(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105122419 B
(45)授权公告日 2017.08.01

(21)申请号 201480013604.8

(22)申请日 2014.03.17

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105122419 A

(43)申请公布日 2015.12.02

(30)优先权数据
61/793,327 2013.03.15 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.09.11

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2014/030535 2014.03.17

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2014/145726 EN 2014.09.18

(73)专利权人 星火工业有限公司
地址 美国伊利诺斯州尚佩恩市

(72)发明人 罗博特·S.·斯特博
丹尼尔·P.·门特
迈克尔·J.·思科斯
布瑞恩·E.·尤尔奇克

(74)专利代理机构 北京高文律师事务所 11359
代理人 徐江华

(51)Int.Cl.
H01J 33/00(2006.01)

审查员 赵芳

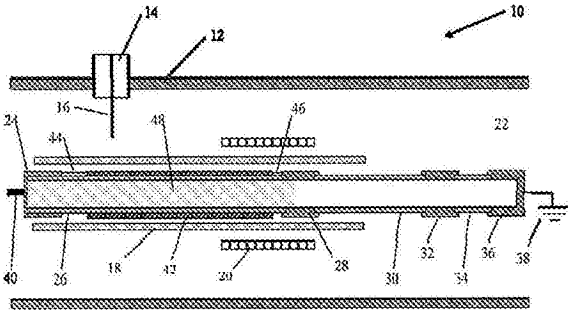
权利要求书2页 说明书8页 附图6页

(54)发明名称

用于在等离子体离子源腔室中产生等离子体离子源的装置和方法

(57)摘要

本文中描述用于将电磁(EM)能量从远程就位的初级天线耦合到等离子体离子源的系统和方法。EM能量由第一结构辐射通过中间的次级天线。本文描述的实施例能够相对于初级天线将等离子体离子源提升到高电势的偏置值,其中初级天线可保持在接地电势值或其接近值。



