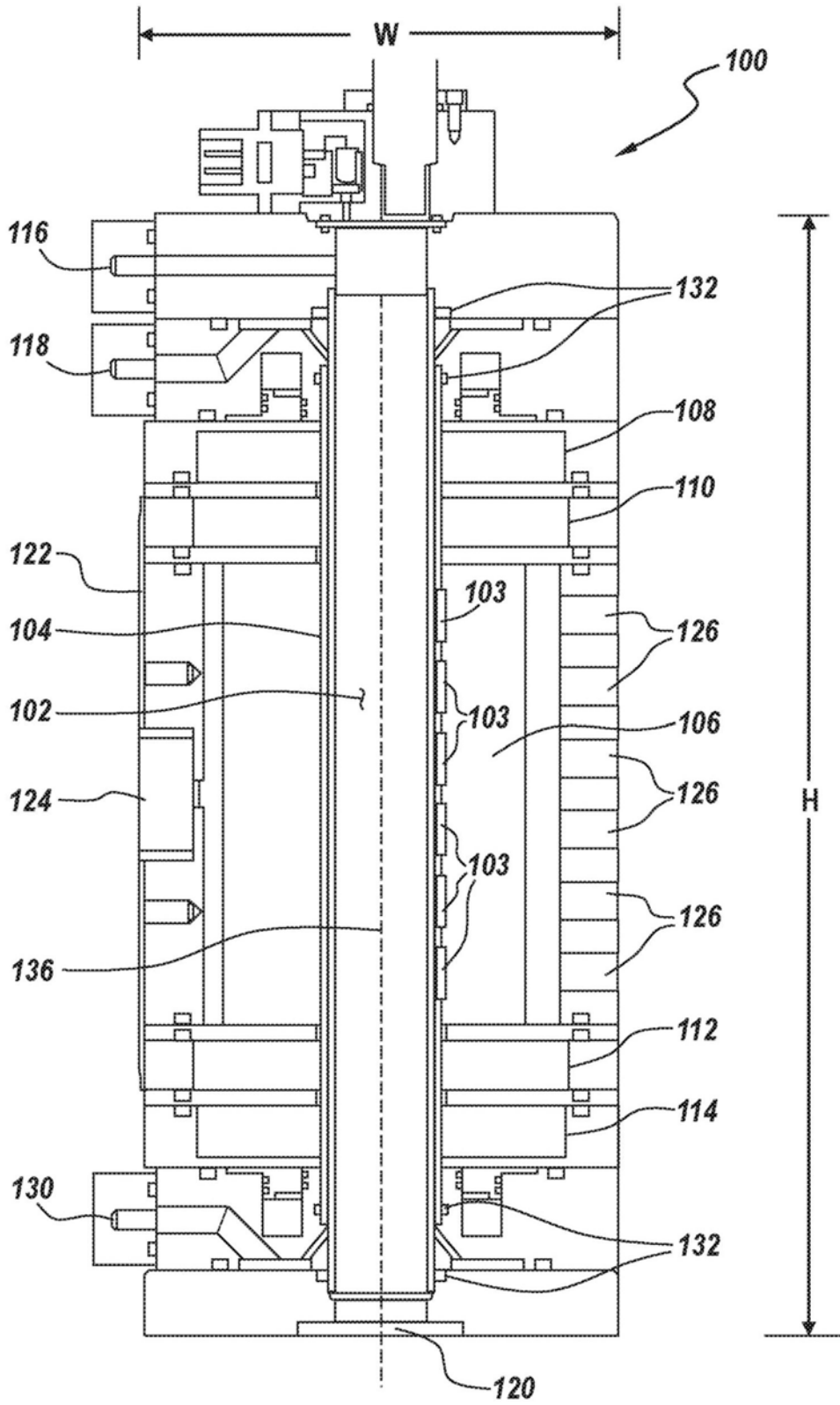


图1

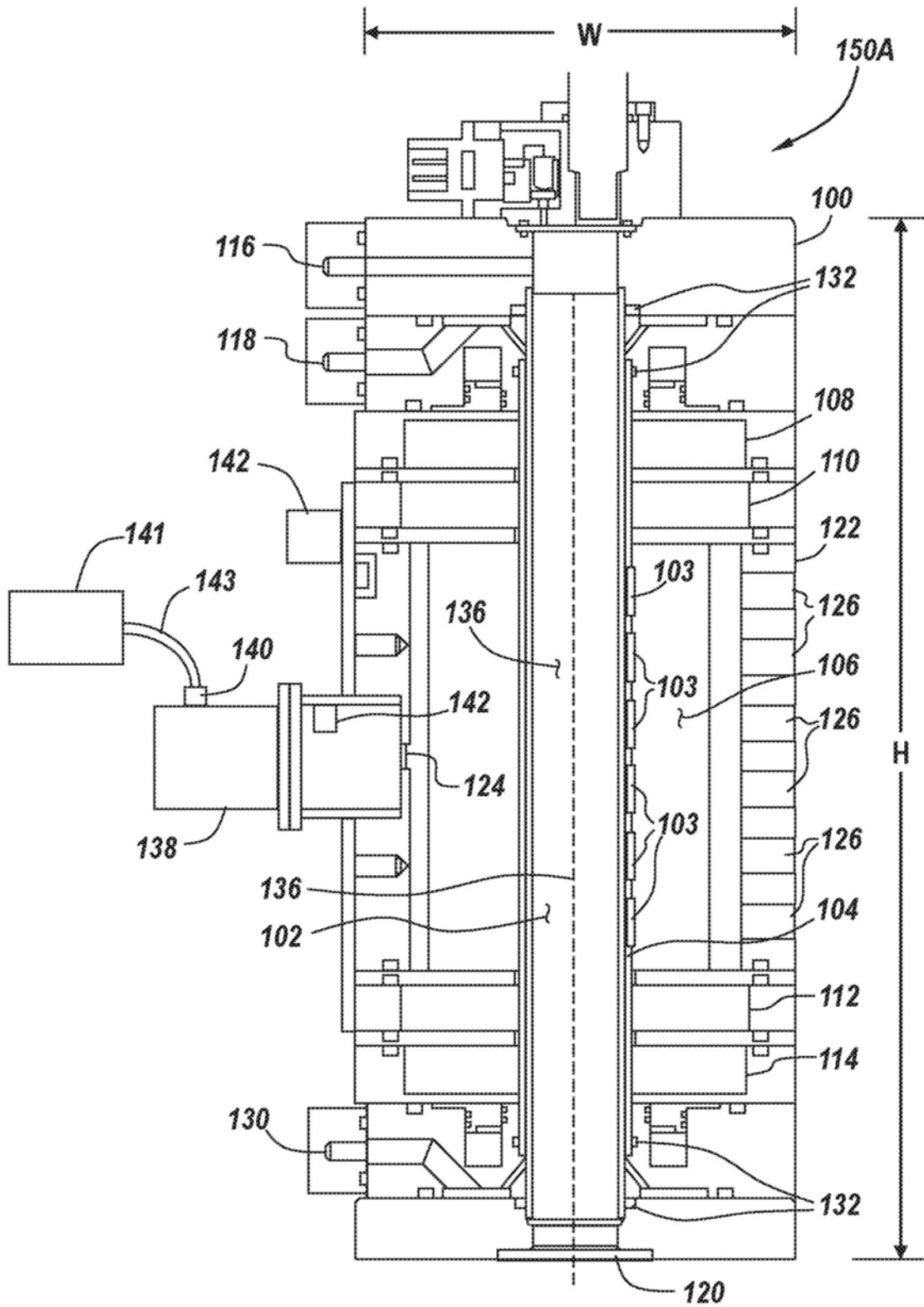


图2A

