(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 116671256 A
(43)申请公布日 2023.08.29

(21)申请号 202180089586.1

(22)申请日 2021.11.09

(30)优先权数据
63/111446 2020.11.09 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2023.07.06

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2021/058601 2021.11.09

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2022/099189 EN 2022.05.12

(71)申请人 阿尔法能源技术公司
地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 A·特卡乔夫 S·科雷帕诺夫

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001
专利代理师 汪小波 郭帆扬

(51)Int.Cl.
H05H 1/16(2006.01)

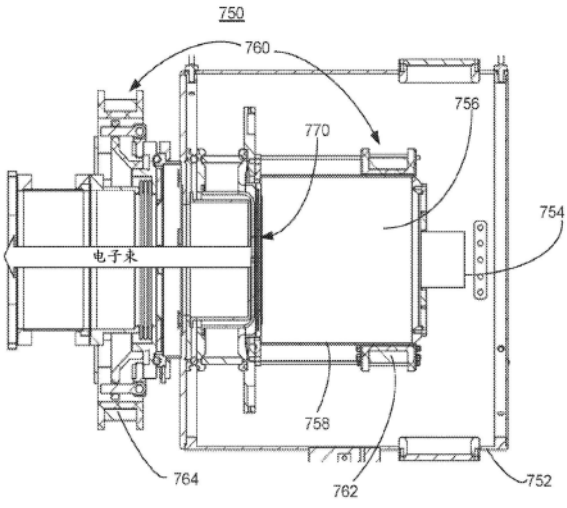
权利要求书4页 说明书25页 附图36页

(54)发明名称

针对用于等离子体加热的电子束的系统、装置和方法

(57)摘要

用于等离子体加热的带有等离子体发射器的长脉冲高功率电子束。该电子束包括电弧等离子体源、由加速栅的系统构成的电子光学系统、包括磁系统的束线、等离子体发生器线圈、等离子体发射器线圈、透镜线圈和束传输线圈，该磁系统用于提供有效的电子束形成、传输和向感兴趣的等离子体约束装置中的最终注入。



CN 116671256 A

1.一种用于生成和保持场反向配置(FRC)等离子体的方法,包括以下步骤:

在约束室内形成关于等离子体的FRC,

将电子束从电子束源轴向地注入到所述FRC等离子体中,以及

通过将快速中性原子的束从中性束注入器朝向所述约束室的中平面成一角度注入到所述FRC等离子体中,将所述FRC等离子体维持为恒定值或在所述恒定值附近而不衰减。

2.根据权利要求1所述的方法,其中,所述电子束源包括:

电弧等离子体源,

电子光学系统,其包括加速栅的系统,以及

束线,其包括配置成实现电子束形成、传输和注入到所述FRC等离子体中的磁系统。

3.根据权利要求2所述的方法,其中,所述电子束源还包括配置成实现环形束的束发射器。

4.根据权利要求3所述的方法,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅和覆盖所述发射器栅的中心区域中的孔口的掩模。

5.根据权利要求3所述的方法,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅以及第一和第二掩模,所述第一和第二掩模覆盖所述发射器栅的中心区域和与所述中心区域成间隔开的关系的外部区域中的孔口。

6.根据权利要求5所述的方法,其中,所述第二掩模具有与所述第一掩模的外部轮廓形状匹配的内部轮廓形状。

7.根据权利要求2所述的方法,其中,所述磁系统包括:

等离子体发生器线圈,

等离子体发射器线圈,

透镜线圈,以及

束传输线圈。

8.根据权利要求1所述的方法,其中,所述轴向地注入电子束包括:

生成等离子体,

使所述等离子体膨胀,

从所述等离子体中提取电子,以及

使所述提取的电子加速。

9.根据权利要求1至5所述的方法,其中,注入快速中性原子的束的所述步骤包括以下步骤中的一个:在第一束能量和第二束能量之间调谐所述多个中性束的束能量的步骤,其中,所述第二束能量不同于所述第一束能量;或者在第一束能量和第二束能量之间调谐所述多个中性束的束能量的步骤,其中,所述第二束能量不同于所述第一束能量,并且其中,所述第二束能量高于所述第一束能量;或者在第一束能量和第二束能量之间调谐所述多个中性束的束能量的步骤,其中,所述第二束能量不同于所述第一束能量,并且其中,所述多个中性束在注入发射的持续时间期间在所述第一束能量和所述第二束能量之间切换。

10.根据权利要求1至5中任一项所述的方法,还包括以下步骤中的一个:利用围绕所述室延伸的准直流线圈在所述室内生成磁场的步骤;或者利用围绕所述室延伸的准直流线圈在所述室内生成磁场并利用围绕所述室的相对端部延伸的准直流镜线圈在所述室的相对端部内生成镜磁场的步骤。

11.根据权利要求1至5中任一项所述的方法,其中,形成所述FRC等离子体的所述步骤包括在联接到所述约束室的相对端部的第一和第二形成部段中形成第一和第二形成FRC等离子体和使所述形成FRC等离子体朝向所述室的中平面加速以形成所述FRC。

12.根据权利要求8所述的方法,还包括将所述FRC的磁通量表面引导到联接到所述形成部段的所述端部的分流器中的步骤。

13.一种用于生成和保持场反向配置(FRC)等离子体的系统,包括:

约束室,

第一偏滤器和第二偏滤器,其联接到所述第一形成部段和第二形成部段,

第一轴向等离子体枪和第二轴向等离子体枪,其能够操作地联接到所述第一偏滤器和第二偏滤器、所述第一形成部段和第二形成部段以及所述约束室,

多个中性原子束注入器,其联接到所述约束室并定向成以小于法向于所述约束室的纵向轴线的角度朝向所述约束室的中平面注入中性原子束,

磁系统,其包括:多个准直流线圈,其定位在所述约束室、所述第一形成部段和第二形成部段以及所述第一偏滤器和第二偏滤器周围;第一组准直流镜线圈和第二组准直流镜线圈,其定位在所述约束室与所述第一形成部段和第二形成部段之间;以及第一镜塞和第二镜塞,其定位在所述第一形成部段和第二形成部段与所述第一偏滤器和第二偏滤器之间,

吸杂系统,其联接到所述约束室以及所述第一偏滤器和第二偏滤器,

一个或多个偏置电极,其用于电偏置生成的FRC的开放通量表面,所述一个或多个偏置电极定位在所述约束室、所述第一形成部段和第二形成部段以及所述第一偏滤器和第二偏滤器中的一个或多个内,

两个或更多个鞍形线圈,其联接到所述约束室,以及

一个或多个电子束,其轴向地联接到所述第一偏滤器和第二偏滤器中的一个或多个。

14.根据权利要求10所述的系统,其中,所述电子束包括:

电弧等离子体源,

电子光学系统,其包括加速栅的系统,以及

束线,其包括配置成实现电子束形成、传输和注入到所述FRC等离子体中的磁系统。

15.根据权利要求11所述的系统,其中,所述电子束还包括配置成实现环形束的束发射器。

16.根据权利要求15所述的系统,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅和覆盖所述发射器栅的中心区域中的孔口的掩模。

17.根据权利要求15所述的方法,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅以及第一掩模和第二掩模,所述第一掩模和第二掩模覆盖所述发射器栅的中心区域和与所述中心区域成间隔开的关系的外部区域中的孔口。

18.根据权利要求17所述的方法,其中,所述第二掩模具有与所述第一掩模的外部轮廓形状匹配的内部轮廓形状。

19.根据权利要求14所述的系统,其中,所述磁系统包括:

等离子体发生器线圈,

等离子体发射器线圈,

透镜线圈,以及

束传输线圈。

20.一种用于生成和保持场反向配置(FRC)等离子体的系统,包括:

约束室,

第一偏滤器和第二偏滤器,其联接到所述第一形成部段和第二形成部段,

多个等离子体枪、一个或多个偏置电极以及第一镜塞和第二镜塞中的一个或多个,其中,所述多个等离子体枪包括能够操作地联接到所述第一偏滤器和第二偏滤器、所述第一形成部段和第二形成部段以及所述约束室的第一轴向等离子体枪和第二轴向等离子体枪,其中,所述一个或多个偏置电极定位在所述约束室、所述第一形成部段和第二形成部段以及所述第一偏滤器和第二偏滤器中的一个或多个内,并且其中,所述第一镜塞和第二镜塞定位在所述第一形成部段和第二形成部段以及所述第一偏滤器和第二偏滤器之间,

吸杂系统,其联接到所述约束室以及所述第一和第二偏滤器,

多个中性原子束注入器,其联接到所述约束室并法向于所述约束室的所述轴线定向,

磁系统,其包括:多个准直流线圈,其定位在所述约束室、所述第一形成部段和第二形成部段以及所述第一偏滤器和第二偏滤器周围;第一组准直流镜线圈和第二组准直流镜线圈,其定位在所述约束室与所述第一形成部段和第二形成部段之间,以及

一个或多个电子束,其轴向地联接到所述第一偏滤器和第二偏滤器中的一个或多个,

其中,所述系统配置成生成FRC并在所述中性束被注入到所述等离子体中时维持所述FRC而不衰减。

21.根据权利要求20所述的系统,其中,所述电子束包括:

电弧等离子体源,

电子光学系统,其包括加速栅的系统,以及

束线,其包括配置成实现电子束形成、传输和注入到所述FRC等离子体中的磁系统。

22.根据权利要求21所述的系统,其中,所述电子束还包括配置成实现环形束的束发射器。

23.根据权利要求22所述的系统,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅和覆盖所述发射器栅的中心区域中的孔口的掩模。

24.根据权利要求22所述的方法,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅以及第一掩模和第二掩模,所述第一掩模和第二掩模覆盖所述发射器栅的中心区域和与所述中心区域成间隔开的关系的外部区域中的孔口。

25.根据权利要求24所述的方法,其中,所述第二掩模具有与所述第一掩模的外部轮廓形状匹配的内部轮廓形状。

26.根据权利要求22所述的系统,其中,所述磁系统包括:

等离子体发生器线圈,

等离子体发射器线圈,

透镜线圈,以及

束传输线圈。

27.一种电子束,包括:

电弧等离子体源,

电子光学系统,其包括加速栅的系统,以及

束线,其包括配置成实现电子束形成、传输和向感兴趣的等离子体约束装置中的注入的磁系统。

28.根据权利要求27所述的系统,其中,所述电子束包括:

电弧等离子体源,

电子光学系统,其包括加速栅的系统,以及

束线,其包括配置成实现电子束形成、传输和注入到所述FRC等离子体中的磁系统。

29.根据权利要求28所述的系统,其中,所述电子束还包括配置成实现环形束的束发射器。

30.根据权利要求29所述的系统,其中,所述磁系统包括:

等离子体发生器线圈,

等离子体发射器线圈,

透镜线圈,以及

束传输线圈。

31.根据权利要求29所述的系统,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅和覆盖所述发射器栅的中心区域中的孔口的掩模。

32.根据权利要求29所述的方法,其中,所述束发射器包括多孔口发射器栅以及第一掩模和第二掩模,所述第一掩模和第二掩模覆盖所述发射器栅的中心区域和与所述中心区域成间隔开的关系的外部区域中的孔口。

33.根据权利要求32所述的方法,其中,所述第二掩模具有与所述第一掩模的外部轮廓形状匹配的内部轮廓形状。

针对用于等离子体加热的电子束的系统、装置和方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2020年11月9日提交的美国临时专利申请No.63/111,446的优先权，该申请全文以引用方式并入本文中以用于所有目的。

技术领域

[0003] 本文中描述的实施例大体上涉及电子束，并且更特别地涉及用于促进等离子体加热的带有等离子体发射器的长脉冲、高功率电子束的系统、装置和方法。

背景技术

[0004] 场反向配置(FRC,Field Reversed Configuration)属于被称为紧凑环(CT,compact toroids,有时也称为紧凑等离子体环)的磁等离子体约束拓扑结构的类别。它主要表现出极向磁场并具有零或小的自生环形场(参见M.Tuszewski,Nucl.Fusion 28,2033(1988))。这种配置的吸引力在于其易于构造和维护的简单的几何形状、促进能量提取和除灰的天然的不受限制的偏滤器以及非常高的β(β是平均等离子体压力与FRC内部的平均磁场压力的比率)(即高功率密度)。高β性质有利于经济操作和使用先进的无中子燃料，诸如$D\text{-}He^3$和$p\text{-}B^{11}$。

[0005] 形成FRC的传统方法使用反向场角向箍缩(θ-pinch)技术，产生热的高密度等离子体(参见A.L.Hoffman和J.T.Slough,Nucl.Fusion 33,27(1993))。这种方法的一种变型为平移-捕获方法，在这种方法中，在角向箍缩“源”中形成的等离子体差不多立即从一个端部出射到约束室中。平移的等离子体团然后被捕获在室的端部处的两个强镜之间(参见例如H.Himura、S.Okada、S.Sugimoto和S.Goto,Phys.Plasmas 2,191(1995))。一旦处于约束室中，可应用各种加热和电流驱动方法，诸如束注入(中性或中和的)、旋转磁场、RF或欧姆加热等。这种源的分离和约束功能为潜在的未来聚变反应堆提供了关键的工程优势。FRC被证明极其稳健，对于动态形成、平移和暴力捕获事件具有适应性。此外，它们显示出呈现优选等离子体状态的趋势(参见例如H.Y.Guo、A.L.Hoffman、K.E.Miller和L.C.Steinhauer,Phys.Rev.Lett.92,245001(2004))。在过去的十几年中在开发其它FRC形成方法方面已取得了重大进展：合并具有相反方向螺旋性的球马克(参见例如Y.Ono、M.Inomoto、Y.Ueda、T.Matsuyama和T.Okazaki,Nucl.Fusion39,2001(1999))和通过用旋转磁场(RMF)驱动电流(参见例如I.R.Jones,Phys.Plasmas 6,1950(1999))，其也提供额外的稳定性。

[0006] 现有FRC系统设计的缺点是缺乏除中性束注入之外的高效电子加热机制，由于通过离子-电子碰撞对电子的功率阻尼的机制，中性束注入倾向于具有较差的电子加热效率。等离子体的电子加热的一种方法是使用电子束。在FRC系统中，用电子束进行高效的电子加热需要长脉冲、高功率的电子束。

[0007] 形成长脉冲高功率电子束的挑战主要与阴极退化和由高束导流系数导致的显著的束空间电荷效应相关联。在许多现有应用中，阴极或者由固体材料制成，或者由形成所谓等离子体发射器的栅电极的系统制成。在这两种情况下，由于用高能粒子轰击阴极的活性

表面而产生高热通量的问题。束的空间电荷效应可导致束包络随距离迅速膨胀或坍缩。在没有采取额外措施的情况下，束包络行为也变得对沿着束线的环境气体条件极其敏感，使得实际上不可能控制束向最终目的地的传播和传输。

[0008] 为了实现在开放等离子体约束配置中的等离子体加热，电子束的注入可沿着等离子体约束设施的对称轴线进行，其伴随着将束通过磁塞传输到约束区域中的问题。这对电子束的磁系统以及(束的)等离子体发生器装置的磁系统提出了许多具体要求。

[0009] 如所指出的，现有方法的主要缺点是阴极退化，这导致低脉冲持续时间和低束电流。由固体材料制成的阴极不能承受与加热和粒子轰击相关联的高能通量。因此，在现有的方法中，脉冲持续时间通常被限制在～100微秒。出于同样的原因，在有必要更换阴极之前，工作循环的数量也被限制到～100-1000个脉冲。

[0010] 另外，在现有方法中，束流的密度以及因此束空间电荷保持在相对较小的值，以便能够在设计束线时和在束传输期间忽略空间电荷效应。

[0011] 需要促进用于等离子体加热的带有等离子体发射器的长脉冲、高功率电子束的改进的系统、装置和方法。

发明内容

[0012] 本文中提供了用于生成用于FRC等离子体的等离子体加热的带有等离子体发射器的长脉冲、高功率电子束的系统、装置和方法的示例实施例。在示例实施例中，该电子束包括电弧等离子体源、由加速栅的系统构成的电子光学系统、包括磁系统的束线、等离子体发生器线圈、等离子体发射器线圈、透镜线圈和束传输线圈，该磁系统用于提供有效的电子束形成、传输和向感兴趣的等离子体约束装置中的最终注入。

[0013] 通过研究以下附图和详细描述，本文中描述的主题的其它系统、装置、方法、特征和优点对于本领域技术人员将是或将变得显而易见。所有这些附加的系统、方法、特征和优点都旨在包括在本说明书中，包括在本文中描述的主题的范围内，并受所附权利要求书的保护。示例实施例的特征决不应被解释为限制所附权利要求书，权利要求书中没有对这些特征的明确叙述。

附图说明

[0014] 作为本说明书的一部分被包括的附图图示了当前的示例实施例，并且与上面给出的一般描述和下面给出的示例实施例的详细描述一起用于解释和教导本发明的原理。

[0015] 图1图示了与在常规FRC机制(CR)下以及其它常规FRC实验相比在高性能FRC机制(HPF)下本发明的FRC系统中的粒子约束。

[0016] 图2图示了本发明的FRC系统的部件和在本发明的FRC系统中可产生的FRC的磁拓扑结构。

[0017] 图3A图示了如从顶部观察的本发明的FRC系统的基本布局，包括中心约束容器、形成部段、偏滤器、中性束、电极、等离子体枪、镜塞和弹丸注入器的优选布置。

[0018] 图3B图示了如从顶部观察的中心约束容器，并且示出了以法向于中心约束容器中的长对称轴线的角度布置的中性束。

[0019] 图3C图示了如从顶部观察的中心约束容器，并且示出了以小于法向于中心约束容

器中的长对称轴线的角度布置的中性束，并被引导以朝向中心约束容器的中平面注入粒子。

[0020] 图3D和图3E分别图示了本发明的FRC系统的备选实施例的基本布局的俯视图和透视图，包括中心约束容器、形成部段、内偏滤器和外偏滤器、以小于法向于中心约束容器中的长对称轴线的角度布置的中性束、电极、等离子体枪和镜塞的优选布置。

[0021] 图4图示了用于形成部段的脉冲功率系统的部件的示意图。

[0022] 图5图示了单个脉冲功率形成滑动件的等距视图。

[0023] 图6图示了形成管组件的等距视图。

[0024] 图7图示了中性束系统和关键部件的部分截面等距视图。

[0025] 图8图示了约束室上的中性束布置的等距视图。

[0026] 图9图示了Ti和Li吸杂系统的优选布置的部分截面等距视图。

[0027] 图10图示了安装在偏滤器室中的等离子体枪的部分截面等距视图。还示出了相关联的磁镜塞和偏滤器电极组件。

[0028] 图11图示了在约束室的轴向端处的环形偏置电极的优选布局。

[0029] 图12图示了从在两个场反向角向箍缩形成部段处的一系列外部抗磁圈和嵌入中心金属约束室内部的磁探针获得的FRC系统中排斥通量半径的演变。时间从形成源中同步场反向的时刻开始测量，并且距离z相对于机器的轴向中平面给出。

[0030] 图13A、图13B、图13C和图13D图示了来自本发明的FRC系统上的代表性的非HPF非持续放电的数据。示出为时间的函数的是(图13A)在中平面处的排斥通量半径、(图13B)来自中平面CO2干涉仪的线积分密度的6条弦、(图13C)来自CO2干涉仪数据的Abel反演密度径向分布以及(图13D)来自压力平衡的总等离子体温度。

[0031] 图14图示了图13A、图13B、图13C和图13D中所示的本发明的FRC系统的相同放电在选定时间处的排斥通量轴向分布。

[0032] 图15图示了安装在约束室外部的鞍形线圈的等距视图。

[0033] 图16A、图16B、图16C和图16D图示了注入中性束的FRC寿命和脉冲长度的相关性。如图所示，更长的束脉冲产生更长寿命的FRC。

[0034] 图17A、图17B、图17C和图17D图示了FRC系统的不同部件对FRC性能和HPF机制的实现的单独和组合影响。

[0035] 图18A、图18B、图18C和图18D图示了来自本发明的FRC系统上的代表性的HPF非持续放电的数据。示出为时间的函数的是(图18A)在中平面处的排斥通量半径、(图18B)来自中平面CO2干涉仪的线积分密度的6条弦、(图18C)来自CO2干涉仪数据的Abel反演密度径向分布以及(图18D)来自压力平衡的总等离子体温度。

[0036] 图19图示了随电子温度(T_e)变化的通量约束。它代表新建立的用于HPF放电的优异定标机制的图形表示。

[0037] 图20图示了对应于非成角度和成角度注入中性束的脉冲长度的FRC寿命。

[0038] 图21A、图21B、图21C、图21D和图21E图示了成角度注入中性束的脉冲长度以及对应于成角度注入中性束的脉冲长度的等离子体半径、等离子体密度、等离子体温度和磁通量的FRC等离子体参数的寿命。

[0039] 图22A和图22B图示了紧凑环(CT)注入器的基本布局。

[0040] 图23A和图23B图示了中心约束容器,示出了安装到其的CT注入器。

[0041] 图24A和图24B图示了具有联接到其的漂移管的CT注入器的备选实施例的基本布局。

[0042] 图25图示了中性束系统和用于可调谐能量束输出的关键部件的截面等距视图。

[0043] 图26是图示具有可调谐能量束输出的中性束系统的示意图。

[0044] 图27是图示约束容器(CV)内的FRC等离子体的轴向位置控制机构的示意图。

[0045] 图28是通用滑模控制方案的流程图。

[0046] 图29是滑模轴向位置控制模拟的示例的合成图。

[0047] 图30是滑模轴向位置控制模拟的示例的合成图。

[0048] 图31是从离子源转换的电子束源的示意图。

[0049] 图32是示出从等离子体中提取电子束和加速的模拟结果图。

[0050] 图33是电子光学系统的部分示意图。

[0051] 图34A和图34B是带有掩模以产生空心束的等离子体栅的实施例的示意图。

[0052] 图35是示出向等离子体容纳系统中轴向电子束注入的示意性平面图。

[0053] 图36是示意性透视图,示出了安装在等离子体容纳系统的偏滤器处的电子束。

[0054] 应当注意,附图不一定按比例绘制,并且在整个附图中,出于说明的目的,类似结构或功能的元件大体上由相似的附图标记表示。还应当注意,附图仅旨在促进本文中描述的各种实施例的描述。附图不一定描述本文中公开的教导的每个方面,并且不限制权利要求书的范围。

具体实施方式

[0055] 在详细描述本主题之前,应当理解,本公开不限于所描述的特定实施例,因此当然可变化。还应当理解,本文使用的术语仅用于描述特定实施例的目的,并且不旨在进行限制,因为本公开的范围将仅由所附权利要求书限制。

[0056] 本文中提供的本实施例涉及促进形成和保持具有优异稳定性以及粒子、能量和通量约束的FRC的系统和方法。本实施例中的一些涉及利用具有可调谐束能量能力的中性束注入器来促进形成和保持具有升高的系统能量和改进的维持的FRC的系统和方法。本实施例中的一些还涉及促进FRC等离子体在径向方向和轴向方向两者上的稳定性以及FRC等离子体沿着FRC等离子体约束室的对称轴线的轴向位置控制的系统和方法,而不依赖于FRC等离子体平衡的轴向稳定性特性。本实施例中的一些还涉及磁等离子体约束系统中用于等离子体加热的高功率电子束。

[0057] 现在将参考附图更详细地描述本文中描述的实施例的代表性示例,这些示例单独地和组合地利用了这些附加特征和教导中的许多。该详细描述仅旨在教导本领域技术人员用于实践本教导的优选方面的进一步细节,并且不旨在限制本发明的范围。因此,在下面的详细描述中公开的特征和步骤的组合对于在最广泛的意义上实践本发明可能不是必要的,并且相反被教导仅仅是为了特别地描述本教导的代表性示例。

[0058] 此外,代表性示例和从属权利要求的各种特征可以没有具体和明确列举的方式组合,以便提供本教导的附加有用实施例。此外,应明确指出,出于原始公开的目的,并且出于独立于实施例和/或权利要求书中的特征的组成来限制所要求保护的主题的目的,说明书

和/或权利要求书中公开的所有特征旨在彼此单独地和独立地公开。还应明确指出，出于原始公开的目的，并且出于限制所要求保护的主题的目的，实体组的所有值范围或指示都公开了每个可能的中间值或中间实体。

[0059] 在转向促进FRC等离子体在径向方向和轴向方向两者上的稳定性以及FRC等离子体沿着FRC等离子体约束室的对称轴线的轴向位置控制的系统和方法之前，提供了用于形成和保持高性能FRC的系统和方法的讨论，该高性能FRC具有优于常规FRC的优异稳定性以及优异的粒子、能量和通量约束。这种高性能FRC提供了通向各种应用的途径，包括紧凑型中子源(用于医用同位素生产、核废料修复、材料研究、中子射线照相术和断层摄影术)、紧凑型光子源(用于化学生产和加工)、质量分离和浓缩系统以及用于未来产生能量的轻核聚变的反应堆芯。

[0060] 已经探索了各种辅助系统和操作模式，以评估FRC中是否存在优异的约束机制。这些努力导致了突破性的发现和本文中描述的高性能FRC范例的发展。根据这种新范例，本发明的系统和方法结合了大量新颖的想法和手段，以显著地改善如图1中所图示的FRC约束并提供稳定性控制而没有负面副作用。如下面更详细地讨论的，图1描绘了根据用于形成和保持FRC的高性能FRC机制(HPF)操作的下面描述的FRC系统10中的粒子约束(参见图2和图3)，其与根据用于形成和保持FRC的常规机制CR的操作和根据在其它实验中使用的用于形成和保持FRC的常规机制的粒子约束形成对比。本公开将概述和详述FRC系统10和方法的创新的单个部件以及它们的集体效果。

[0061] FRC系统

[0062] 真空系统

[0063] 图2和图3描绘了本发明的FRC系统10的示意图。FRC系统10包括由两个沿直径相对的反向场角向箍缩形成部段200包围的中心约束容器100，以及在形成部段200之外的两个偏滤器室300，用于控制中性密度和杂质污染。本发明的FRC系统10构建成适应超高真空并在10^{-8}托的典型基础压力下操作。这种真空压力要求在配合部件、金属O形环、高纯度内壁之间使用双泵吸配合凸缘，以及在组装前对所有零件进行仔细的初始表面调节，诸如物理和化学清洁，然后是24小时250℃真空烘烤和氢辉光放电清洁。

[0064] 反向场角向箍缩形成部段200是标准场反向角向箍缩(FRTP)，尽管具有下面详细讨论的高级脉冲功率形成系统(参见图4至图6)。每个形成部段200由标准不透明工业级石英管制成，其以2毫米的超纯石英内衬为特征。约束室100由不锈钢制成，以允许多个径向和切向端口；其也用作下文所述实验的时间标度上的通量保存器并且限制快速磁暂态。利用一组干式涡旋低真空泵、涡轮分子泵和低温泵来在FRC系统10内形成和保持真空。

[0065] 磁系统

[0066] 在图2和图3中图示了磁系统400。除其它特征外，图2图示了与能够由FRC系统10产生的FRC 450相关的FRC磁通量和等密度线(随径向和轴向坐标而变化)。这些等密度线通过使用为模拟对应于FRC系统10的系统和方法而开发的代码的2-D电阻霍尔-MHD数值模拟获得，并且与测量的实验数据很好地吻合。如图2中可见，FRC 450由分界面451内部的FRC 450的内部453处的闭合场线的环面和仅仅在分界面451外部的开放场线452上的环形边缘层456组成。边缘层456合并成超出FRC长度的射流454，从而提供自然偏滤器。