CN 105122419 B

1.一种用于生成等离子体离子源的设备，该设备包括：

等离子体离子源电介质，其具有限定等离子体离子源腔室的内表面；

次级天线，其位于所述等离子体离子源电介质的外表面之外，并被构造为将电磁(EM)辐射耦合到所述等离子体离子源腔室中的等离子体离子源中；和

初级天线，其与所述次级天线电隔离，并被构造为将电磁(EM)辐射传送到所述次级天线；

其中，所述等离子体离子源腔室、所述等离子体离子源电介质、所述次级天线相对于所述初级天线以正电势偏置。

2.如权利要求1所述的设备，进一步包括：

磁体组件，其位于所述等离子体离子源电介质的外表面之外；

其中，所述次级天线的一部分位于所述等离子体离子源电介质的所述外表面与所述磁体组件之间。

3.如权利要求1所述的设备，进一步包括：

导电外包壳，其封装所述等离子体离子源电介质和所述次级天线。

4.如权利要求3所述的设备，其中，

所述导电外包壳用作所述设备的电势接地部。

5.如权利要求3所述的设备，其中，

所述初级天线电连接到所述导电外包壳。

6.如权利要求2所述的设备，进一步包括：

阳极电极，其电连接到所述等离子体离子源电介质；和

束流电极(beam stop electrode)，其电连接到所述等离子体离子源电介质。

7.如权利要求6所述的设备，其中，

所述束流电极被构造以提升所述等离子体离子源电介质的电势和所述等离子体离子源腔室的电势。

8.如权利要求7所述的设备，进一步包括：

连接体，其电连接到所述束流电极，被构造以提升所述束流电极的电势。

9.如权利要求6所述的设备，其中，

所述磁体组件沿所述设备的纵向轴线位于所述阳极电极的邻近处；

其中，所述纵向轴线延伸穿过所述阳极电极和所述束流电极。

10.如权利要求9所述的设备，其中，

所述次级天线的所述一部分位于所述等离子体离子源电介质的所述外表面，所述磁体组件沿所述纵向轴线位于所述阳极电极的邻近处。

11.如权利要求9所述的设备，其中，

所述次级天线的第二部分沿所述纵向轴线延伸而超过所述磁体组件沿所述纵向轴线的延伸程度。

12.如权利要求3所述的设备，其中，

由所述导电外包壳的内表面界定的腔以电介质填充。

13.如权利要求1所述的设备，其中，

所述次级天线通过由电容耦合、电感耦合、共振耦合构成的组中的一种而被耦合到所

述初级天线。

14.如权利要求13所述的设备，其中，

所述次级天线通过共振耦合而耦合到所述初级天线；

其中，所述初级天线和所述次级天线被构造以呈现固有共振频率，所述固有共振频率匹配于由外部电磁源产生的电磁辐射的频率。

15.如权利要求1所述的设备，其中，

所述次级天线被构造以通过由电容耦合、电感耦合、共振耦合构成的组中的一种而将电磁能量耦合到所述等离子体离子源腔室中。

16.如权利要求15所述的设备，其中，

所述共振耦合包括由电子回旋加速器共振(ECR)、离子回旋加速器共振(ICR)、螺旋波、高混杂构成的组中的一种。

17.如权利要求1所述的设备，其中，

所述等离子体离子源腔室、所述等离子体离子源电介质、所述次级天线相对于接地处被提升到+20kV至+1MV的电势。

18.一种用于生成等离子体离子源的方法，该方法包括：

由初级天线辐射电磁(EM)能量；

将由所述初级天线辐射的电磁能量耦合到次级天线；

由所述次级天线辐射电磁能量；

通过设置在所述次级天线与一等离子体之间的等离子体离子源电介质，将由所述次级天线辐射的电磁能量耦合到所述等离子体中；和

在所述初级天线与由等离子体离子源电介质限定的等离子体离子源腔室、所述等离子体离子源电介质、和所述次级天线中的每个构件之间保持电势差。

19.如权利要求18所述的方法，进一步包括：

通过由位于所述等离子体离子源电介质的外表面之外的磁体组件所生成的磁场限制所述等离子体。

用于在等离子体离子源腔室中产生等离子体离子源的装置和方法

[0001] 对相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求对2013年3月15日提交的、名称为“紧凑式高电压等离子体源”的美国临时专利申请No.61/793,327的优先权，所述美国临时专利申请的内容(包括其中包含的任何参考文献的内容和教示)通过整体引用被明确包括在本文中。

技术领域

[0003] 本发明涉及紧凑式等离子体源，且更具体地涉及可通过初级天线和次级天线的组合将电磁能量耦合其中的紧凑式等离子体源。

背景技术

[0004] 基于中子发生器的加速器具有广泛的多种应用，包括医药、安全和油气勘探。基于中子发生器的加速器提取在离子源产生的离子，并通过加速器管将其朝向标靶加速，在标靶处的撞击产生聚变反应以产生中子。一些基于中子发生器的加速器利用射频(RF)驱动的等离子体离子源。一些这样的RF驱动的等离子体源依靠将通过RF天线产生的RF能量耦合到等离子体源中以驱动等离子体的产生。

发明内容

[0005] 在此描述一种设备，用于在真空腔中生成等离子体离子源，该设备包括：

[0006] 等离子体离子源电介质(dielectric)，其被构造以封装所述真空腔；

[0007] 次级天线，其位于所述等离子体离子源电介质的外表面之外，并被构造为将电磁(EM)辐射耦合到所述真空腔中的等离子体离子源中；和

[0008] 初级天线，其与所述次级天线电隔离，并被构造为将电磁(EM)辐射传送到所述次级天线；

[0009] 其中，所述等离子体离子源腔室、所述等离子体离子源电介质、所述次级天线相对于所述初级天线以正电势偏置。

[0010] 在此描述一种方法，用于生成等离子体离子源，该方法包括：

[0011] 由初级天线辐射电磁(EM)能量；

[0012] 将由所述初级天线辐射的电磁能量耦合到次级天线；

[0013] 由所述次级天线辐射电磁能量；

[0014] 通过设置在所述次级天线与一等离子体之间的等离子体离子源电介质，将由所述次级天线辐射的电磁能量耦合到所述等离子体中；和

[0015] 在所述初级天线与所述等离子体离子源腔室、所述等离子体离子源电介质、和所述次级天线中的每个之间保持电势差。

附图说明

[0016] 本发明将在下文中基于示例性附图进行更详细的描述。本发明不限于示例性实施例。在此描述和/或例示的所有特征可单独使用，或者可按照不同实施例的不同组合而结合使用。通过阅读以下参照附图进行的详细描述，各种实施例的特征和优点将变得明显，附图中例示如下：