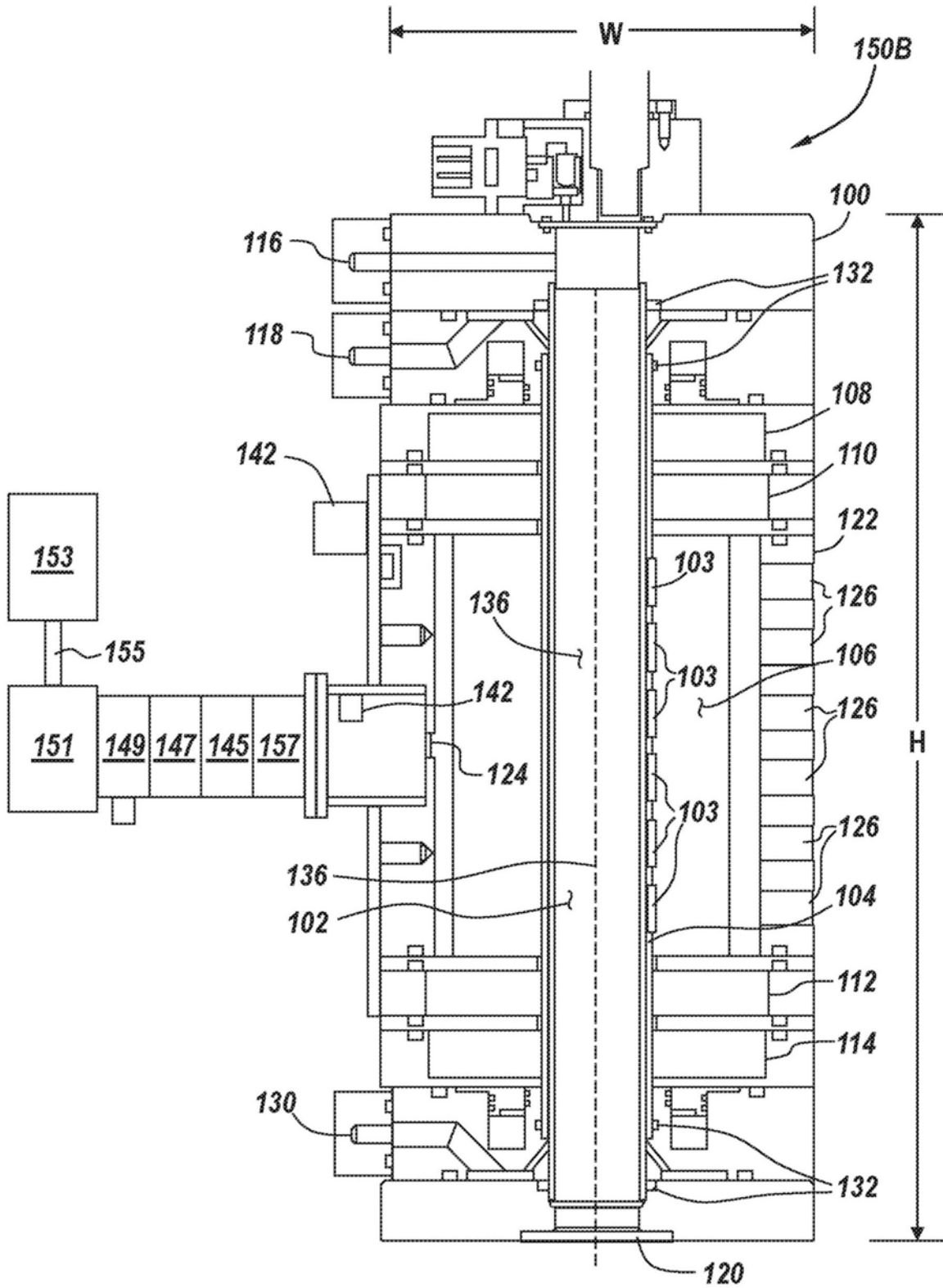


图2B

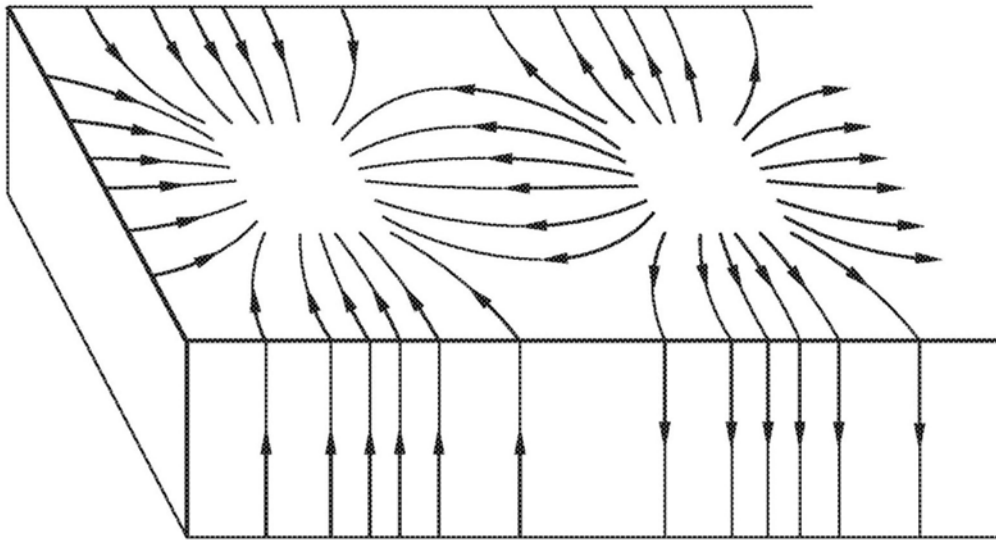


图3A