[0067] 主磁系统410包括一系列准直流线圈412、414和416，准直流线圈412、414和416沿

着FRC系统10的部件(即沿着约束室100、形成部段200和偏滤器300)位于特定的轴向位置处。准直流线圈412、414和416由准直流开关电源馈电,并在约束室100、形成部段200和偏滤器300中产生约0.1T的基本偏置磁场。除了准直流线圈412、414和416之外,主磁系统410还包括在约束室100的任一端部和相邻形成部段200之间的准直流镜线圈420(由开关电源馈电)。准直流镜线圈420提供至多为5的磁镜比,并且可被独立地激励以用于平衡的成形控制。此外,镜塞440定位在形成部段200中的每一个和偏滤器300之间。镜塞440包括紧凑的准直流镜线圈430和镜塞线圈444。准直流镜线圈430包括三个线圈432、434和436(由开关电源馈电),其产生额外的引导场,以使磁通量表面455朝向穿过镜塞线圈444的小直径通道442聚焦。围绕小直径通道442缠绕并由LC脉冲功率电路馈电的镜塞线圈444产生至多为4T的强磁镜场。这整个线圈布置的目的是将磁通量表面455和端部流动的等离子体射流454紧密地束集并引导到偏滤器300的边远室310中。最后,一组鞍形线圈“天线”460(参见图15)位于约束室100外部,在中平面的每一侧上两个,并且由直流电源馈电。鞍形线圈天线460可配置成提供约0.01T的准静态磁偶极或四极场,以用于控制旋转不稳定性和/或电子电流控制。鞍形线圈天线460可根据所施加电流的方向灵活地提供关于机器的中平面对称或反对称的磁场。

[0068] 脉冲功率形成系统

[0069] 脉冲功率形成系统210根据修改的角向箍缩原理操作。存在各自为形成部段200中的一个供功率的两个系统。图4至图6图示了形成系统210的主要构建块和布置。形成系统210由模块化脉冲功率布置构成,该模块化脉冲功率布置由各自激励围绕形成石英管240缠绕的条带组件230(=条带)的线圈232的子集的各个单元(=滑动件(skids))220组成。每个滑动件220由电容器221、电感器223、快速高电流开关225和相关联的触发器222和吞食电路(dump circuitry)224构成。总之,每个形成系统210存储介于350-400kJ之间的电容能量,其提供至多为35GW的功率以形成FRC和使其加速。这些部件的协调操作经由现有技术的触发器222和控制系统224实现,触发器222和控制系统224允许每个形成部段200上的形成系统210之间的同步定时,并将开关抖动最小化到几十纳秒。这种模块化设计的优点是其灵活的操作:FRC可原位形成,并且然后被加速和注入(=静态形成)或同时形成和加速(=动态形成)。

[0070] 中性束注入器

[0071] 中性原子束600部署在FRC系统10上,以提供加热和电流驱动并且产生快速粒子压力。如图3A、图3B和图8中所示,包括中性原子束注入器系统610和640的各个束线位于中心约束室100周围,并以冲击参数与FRC等离子体相切地(并且垂直于中心约束容器100中的长对称轴线或以法向于长对称轴线的角度)注入快速粒子,使得目标捕获区正好位于分界面451内(参见图2)。每个注入器系统610和640能够将至多为1MW的中性束功率注入到粒子能量在20和40keV之间的FRC等离子体中。系统610和640基于正离子多孔口提取源并利用离子提取栅的几何聚焦、惯性冷却和差动泵送。除了使用不同的等离子体源之外,系统610和640主要通过它们的物理设计来区分,以满足它们相应的安装位置,得到侧部和顶部注入能力。这些中性束注入器的典型部件在图7中针对侧注入器系统610具体地图示。如图7中所示,每个单独的中性束系统610包括在输入端处的RF等离子体源612(这在系统640中由电弧源替代),其中磁屏614覆盖该端部。离子光源和加速栅616联接到等离子体源612,并且闸阀620

定位在离子光源和加速栅616与中和器622之间。偏转磁体624和离子吞食器628位于中和器622和在出口端处的瞄准装置630之间。冷却系统包括两个低温制冷器634、两个低温板636和LN2护罩638。这种灵活设计允许在广泛的FRC参数范围内操作。

[0072] 中性原子束注入器600的备选配置是向FRC等离子体相切地注入快速粒子，但是相对于中心约束容器100中的长对称轴线的角度A小于90°。束注入器615的这些类型的取向在图3C中示出。此外，束注入器615可被定向成使得在中心约束容器100的中平面的任一侧上的束注入器615朝向中平面注入它们的粒子。最后，这些束系统600的轴向位置可选择得更靠近中平面。这些备选的注入实施例促进了更中央的加料选项，其提供了束的更好的联接和注入的快速粒子的更高的捕获效率。此外，取决于角度和轴向位置，束注入器615的这种布置允许对FRC 450的轴向伸长和其它特性进行更直接和独立的控制。例如，以相对于容器的长对称轴线的浅角度A注入束将产生具有更长轴向延伸和更低温度的FRC等离子体，而选择更垂直的角度A将导致轴向更短但更热的等离子体。以这种方式，束注入器615的注入角度A和位置可针对不同的目的进行优化。此外，束注入器615的这种定角度和定位可允许更高能量的束(这通常更有利于以更小的束发散沉积更多的功率)被注入到比捕获这样的束原本所必需的更低的磁场中。这是由于决定快离子轨道标度的是能量的方位角分量的事实(在恒定的束能量下，随着相对于容器的长对称轴线的注入角减小，该轨道标度逐渐变小)。此外，朝向中平面且轴向束位置靠近中平面的成角度注入改善了束-等离子体耦合，即使在注入期间FRC等离子体收缩或以其它方式轴向地紧缩。

[0073] 转到图3D和图3E，FRC系统10的另一备选配置除了成角度的束注入器615之外还包括内偏滤器302。内偏滤器302定位在形成部段200和约束室100之间，并且基本上类似于外偏滤器300配置和操作。其中包括快速开关磁线圈的内偏滤器302在形成过程期间有效地不活动，以使得当形成FRC朝向约束室100的中平面平移时形成FRC能够穿过内偏滤器302。一旦形成FRC穿过内偏滤器302进入约束室100，内偏滤器就被激活以基本上类似于外偏滤器操作，并将约束室100与形成部段200隔离。

[0074] 弹丸注入器

[0075] 为了提供注入新粒子的手段和更好地控制FRC粒子存量，在FRC系统10上利用12管筒弹丸注入器700(参见例如I.Vinyar等人，“Pellet Injectors Developed at PELIN for JET,TAE,and HL-2A,”Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium,09/27to 10/01(2010)(2010年9月27日至10月1日第26届聚变科学与技术研讨会的会议录))。图3图示了弹丸注入器700在FRC系统10上的布局。圆柱形弹丸(D～1mm,L～1-2mm)以150-250km/s范围内的速度注入FRC中。每个单独的弹丸包含约5×10^{19}个氢原子，这与FRC粒子存量相当。

[0076] 吸杂系统

[0077] 众所周知，中性光晕气体是所有约束系统中的严重问题。电荷交换和再循环(从壁释放冷杂质材料)过程可对能量和粒子约束具有毁灭性影响。此外，在边缘处或边缘附近的任何显著密度的中性气体将导致促进注入的大轨道(高能)粒子(大轨道是指具有FRC拓扑结构的标度上的轨道或者至少轨道半径远大于特征性磁场梯度长度标度的粒子)的寿命损失或至少严重地缩减注入的大轨道(高能)粒子的寿命，这一事实对所有高能等离子体应用都是有害的，包括经由辅助束加热而聚变。

[0078] 表面调节是一种手段，通过这种手段可在约束系统中控制或减少中性气体和杂质的有害影响。为此，本文中提供的FRC系统10采用钛沉积系统810和锂沉积系统820，其用Ti和/或Li的薄膜(几十微米厚)涂覆约束室(或容器)100和偏滤器300和302的面向等离子体的表面。涂覆经由气相沉积技术来实现。固体Li和/或Ti被蒸发和/或升华并喷涂到附近的表面上以形成涂层。源是具有引导喷嘴(在Li的情况下)822或带有引导护罩的受热固体球(在Ti的情况下)812的原子炉。Li蒸发器系统典型地以连续模式操作，而Ti升华器大多在等离子体操作之间间歇地操作。这些系统的操作温度高于600℃，以获得快速沉积速率。为了实现良好的壁覆盖率，多个策略性定位的蒸发器/升华器系统是必要的。图9详述了FRC系统10中吸杂沉积系统810和820的优选布置。涂层充当吸杂表面，并有效地泵送原子和分子类氢物质(H和D)。涂层还将诸如碳和氧的其它典型的杂质减少到微不足道的水平。

[0079] 镜塞

[0080] 如上文所述，FRC系统10采用如图2和图3中所示的成组的镜线圈420、430和444。第一组镜线圈420位于约束室100的两个轴向端部处，并且相对于主磁系统410的DC约束线圈412、形成线圈414和偏滤器线圈416独立地被激励。第一组镜线圈420主要帮助在合并期间操纵和轴向地包含FRC 450，并在维持期间提供平衡成形控制。第一镜线圈组420产生比由中心约束线圈412产生的中心约束场标称上更高的磁场(约0.4至0.5T)。第二组镜线圈430包括三个紧凑的准直流镜线圈432、434和436，其位于形成部段200和偏滤器300之间，并由公共开关电源驱动。镜线圈432、434和436与更紧凑的脉冲镜塞线圈444(由电容电源馈电)和物理收缩部442一起形成镜塞440，该镜塞440提供具有非常高磁场(在2至4T之间，上升时间约10至20ms)的窄的低气体传导路径。与约束线圈412、414和416的一米以上标度(meter-plus-scale)孔和扁平设计相比，最紧凑的脉冲镜线圈444具有紧凑的径向尺寸、20cm的孔和类似的长度。镜塞440的目的是多元的：(1)线圈432、434、436和444将磁通量表面452和端流等离子体射流454紧密地束集并引导到边远偏滤器室300中。这确保排出的粒子适当地到达偏滤器300，并且存在从中心FRC 450的开放场线452区域一直追踪到偏滤器300的连续通量表面455。(2)在FRC系统10中的物理收缩部442对来自安放于偏滤器300中的等离子体枪350的中性气体流提供阻碍，线圈432、434、436和444通过物理收缩部442能够实现磁通量表面452和等离子体射流454的通路。同样，收缩部442防止气体从形成部段200回流到偏滤器300，从而减少当开始启动FRC时必须引入整个FRC系统10中的中性粒子的数量。(3)由线圈432、434、436和444产生的强轴向镜减少轴向粒子损耗，并且因此减少开放场线上的平行粒子扩散率。

[0081] 在图3D和图3E中所示的备选配置中，一组低轮廓颈缩线圈421定位在内偏滤器302和形成部段200之间。

[0082] 轴向等离子体枪

[0083] 来自安装在偏滤器300的偏滤器室310中的枪350的等离子体流旨在提高稳定性和中性束性能。枪350安装在偏滤器300的室310内部的轴线上，如图3和图10中所图示，并产生沿着偏滤器300中的开放通量线452并朝向约束室100的中心流动的等离子体。枪350在垫圈-堆叠通道中以高密度气体放电操作，并且被设计成在5至10ms内生成几千安培的完全电离等离子体。枪350包括脉冲磁线圈，该脉冲磁线圈将输出等离子体流与约束室100中等离子体的期望尺寸相匹配。枪350的技术参数的特征在于具有5至13cm外径和至多为约10cm内

径的通道，并且以在0.5至2.3T之间的枪内部磁场在400至600V下提供10至15kA的放电电流。

[0084] 枪等离子体流可穿透镜塞440的磁场并流入形成部段200和约束室100中。通过镜塞440的等离子体转移的效率随着枪350和塞440之间的距离的减小以及通过使塞440更宽和更短而增加。在合理的条件下，枪350可各自分别以约150至300eV和约40至50eV的高离子和电子温度通过2至4T镜塞440输送大约10^{22}个质子/s。枪350提供FRC边缘层456的大量加料，以及改善的整体FRC粒子约束。

[0085] 为了进一步增加等离子体密度，可利用气体箱将额外的气体从枪350喷入到等离子体流中。这种技术允许注入的等离子体密度增加几倍。在FRC系统10中，安装在镜塞440的偏滤器300侧上的气体箱改善了FRC边缘层456的加料、FRC 450的形成和等离子体线捆。

[0086] 给定上文讨论的所有调整参数，并且还考虑到仅使用一个或两个枪的操作是可能的，很明显，可获得广泛范围的操作模式。

[0087] 偏置电极

[0088] 开放通量表面的电偏置可提供产生方位角E×B运动的径向电势，该方位角E×B运动提供类似于转动旋钮的控制机构，以经由速度剪切控制开放场线等离子体以及实际FRC芯450的旋转。为了实现这种控制，FRC系统10采用策略性地放置在机器的各种部分中的各种电极。图3描绘了定位在FRC系统10内的优选位置处的偏置电极。

[0089] 原则上，存在4类电极：(1)约束室100中的点电极905，其与FRC 450边缘中的特定开放场线452接触以提供局部充电，(2)约束室100和形成部段200之间的环形电极900，其用于以方位角对称的方式对远边缘通量层456充电，(3)偏滤器300中的同心电极910的叠堆，其对多个同心通量层455充电(由此通过调整线圈416来调整偏滤器磁场从而将期望的通量层456终止在适当的电极910上，从而使层的选择是可控制的)，以及最后(4)等离子体枪350自身的阳极920(参见图10)(其在FRC 450的分界面附近截取内部开放通量表面455)。图10和图11示出了这些电极中的一些的典型设计。

[0090] 在所有情况下，这些电极都由脉冲或直流功率源在至多为约800V的电压下驱动。根据电极尺寸和交叉的通量表面，可在千安培范围内汲取电流。

[0091] FRC系统的非持续操作-常规机制

[0092] FRC系统10上的标准等离子体形成遵循良好发展的反向场角向箍缩技术。用于启动FRC的典型过程通过将准直流线圈412、414、416、420、432、434和436驱动到稳态操作而开始。脉冲功率形成系统210的RFTP脉冲功率电路然后驱动脉冲快速反向磁场线圈232，以在形成部段200中产生约-0.05T的临时反向偏置。在这一点上，在9-20psi下的预定量的中性气体经由在位于形成部段200的外端部上的凸缘处的一组沿方位角定向的喷气槽(puff-vales)注入到由(北和南)形成部段200的石英管室240限定的两个形成容积中。接下来，从石英管240的表面上的一组天线生成小RF(约数百千赫兹)场，以在中性气体柱内以局部种子电离区的形式产生预电离。随后通过对驱动脉冲快速反向磁场线圈232的电流施加角向振铃调制，这导致气体柱的更全面的预电离。最后，脉冲功率形成系统210的主脉冲功率组发射以驱动脉冲快速反向磁场线圈232，以产生至多为0.4T的正向偏置场。该步骤可以时间为序，使得正向偏置场在形成管240的整个长度上均匀地生成(静态形成)，或者使得沿着形成管240的轴线实现连续的蠕动场调制(动态形成)。

[0093] 在该整个形成过程中,等离子体中的实际场反向在约5μs内迅速发生。输送到正形成的等离子体的数吉瓦脉冲功率容易产生热FRC,热FRC然后经由前向磁场的时序调制(磁蠕动)或在形成管210的轴向外端部附近的线圈组232的最后一个线圈中临时增加的电流(形成轴向地指向约束室100的轴向磁场梯度)中的任一者的施加而从形成部段200出射。如此形成和加速的两个(北和南)形成FRC然后膨胀到更大直径的约束室100中,在那里准直流线圈412产生正向偏置场以控制径向膨胀并提供平衡的外部磁通量。

[0094] 一旦北和南形成FRC到达约束室100的中平面附近,FRC就碰撞。在碰撞期间,当FRC最终合并成单个FRC 450时,北和南形成FRC的轴向动能被大量热化。在约束室100中可获得一大组等离子体诊断以研究FRC 450的平衡。FRC系统10中的典型操作条件产生具有约0.4m的分界面半径和约3m的轴向延伸的复合FRC。进一步的特性是约0.1T的外部磁场、约$5\times10^{19}m^{-3}$的等离子体密度和至多为1keV的总等离子体温度。在没有任何维持(即没有经由中性束注入或其它辅助手段的加热和/或电流驱动)的情况下,这些FRC的寿命被限制到约1ms,这是本征特性配置衰减时间。

[0095] 非持续操作的实验数据-常规机制

[0096] 图12示出了排斥通量半径$r_{\Delta\Phi}$的典型时间演变,该排斥通量半径近似于分界面半径r_s,以图示FRC 450的角向箍缩合并过程的动态。两个(北和南)单独的等离子体团同时产生,并且然后以超音速(v_Z～250km/s)加速离开相应的形成部段200,并在z=0时在中平面附近碰撞。在碰撞期间,在最终合并以形成FRC 450之前,等离子体团轴向地压缩,随后是快速径向和轴向膨胀。合并FRC 450的径向和轴向动态两者都由详细的密度分布测量和基于测辐射热仪的断层摄影术来证明。

[0097] 来自FRC系统10的代表性非持续放电的数据在图13A、图13B、图13C和图13D中被示出为随时间变化。FRC在t=0时启动。在图13A中示出了在机器的轴向中平面处的排斥通量半径。该数据从位于约束室的不锈钢壁略内侧的一系列磁性探针获得,这些探针测量轴向磁场。钢壁在该放电的时间标度上是良好的通量保存器。

[0098] 在图13B中示出了线积分密度,来自位于z=0处的6弦CO_2/He-Ne干涉仪。考虑到如由测辐射热断层摄影术测量的竖直(y)FRC位移,Abel反演得到图13C的等密度线。在前0.1ms期间进行某些轴向和径向晃动之后,FRC以中空密度分布稳定。这种分布相当平坦,在轴线上具有显著的密度,如由典型2-D FRC平衡所需要的那样。

[0099] 在图13D中示出了总等离子体温度,其从压力均衡得到并且与汤姆逊散射和光谱学测量完全一致。

[0100] 源自整个排斥通量阵列的分析表明FRC分界面的形状(由排斥通量轴向分布来近似)从跑道形逐渐地演变为椭圆形。在图14中示出的这种演变与从两个FRC到单个FRC的逐渐磁性重连一致。实际上,粗略估计表明在这种特定情形下约10%的两个初始FRC磁通量在碰撞期间重连。

[0101] 在FRC寿命期间,FRC长度从3m稳态地收缩至约1m。在图4中可看到的这种收缩表明大部分对流能量损失支配了FRC约束。由于分界面内部的等离子体压力比外部磁压力更快速地减小,在端部区域中的磁场线张力在轴向地压缩FRC,从而恢复轴向和径向平衡。对于图13和图14中讨论的放电,当FRC平衡似乎要减退时,FRC磁通量、粒子存量和热能(分别为约10mWb,7×10^{19}个粒子和7kJ)在第一毫秒中减小大致一个数量级。

[0102] 持续操作-HPF机制

[0103] 图12至图14中的示例是在没有任何维持的情况下的衰减FRC的特征。然而，在FRC系统10上部署了若干技术，以进一步改进对HPF机制的FRC约束(内核和边缘层)并维持该配置。

[0104] 中性束

[0105] 首先，快速(H)中性粒子在来自八个中性束注入器600的束中垂直于B_z注入。从北和南形成FRC在约束室100中合并成一个FRC 450的那一刻起，快速中性粒子的束被注入。主要由电荷交换形成的快离子具有添加到FRC 450的方位角电流的电子感应加速器轨道(具有FRC拓扑结构的标度上或者至少远大于特征性磁场梯度长度标度的主要半径)。在放电的一些部分之后(在进入发射0.5至0.8ms之后)，足够大的快离子群体显著地改进了内FRC的稳定性和约束性质(例如参见M.W.Binderbauer and N.Rostoker,Plasma Phys.56,part 3,451(1996))。此外，从维持的角度来看，来自中性束注入器600的束也是用于驱动电流和加热FRC等离子体的主要手段。

[0106] 在FRC系统10的等离子体机制中，快离子主要在等离子体电子上减缓。在放电的早期部分期间，快离子的典型轨道平均减速时间为0.3-0.5ms，这导致显著的FRC加热，主要是电子的FRC加热。快离子在分界面外部进行大的径向漂移，因为内部FRC磁场固有地较低(对于0.1T的外部轴向场，平均为约0.03T)。如果在分界面外部中性气体密度太高，则快离子将易遭受电荷交换损失。因此，部署在FRC系统10上的壁吸杂和其它技术(诸如除其它之外还有助于气体控制的等离子体枪350和镜塞440)倾向于最小化边缘中性粒子并且使得能够建立所需的快离子电流。

[0107] 弹丸注入

[0108] 当在FRC 450内建立显著的快速粒子群体时，由于更高的电子温度和更长的FRC寿命，冷冻的H或D弹丸从弹丸注入器700注入到FRC 450中，以维持FRC 450的FRC粒子存量。预期的消融时间标度足够短以提供显著的FRC粒子源。当在弹丸注入器700的管筒或注入管中时并且在进入约束室100之前，通过将单个弹丸破碎为更小的碎片来扩大注入件的表面积也可增加该速率，该步骤可通过在即将进入约束室100内之前收紧注入管的最后区段的弯曲半径来增加弹丸与注入管的壁之间的摩擦来实现。通过改变12个管筒(注入管)的发射顺序和速率以及分裂，调谐粒子注入系统700以提供仅期望水平的粒子存量维持是可能的。反过来，这有助于保持FRC 450中的内部动压以及FRC 450的持续操作和寿命。

[0109] 一旦消融的原子遇到FRC 450中的大量等离子体，它们就变得完全电离。所得到的冷等离子体成分然后由固有的FRC等离子体来碰撞加热。保持期望的FRC温度所需的能量最终由束注入器600供应。在这种意义上，粒子注入器700与中性束注入器600一起形成保持稳态并维持FRC 450的系统。

[0110] CT注入器

[0111] 作为弹丸注入器的备选方案，提供了紧凑环(CT)注入器，其主要用于为场反向配置(FRC)等离子体加料。CT注入器720包括磁化同轴等离子体枪(MCPG)，如图22A和图22B中所示，其包括同轴圆柱形内电极722和外电极724、定位在内电极726内部的偏置线圈和在CT注入器720的放电的相对端部上的电断路器728。气体通过气体注入端口730注入到内电极722和外电极724之间的空间中，并且通过放电从其中生成球马克状等离子体，并由洛伦兹

力从枪中推出。如图23A和图23B中所示，一对CT注入器720联接到约束容器100，靠近容器100的中平面并在容器100的相对侧上，以将CT注入到约束容器100内的中心FRC等离子体中。类似于中性束注入器615，CT注入器720的放电端部相对于约束容器100的纵向轴线成一角度被引导朝向约束容器100的中平面。

[0112] 在备选实施例中，如图24A和图24B中所示，CT注入器720包括漂移管740，该漂移管740包括联接到CT注入器720的放电端部的细长圆柱形管。如所描绘，漂移管740包括围绕该管定位并沿着该管轴向地间隔开的漂移管线圈742。沿着管的长度描绘了多个诊断端口744。

[0113] CT注入器720的优点是：(1)每个注入的CT的粒子存量的控制和可调整性；(2)沉积温等离子体(而不是低温弹丸)；(3)系统可在重复速率模式下操作，以便允许连续加料；(4)由于注入的CT携带嵌入的磁场，系统还可恢复一些磁通量。在用于实验用途的实施例中，外电极的内径为83.1mm，并且内电极的外径为54.0mm。内电极722的表面优选地涂覆有钨，以便减少源自于电极722的杂质。如所描绘，偏置线圈726安装在内电极722的内部。

[0114] 在最近的实验中，实现了至多为～100km/s的超音速CT平移速度。其它典型的等离子体参数如下：电子密度为～$5\times10^{21}m^{-3}$，电子温度为～30-50eV，并且粒子存量为～0.5-1.0×10^{19}。CT的高动压允许注入的等离子体深入地渗透到FRC中，并将粒子沉积在分界面内部。在最近的实验中，FRC粒子加料已经导致由CT注入器提供～10-20％的FRC粒子存量，成功地证明了加料可在不破坏FRC等离子体的情况下容易地进行。

[0115] 鞍形线圈

[0116] 为了实现稳态电流驱动并保持所需的离子电流，希望防止或显著降低由于电子-离子摩擦力(由碰撞离子电子动量转移产生)引起的电子加快自旋。FRC系统10利用创新技术经由外部施加的静态磁偶极或四极场来提供电子破碎。这经由图15中描绘的外部鞍形线圈460来实现。来自鞍形线圈460的横向施加的径向磁场在旋转的FRC等离子体中感应轴向电场。所得到的轴向电子流与径向磁场相互作用，以在电子上产生方位角破碎力，$F_\theta=-\sigma V_{e\theta}\langle|B_r|^2\rangle$。对于FRC系统10中的典型条件，等离子体内部的所需施加的磁偶极(或四极)场仅需要0.001T级别以提供足够的电子破碎。约0.015T的对应外部场足够小，不会引起明显的快速粒子损失或以其它方式负面地影响约束。事实上，施加的磁偶极(或四极)场有助于抑制不稳定性。与切向中性束注入和轴向等离子体注入相结合，鞍形线圈460提供了关于电流保持和稳定性的额外水平的控制。

[0117] 镜塞

[0118] 镜塞440内的脉冲线圈444的设计允许以适度(约100kJ)的电容能量局部生成高磁场(2至4T)。对于FRC系统10的当前操作典型的磁场的形成，形成容积内的所有场线都穿过镜塞440处的收缩部442，如由图2中的磁场线所示，并且不发生等离子体壁接触。此外，与准直流偏滤器磁体416协作的镜塞440可被调整以将场线引导到偏滤器电极910上，或者使场线以端部尖头配置(未示出)张开。后者提高稳定性并抑制平行电子热传导。

[0119] 镜塞440本身也有助于中性气体控制。镜塞440允许在FRC形成期间更好地利用喷入到石英管中的氘气，因为到偏滤器300中的气体返流通过塞的小气体传导(极少的500L/s)显著地减少。在形成管210内部的大部分残余的喷入气体被迅速电离。此外，流过镜塞440的高密度等离子体提供高效的中性电离，因此提供有效的气体屏障。结果，来自FRC边缘层

456的在偏滤器300中再循环的大多数中性粒子不会返回到约束室100。此外，与等离子体枪350的操作相关联的中性粒子(如下文所讨论)将主要被约束到偏滤器300。

[0120] 最后，镜塞440倾向于改善FRC边缘层约束。利用在20至40的范围内的镜比(塞/约束磁场)以及在北和南镜塞440之间的15m的长度，边缘层粒子约束时间$\tau_{||}$增加多达一个数量级。改进$\tau_{||}$容易地增加FRC粒子约束。

[0121] 假设来自分界面容积453的径向扩散(D)粒子损失由来自边缘层456的轴向损失($\tau_{||}$)平衡，可得到$(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)=(2\pi r_s L_s\delta)(n_s/\tau_{||})$，由此可将分界面密度梯度长度改写为$\delta=(D\tau_{||})^{1/2}$。这里$r_s$、$L_s$和$n_s$分别是分界面半径、分界面长度和分界面密度。FRC粒子约束时间为$\tau_N=[\pi r_s^2 L_s\langle n\rangle]/[(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)]=(\langle n\rangle/n_s)(\tau_\perp\tau_{||})^{1/2}$，其中$\tau_\perp=a^2/D$，且$a=r_s/4$。物理地，改进$\tau_{||}$导致增加δ(减少分界面密度梯度和漂移参数)，并且因此减少FRC粒子损失。FRC粒子约束上的总体改进通常略小于平方，因为n_s随着$\tau_{//}$而增加。

[0122] $\tau_{||}$的显著改进还需要边缘层456保持大致稳定(即，没有n=1的槽型、消防水龙带型或开放系统典型的其它MHD不稳定性)。等离子体枪350的使用提供了这种优选的边缘稳定性。在这个意义上，镜塞440和等离子体枪350形成有效的边缘控制系统。

[0123] 等离子体枪

[0124] 等离子体枪350通过线捆来改善FRC排放射流454的稳定性。来自等离子体枪350的枪等离子体在没有方位角动量的情况下生成，这证明在控制FRC旋转不稳定性方面是有用的。照此，枪350是在不需要更旧的四极稳定化技术的情况下控制FRC稳定性的有效手段。结果，等离子体枪350使得利用快速粒子的有益效果或获得如本公开中概述的高级混合动力学FRC机制成为可能。因此，等离子体枪350使得FRC系统10能够以刚好足以使电子破碎但低于将造成FRC不稳定性和/或导致急剧快速粒子扩散的阈值的鞍形线圈电流操作。