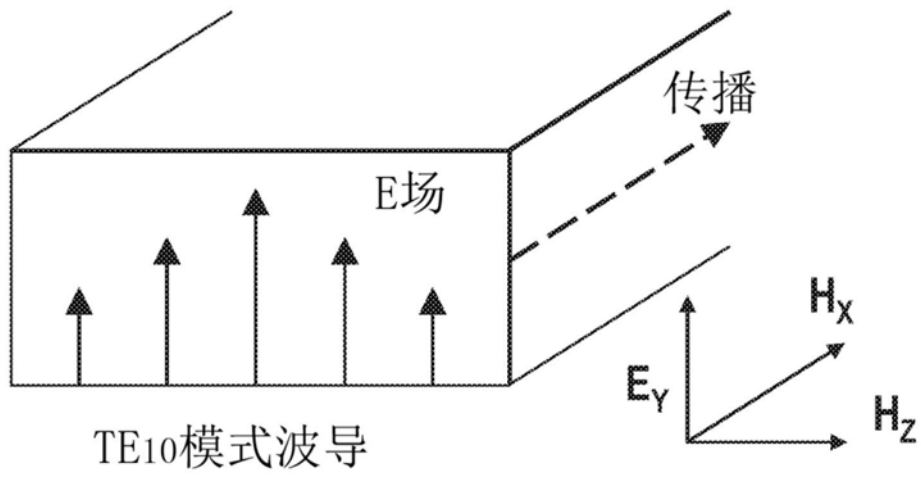


图3B

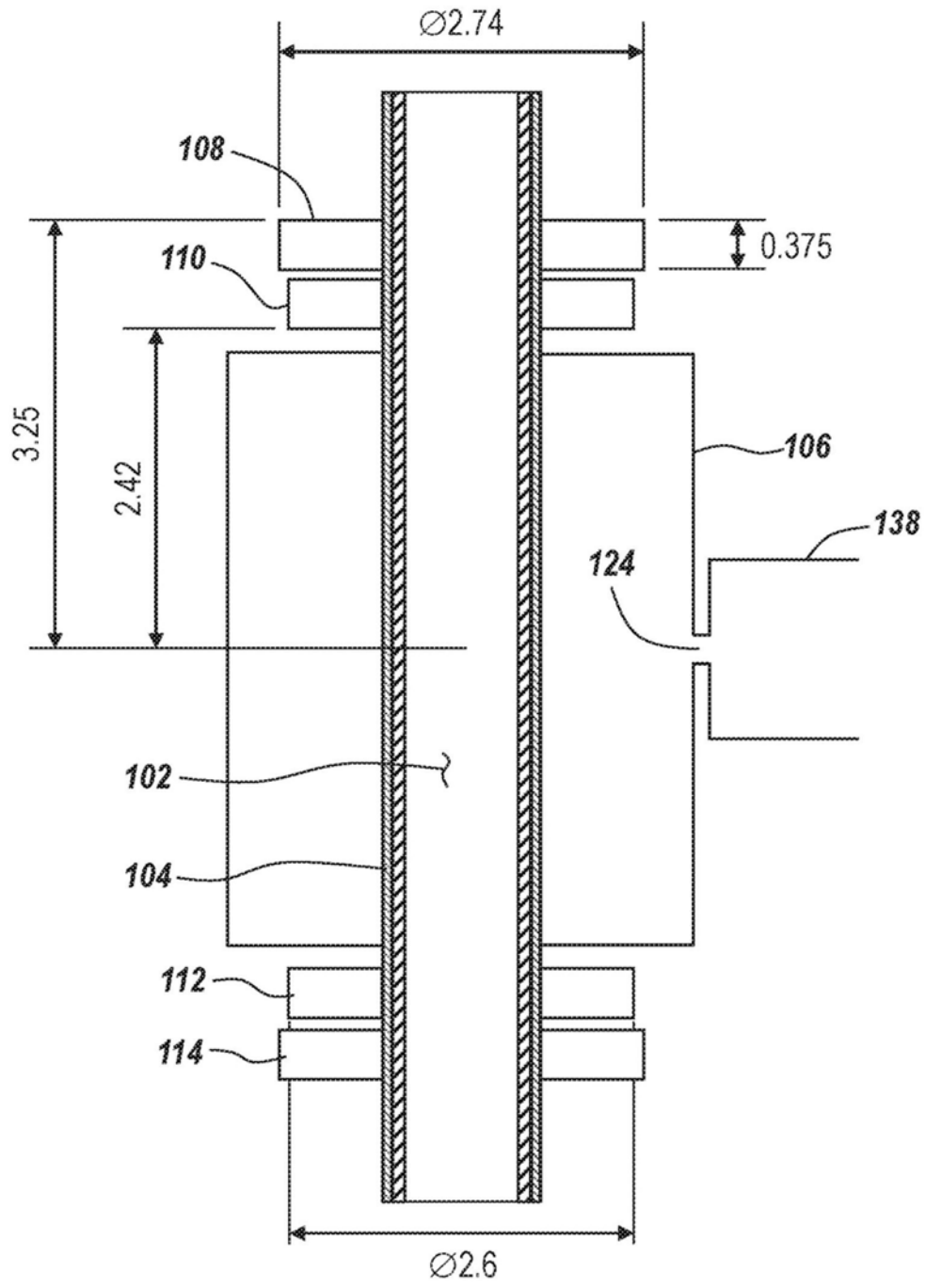


图4A

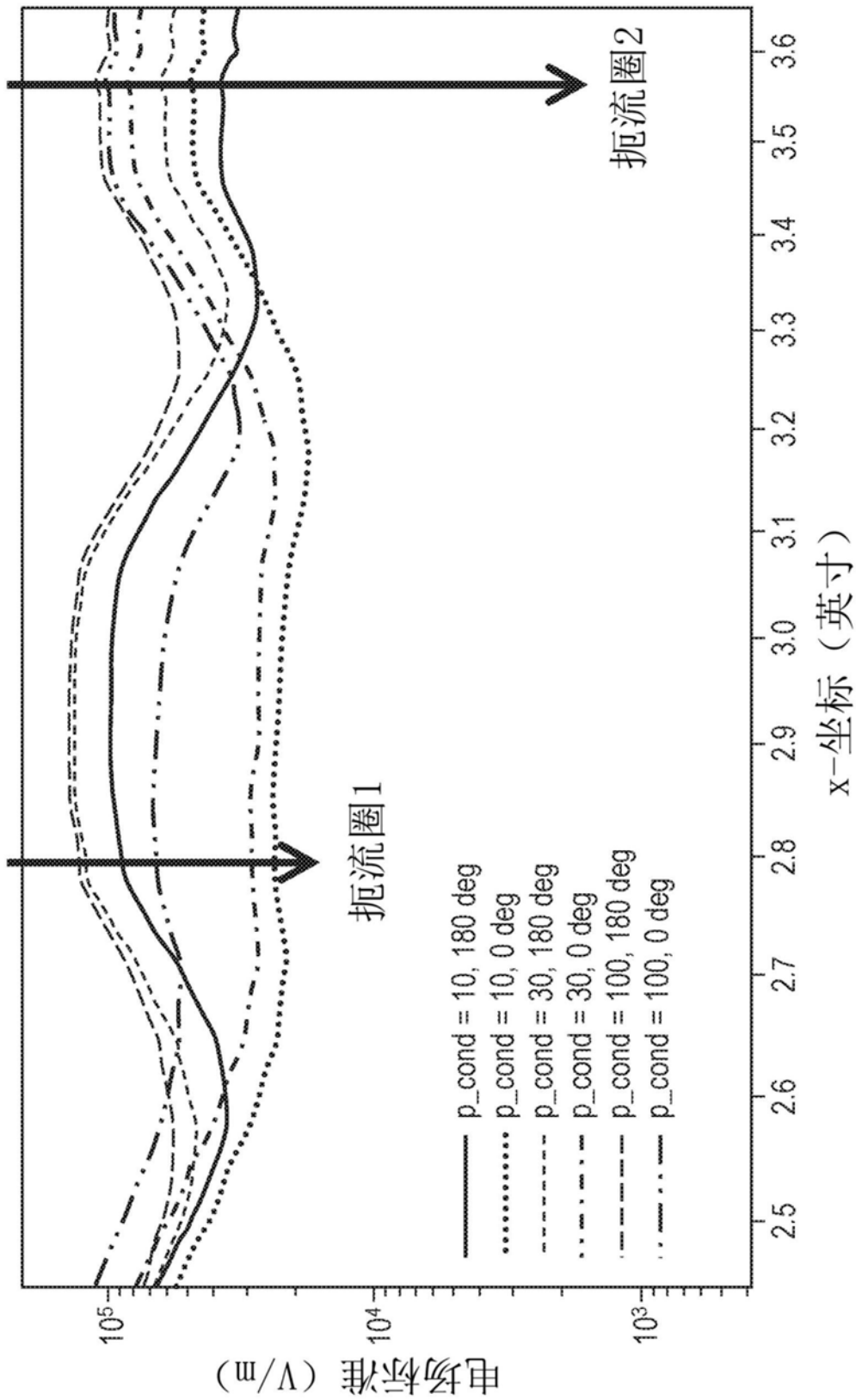


图4B

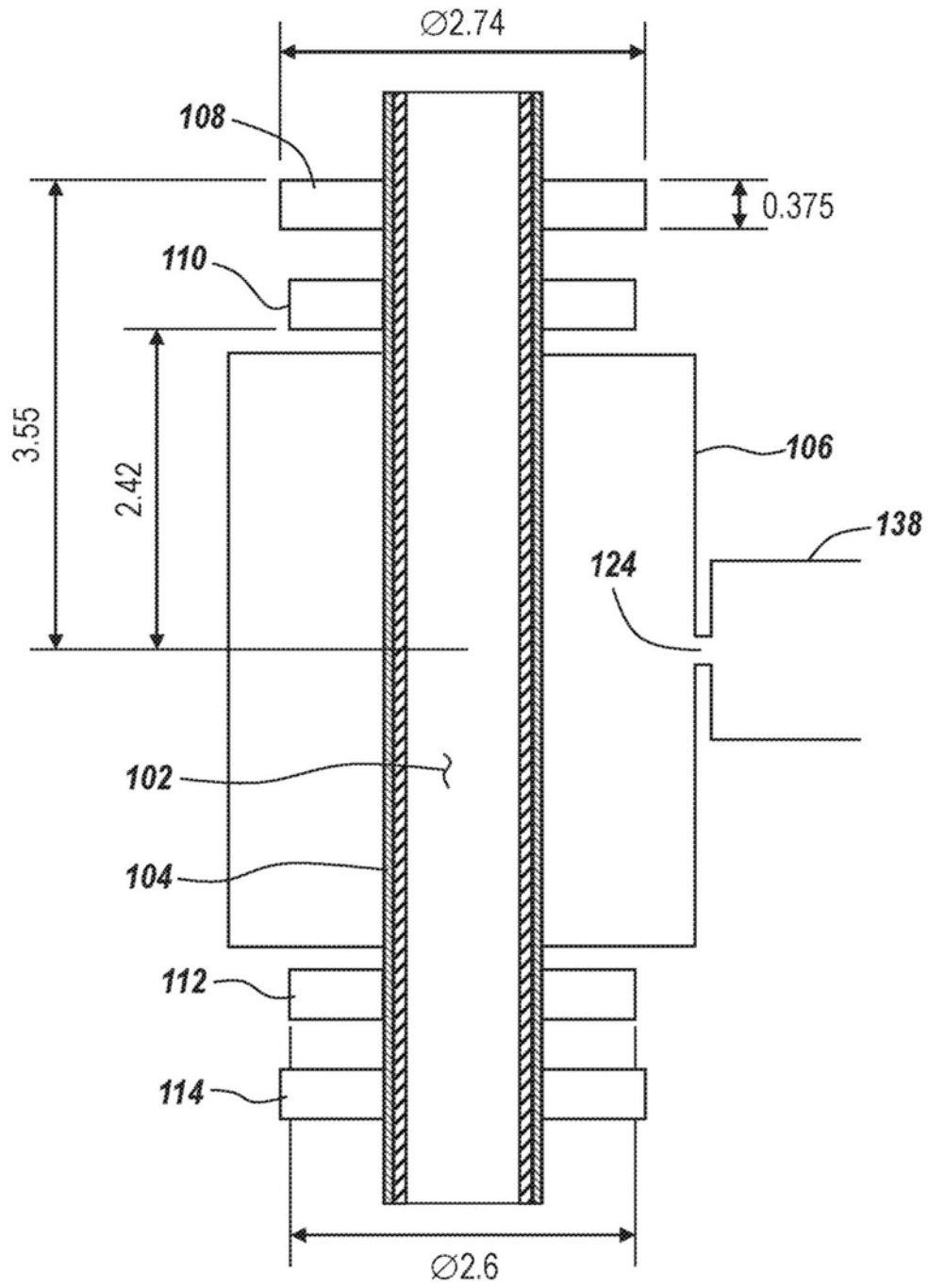


图5A

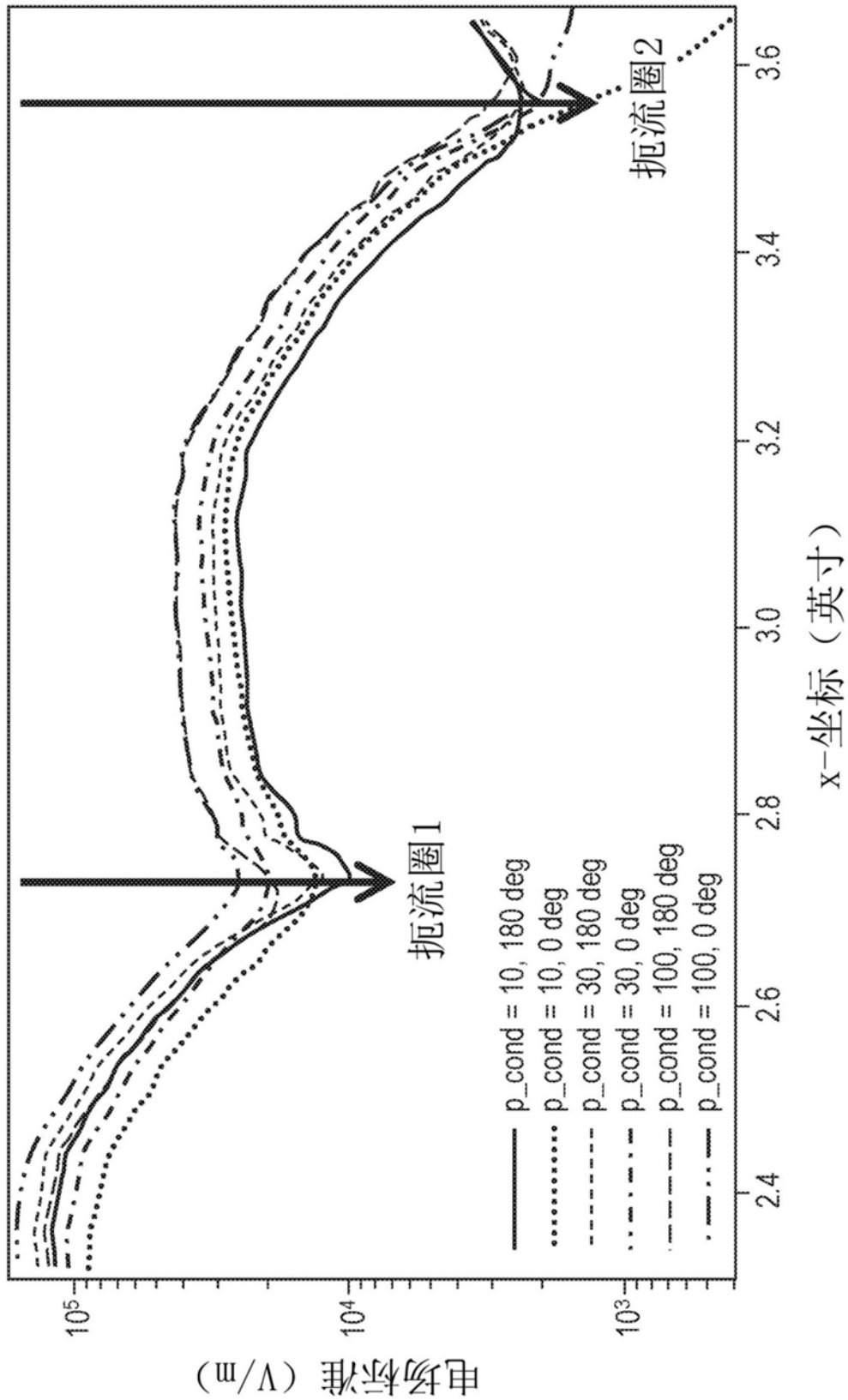