[0125] 正如在上面的镜塞讨论中提到的，如果可显著改善$\tau_{//}$，则所供应的枪等离子体将与边缘层粒子损失率(~10^{22}/s)相当。FRC系统10中枪产生的等离子体的寿命在毫秒范围内。实际上，考虑具有~$10^{13}cm^{-3}$的密度n_e和约200eV的离子温度的枪等离子体被约束在端镜塞440之间。捕获长度L和镜比R分别为约15m和20。由于库仑碰撞所造成的离子平均自由程为λ_{ii}~6×10^3cm，并且由于$\lambda_{ii}lnR/R<L$，离子被约束在气体动力机制中。在该机制中的等离子体约束时间为τ_{gd}~$RL/2V_s$~2ms，其中V_s为离子声速。作为比较，这些等离子体参数的经典离子约束时间将是τ_c~$0.5\tau_{ii}(lnR+(lnR)^{0.5})$~0.7ms。原则上，异常横向扩散可缩短等离子体约束时间。然而，在FRC系统10中，如果我们假设玻姆扩散率，则枪等离子体的估计横向约束时间为$\tau_\perp>\tau_{gd}$~2ms。因此，枪将提供FRC边缘层456的大量加料，以及改善的整体FRC粒子约束。

[0126] 此外，枪等离子体流可在约150至200微秒内开启，这允许在FRC启动、平移和合并到约束室100中使用。如果在约t~0(FRC主组起始)处开启，则枪等离子体有助于维持目前动态形成和合并的FRC 450。来自形成FRC和来自枪的组合粒子存量足以用于中性束捕获、等离子体加热和长期维持。如果在-1至0ms的范围内的t处开启，则枪等离子体可用等离子体填充石英管210或使喷入到石英管中的气体电离，从而允许具有减少或甚至可能为零的喷入气体的FRC形成。后者可能需要足够冷的形成等离子体，以允许反向偏置磁场的快速扩散。如果在t<-2ms处开启，则等离子体流可用若干$10^{13}cm^{-3}$的目标等离子体密度填充形成部段200和约束室100的形成区域和限制区域的约1至$3m^3$场线容积，这足以允许在FRC到达之

前建立中性束。然后，形成FRC可形成并被转化为所得到的约束容器等离子体。以这种方式，等离子体枪350能够实现各种各样的操作条件和参数机制。

[0127] 电偏置

[0128] 边缘层456中的径向电场分布的控制以各种方式有利于FRC稳定性和约束。借助于部署在FRC系统10中的创新偏置部件，有可能将多种周密计划的电势分布从约束室100中的中心约束区域的充分外侧的区域施加到整个机器中的一组开放通量表面。以这种方式，可横跨FRC 450的略外部的边缘层456生成径向电场。然后，这些径向电场修改边缘层456的方位角旋转并经由E×B速度剪切实现其约束。然后，边缘层456和FRC芯453之间的任何差异旋转可通过剪切传输到FRC等离子体的内部。结果，控制边缘层456直接影响FRC芯453。此外，由于等离子体旋转中的自由能也可能造成不稳定性，该技术提供了控制不稳定性的开始和生长的直接手段。在FRC系统10中，适当的边缘偏置提供了开放场线传输和旋转以及FRC芯旋转的有效控制。所提供的各种电极900、905、910和920的位置和形状允许控制不同组的通量表面455并且处于不同且独立的电势。以这种方式，可实现各种不同的电场配置和强度，每种配置和强度对等离子体性能具有不同的特性影响。

[0129] 所有这些创新偏置技术的关键优点在于芯和边缘等离子体行为可从FRC等离子体的充分外侧实现，即不需要使任何物理组件与中心热等离子体接触(这将对能量、通量和粒子损失产生严重影响)。这对性能和HPF概念的所有潜在应用都具有重大的有益影响。

[0130] 实验数据-HPF操作

[0131] 经由来自中性束枪600的束注入快速粒子在实现HPF机制中起重要作用。图16A、图16B、图16C和图16D图示了这一事实。所描绘的是示出FRC寿命如何与束脉冲的长度相关的一组曲线。对于构成本研究的所有放电，所有其它操作条件保持不变。数据在多次发射中求平均，并且因此代表典型的行为。很明显，较长的束持续时间产生较长寿命的FRC。考虑到这个证据以及在这次研究期间的其它诊断，证明束增加了稳定性并且减少了损失。束脉冲长度和FRC寿命之间的相关性不是完美的，因为束捕获在低于某个等离子体尺寸时变得低效，即，当FRC 450在物理尺寸上收缩时，并非所有注入的束都被拦截和捕获。FRC的收缩主要是由于在放电期间来自FRC等离子体的净能量损失(大约在放电中途～4MW)略大于对于特定实验装置经由中性束馈入FRC的总功率(～2.5MW)。将束定位在更接近容器100的中平面的位置处将倾向于减少这些损失并延长FRC寿命。

[0132] 图17A、图17B、图17C和图17D图示了用于实现HPF机制的不同部件的效果。它示出了描绘随时间变化的FRC 450的寿命的一系列典型曲线。在所有情况下，在每次放电的整个持续时间内，注入恒定的、适量的束功率(约2.5MW)。每条曲线代表不同的部件组合。例如，在没有任何镜塞440、等离子体枪350或来自吸杂系统800的吸杂的情况下操作FRC系统10导致旋转不稳定性的快速开始和FRC拓扑结构的损失。仅添加镜塞440延迟了不稳定性的开始并增加了约束。利用镜塞440和等离子体枪350的组合进一步降低不稳定性并增加FRC寿命。最后，在枪350和塞440的顶部上添加吸杂剂(在这种情况下为Ti)产生最佳结果——所得到的FRC没有不稳定性，并且表现出最长的寿命。从这个实验演示显而易见的是，部件的完全组合产生最佳效果并且提供具有最佳目标条件的束。

[0133] 如图1中所示，新发现的HPF机制表现出显著改善的传输行为。图1图示了在常规机制和HPF机制之间的FRC系统10中粒子约束时间上的变化。如可看出的，在HPF机制中，约束

时间已经改进了5倍以上。此外，图1详述了相对于现有常规FRC实验中的粒子约束时间的FRC系统10中的粒子约束时间。对于这些其它机器，FRC系统10的HPF机制已经将约束改进了在5倍和接近20倍之间的倍数。最后并且最重要地，在HPF机制中的FRC系统10的约束定标的性质与所有先前的测量显著不同。在FRC系统10中建立HPF机制之前，从数据导出各种经验定标律以预测先前FRC实验中的约束时间。所有这些定标规则主要取决于比率R^2/ρ_i，其中R是磁场零的半径(机器的物理标度的粗测)，并且ρ_i是在外部施加的场中评估的离子拉莫半径(施加的磁场的粗测)。从图1中显而易见的是，常规FRC中的长约束只有在大机器尺寸和/或高磁场下才是可能的。如图1中所指示的，在常规FRC机制CR中操作FRC系统10倾向于遵循那些定标规则。然而，HPF机制要优异得多，并且显示在没有大机器尺寸或高磁场的情况下可获得好得多的约束。更重要的是，从图1中还显而易见的是，与CR机制相比，HPF机制以减小的等离子体尺寸导致改进的约束时间。如下所述，对于通量和能量约束时间也可见类似的趋势，其在FRC系统10中也增加了超过3-8倍。因此，HPF机制的突破使得能够使用适度的束功率、较低的磁场和较小的尺寸来维持和保持FRC系统10和未来更高能量机器中的FRC平衡。伴随这些改进而来的是更低的操作和建造成本以及降低的工程复杂性。

[0134] 为了进一步比较，图18A、图18B、图18C和图18D示出了随时间变化的来自FRC系统10中代表性HPF机制放电的数据。图18A描绘了在中平面处的排斥通量半径。对于这些较长的时间标度，导电钢壁不再是良好的通量保存器，并且壁内部的磁探针用壁外部的探针来增强，以适当地考虑通过钢的磁通量扩散。与常规机制CR中的典型性能相比，如图13A、图13B、图13C和图13D中所示，HPF机制操作模式表现出延长400％以上的寿命。

[0135] 图18B中示出了线积分密度迹线的代表性弦，并且在图18C中示出了其Abel逆变换补充、等密度线。与常规的FRC机制CR相比，如图13A、图13B、图13C和图13D中所示，等离子体在整个脉冲中更平静，指示非常稳定的操作。峰值密度在HPF发射中也略微更低——这是更热的总等离子体温度(至多为2的倍数)的结果，如图18D中所示。

[0136] 对于图18A、图18B、图18C和图18D中图示的相应放电，能量、粒子和通量约束时间分别为0.5ms、1ms和1ms。在进入放电1ms的参考时间，储存的等离子体能量为2kJ，而损失为约4MW，这使得该目标非常适合于中性束维持。

[0137] 图19以新建立的实验性HPF通量约束定标的形式总结了HPF机制的所有优点。如在图19中可看出，基于t＝0.5ms之前和之后(即$t\leq0.5ms$和$t>0.5ms$)的测量，对于给定的分界面半径(r_s)，通量约束(以及类似地粒子约束和能量约束)大致以电子温度(T_e)的平方定标。具有T_e的正幂(和非负幂)的这个强定标与由常规托卡马克表现的定标完全相反，在常规托卡马克中，约束典型地与电子温度的某次幂成反比。这种定标的表现形式是HPF状态和大轨道(即，FRC拓扑结构的标度和/或至少特征性磁场梯度长度标度上的轨道)离子群体的直接结果。从根本上说，这种新定标显著有利于高操作温度并且使得能够实现相对适度大小的反应堆。

[0138] 在存在HPF机制具有的优点的情况下，能够实现由中性束驱动的FRC维持或稳态，这意味着诸如等离子体热能、总粒子数、等离子体半径和长度以及磁通量的全局等离子体参数能够维持在合理水平而无实质性的衰减。为了比较，图20在曲线A中示出随时间变化的来自FRC系统10中的代表性HPF机制放电的数据，并且在曲线B中示出随时间变化的FRC系统10中投射的代表性HPF机制放电的数据，其中在中性束脉冲的持续时间内维持FRC 450而没

有衰减。对于曲线A,具有在约2.5-2.9MW范围内的总功率的中性束在约6ms的主动束脉冲长度内被注入FRC 450中。曲线A中描绘的等离子体抗磁寿命为约5.2ms。更多的近期数据显示,使用约7ms的主动束脉冲长度能够获得约7.2ms的等离子体抗磁寿命。

[0139] 如上文关于图16A、图16B、图16C和图16D所指出的,束脉冲长度和FRC寿命之间的相关性不是完美的,因为束捕获在某个等离子体尺寸以下变得低效,即,随着FRC 450在物理尺寸上收缩,并非所有注入的束都被拦截和捕获。FRC的收缩或衰减主要是由于在放电期间来自FRC等离子体的净能量损失(大约在放电中途-4MW)略大于对于特定实验设置经由中性束馈入FRC的总功率(-2.5MW)。如关于图3C所指出的,从中性束枪600朝向中平面的成角度的束注入改善了束-等离子体耦合,即使FRC等离子体在注入期间收缩或以其它方式轴向地紧缩。此外,适当的弹丸加料将保持必要的等离子体密度。

[0140] 曲线B是使用约6ms的主动束脉冲长度和来自略大于约10MW的中性束枪600的总束功率运行的模拟的结果,其中中性束将注入具有约15keV的粒子能量的H(或D)中性粒子。由每个束注入的等效电流为约110A。对于曲线B,相对于装置轴线的束注入角度为约20°,目标半径为0.19m。注入角度可在15°-25°的范围内改变。束将在共流方向上沿方位角注入。来自中性束动量注入的净侧向力以及净轴向力应被最小化。与曲线A一样,从北和南形成FRC在约束室100中合并成一个FRC 450的时刻开始,从中性束注入器600注入快速(H)中性粒子。

[0141] 作为曲线B的基础的模拟使用多维霍尔-MHD解算器用于背景等离子体和平衡,基于完全动力学蒙特-卡罗的解算器用于能量束分量和所有散射过程以及一组耦合的输运方程用于所有等离子体种类来模型化交互损失过程。输运分量被经验地校准并根据实验数据库进行广泛的基准测试。

[0142] 如由曲线B所示,FRC 450的稳态抗磁寿命将是束脉冲的长度。然而,重要的是要注意,关键的相关性曲线B显示的是,当束关闭时,等离子体或FRC在那时开始衰减,而不是在此之前。衰减将类似于在非束辅助的放电——可能超出束关断时间1ms的数量级——中观察到的那样,并且简单地是由本征损失过程驱动的等离子体的特性衰减时间的反映。

[0143] 转到图21A、图21B、图21C、图21D和图21E,图中图示的实验结果指示实现由成角度的中性束驱动的FRC维持或稳态,即,诸如等离子体半径、等离子体密度、等离子体温度以及磁通量的全局等离子体参数能够维持在恒定水平,而没有与NB脉冲持续时间相关的衰减。例如,这种等离子体参数基本上保持恒定达～5+ms。这种等离子体性能(包括维持特征)具有强相关性NB脉冲持续时间,其中由于累积的快离子,抗磁性在NB终止后甚至持续几毫秒。如所图示,等离子体性能仅由脉冲长度约束限制,脉冲长度约束来自许多关键系统(诸如NB注入器以及其它系统部件)的相关联的电源中的有限储存能量。

[0144] 中性束可调谐束能量

[0145] 如上文关于图3A、图3B、图3C、图3D、图3E和图8中所指出的,中性原子束600部署在FRC系统10上以提供加热和电流驱动以及产生快速粒子压力。包括中性原子束注入器系统600的各个束线位于中心约束室100周围,并且如图3C、图3D和图3E中所示,优选地成角度以朝向约束室100的中平面注入中性粒子。

[0146] 为了进一步改善FRC维持并证明FRC斜升到高等离子体温度和升高的系统能量,本发明的FRC系统10包括具有升高的功率和扩展的脉冲长度(例如,仅为了示例的目的,约20+MW的功率,至多为30ms的脉冲长度)的中性束注入器(NBI)系统600。NBI系统600包括多个基

于正离子的注入器615(参见图3D和图3E),其特征在于灵活的模块化设计,具有NBI注入器615的子集,例如八(8)个NBI注入器615中的四(4)个,具有在发射期间将束能量从初始较低的束能量调谐到升高的束能量的能力,例如在恒定的束电流下从约15keV调谐到约40keV。NBI注入器615的这种能力是期望的,以便实现等离子体芯450的更高效的加热和由此产生的加压。特别地,与低能量水平相比,这种能力能够在峰值能量操作水平下实现高度期望的性能改进:例如,(i)至多为2倍的更高的加热功率;(ii)电荷交换损失减少近5倍;以及(iii)至多为两倍的加热效率。此外,能够由NBI注入器615产生的连续可变束能量能够实现注入且然后捕获的快离子的轨道参数相对于在斜升过程期间的瞬时磁压分布的最佳匹配。最后,允许0.1-10ms斜升持续时间的快速斜坡速率以及NBI注入器615的束能量和功率的快速(1ms或更少的数量级)可调谐性为等离子体成形和经由束能量和功率的调制对等离子体的主动反馈控制提供了额外的有效“控制旋钮”,即可控特征。

[0147] 需要足够的加热功率来实现FRC 450的加热和加压,既用于维持,也用于斜升到高等离子体温度和升高的系统能量。假设损耗率足够低,斜升速率主要是在任何给定时间可由NBI注入器615在FRC芯450中沉积的功率的函数。因此,通过注入端口的更高主中性束功率总是期望的。

[0148] 此外,由于NBI注入器615的有效加热速率是在注入束的特性与所有物质的温度、电子和离子密度、中性粒子浓度以及跨FRC芯450的磁场的随后持续的瞬时分布之间的复杂相互作用。其中,磁场分布在斜升期间通过控制系统有意地在亚毫秒时间标度上改变,而与动压相关的分布经由衍生自等离子体内的自组织过程和湍流的本征改变以及通过注入过程沉积的能量而演变。束的可调谐性提供了最佳地适应于这些变化条件的手段。

[0149] 例如,电荷交换截面(即,由快离子捕获电子以形成中性原子的概率)是束能量的强函数。对于15-40keV的范围,主电荷交换率作为束能量的函数而急剧下降。因此,在任何给定的场水平下,当以与这样的场水平相容的最高能量注入粒子时,等离子体中的能量保留是最高的(除其它外,这需要注入的粒子的能量引起在约束系统的内壁内合适的被捕获离子轨道半径)。

[0150] 分布对整体加热效率的影响的另一示例与功率沉积的位置有关。较高的束能量典型地将导致FRC周边中相对于芯的相对较高的能量沉积。提高磁场但保持束能量相同将导致更紧密的被捕获离子轨道和相称地更高功率耦合到FRC芯等离子体。这些事实于是对能量保留也有很强影响——例如,周边沉积的能量沿着开放的场线结构传输出系统容易得多,而芯沉积的能量由于较低的跨场传输时间而相对更慢地损失。因此,磁场斜坡变化和束能量中的适当增加的紧密协调是期望的。

[0151] 束系统600被设计成电压在0.1-10ms的范围内的快速斜坡变化。这提供了将离子和电子温度分别增加至2倍和10倍的可能,并且在比典型的宏观不稳定性成长时间更短的时间标度上这样做。因此,等离子体稳定性从根本上增加,操作可靠性和再现性也是如此。

[0152] 0.05至1ms的可变电压上升时间提供足够快的响应时间,使得束可用作有源反馈系统的一部分。以这种方式,束调制可用于控制宏观和微观稳定性。例如,通过改变束能量(并由此变换径向能量沉积模式)而暂时变换径向功率沉积分布,可影响压力梯度,其可抵消不稳定等离子体模式的开始。图3D和图3E中所示的FRC系统10利用这种能力以及快速磁反馈来控制内部倾斜、旋转速率、漂移波发展和其它操作场景。

[0153] 图25描绘了本发明的FRC系统10的NBI注入器615的图示。在示例实施例中,NBI注入器615被示出为包括:弧驱动器650;等离子体箱651;离子光学系统652,其包括提取栅和加速栅的三极管或四极管组;瞄准平衡环(gimbal)653;中和器654,其包括弧蒸发器655(诸如例如Ti弧蒸发器)、具有表面结构(诸如例如肋状表面结构)的低温泵656(其配置用于增加低温泵送)以及用于移除非中和离子的偏转磁体656;以及准直孔口658,其包括可插入的量热计659,以用于间歇束表征、诊断和重新校准。

[0154] 更具体地并且参考图26,如图所示,可调谐束系统的实现优选地基于三极管型离子光学系统(=IOS)660。理念是加速-减速方案。如图26中所图示,第一栅G1被设定为电压V1,而第二栅G2被设定为电压V2,并且最终栅G3被设定为电压V3。所提取的离子首先被加速到能量E1=e*(V1-V2),同时横越穿过在G1和G2之间的间隙(这里e是指离子的电荷)。然后它们在G2和G3之间的间隙中减速,使得E2=E1+e*(V2-V3)。典型地调整电压使得V1>V2<V3。基于适当的单独电源PS1、PS2、PS3,可在脉冲期间递增地调整栅电压,以便改变发射的离子662的输出。例如,为了开始氢原子的束脉冲,工作电压可被调整到V1=15kV、V2=-25kV和V3=0V。初始束离子然后将首先被加速到40keV,并且然后以15keV的能量从IOS中出来。在脉冲的后期,可切换电源以提供V1=40kV、V2=-1kV、V3=0V。于是将实际上不存在第二间隙中的束减速,从而产生大约40keV的输出束能量。电源是各自可单独控制的,并提供适当的电压调制。初始束离子从多个标准的弧形或基于RF的等离子体源PS中抽出。从IOS 660出来后,束离子662横越中和器664,在那里,快离子经由离开中和器664中存在的冷中性气体的电子的电荷交换而转换成中性离子。适当的低温泵送防止中性气体从中和器664的下游孔口流出。在中和器的端部处还存在适当的弯曲磁体666,其提供未中和的快离子663的移除,以及相关联的离子吞食器668,以用于吸收快离子及其能量。然后,出现的原子束670穿过适当的孔口6720,以减少束发散,并朝向反应堆的芯提供良好准直的中性原子流。

[0155] 在备选型式中,IOS基于四极管设计。在这种情况下,IOS由四个栅组成,它们具有与针对三极管情况解释的相同的加速-减速原理。本领域技术人员将容易认识到系统部件和操作原理之间的相似性。第四栅的引入提供了进一步的微调可能性和总体更大的操作灵活性。

[0156] 本文中提供的示例实施例已经在美国临时专利申请No.62/414,574中描述,该申请通过引用并入本文中。

[0157] 等离子体稳定性和轴向位置控制

[0158] 对于FRC不稳定性的常规解决方案典型地以径向方向上的不稳定为代价而提供轴向方向上的稳定性,或者以轴向不稳定为代价而提供径向方向上的稳定性,但是不会同时在两个方向上都提供稳定性。对于一阶,以轴向不稳定为代价,其中等离子体位置横向地或径向地稳定的平衡具有轴对称的期望特性。考虑到前述内容,本文中提供的实施例涉及促进FRC等离子体在径向方向和轴向方向两者上的稳定性以及FRC等离子体沿着FRC等离子体约束室的对称轴线的轴向位置控制的系统和方法,而不依赖于FRC等离子体平衡的轴向稳定性特性。然而,轴向位置不稳定性使用控制FRC等离子体轴向位置的一组外部轴对称线圈来主动控制。通过作用于施加到与等离子体同心的一组外部线圈的电压和使用非线性控制技术,该系统和方法提供独立于等离子体平衡的稳定性特性的FRC等离子体轴向位置的反馈控制。

[0159] 本文中呈现的实施例利用FRC的轴向不稳定平衡来增强径向稳定性，同时稳定化或者控制轴向不稳定性。以这种方式，可获得轴向方向和径向方向两者上的稳定性。控制方法被设计成改变外部或平衡磁场来以轴向不稳定为代价而使FRC等离子体径向地或横向地稳定，并且然后作用于径向场线圈电流以便迅速地朝向中平面恢复FRC等离子体位置，同时最小化过调和/或围绕约束室的中平面的振荡。这种解决方案的优点是它降低了控制所需的致动器的复杂性。与具有多个自由度的常规解决方案相比，本文中呈现的实施例的方法将复杂性降低到沿着FRC等离子体回转轴线的具有一个自由度的控制问题。

[0160] 导致轴向不稳定等离子体的线圈电流中的波形、加料和中性束功率的组合限定了将等离子体置于轴向不稳定情形中的等离子体控制场景。该场景可使用模拟或实验的先验知识、或者被控制用来保持轴向不稳定的平衡的反馈来预先编制。在放电期间等离子体位置应当独立于平衡的稳定性特性被控制，例如，控制方案应当在一定限度内对于轴向稳定或者轴向不稳定的等离子体都有用。可被控制的轴向最不稳定的等离子体具有与容器的趋肤时间相当的生长时间。

[0161] 现在转向促进FRC等离子体在径向方向和轴向方向两者上的稳定性以及沿着FRC等离子体约束室的对称轴线的FRC等离子体的轴向位置控制的系统和方法，图27示出了简化的方案来图示轴向位置控制机构510的示例实施例。示出在约束室100内的旋转FRC等离子体520具有等离子体电流522和轴向移位方向524。在室100内通过诸如例如准直流线圈412的对称的电流部件(参见图2、图3A、图3D和图3E)产生平衡场(未示出)。平衡场在轴向移位方向524上不产生净力，但是可被调谐以产生横向/径向或轴向稳定的等离子体。为了本文中呈现的实施例的目的，平衡场被调谐以产生横向/径向稳定的FRC等离子体520。如上文所指出的，这导致轴向不稳定性，并且因此导致FRC等离子体520在轴向移位方向524上的轴向移位。当FRC等离子体520轴向地移动时，其引发反对称(即，在约束室100的中平面的每侧上在约束室100的壁中在相反方向上)的电流514和516。FRC等离子体520将在容器以及在外部线圈两者中引发这些类型的电流分量。这些反对称的电流分量514和516产生径向场，该径向场与环形等离子体电流522相互作用，以产生与FRC等离子体520的移动相反的力，并且该力的结果是其减缓等离子体轴向移位。由于约束室100的电阻率，这些电流514和516随着时间逐渐消散。

[0162] 围绕约束室100在中平面的每侧上设置的径向场线圈530和531提供附加的径向场分量，它们由于在线圈530和531中在相反方向上引发的电流532和534而产生。径向场线圈530和531可包括一组轴对称线圈，其可定位在容纳容器100的内部或外部。径向线圈530和531被示出为类似于准直流线圈412定位在容纳容器100的外部(参见图2、图3A、图3D和图3E)。线圈530和531中的每一个或线圈组可承载与中平面的相对侧上的线圈不同的电流，但是电流相对于容纳容器100的中平面是反对称的，并且沿着中平面产生$B_z \neq 0$、$B_r = 0$的磁场结构。径向场线圈530和531产生补充性的径向场分量，其与环形等离子体电流522相互作用以产生轴向力。轴向力继而使等离子体朝向约束室100的中平面往回移动。

[0163] 控制机构510包括控制系统，该控制系统配置成作用于径向场线圈电流，以便迅速地朝向中平面恢复等离子体位置，同时最小化过调和/或围绕机器中平面的振荡。控制系统包括处理器，该处理器能够操作地联接到径向场线圈530和531、准直流线圈412、它们相应的电源和诸如例如磁传感器的其它部件，以提供等离子体位置、等离子体速度和有源线圈

电流测量。处理器可配置成执行本申请中描述的计算和分析，并且可包括或通信地联接到一个或多个存储器，所述存储器包括非暂时性计算机可读介质。它可包括基于处理器或基于微处理器的系统，包括使用微控制器、精简指令集计算机(RISC)、专用集成电路(ASIC)、逻辑电路和能够执行本文中所述功能的任何其它电路或处理器的系统。以上仅是示例，并且因此并不旨在以任何方式限制术语“处理器”或“计算机”的定义和/或含义。

[0164] 处理器的功能可使用软件例程、硬件部件或它们的组合来实现。硬件部件可使用多种技术来实现，包括例如集成电路或分立电子部件。处理器单元典型地包括可读/可写存储器存储装置，并且典型地还包括用于写入和/或读取存储器存储装置的硬件和/或软件。

[0165] 处理器可包括计算装置、输入装置、显示单元和接口，例如，用于访问因特网。计算机或处理器可包括微处理器。微处理器可连接到通信总线。计算机或处理器还可包括存储器。存储器可包括随机存取存储器(RAM)和只读存储器(ROM)。计算机或处理器还可包括存储装置，其可为硬盘驱动器或诸如软盘驱动器、光盘驱动器等的可移动存储驱动器。存储装置也可为用于将计算机程序或其它指令加载到计算机或处理器中的其它类似装置。

[0166] 处理器执行存储在一个或多个存储元件中的一组指令，以便处理输入数据。存储元件还可按期望或需要存储数据或其它信息。存储元件可呈信息源或处理机器内的物理存储器元件的形式。

[0167] 使用径向场线圈致动器控制轴向稳定或不稳定FRC配置的位置的问题使用被称为滑模控制的非线性控制理论的分支来解决。系统状态的线性函数(滑动表面)充当具有期望渐近稳定(滑动)行为的误差信号。使用Liapunov理论设计滑动表面，以在宽范围的FRC动态参数中表现出渐近稳定性。所提出的控制方案于是可用于轴向稳定和不稳定的等离子体两者，而不需要重新调谐滑动表面中使用的参数。该特性是有利的，因为如前文所提及的那样，平衡可能必须在FRC放电的不同阶段上在轴向稳定和轴向不稳定平衡之间转换。

[0168] 图28中示出了控制方案500的配置。低通滤波器将开关频率限制在期望的控制带宽内。假设需要以一个采样延迟进行采样和信号传输的数字控制回路。误差信号(滑动表面)是线圈电流、等离子体位置和等离子体速度的线性组合。等离子体位置和等离子体的速度从外部磁测量中获得。有源线圈系统中的电流可通过标准方法测量。

[0169] 需要线圈电流和等离子体位置来实现位置控制。需要等离子体速度来改善性能，但这是任选的。该误差信号的非线性函数(中继控制律)为连接到中平面对称线圈的每对电源生成离散的电压水平。中平面对称线圈被馈送相同强度但相反符号的中继电压。这产生径向场分量以朝向中平面恢复等离子体位置。

[0170] 为了展示控制方案的可行性，使用刚性等离子体模型来模拟等离子体动态。该模型利用磁体几何形状。当仅考虑等离子体和容器时，等离子体电流分布对应于具有2ms的生长时间的轴向不稳定平衡。假设电源以离散的电压水平工作，典型地以800V为步级。

[0171] 图29示出了若干等离子体控制模拟，其突出了向线圈施加的电压与等离子体位置稳定时间之间的关系，以及将轴向移位20cm的等离子体带回到中平面所需要的线圈峰值电流和斜坡速率。这些滑模轴向位置控制模拟示例使用四对外部微调线圈在0.3T下运行。示出了四种情况，其对应于具有步级为200V(实心正方形)、400V(实心圆形)、800V(实心三角形)和1600V(空心正方形)的离散电压水平的电源。对于所有四种情况，控制带宽为16kHz，并且采样频率为32kHz。示出了等离子体位置(上图)、最外层线圈对中的电流(中间)和线圈

电流斜坡速率(下图)。允许等离子体移位变得不稳定,直到其达到20cm。此时,应用反馈控制。

[0172] 模拟结果表明:

[0173] 1.要在5ms(实心正方形迹线)内将等离子体带回到中平面,0.5MA/s的线圈斜升速率足够,需要200V电源。

[0174] 2.要在2.3ms(实心圆形迹线)内将等离子体带回到中平面,1MA/s的线圈斜升速率足够,需要400V电源。

[0175] 3.要在1.3ms(实心三角形迹线)内将等离子体带回到中平面,2MA/s的线圈斜升速率足够,需要800V电源。

[0176] 4.要在1.0ms(空心正方形迹线)内将等离子体带回到中平面,4MA/s的线圈斜升速率足够,需要1600V电源。

[0177] 图30中还示出了上文研究的第三种情况(2MA/s斜坡速率情况)下所有微调线圈的峰值电流与微调线圈位置的关系。滑模轴向位置控制模拟示例使用四对外部微调线圈使用具有三级(+800V,0,-800V)的电源、16kHz的控制带宽和32kHz的采样率在0.3T下运行。要在1.3ms内将等离子体带回到中平面,需要2MA/s的线圈斜升速率。所有线圈对中所需的峰值电流都小于1.5kA。所需的实际开关频率(约2kHz)远低于控制系统带宽。

[0178] 控制系统也可实现仅随线圈电流和等离子体速度变化,而不随等离子体位置变化的目标表面。在这种情况下,轴向位置控制回路仅提供轴向动态的稳定化,而不是控制。这意味着等离子体处于亚稳定的情形中,并且可沿着其轴线缓慢漂移。然后使用附加的反馈回路提供位置控制,该附加的反馈回路控制在等离子体分界面与容器之间的等离子体间隙,因此其同时执行等离子体形状和位置控制。

[0179] 使用了类似控制系统的另一种等离子体约束装置是托卡马克。为了保持等离子体约束,托卡马克中的等离子体电流必须保持在分别与等离子体密度和环形场大致成比例的下限和上限之间。为了在高等离子体密度下操作,必须增加等离子体电流。同时极向场必须保持尽可能低,因此q安全系数在q=2以上。这通过沿着机器轴线方向伸长等离子体从而允许适合大等离子体电流(并且因此允许高等离子体密度)而不使边界磁场增加到高于其安全极限来实现。这些伸长的等离子体沿着机器轴线方向(在托卡马克行话中称为竖直方向)是不稳定的,并且也需要等离子体稳定化机构。托卡马克中的竖直等离子体位置控制也使用一组径向场线圈来恢复,因此它非常类似于RFC位置控制问题。然而,托卡马克和FRC中需要稳定化的原因是不同的。在托卡马克中,等离子体竖直不稳定性是以大的等离子体电流操作要付出的代价,其需要等离子体伸长来以高环形场操作。在FRC的情况下,等离子体不稳定性是获得横向稳定性要付出的代价。托卡马克具有使配置稳定化的环形场,因此它们不需要横向稳定化。

[0180] 用于等离子体加热的电子束

[0181] 转到图31到图25,呈现了在磁等离子体约束系统中用于等离子体加热的高功率电子束的示例实施例。在示例实施例中,电子束以约30kV的加速电压提供至多为约100至120A的电子流,脉冲持续时间至多为约6至10ms。电子从等离子体发射器中提取,并由嵌套的多孔口加速栅加速。束被传输到接地漂移管中的注入端口。电子的等离子体发射器浸没在外部轴向磁场中,以提供用于轴向注入到具有高磁场的等离子体约束系统中的条件。本文中

呈现了具有等离子体发射器的电子束源的示例实施例，该等离子体发射器促进用于加热FRC等离子体的长脉冲、高功率电子束的生成。

[0182] 如图31中所示，电子束750的示例实施例包括电弧等离子体源754、由嵌套加速栅的系统构成的电子光学系统770和束线，该束线包括磁系统760，以提供有效的电子束形成、传输以及向感兴趣的等离子体约束装置中的最终注入。如图31中所描绘，磁系统760包括等离子体发生器线圈762和等离子体发射器线圈764，以及如图36中进一步描绘的束传输线圈766。如图31中所描绘，电弧等离子体源754(例如电弧等离子体发生器)定位成在等离子体室758的等离子体膨胀容积756内产生等离子体。具有其用于束提取的嵌套加速栅的电子光学系统770邻近等离子体室758定位，并且与等离子体室758和等离子体源754一起定位在静电屏蔽752内。

[0183] 在示例实施例中，电子束形成的过程包括以下步骤：等离子体生成、等离子体膨胀、电子提取和加速。初始氢等离子体由电弧等离子体发生器754在等离子体室758的膨胀容积756内部产生。等离子体发生器754形成等离子体的流体动力流以覆盖电子光学系统770的第一栅电极或等离子体栅电极772(参见图33)的表面。虽然等离子体生成和等离子体膨胀相对容易用现代技术实现，但电子从等离子体中的提取及其加速的模拟能够用计算机模拟实现，诸如图32中所示。

[0184] 电子流在电子光学系统770中被提取和加速，该电子光学系统770被设计成形成具有尽可能最低发射率的电子束。也就是说，从单个单元孔口中提取具有最小RMS角散度的基本束。栅电极的每个基本加速单元向整个束贡献小电流。

[0185] 如图33中所示，电子光学系统770包括等离子体栅电极772、抑制栅电极774和接地栅电极776。栅电极772、774和776中的每一个分别具有单个孔口或单元782、792和794的阵列。等离子体栅772与等离子体室758的膨胀容积756中的等离子体直接接触。它需要高电位，这是系统的加速电压，并且它形成特定弯曲形状的等离子体发射器弯月面，以在提取区域中提供小束的初始聚焦。每个等离子体发射器孔口782具有由从等离子体栅772的等离子体侧778延伸的第一埋头孔783和从等离子体栅772的束侧779延伸的第二埋头孔785形成的特定形状，第一埋头孔783和第二埋头孔785留下环形突起787，该环形突起787具有与束轴线B成静电解释的60度的内倒角P，以用于束聚焦。抑制栅774起到抑制从紧接在最后一个(接地的)栅776之后的环境气体生成的次级等离子体的离子回流的作用。抑制栅774的每个孔口792包括0-30度的埋头孔，以降低静电透镜的散焦能力，从而促进束形成。

[0186] 需要接地栅776为束提供潜在参考点，并用作加速单元的阳极。

[0187] 电子束在由磁系统760的线圈(参见例如762、764、766)形成的外部轴向磁场中传输。磁系统760应当包括至少两个线圈，并且可任选地包括更多线圈。

[0188] 如果束需要注入到具有其自身磁场的区域中，则有必要在束发射器上产生轴向磁场。由于广义动量守恒，如果在阴极处粒子已经在相对于束对称轴线测量的粒子的径向坐标的大小的圆内捕获了一定量的磁通量，则束的粒子只能进入具有非零轴向磁场的区域。

[0189] 如果等离子体发生器位于具有非零磁场的区域中，那么，取决于外部场的大小，等离子体流可能倾向于遵循外部场的磁场线。为了用相对均匀的等离子体流覆盖电子光学系统的第一(等离子体)电极的表面，还可能需要在电弧等离子体发生器754的阳极的位置上放置强线圈。

[0190] 在示例实施例中，如图34A和图34B中所描绘，束包括等离子体发射器栅772的掩模部分，以产生空心束，该空心束将减轻束空间电荷效应并总体上改善束动态。如图34A中所示，诸如例如呈六边形形状的掩模784居中地定位在等离子栅772的等离子侧778上，在具有多个孔口782的孔口阵列780之上。掩模784促进空心或环形束的形成。

[0191] 对于更均匀的空心或环形束，等离子体发射器772可包括具有与第一掩模784相同形状的第二掩模786，以在发射器栅772上形成相同的内部和外部掩模轮廓。

[0192] 如图35和图36中所示，当将束轴向地注入等离子体容纳系统(例如，镜装置)的容器100中时，将束传输通过没有漂移管(例如，参见如图36中所示的接地漂移管755)的偏滤器300、302的容积并且磁场低于必要的磁场可能是一个挑战。在这种情况下，有可能依靠等离子体辅助传输。存在于偏滤器容积中的等离子体将补偿空间电荷和束电流，这导致通常会阻止束传播通过诸如偏滤器容积的开放空间的效应显著降低。

[0193] 在备选的示例实施例中，束可用LaB6阴极而不是等离子体阴极制成。

[0194] 电子束的示例实施例相比常规电子束的优点包括长脉冲、高束电流和不退化的等离子体发射器。示例实施例通过使用等离子体阴极代替固体材料阴极来克服阴极退化的问题。等离子体发射器由栅电极的系统表示，栅的每个基本单元形成单个基本束。与具有有限的循环数并在一定数量的脉冲后退化的固体阴极相反，等离子体发射器允许几乎无限的束提取循环。此外，等离子体阴极可承受长得多的脉冲持续时间，在被动冷却的情况下至多为约1s，并且在采取特殊措施以用于主动冷却栅电极的情况下甚至更长。

[0195] 高导流系数电子束的空间电荷效应可通过设计沿束线产生外部磁场的磁系统来控制。这允许本文中提供的实施例根据条件调整束包络，并将束传输到需要的地方，包括存在任何附加的外部磁场(例如等离子体约束装置的磁场)的地方。

[0196] 本文中提供的示例实施例已经在美国临时专利申请No.63/111446中描述，该申请通过引用并入本文中。

[0197] 根据本公开的实施例，一种用于生成和保持场反向配置(FRC)等离子体的方法，包括：在约束室中形成关于等离子体的FRC；将电子束从电子束源轴向地注入到FRC等离子体中；以及将多个中性束朝向约束室的中平面成一角度注入到FRC等离子体中。

[0198] 根据本公开的另一个实施例，电子束源包括电弧等离子体源、包括加速栅的系统的电子光学系统以及包括配置成实现电子束形成、传输和注入到FRC等离子体中的磁系统的束线。

[0199] 根据本公开的另一个实施例，电子束源包括配置成实现环形束的束发射器。

[0200] 根据本公开的另一个实施例，束发射器包括多孔口发射器栅和覆盖发射器栅的中心区域中的孔口的掩模。

[0201] 根据本公开的另一个实施例，束发射器包括多孔口发射器栅以及覆盖发射器栅的中心区域和与中心区域成间隔开的关系的外部区域中的孔口的第一和第二掩模。

[0202] 根据本公开的另一个实施例，第二掩模具有与第一掩模的外部轮廓形状匹配的内部轮廓形状。

[0203] 根据本公开的另一个实施例，磁系统包括等离子体发生器线圈、等离子体发射器线圈、透镜线圈和束传输线圈。

[0204] 根据本公开的另一个实施例，轴向地注入电子束的步骤包括生成等离子体、使等

离子体膨胀、从等离子体中提取电子以及使提取的电子加速。

[0205] 根据本公开的另一个实施例，在第一束能量和第二束能量之间调谐多个中性束的束能量，其中，第二束能量不同于第一束能量。

[0206] 根据本公开的另一个实施例，第二束能量高于第一束能量。

[0207] 根据本公开的另一个实施例，在注入发射的持续时间期间，多个中性束在第一和第二束能量之间切换。

[0208] 根据本公开的另一个实施例，该方法还包括通过从主动反馈等离子体控制系统接收的反馈信号来控制多个中性束的束能量。

[0209] 根据本公开的另一个实施例，该方法还包括通过从主动反馈等离子体控制系统接收的反馈信号来控制多个中性束的束能量。

[0210] 根据本公开的另一个实施例，控制多个中性束的束能量包括调整多个中性束的束能量以调整径向束功率沉积分布，从而调整压力梯度值。

[0211] 根据本公开的另一个实施例，该方法还包括：在约束室内用围绕约束室内延伸的准直流线圈生成磁场；以及在约束室的相对端部内用围绕约束室的相对端部延伸的准直流镜线圈生成镜磁场。

[0212] 根据本公开的另一个实施例，形成FRC包括：在联接到约束室的相对的第一和第二形成部段中形成形成FRC；以及使形成FRC从第一和第二形成部段朝向约束室的中间贯穿平面加速，在该中间贯穿平面中，两个形成FRC合并以形成FRC。

[0213] 根据本公开的另一个实施例，该方法还包括将FRC的磁通量表面引导到第一和第二内偏滤器中。

[0214] 根据本公开的另一个实施例，一种用于生成和保持场反向配置(FRC)等离子体的系统，包括：约束室；第一和第二偏滤器，其联接到第一和第二形成部段；第一和第二轴向等离子体枪，其能够操作地联接到第一和第二偏滤器、第一和第二形成部段以及约束室；多个中性原子束注入器，其联接到约束室并定向成将中性原子束以小于法向于约束室的纵向轴线的角度朝向约束室的中平面注入；磁系统，其包括定位在约束室、第一和第二形成部段以及第一和第二偏滤器周围的多个准直流线圈、定位在约束室与第一和第二形成部段之间的第一和第二组准直流镜线圈、以及定位在第一和第二形成部段与第一和第二偏滤器之间的第一和第二镜塞；吸杂系统，其联接到约束室和第一和第二偏滤器；一个或多个偏置电极，其用于电偏置生成的FRC的开放通量表面，所述一个或多个偏置电极定位在约束室、第一和第二形成部段以及第一和第二偏滤器中的一个或多个内；两个或更多个鞍形线圈，其联接到约束室；以及一个或多个电子束，其轴向地联接到第一和第二偏滤器中的一个或多个。

[0215] 根据本公开的另一个实施例，一种用于生成和保持场反向配置(FRC)等离子体的系统，包括：约束室；第一和第二偏滤器，其联接到第一和第二形成部段；多个等离子体枪、一个或多个偏置电极以及第一和第二镜塞中的一个或多个，其中，所述多个等离子体枪包括能够操作地联接到第一和第二偏滤器、第一和第二形成部段和约束室的第一和第二轴向等离子体枪，其中，所述一个或多个偏置电极定位在约束室、第一和第二形成部段以及第一和第二偏滤器中的一个或多个内，并且其中，第一和第二镜塞定位在第一和第二形成部段以及第一和第二偏滤器之间；吸杂系统，其联接到约束室和第一和第二偏滤器；多个中性原子束注入器，其联接到约束室并法向于约束室的轴线定向；磁系统，其包括定位在约束室、

第一和第二形成部段以及第一和第二偏滤器周围的多个准直流线圈、定位在约束室与第一和第二形成部段之间的第一和第二组准直流镜线圈;以及一个或多个电子束,其轴向地联接到第一和第二偏滤器中的一个或多个,其中,该系统配置成生成FRC并在中性束被注入等离子体中时维持FRC不衰减。

[0216] 根据本公开的另一个实施例,一种电子束包括电弧等离子体源、包括加速栅的系统的电子光学系统以及束线,且该束线包括配置成实现电子束形成、传输和向感兴趣的等离子体约束装置中的注入的磁系统。

[0217] 然而,本文中提供的示例实施例仅旨在作为说明性示例,并且不是以任何方式进行限制。

[0218] 针对本文提供的任何实施例描述的所有特征、元素、部件、功能和步骤旨在能够与来自任何其它实施例的特征、元素、部件、功能和步骤自由组合和替换。如果某个特征、元素、部件、功能或步骤仅针对一个实施例进行描述,则应当理解,该特征、元素、部件、功能或步骤可与本文描述的每个其它实施例一起使用,除非另有明确说明。因此,该段落在任何时候都用作权利要求书的介绍的前提基础和书面支持,该权利要求书组合了来自不同实施例的特征、元素、部件、功能和步骤,或者用来自一个实施例的特征、元素、部件、功能和步骤替换来自另一个实施例的特征、元素、部件、功能和步骤,即使以下描述在特定情况下没有明确说明这种组合或替换是可能的。明确叙述每一种可能的组合和替代是过于繁琐的,特别是考虑到每一种这样的组合和替代的允许性将容易被本领域普通技术人员在阅读本说明书时识别。

[0219] 在许多情况下,实体在本文中被描述为联接到其它实体。应当理解,术语“联接的”和“连接的”(或它们的任何形式)在本文中可互换使用,并且在这两种情况下,对于两个实体的直接联接(没有任何不可忽略的(例如,寄生的)居间实体)和两个实体的间接联接(具有一个或多个不可忽略的居间实体)是通用的。在实体被示出为直接联接在一起或者被描述为联接在一起而没有描述任何居间实体的情况下,应当理解,这些实体也可间接联接在一起,除非上下文另有明确规定。

[0220] 虽然实施例易于具有各种修改和备选形式,但是其具体示例已经在附图中示出并在本文中详细描述。然而,应当理解,这些实施例不限于所公开的特定形式,相反,这些实施例将覆盖落入本公开的精神内的所有修改、等同物和备选方案。此外,实施例的任何特征、功能、步骤或元素以及通过不在权利要求的发明范围内的特征、功能、步骤或元素来限定该范围的负面限制可在权利要求中叙述或添加到权利要求。

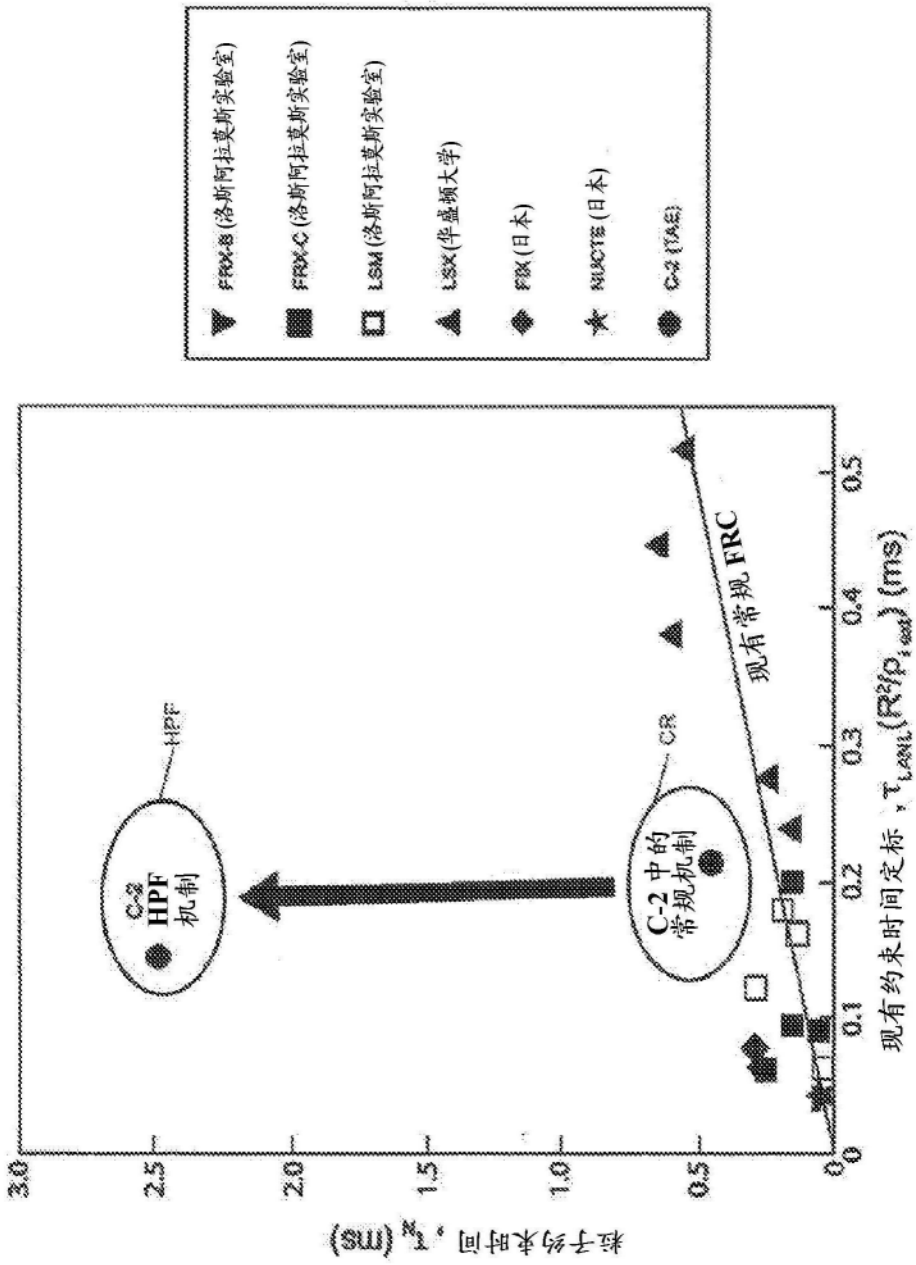

FRX-B (洛斯阿拉莫斯实验室)
FRX-C (洛斯阿拉莫斯实验室)
LSM (洛斯阿拉莫斯实验室)
LSX (华盛顿大学)
FRX (日本)
NUCTE (日本)
C-2 (TAE)
C-2 HPF 机制
C-2 中的常规机制
HPF
CR
现有常规 FRC
粒子约束时间，τ_E (ms)
现有约束时间定标，$\tau_{LAWL}(R^2 p_{i,vol})$ (ms)
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5

图1

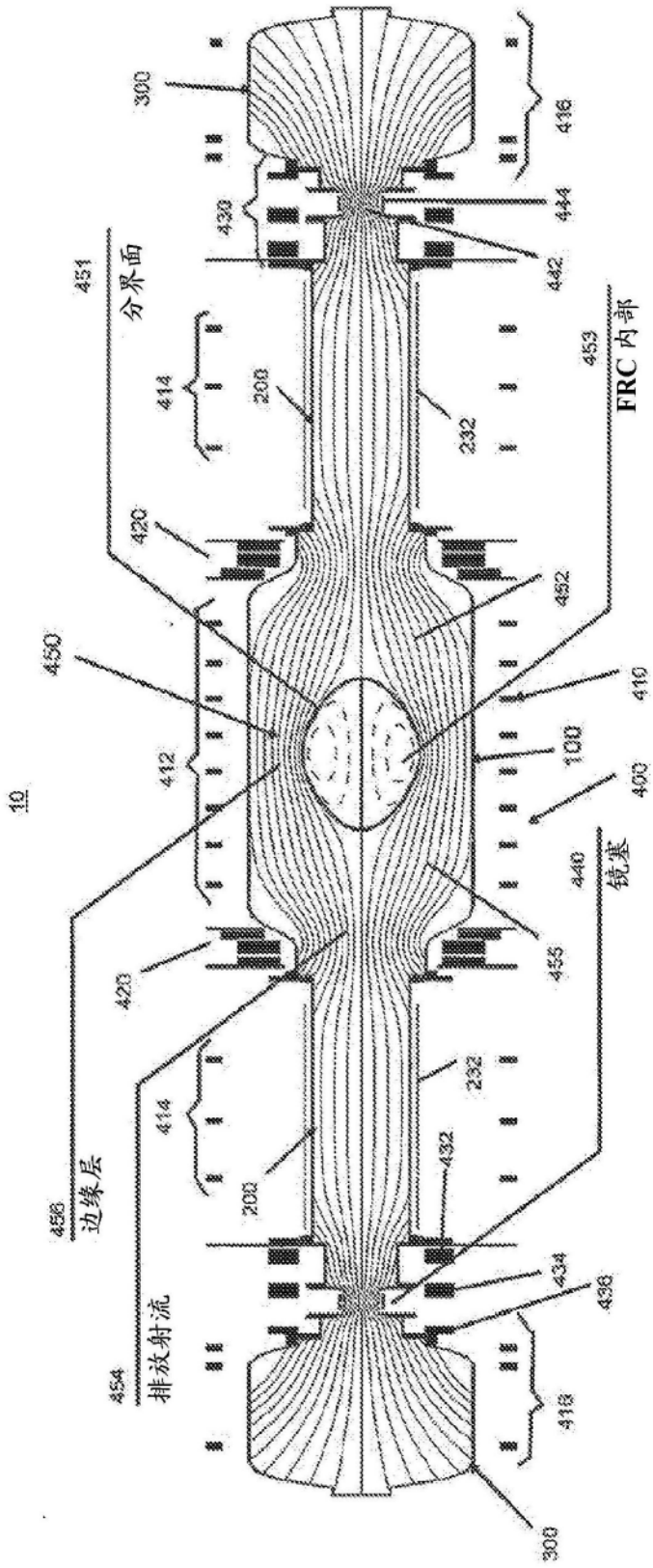

10
300
416
444
442
431
分界面
453
FRC 内部
414
200
232
420
452
450
412
410
100
400
440
镜塞
455
423
456
边缘层
434
436
454
排放射流
418
300

图2

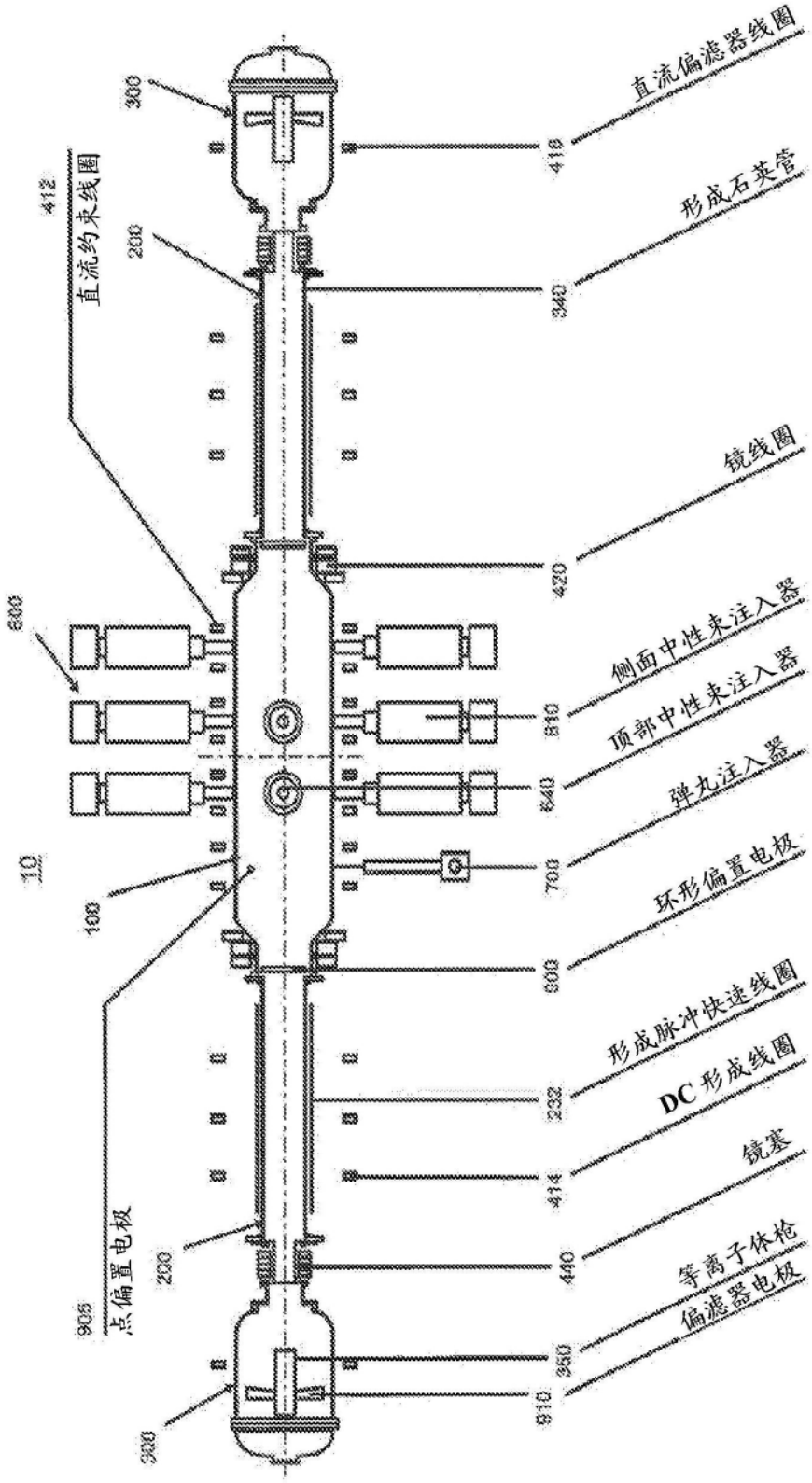

直流偏滤器线圈
形成石英管
镜线圈
侧面中性束注入器
顶部中性束注入器
弹丸注入器
环形偏置电极
形成脉冲快速线圈
DC 形成线圈
镜塞
等离子体枪
偏滤器电极
点偏置电极
直流约束线圈
10
300
412
200
416
340
420
800
810
840
700
100
900
232
414
220
440
905
350
910
320