图5B

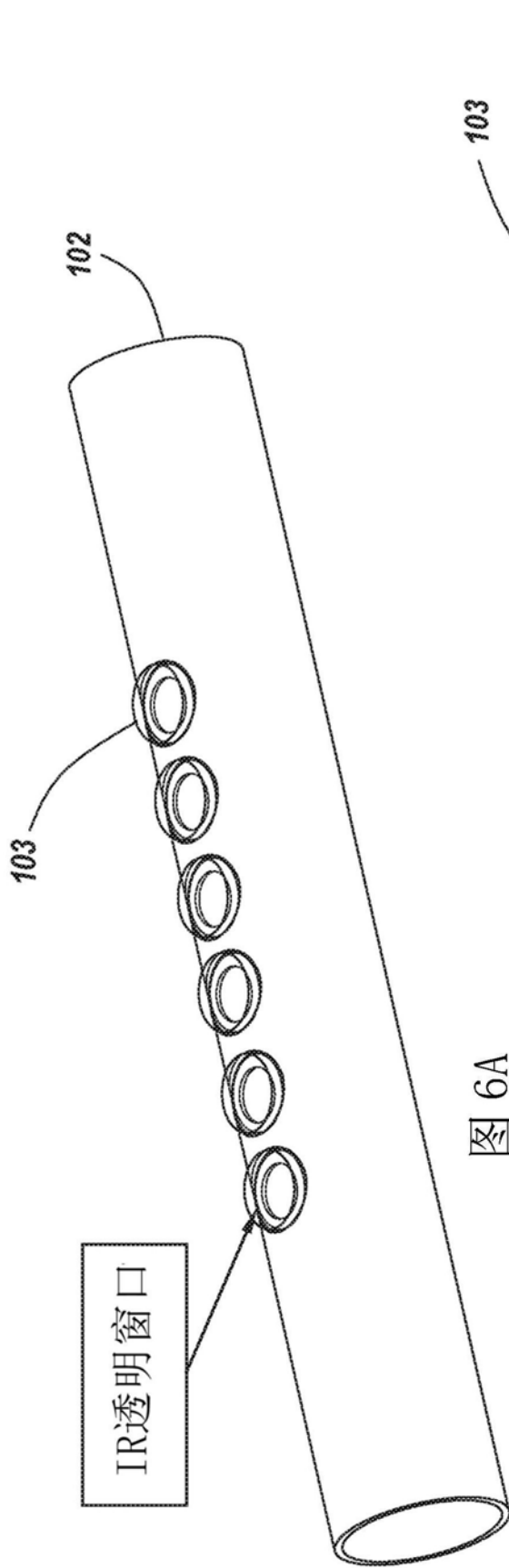


图 6A

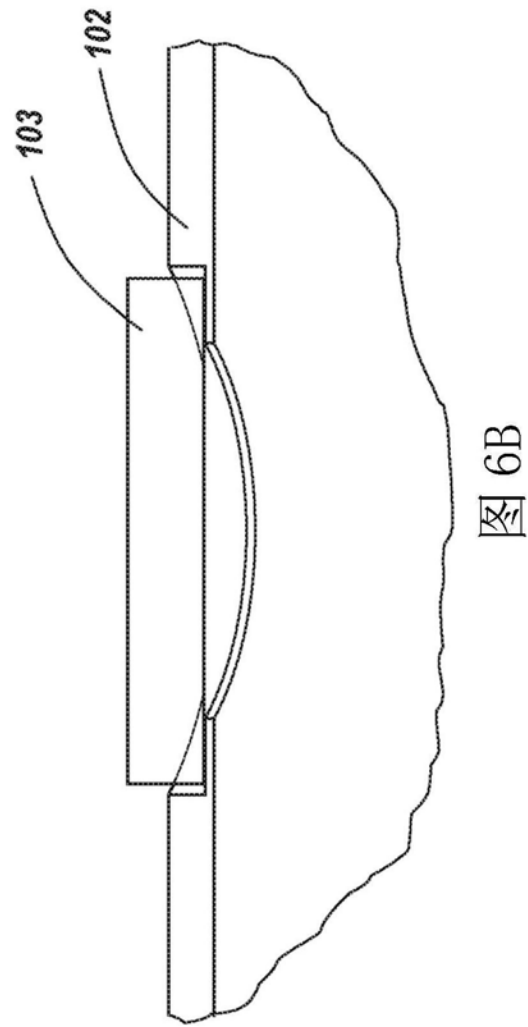


图 6B

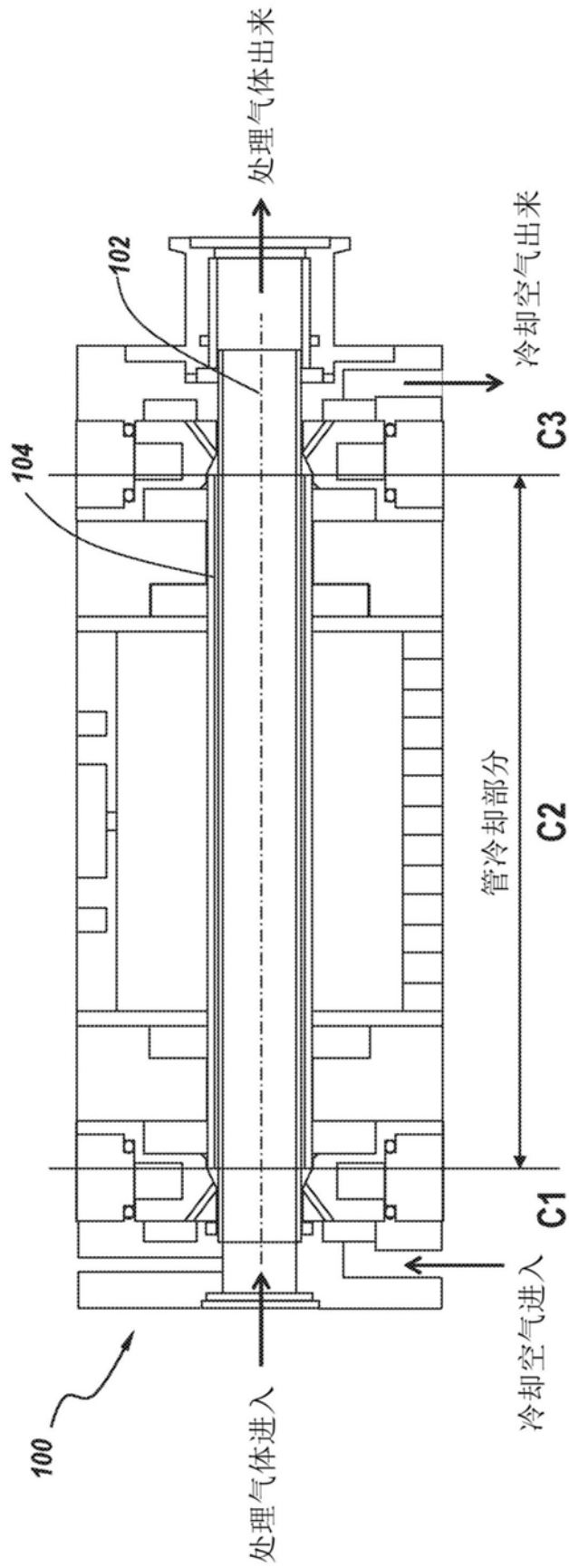


图8

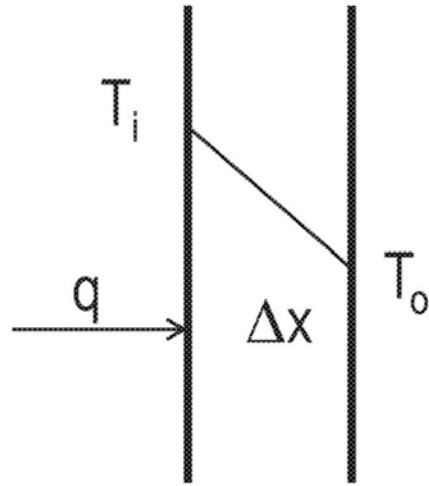