图3A

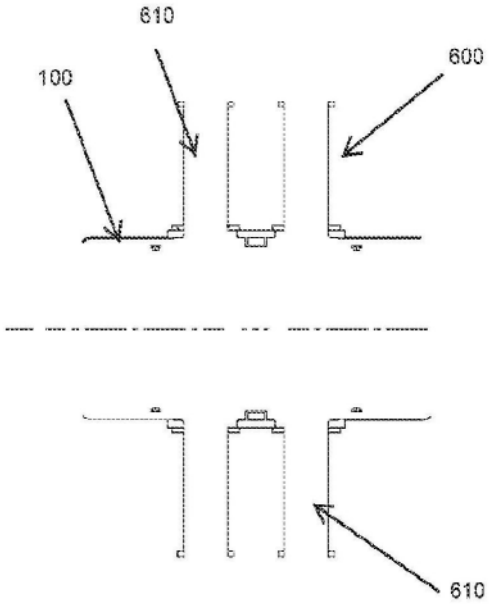


图3B

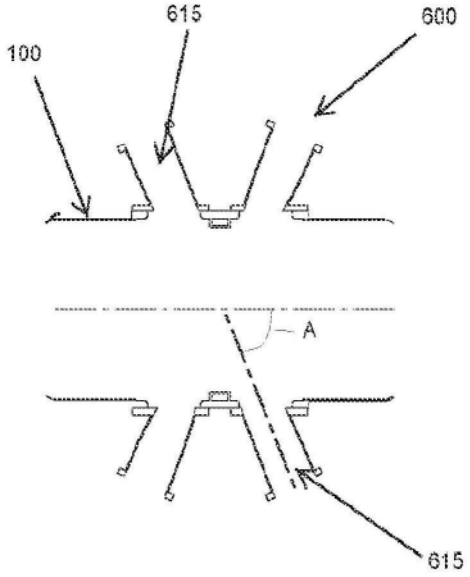


图3C

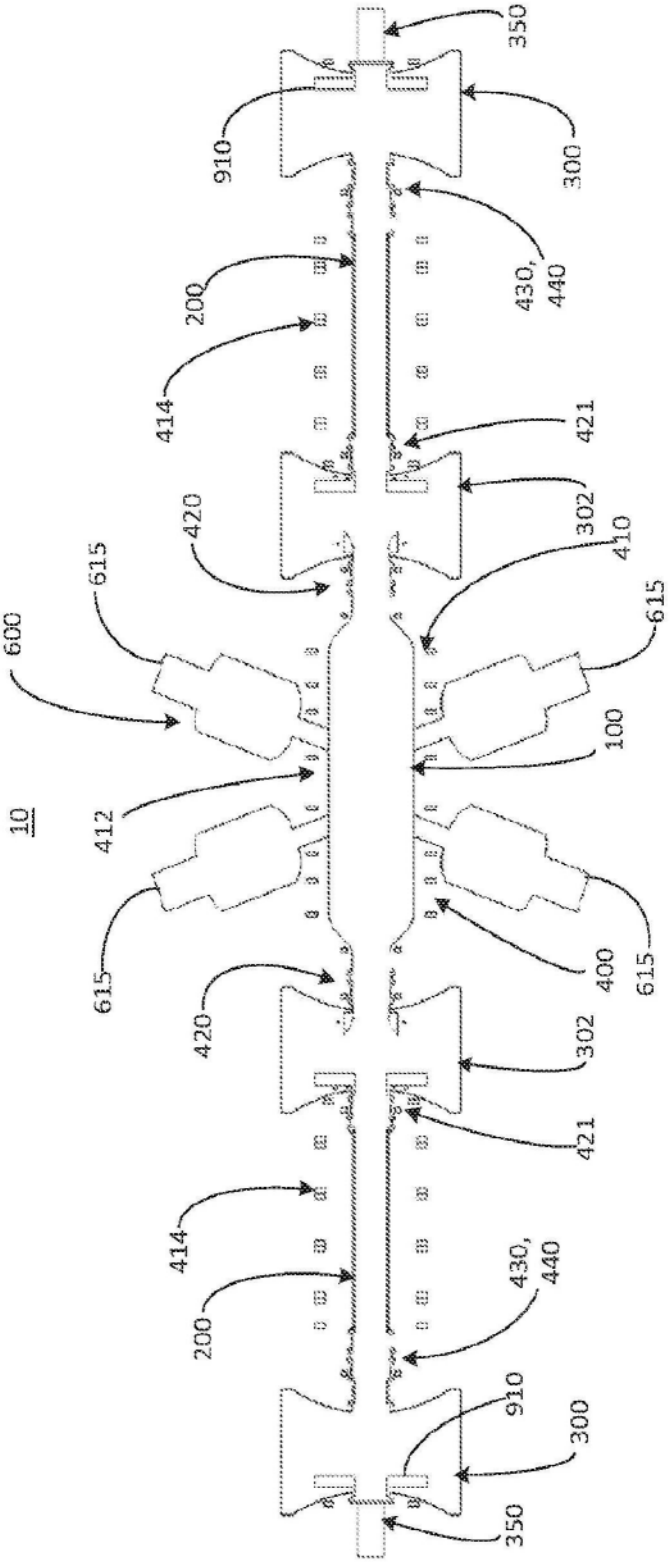

350
910
300
200
430,
440
414
421
420
302
410
615
600
100
10
412
615
400
615
420
302
421
414
200
430,
440
910
300
350

图3D

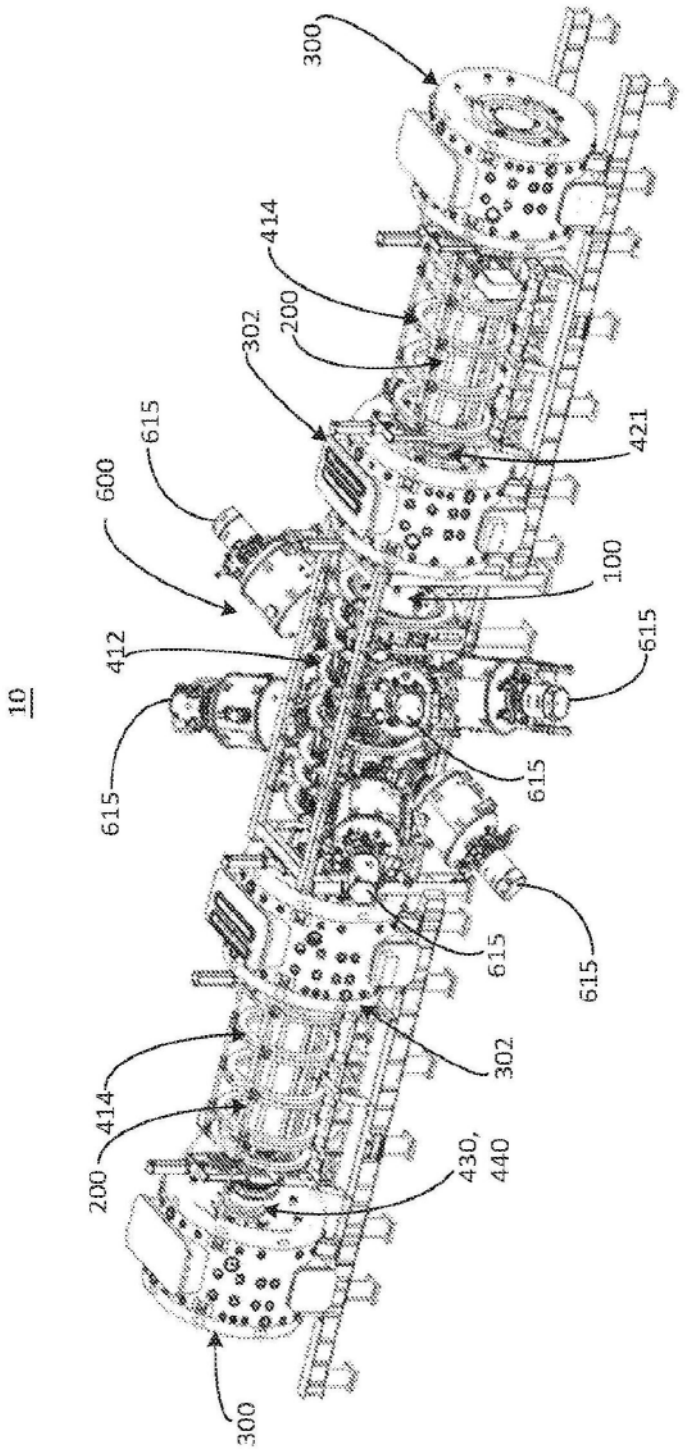

10
300
414
200
302
615
600
421
100
412
615
615
615
615
615
302
414
200
430,
440
300

图3E

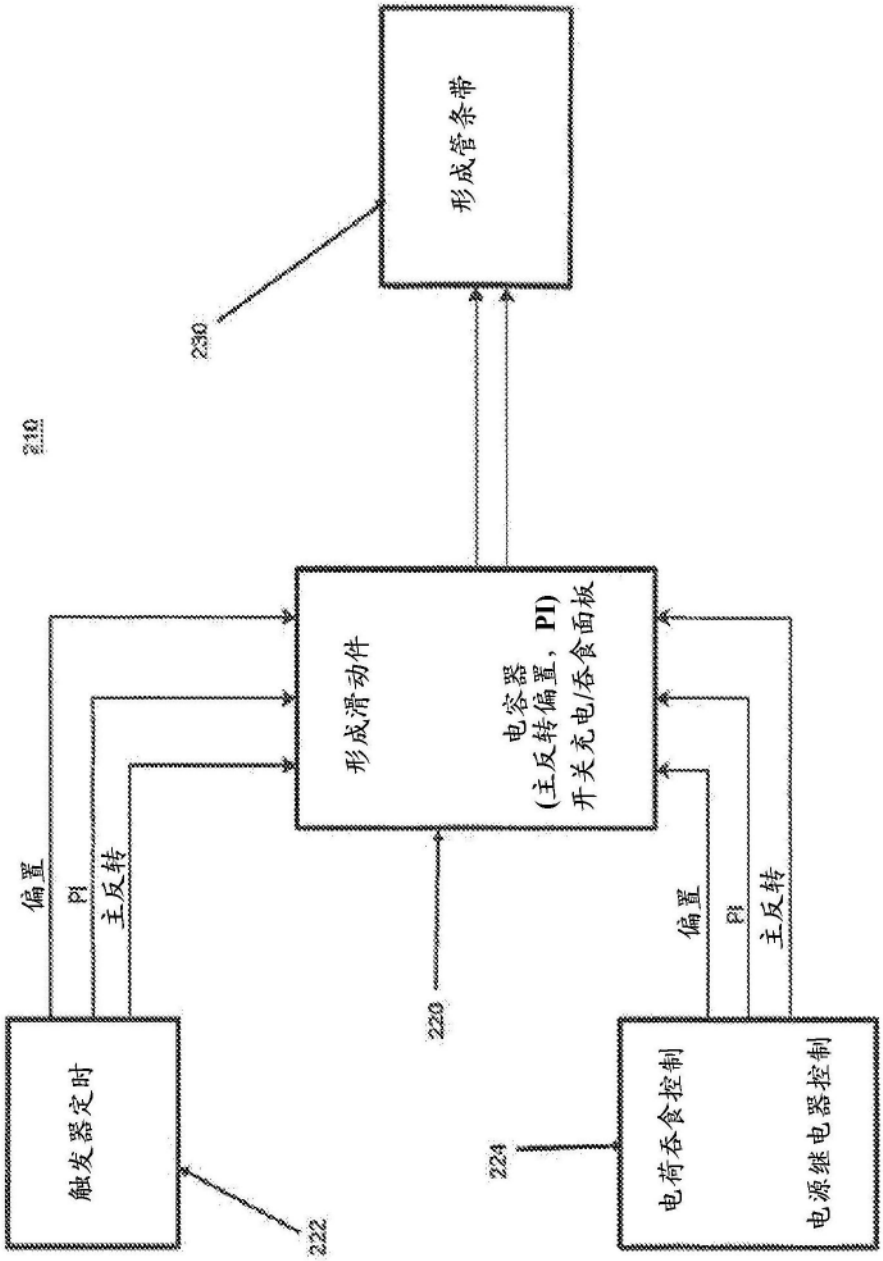

形成管条带
230
210
形成滑动件
电容器
(主反转偏置，PI)
开关充电/吞食面板
偏置
PI
主反转
220
触发器定时
222
偏置
PI
主反转
224
电荷吞食控制
电源继电器控制

图4

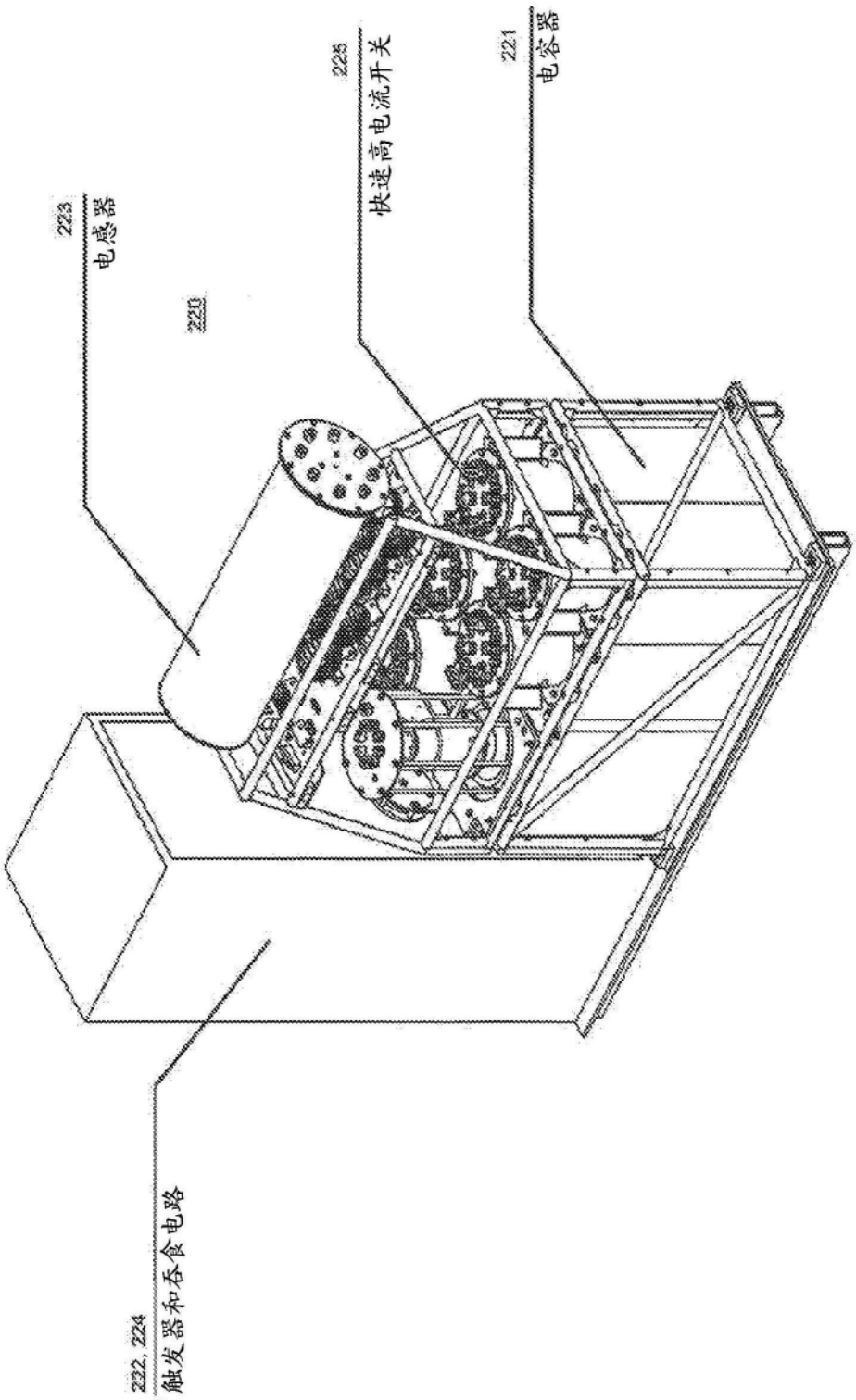


图5

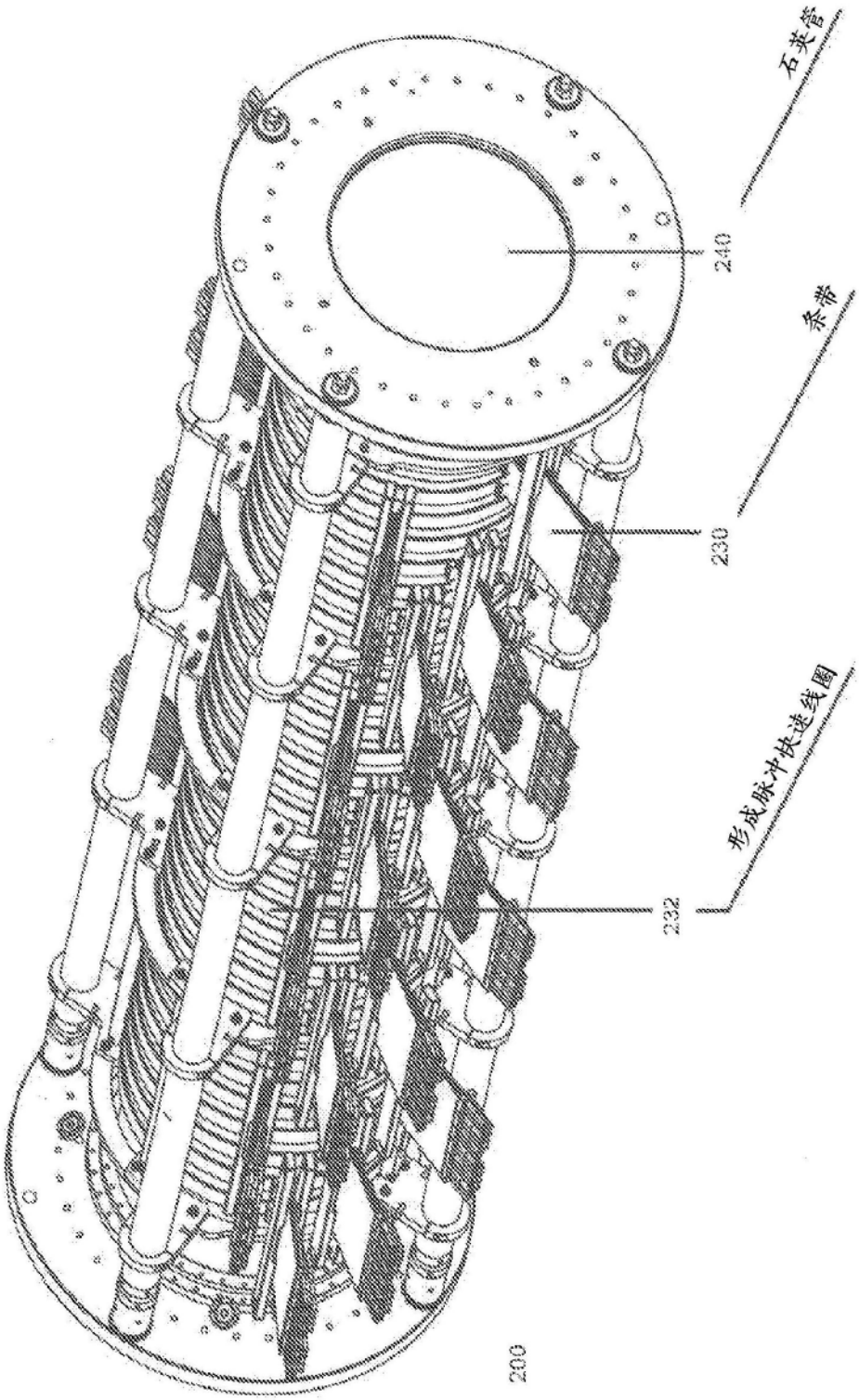


图6

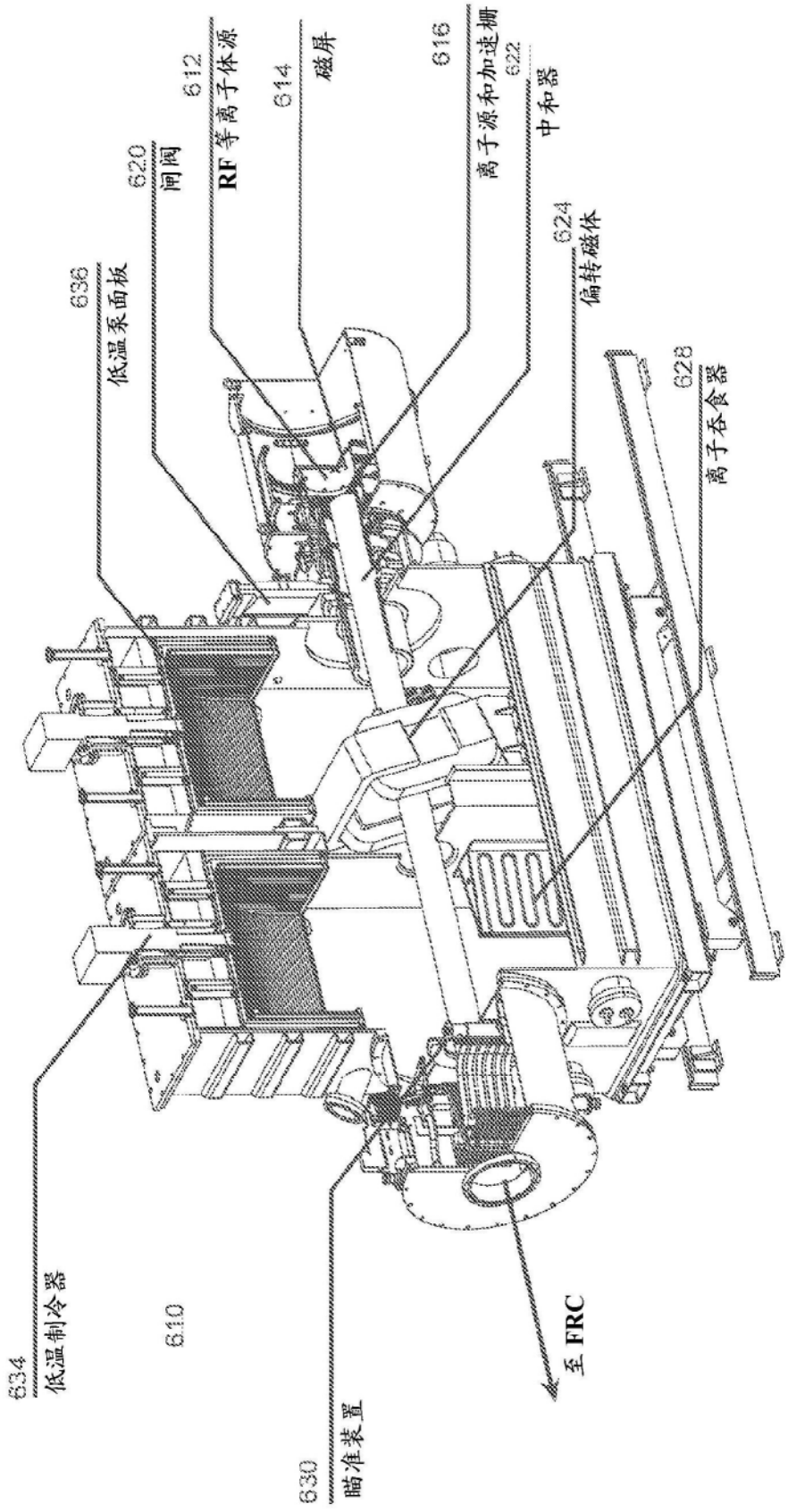

634
低温制冷器
610
630
瞄准装置
至 FRC
624
偏转磁体
628
离子吞食器
636
低温泵面板
620
闸阀
612
RF 等离子体源
614
磁屏
616
离子源和加速栅
622
中和器