图9

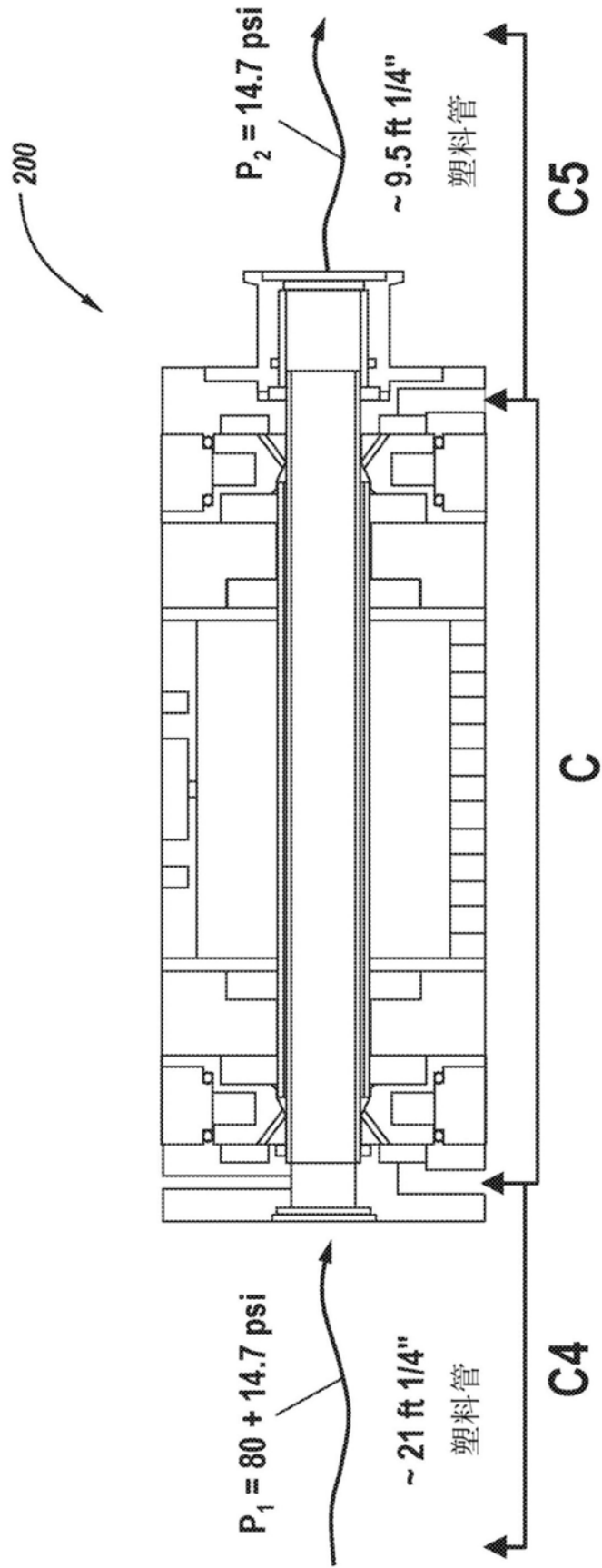


图10

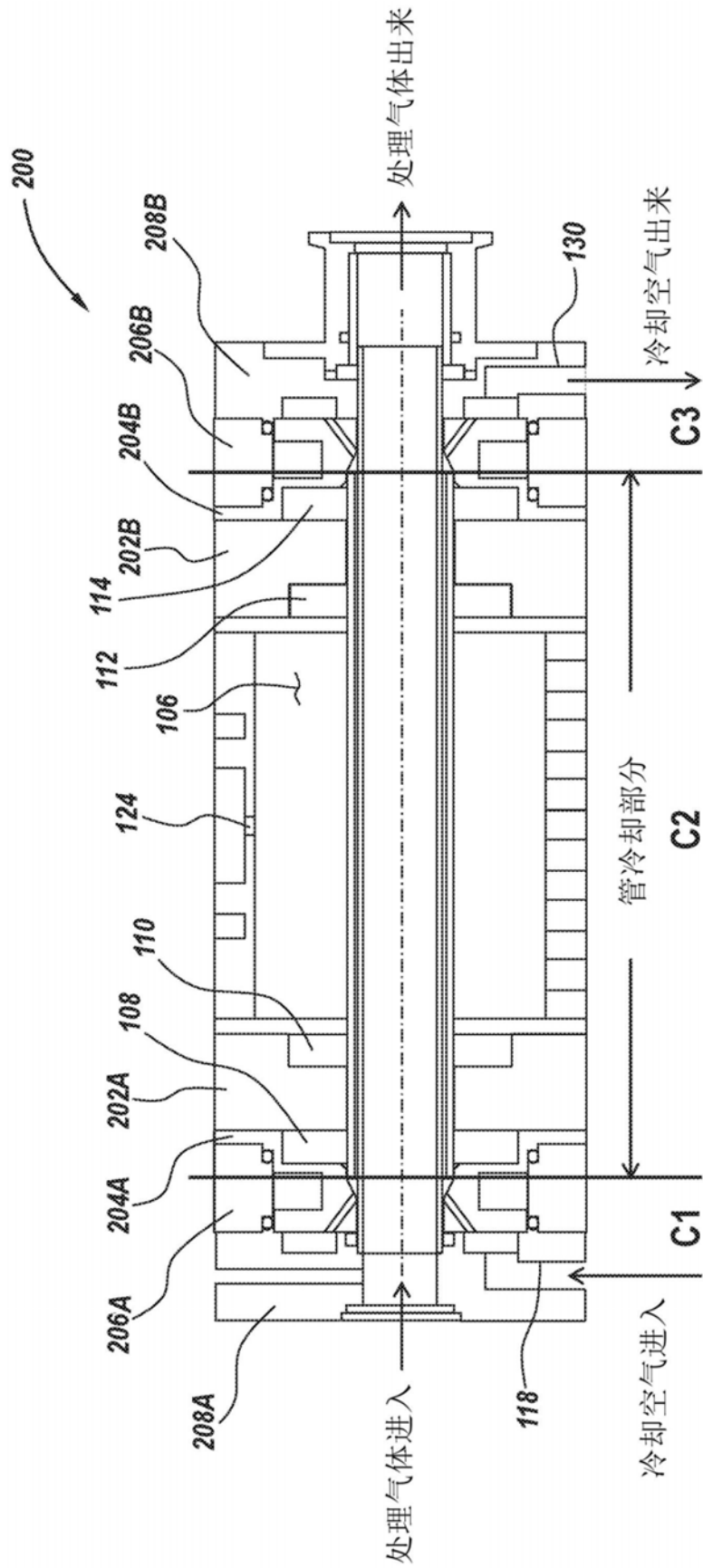