图7

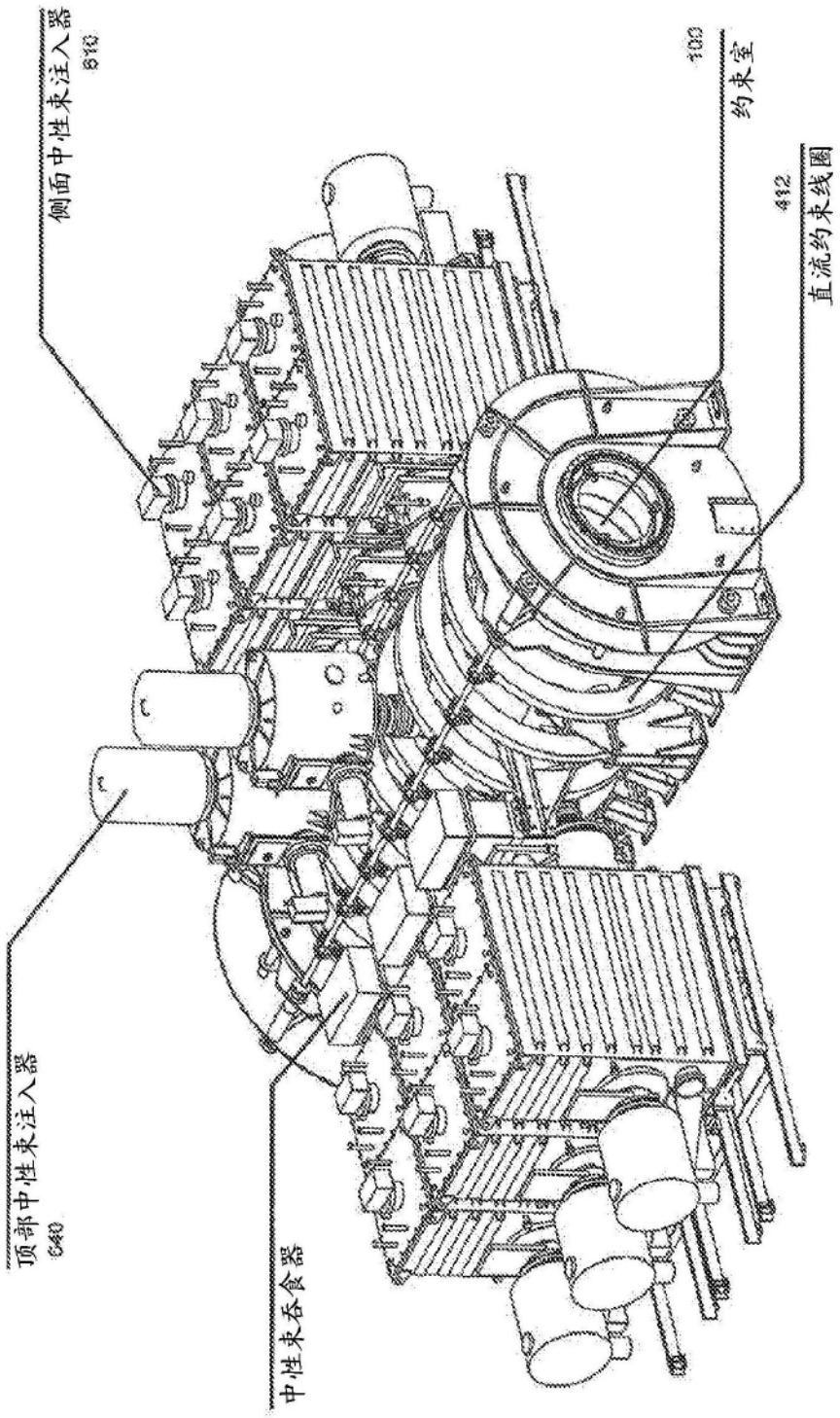


图8

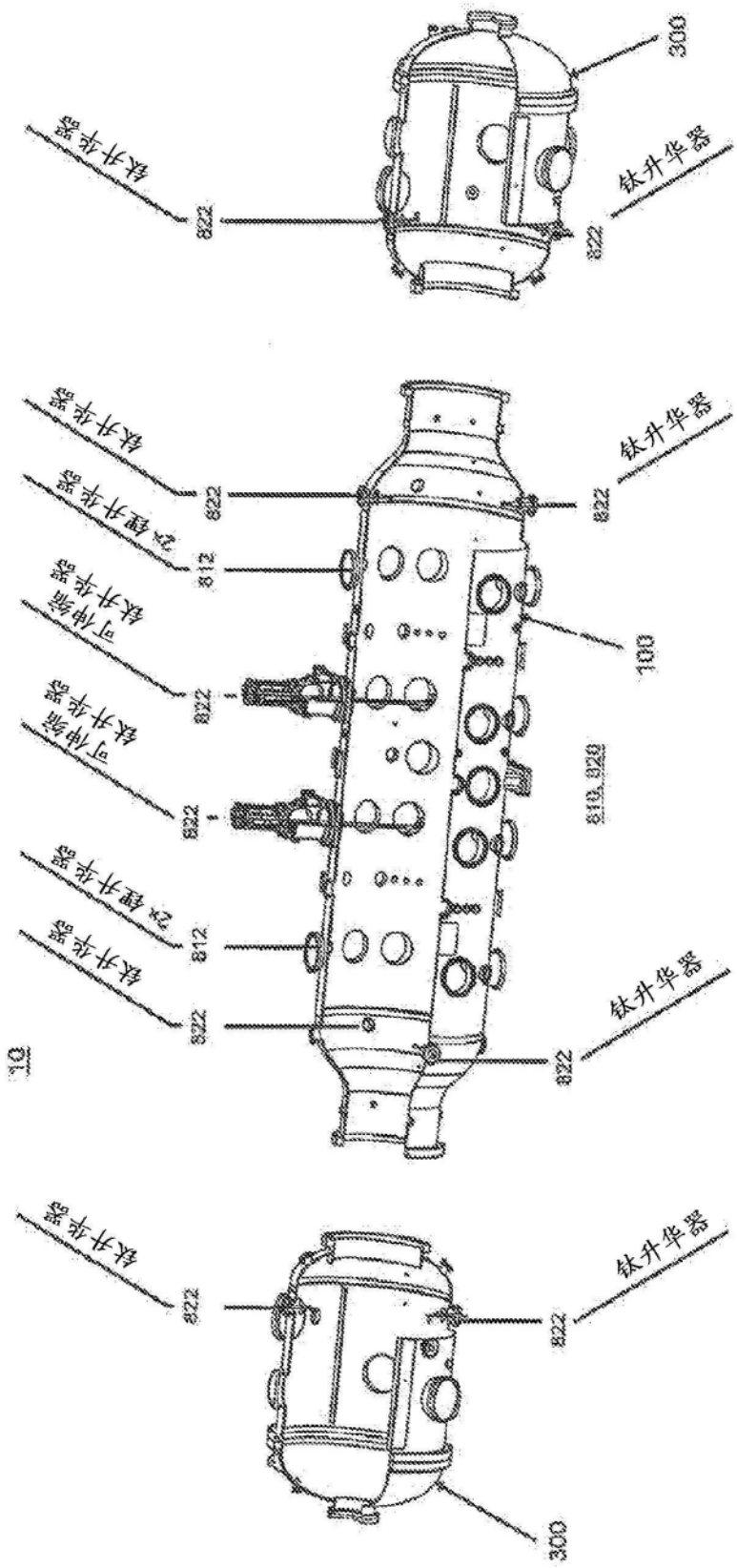

300
钻井平台
822
钛升华器
822
钻井平台
822
钛升华器
822
2K锂升华器
812
钻井平台
可伸缩
822
100
钻井平台
可伸缩
822
810, 820
2K锂升华器
812
钻井平台
822
钛升华器
822
10
钻井平台
822
钛升华器
822
300

图9

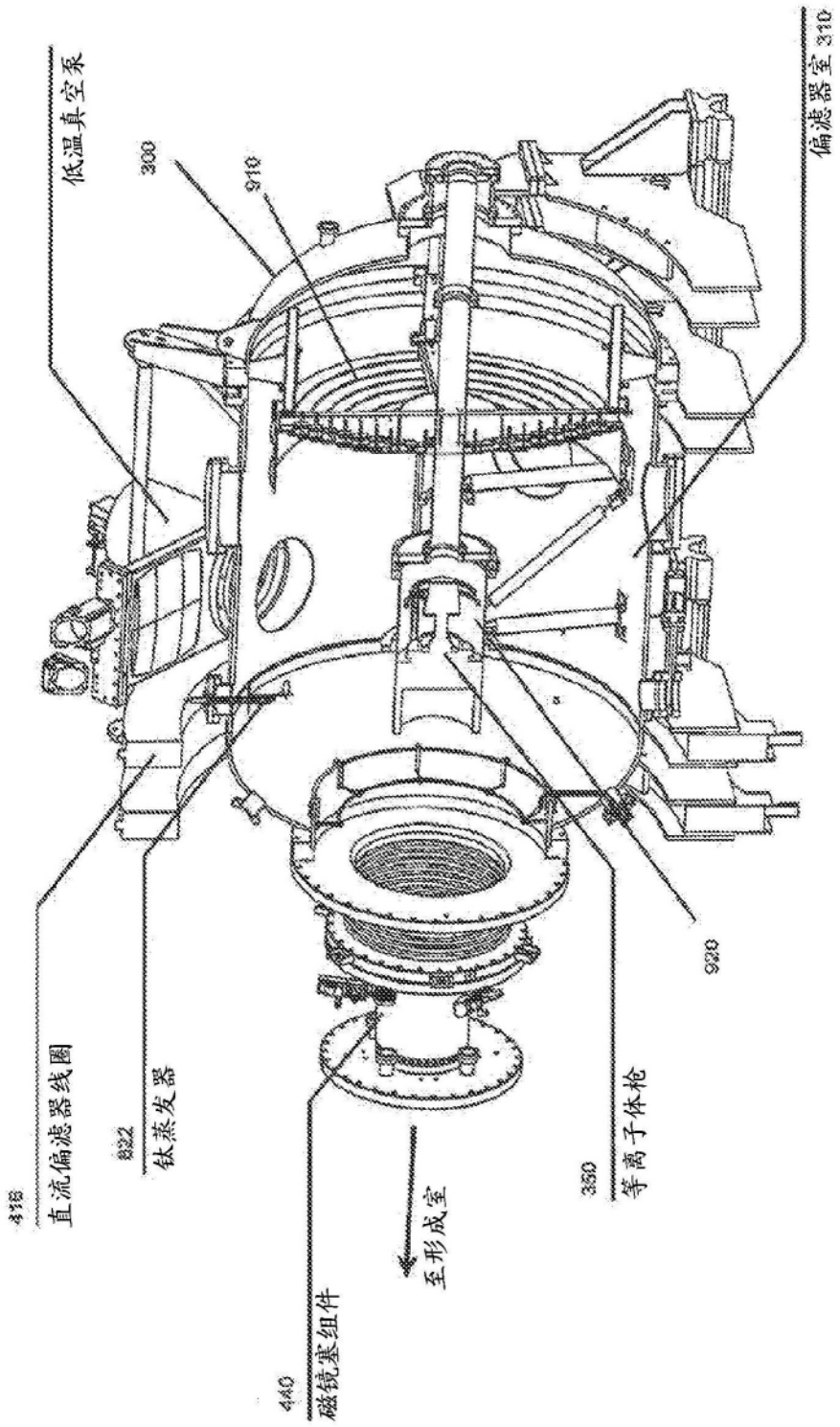


图10

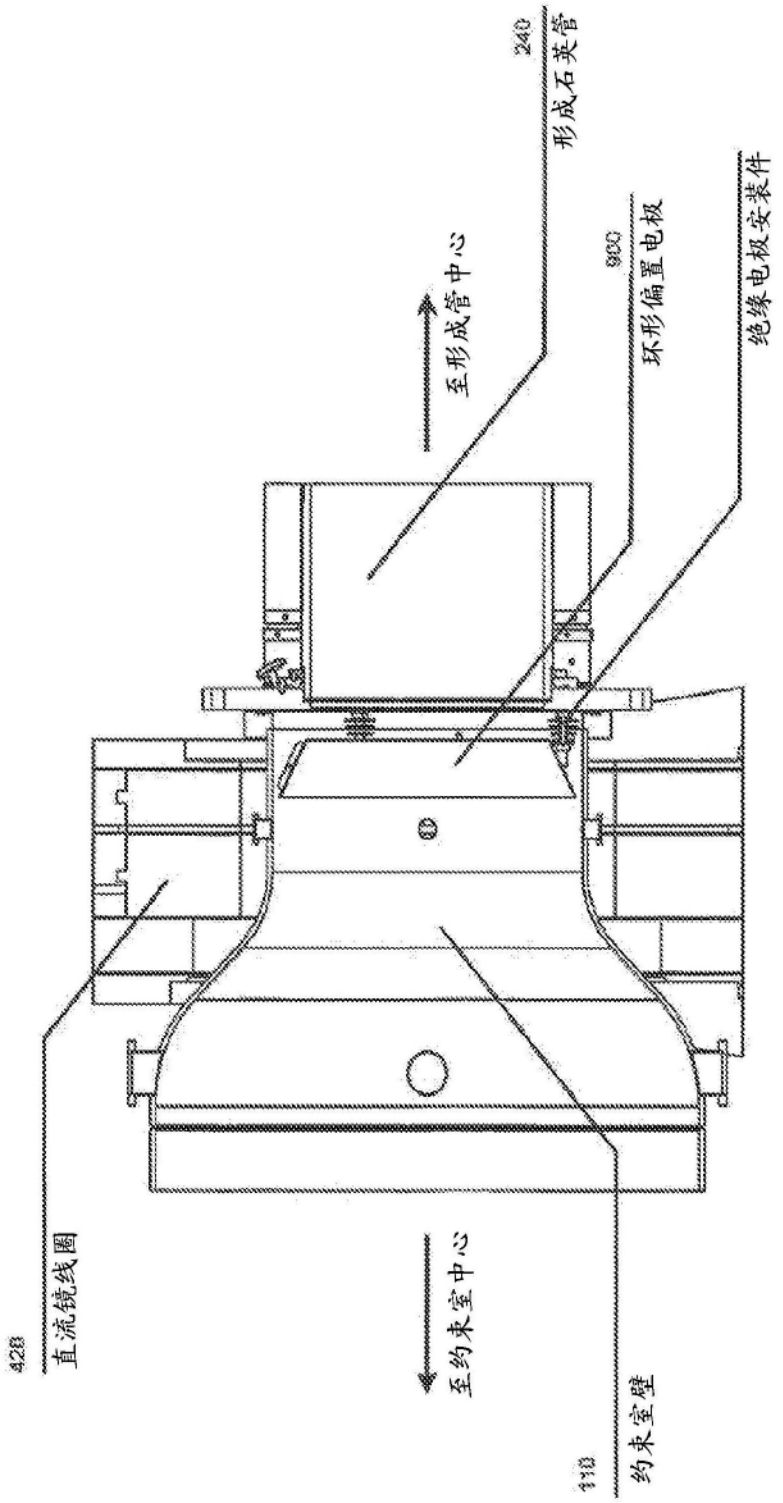

240
形成石英管
至形成管中心
805
环形偏置电极
绝缘电极安装件
428
直流镜线圈
至约束室中心
118
约束室壁

图11

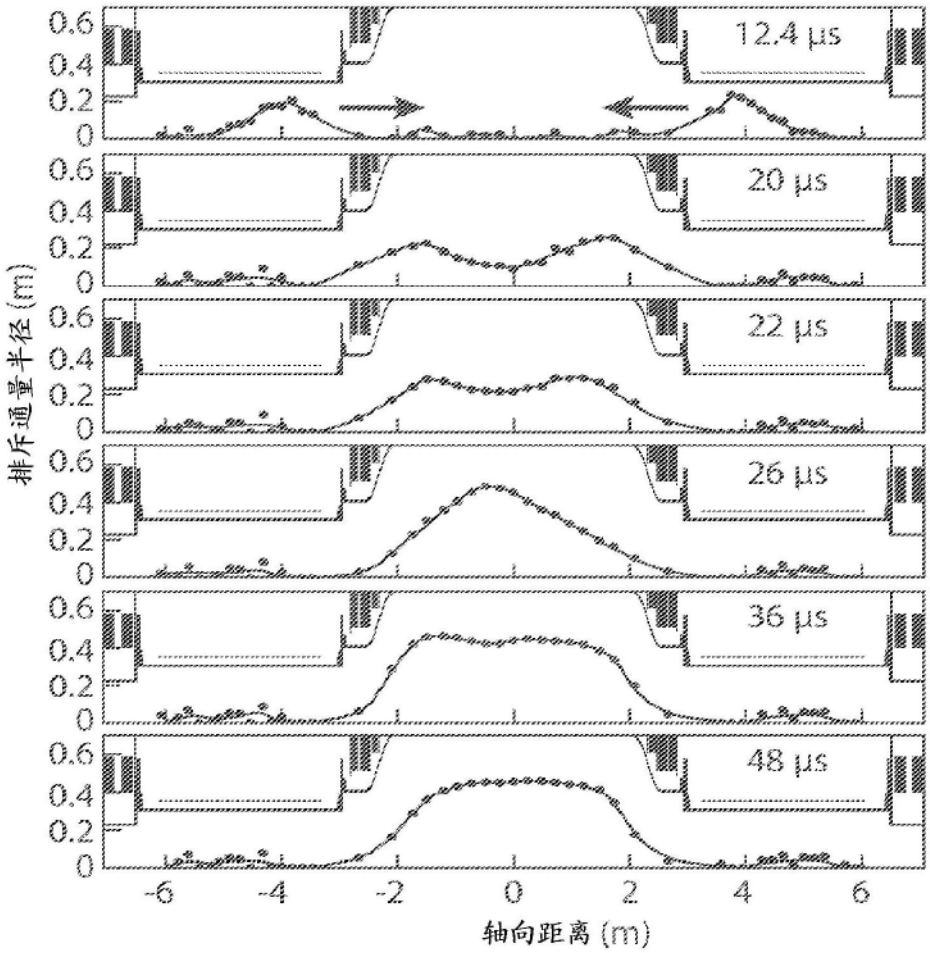

12.4 μs
20 μs
22 μs
26 μs
36 μs
48 μs
0.6
0.4
0.2
0
-6
-4
-2
0
2
4
6
排斥通量半径(m)
轴向距离(m)

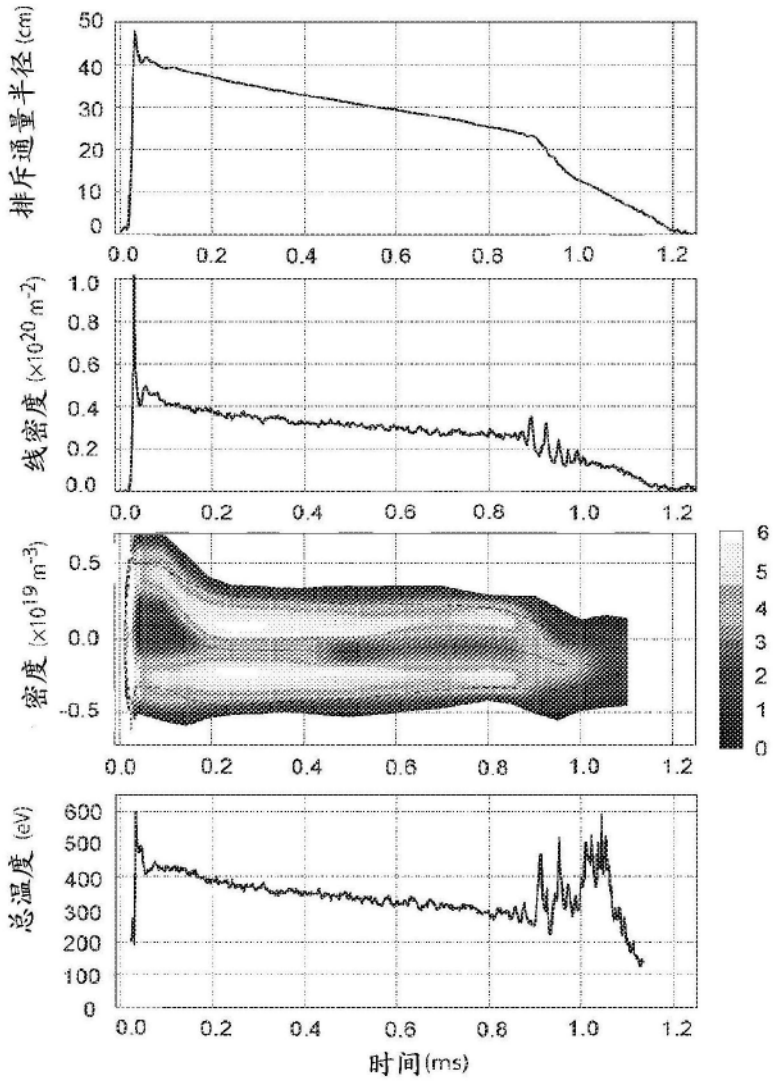
图12

图 13A

图 13B

图 13C

图 13D



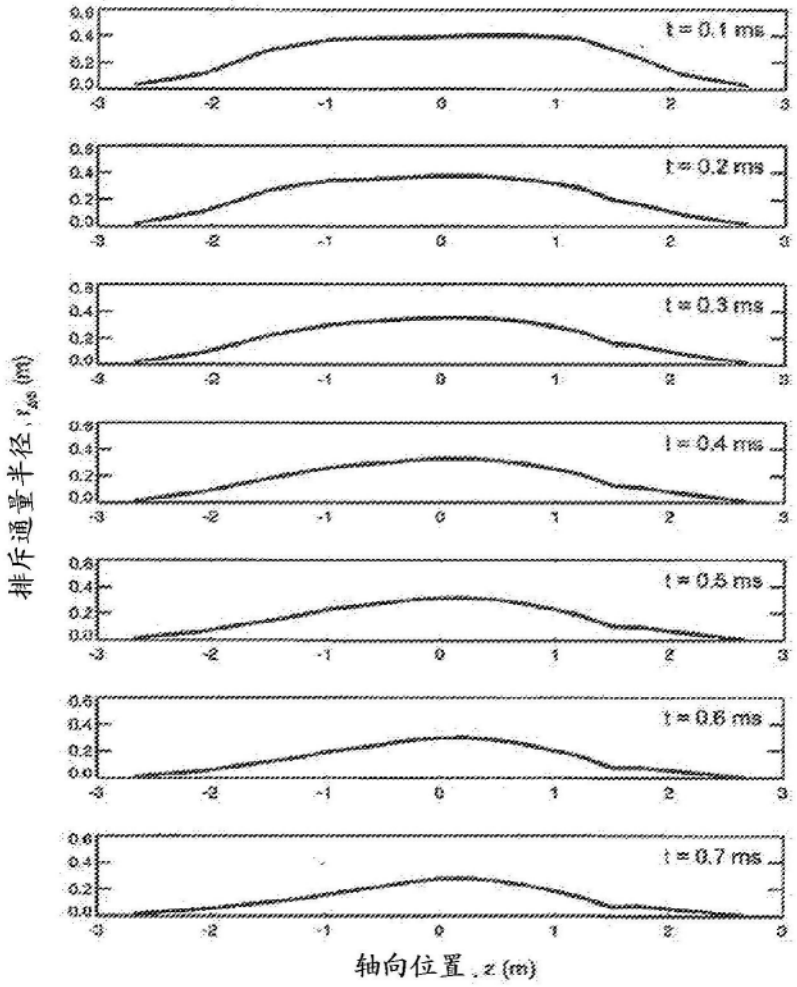

t = 0.1 ms
t = 0.2 ms
t = 0.3 ms
t = 0.4 ms
t = 0.5 ms
t = 0.6 ms
t = 0.7 ms
排斥通量半径，r_{90} (m)
轴向位置，z (m)

图14

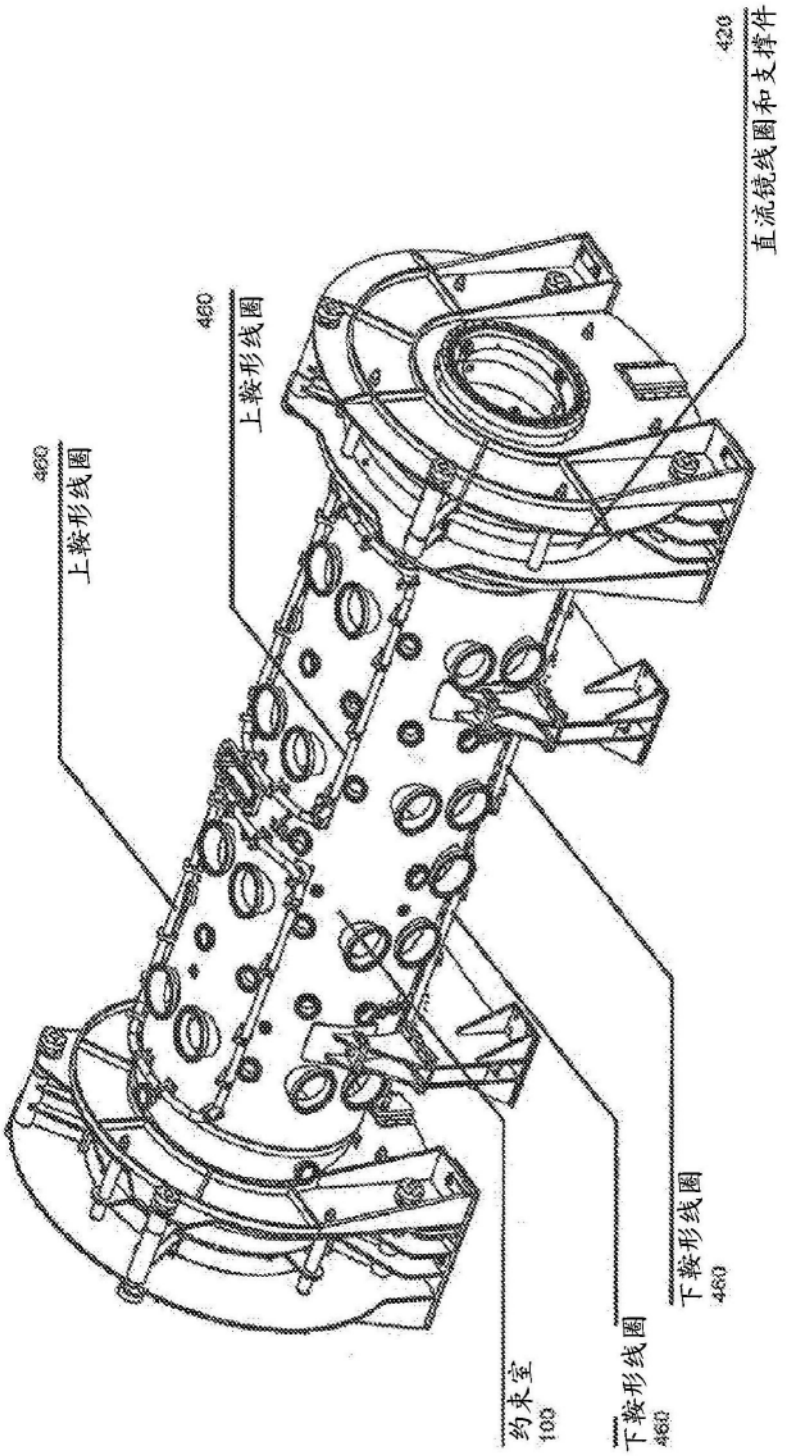

420
直流镜线圈和支撑件
460
上鞍形线圈
460
上鞍形线圈
约束室
103
下鞍形线圈
460
下鞍形线圈
460

图15

图 16A

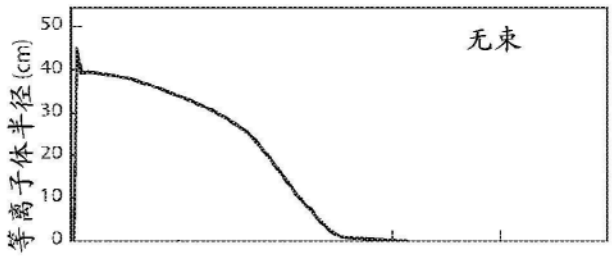


图 16B

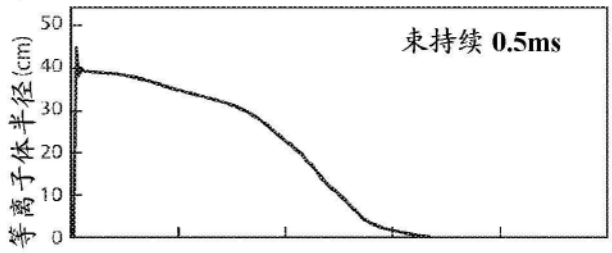


图 16C

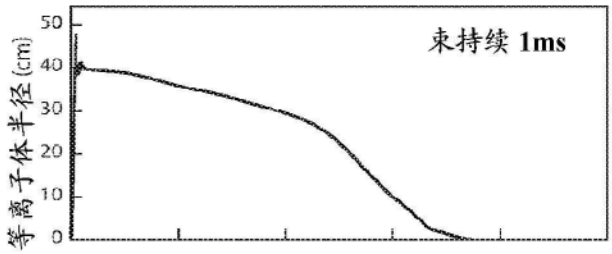


图 16D

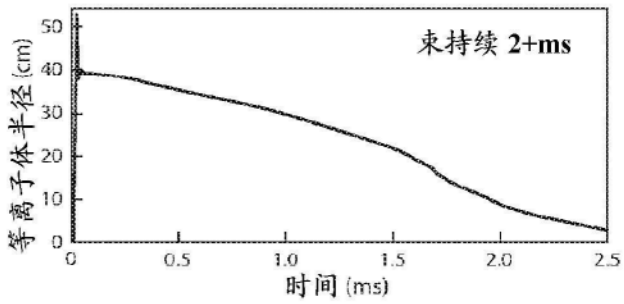


图 17A

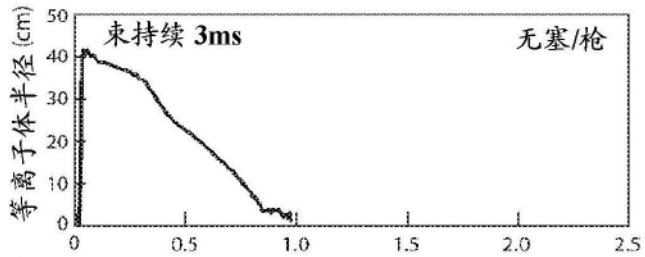


图 17B

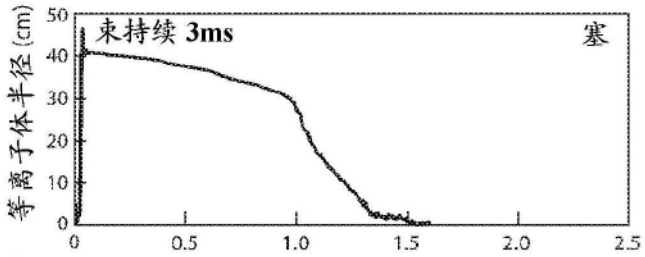


图 17C

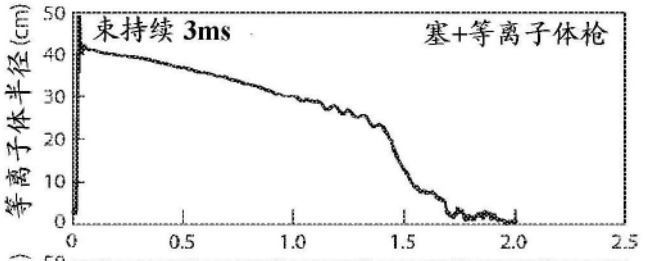


图 17D

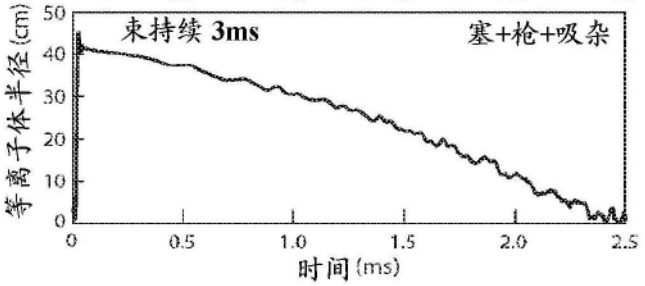


图 18A

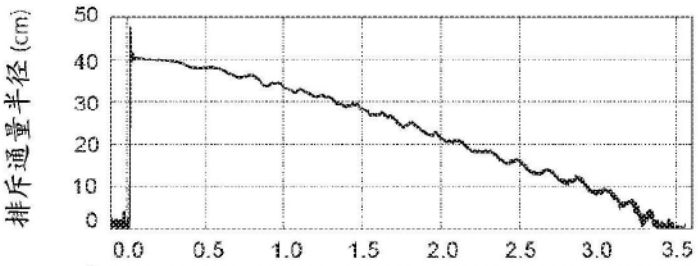


图 18B

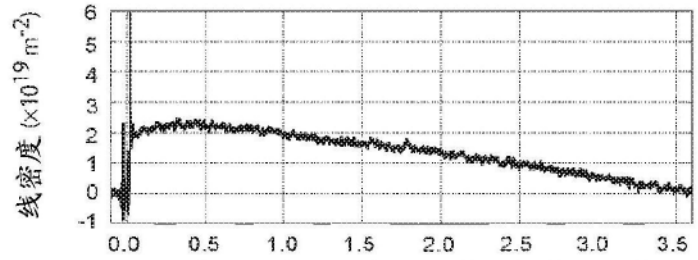


图 18C

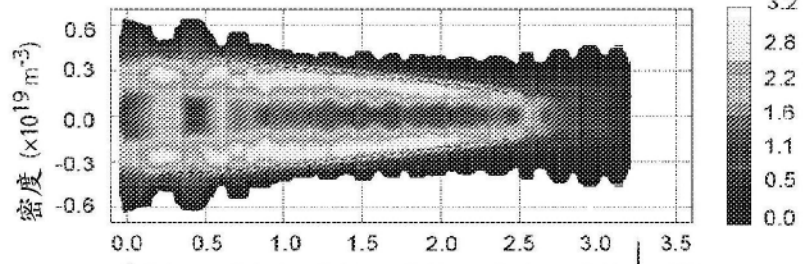
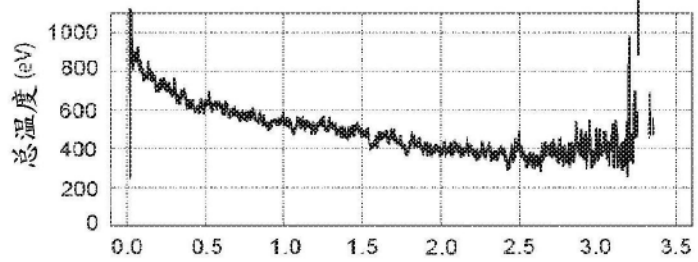


图 18D



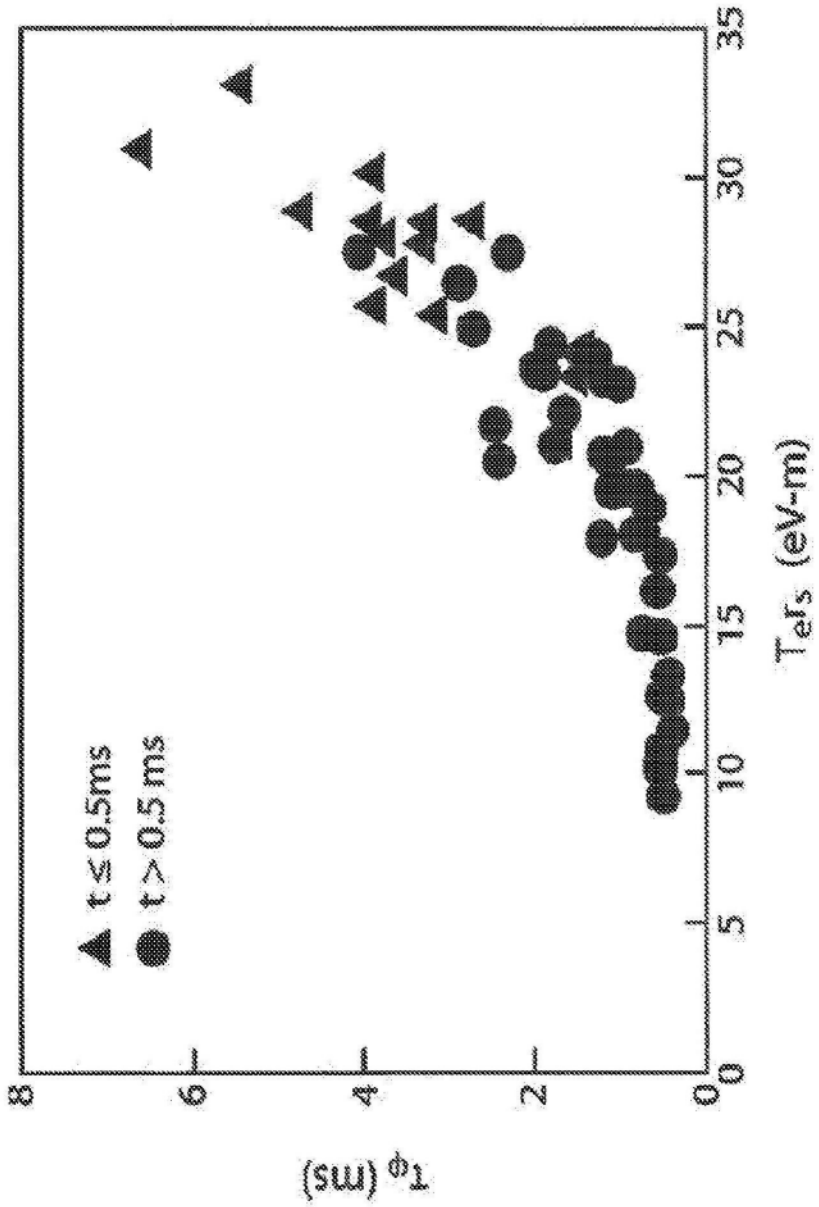


图19

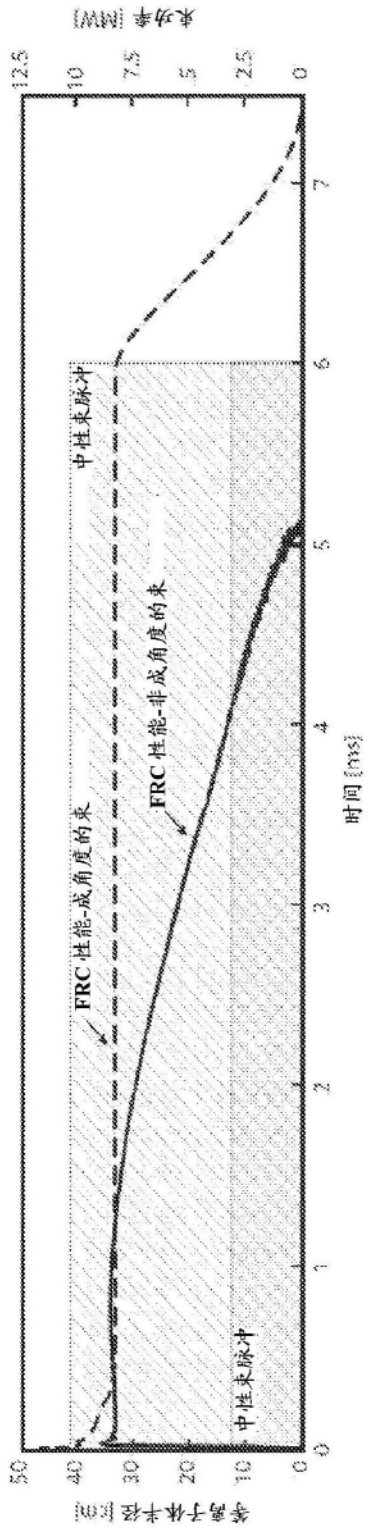

束功率 [MW]
12.5
10
7.5
5
2.5
0
中性束脉冲
FRC 性能-非成角度的束
FRC 性能-成角度的束
中性束脉冲
时间 [ms]
0
1
2
3
4
5
6
7
等离子体半径 [cm]
50
40
30
20
10
0