图11

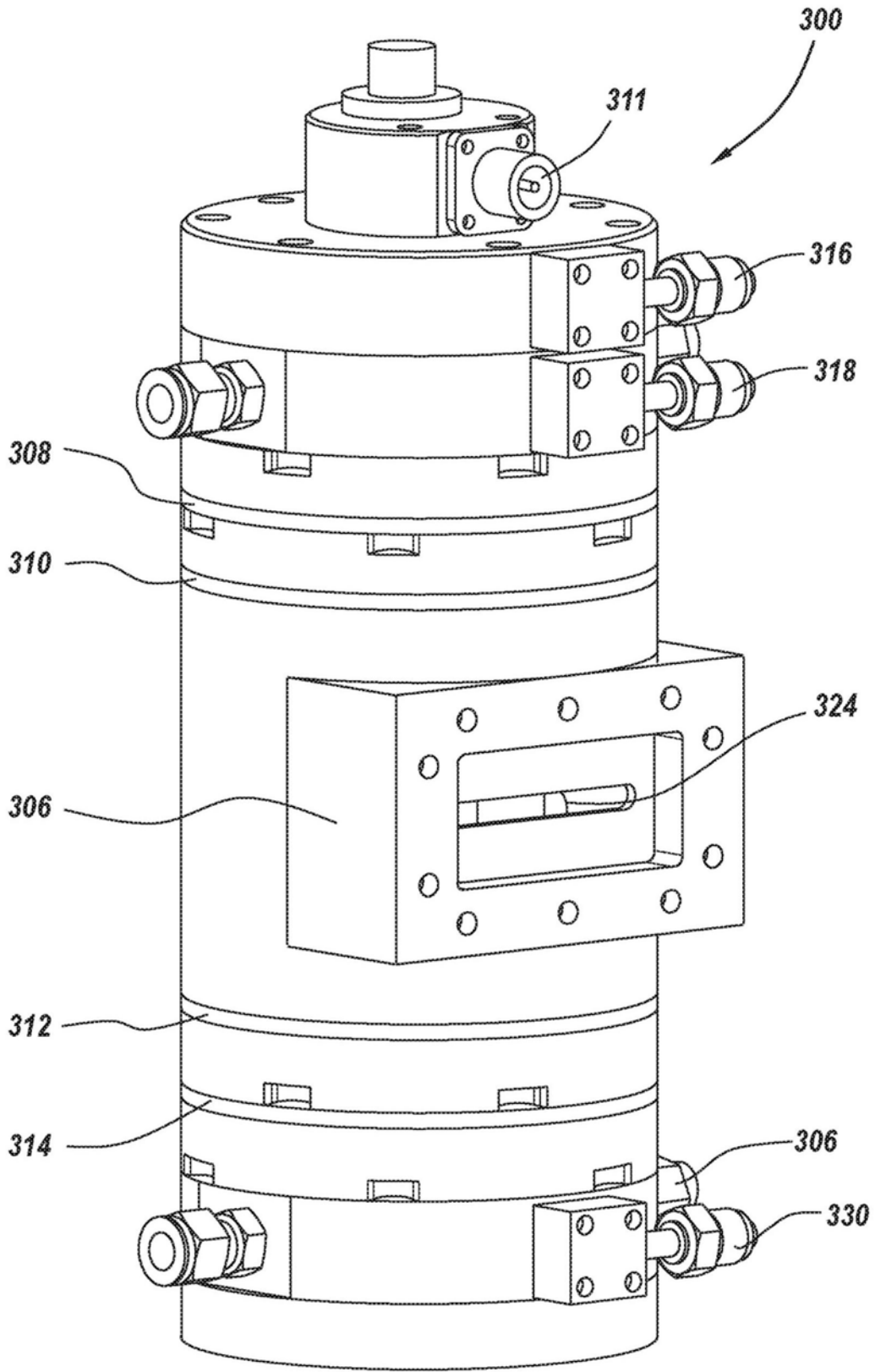


图12

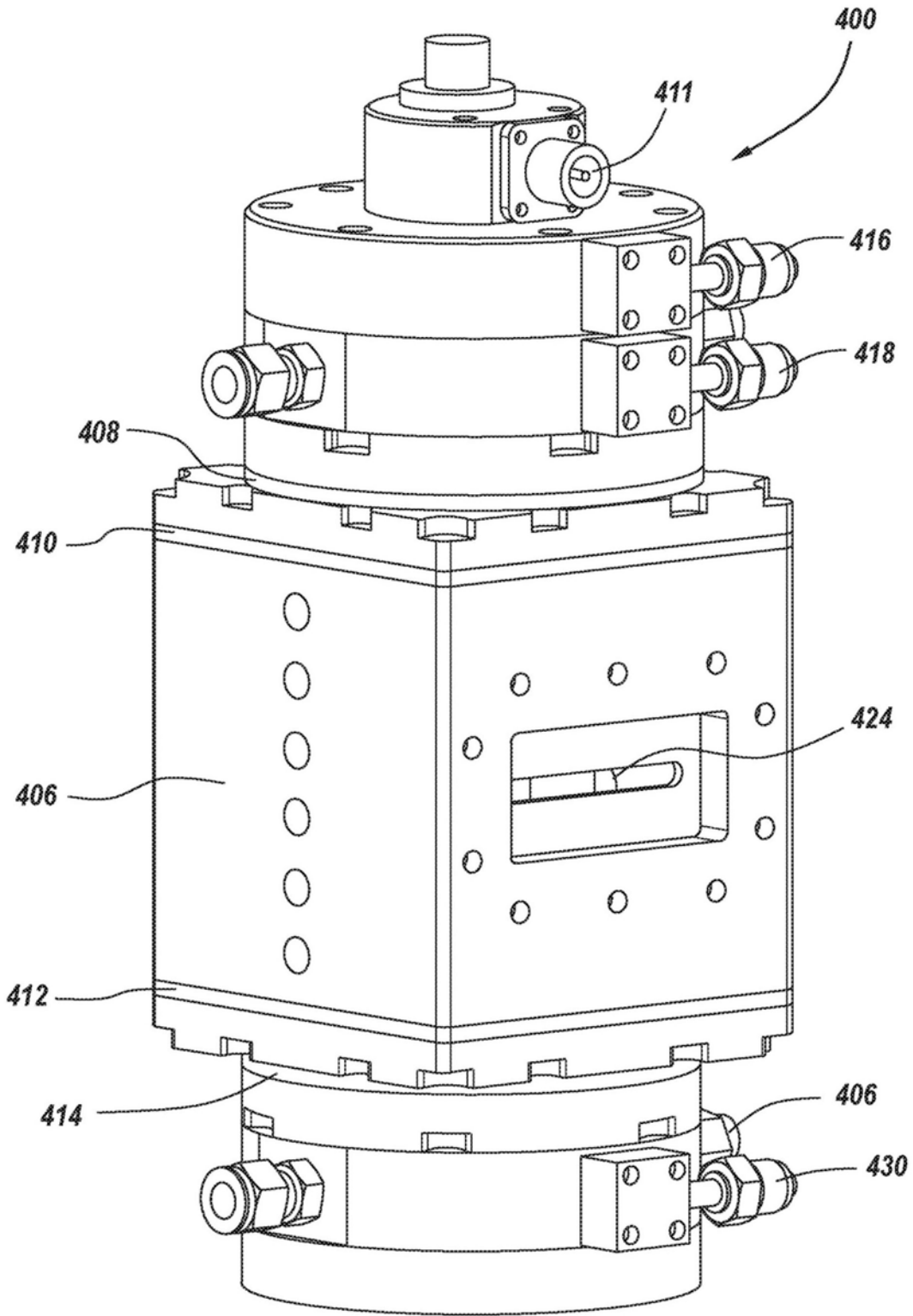


图13