图20

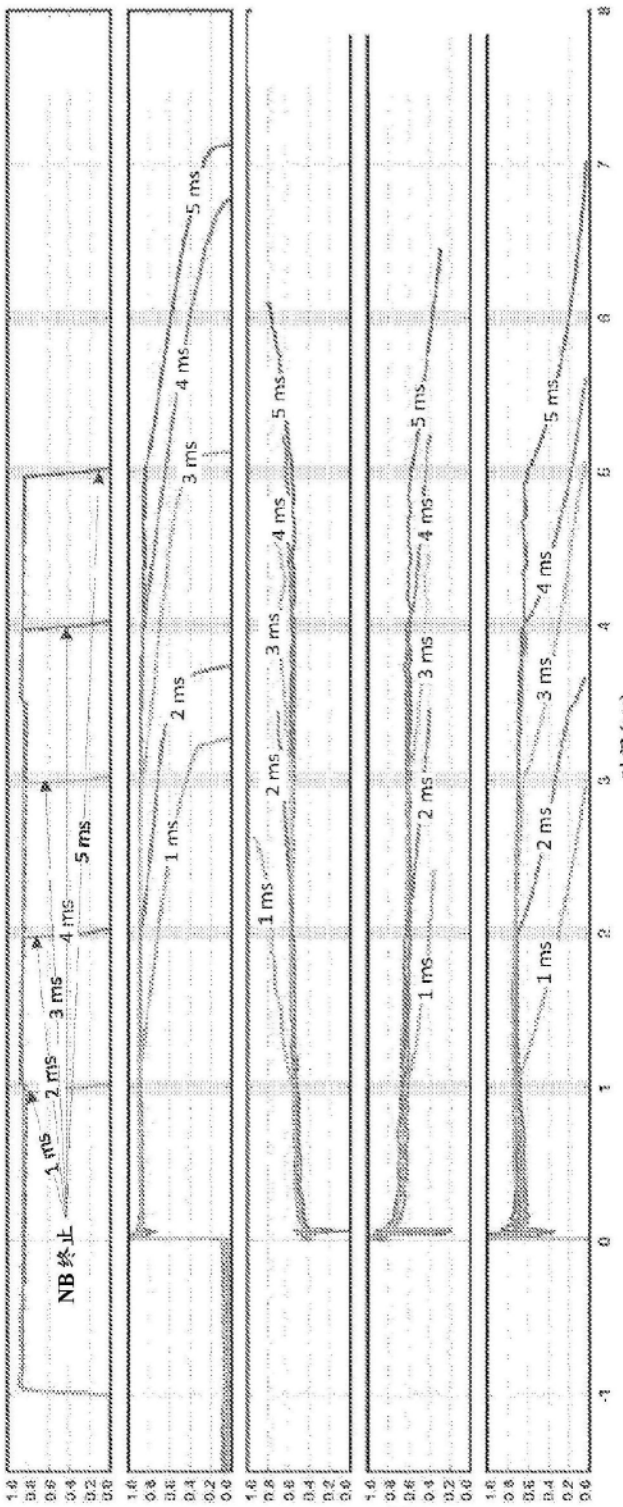


图 21A

图 21B

图 21C

图 21D

图 21E

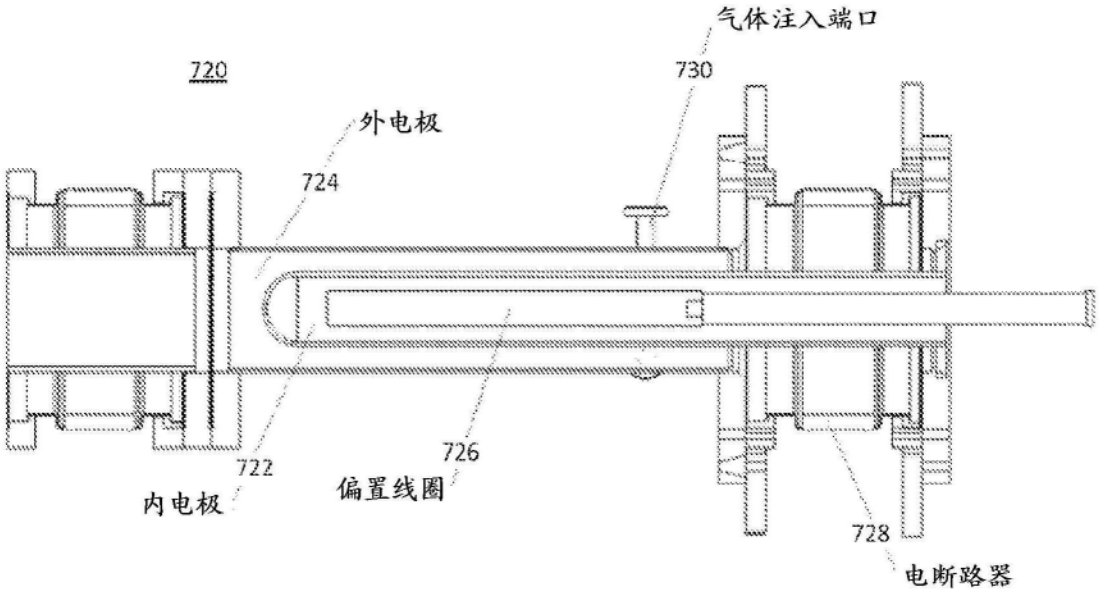

气体注入端口
720
730
外电极
724
722
726
内电极
偏置线圈
728
电断路器

图22A

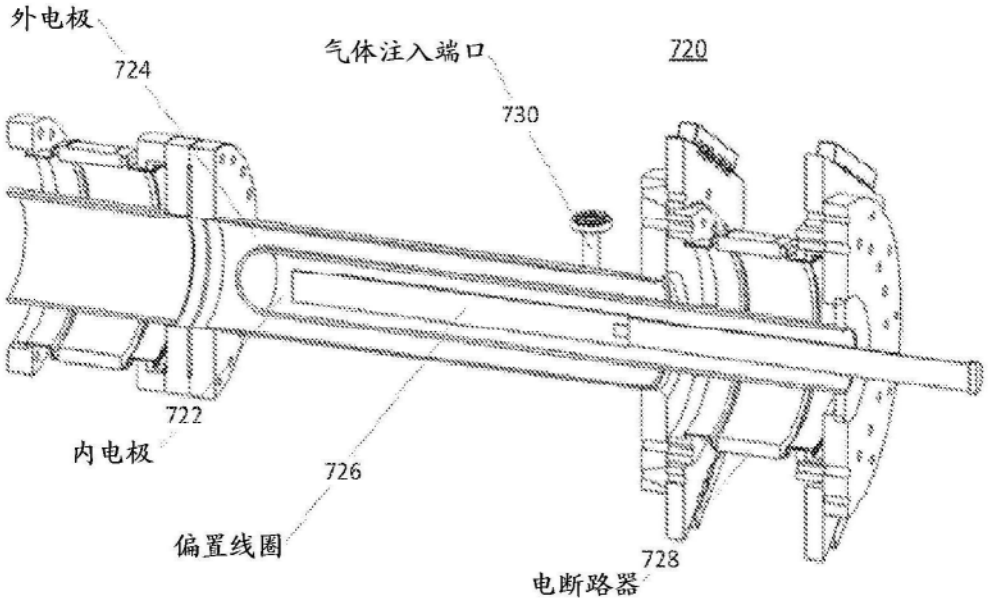

外电极
724
气体注入端口
720
730
722
内电极
726
偏置线圈
728
电断路器

图22B

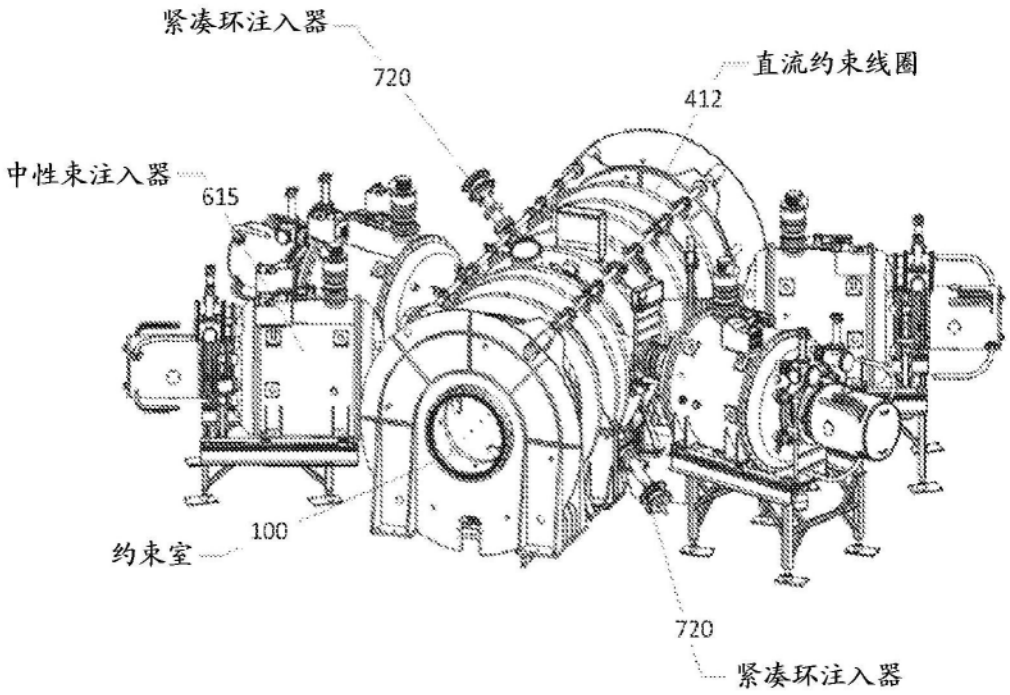

紧凑环注入器
720
直流约束线圈
412
中性束注入器
615
100
约束室
720
紧凑环注入器

图23A

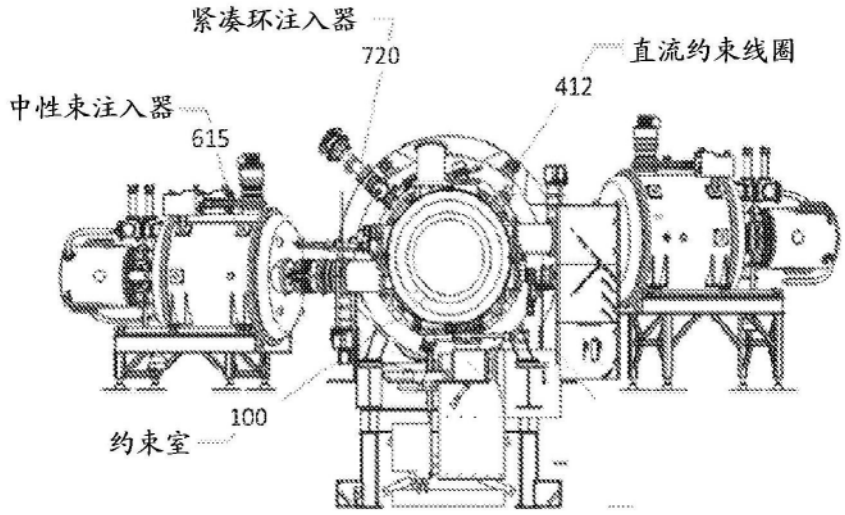

紧凑环注入器
720
直流约束线圈
412
中性束注入器
615
100
约束室

图23B

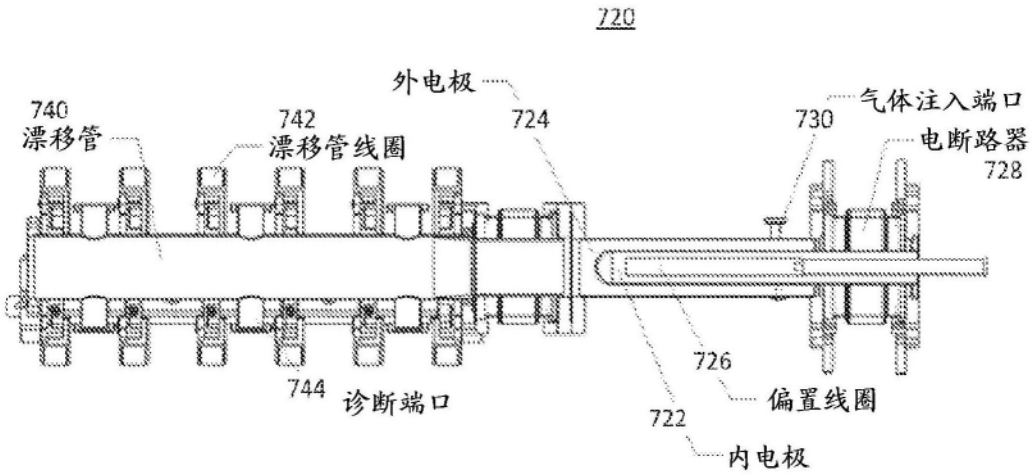

720
外电极
724
740
漂移管
742
漂移管线圈
730
气体注入端口
电断路器
728
726
偏置线圈
744
诊断端口
722
内电极

图24A

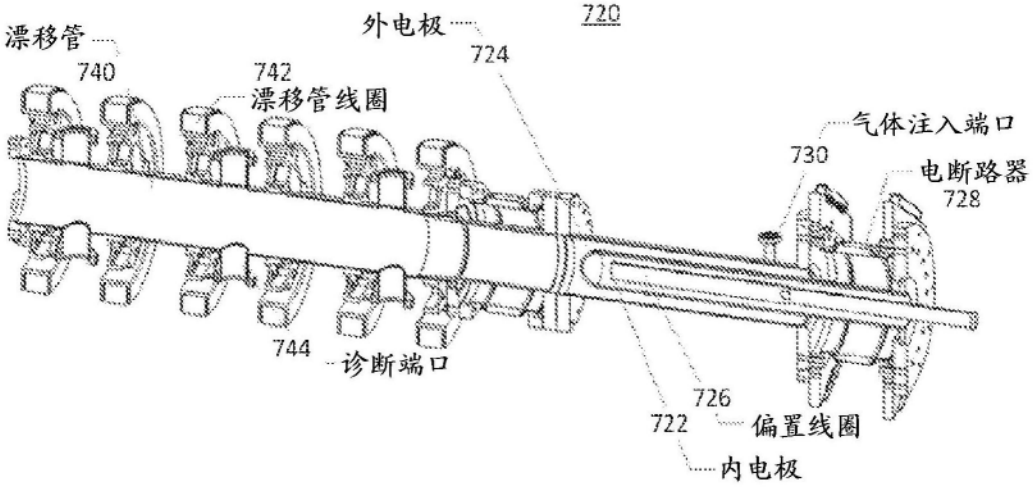

720
外电极
724
漂移管
740
742
漂移管线圈
730
气体注入端口
电断路器
728
744
诊断端口
726
722
偏置线圈
内电极

图24B

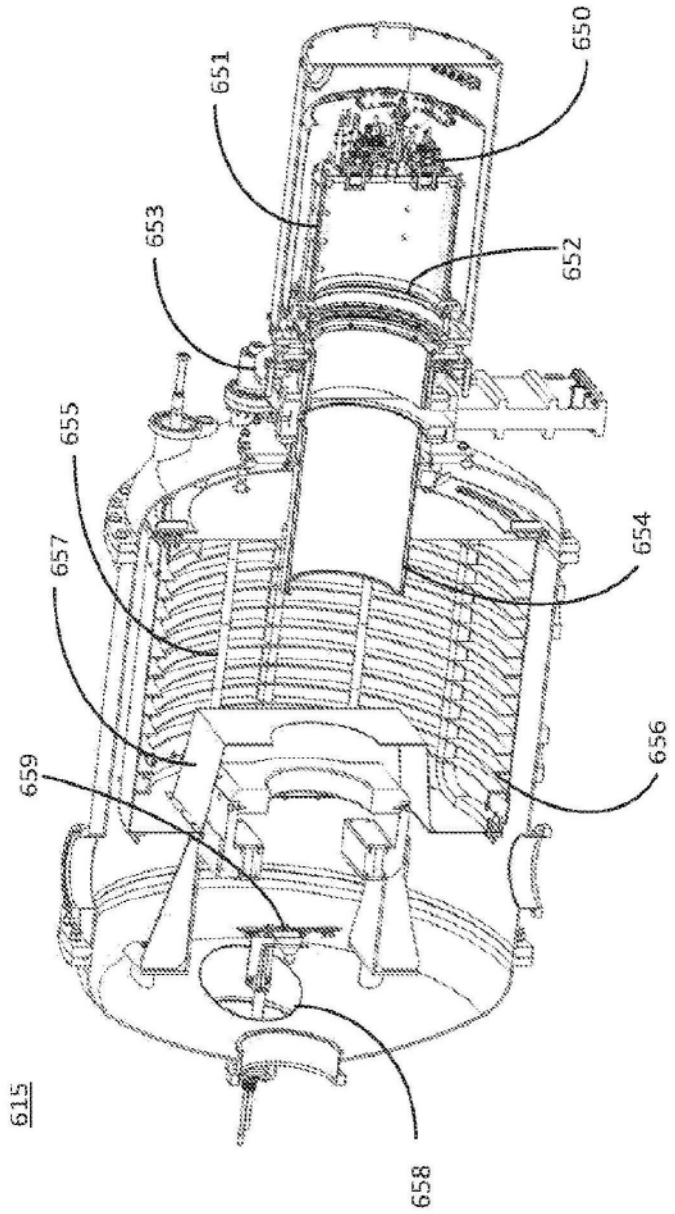


图25

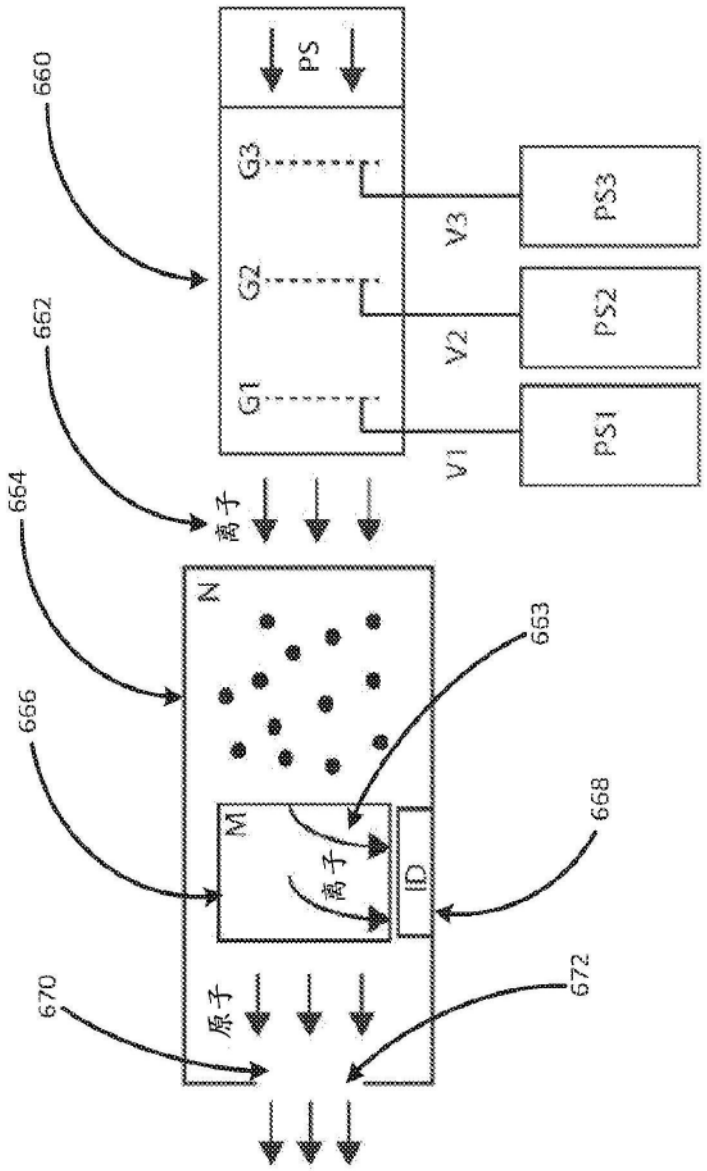

660
662
664
666
668
670
672
663
PS
G3
G2
G1
V3
V2
V1
PS3
PS2
PS1
离子
N
M
离子
ID
原子

图26

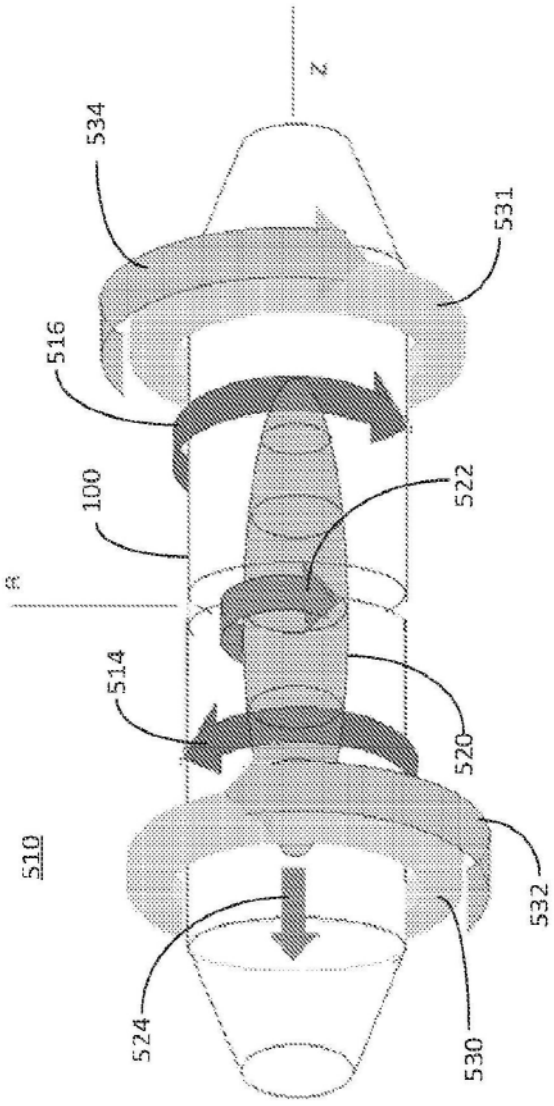


图27

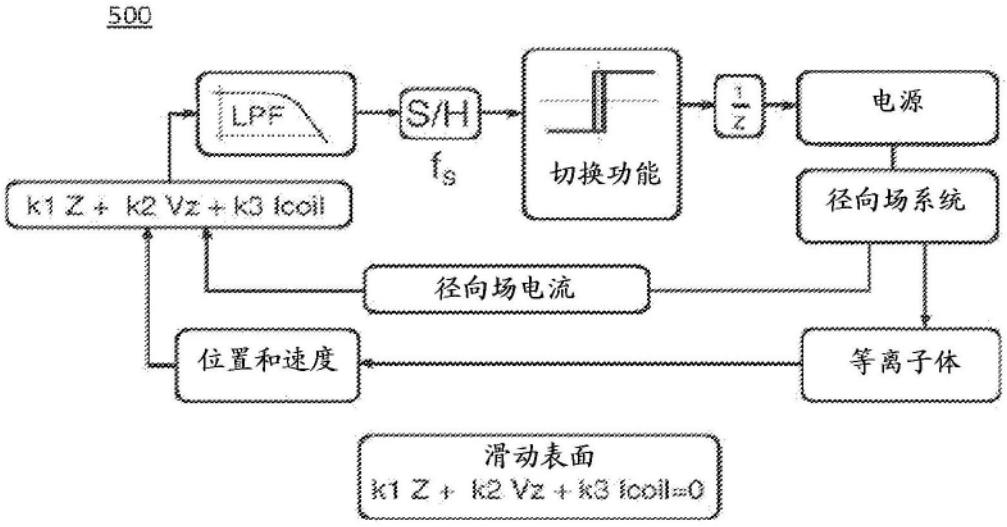

500
LPF
S/H
f_S
切换功能
$\frac{1}{z}$
电源
径向场系统
k1 Z + k2 Vz + k3 Icoil
径向场电流
位置和速度
等离子体
滑动表面
k1 Z + k2 Vz + k3 Icoil=0

图28

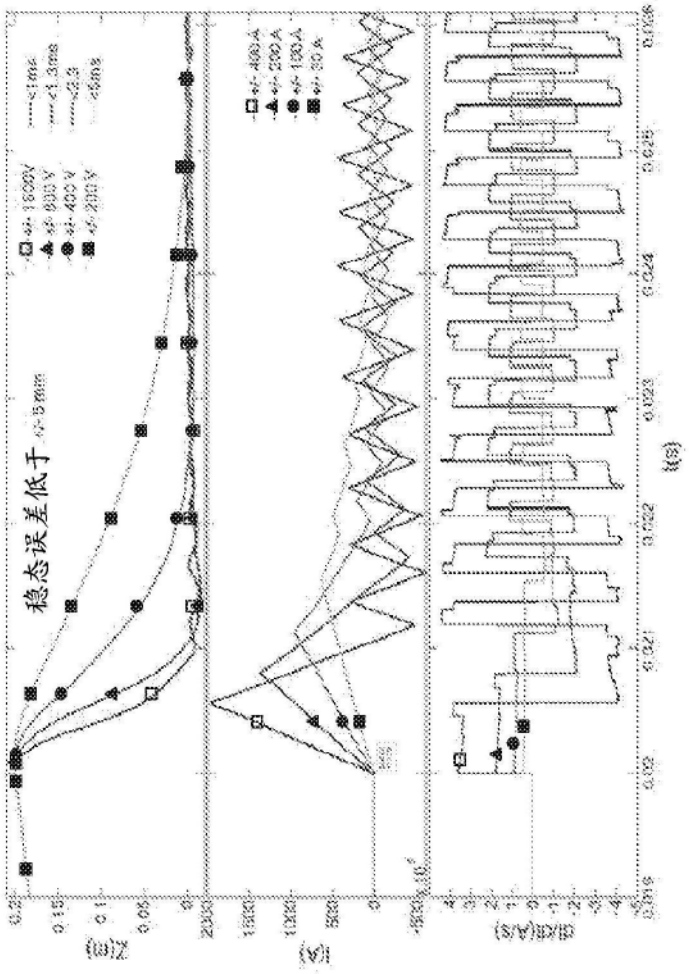

稳态误差低于
t(s)
Z(m)
I(A)
dI/dt(A/s)

图29

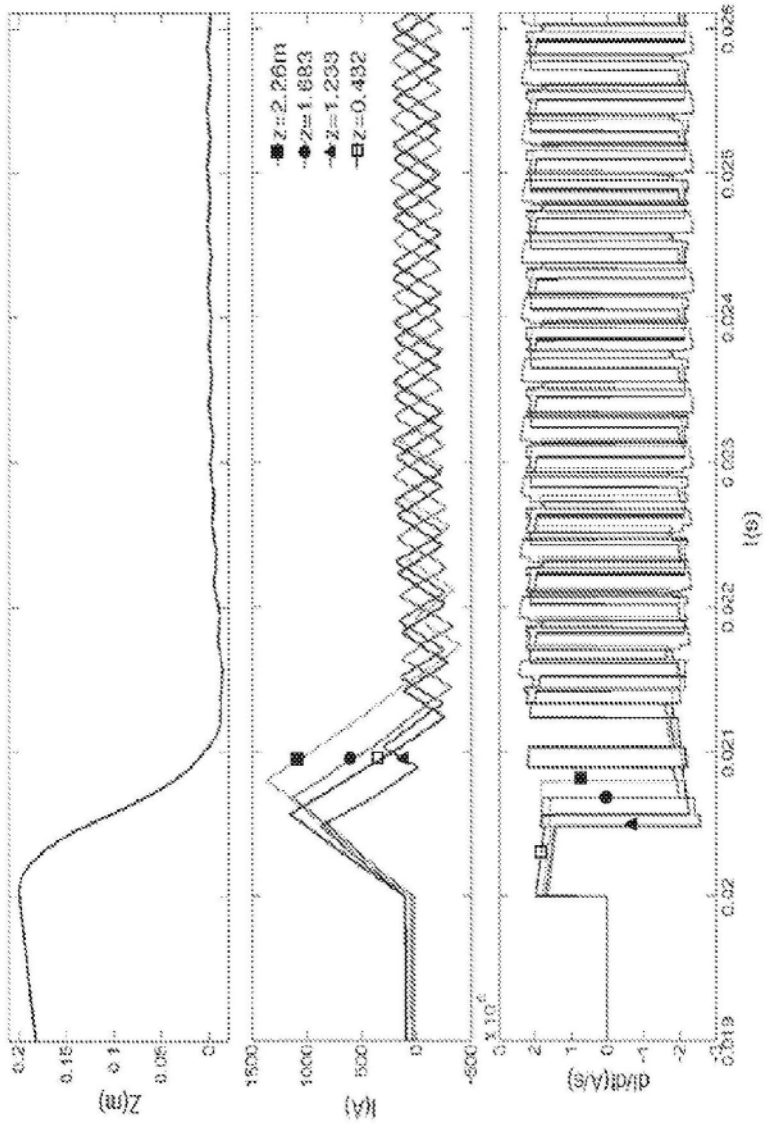


图30

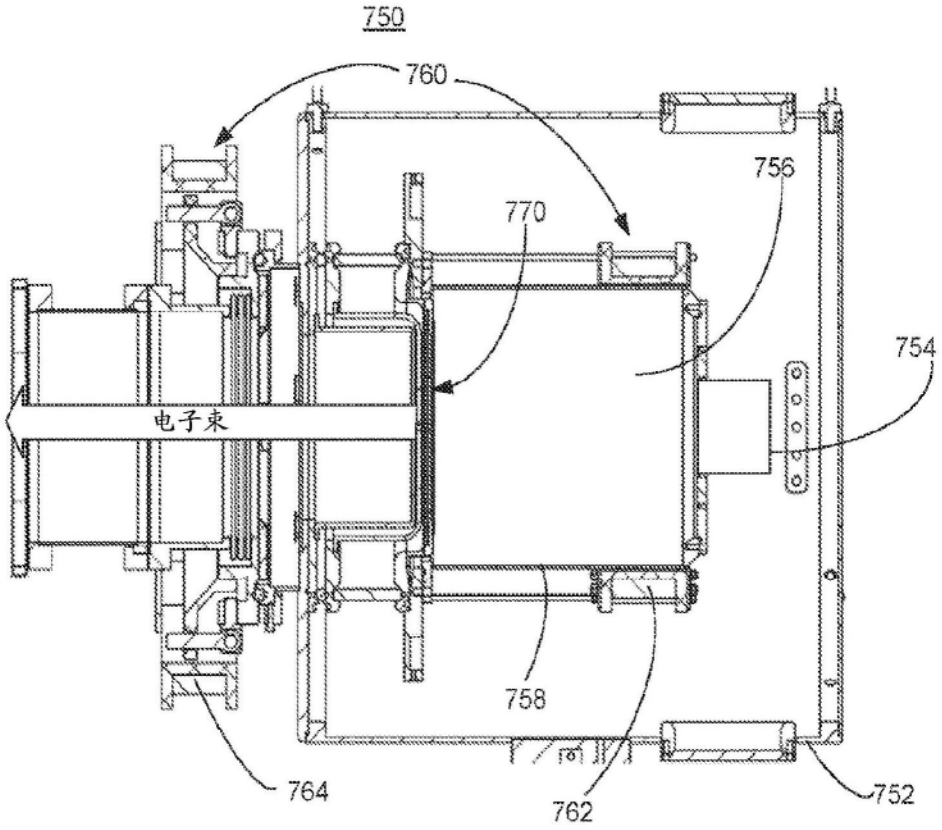

750
760
756
770
754
电子束
758
764
762
752

图31

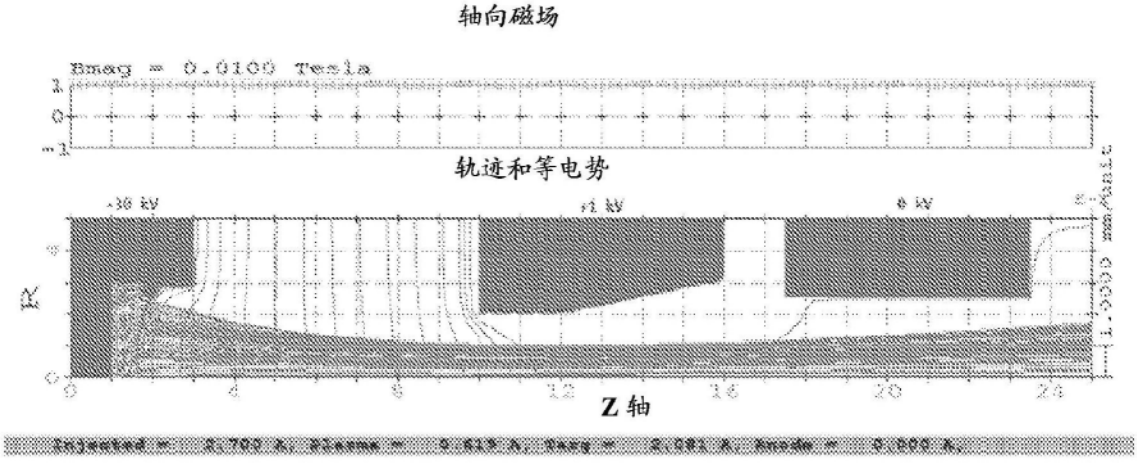

轴向磁场
Bmag = 0.0100 Tesla
轨迹和等电势
-36 kV
-1 kV
0 kV
R
Z 轴

图32

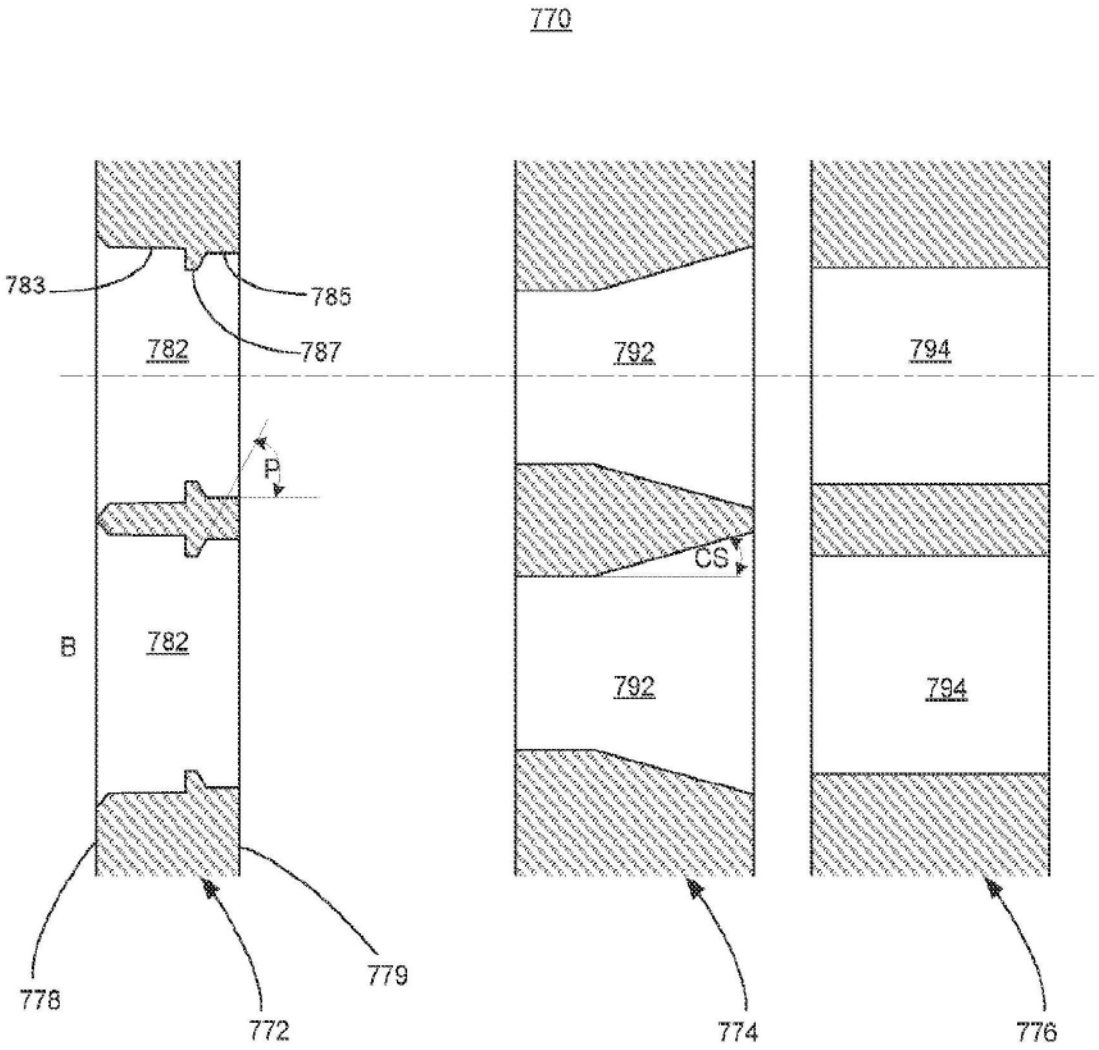


图33

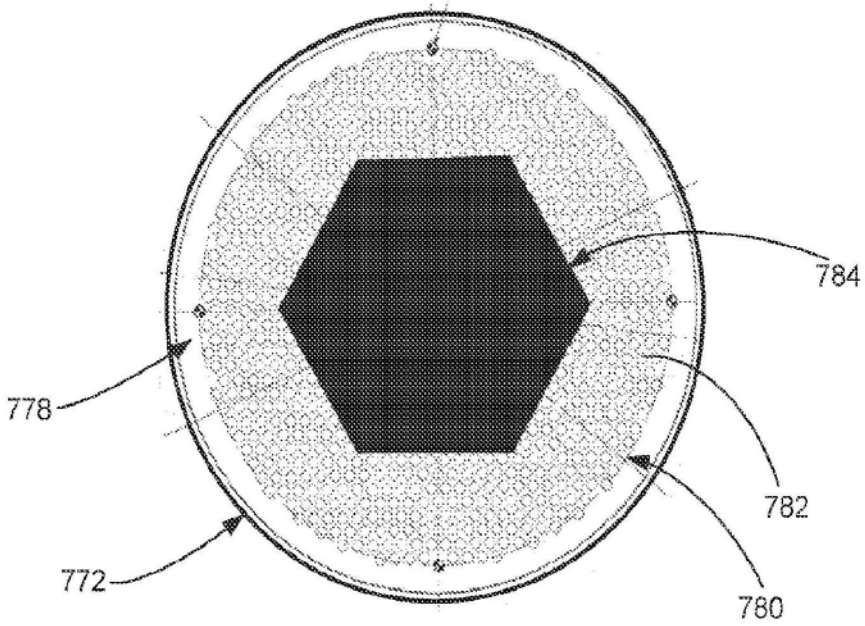


图35A

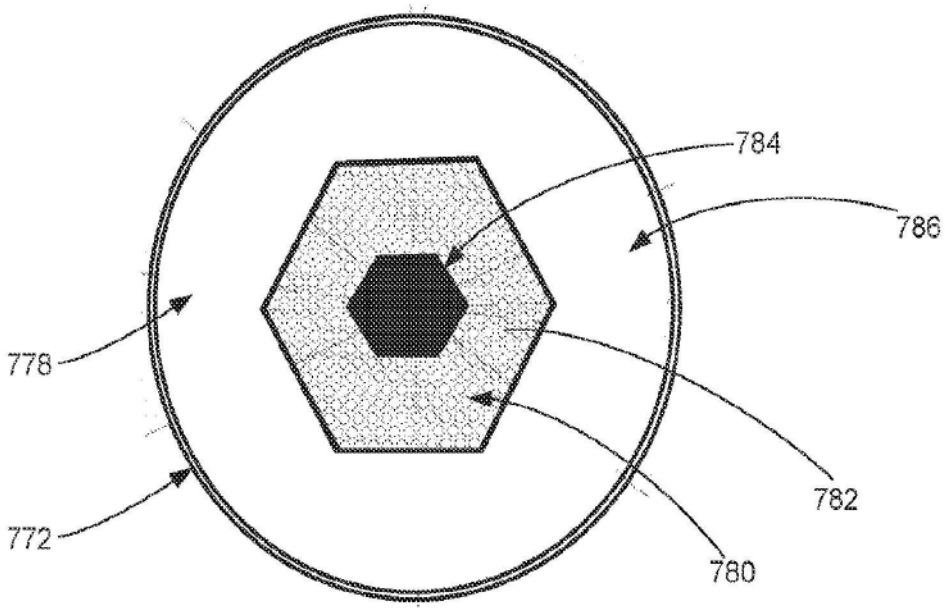


图35B

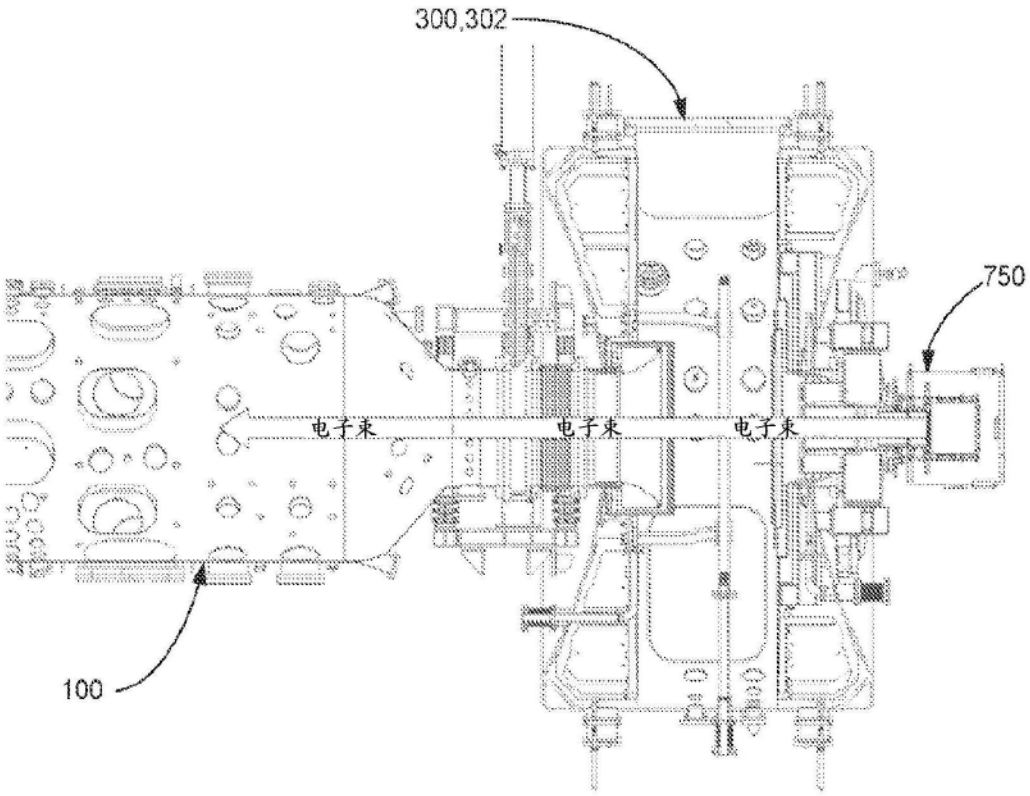

300,302
750
电子束
电子束
电子束
100

图35

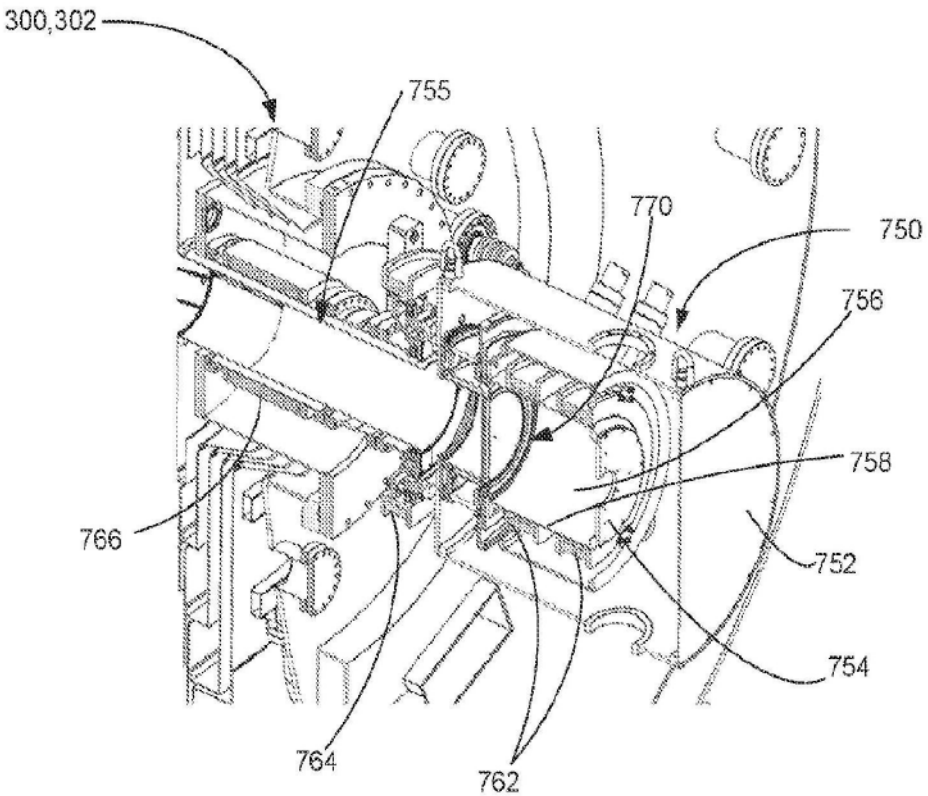

300,302
755
770
750
756
758
766
752
754
764
762

图36