[0017] 图1图示出根据本发明实施例的等离子体离子源中子发生器，其采用初级共振器和次级共振器的组合将电磁能量耦合到等离子体中；

[0018] 图2图示出根据本发明实施例的次级天线构造，用于通过共振耦合将电磁能量耦合到等离子体离子源中；

[0019] 图3图示出根据本发明实施例的次级天线构造，用于通过电容耦合将电磁能量耦合到等离子体离子源中；

[0020] 图4图示出根据本发明实施例的次级天线构造，用于通过电感耦合将电磁能量耦合到等离子体离子源中；

[0021] 图5图示出根据本发明实施例的用于生成等离子体离子源的设备，其包括初级天线，初级天线被构造为通过电感耦合将电磁能量耦合到次级天线；和

[0022] 图6图示出根据本发明实施例的初级天线构造，用于通过电容耦合将电磁能量耦合到次级天线。

具体实施方式

[0023] 可能难以有效地将电磁能量、例如射频(RF)能量耦合到紧凑式等离子体源的限定几何形状中。有效的RF能量耦合常常需要RF天线位于等离子体源的紧邻处。典型地，紧凑式RF驱动的等离子体源利用直接耦合到和安装到等离子体源腔的单一的EM共振器(例如RF天线)。

[0024] 为了从等离子体源提取离子束(例如用于中子发生器应用)，具有充分离子加速量级的电势梯度必须在等离子体源与标靶之间形成和保持。许多中子发生器通过使EM共振器和等离子体源保持在接地电势并向标靶供应极低电压电势而形成适合于离子加速的电势梯度。能够提供必要电隔绝水平以使标靶保持在足够低电压的包壳对于标靶热管控(例如冷却)、对于标靶与被分析对象之间的距离、对于标靶与分析探测器之间的距离施加限制。因此，利用这样的发生器实施各种探测方案和应用受到限制。另外，这种方式要求机载高电压动力供应器位于标靶近处，由此进一步限制这种发生器的使用。不过，通过使等离子体源保持在接地电势，这样的构造不需要电隔绝EM共振器和其它电子部件，也不用与使用能够在大量级电压下操作的专用电子部件相关联的更多费用。

[0025] 可替代的方式是：使等离子体离子源电浮(electrically float)(和电隔离)高至发生器在大电介质包壳中施加的电压以实现接地标靶。为在高电压(例如大于50kV)下产生高质量的等离子体，必须将极大量的RF能量供应到大腔中，或者，用于驱动等离子体的RF发生器必须也提升到高电压。第一种选择对许多应用而言是无效的和禁用的，而后一种选择导致非常笨重和昂贵的系统，这是因为整个系统必须封闭在电介质中并隔离。

[0026] Thermo Fisher MF Physics销售D711高输出中子发生器，其具有的离子源电浮高至发生器在大电介质包壳中施加的电压以实现接地标靶，用于将中子源安置在应用紧邻处。不过，为了实现此目标，需要1000kg的包壳，以SF_6气体加压，直径24英寸。

[0027] Starfire Industries在美国专利申请公开物No.201 1/0044418中所公开的方法和设备中，使用中间电介质将RF或微波能量耦合到等离子体源中，其中，等离子体源相对于中子生成标靶被提升到正电势，所述电介质对于电磁能量是透明的且同时提供充分隔绝以防止出现故障或与电磁能量源电接触。这种方法允许永磁体提供适合于等离子体形成和提取的磁场。

[0028] 限制等离子体源在高电压下操作的另一因素是：需要包围和限制等离子体源的磁场以利于等离子体生成和维持。磁体不仅占据空间，而且其常常必须安置在等离子体生成区域的近处以有效地起作用。由于磁体典型地是对高电压隔绝和RF传播构成干扰的导体，因而要求其位于等离子体源腔的近处，对于将RF能量耦合到等离子体中存在又一障碍。

[0029] 一些应用，例如钻井(wellbore)勘探，要求具有极小直径的中子发生器。不过，现有技术的尺寸足够小的中子发生器面临多种限制。这样的限制包括：减小的原子分数(除非可增加动力以进行补偿)，降低的中子产生效率，和由于增加输出动力以补偿效率损失所导致的加热。在等离子体与标靶之间实现足够的电势间隔要求天线与等离子体之间的空间分离程度更大，这降低了耦合效率。

[0030] 示例性实例设想出各种系统和方法，其中使用次级电磁(EM)天线，包括射频(RF)和微波天线，以将由远程就位初级天线发射的EM能量耦合到紧凑式等离子体离子源。这种方法和系统的应用包括：用于中子发生器的紧凑式高电压等离子体源。其它应用包括但不限于：用于空间推进的等离子体推进器、离子束辅助沉积和蚀刻源，和大气压放电(atmospheric pressure discharge)等离子体。这样的系统和方法还能够形成紧凑式中子发生器，其具有更小尺寸和改进的耦合到等离子体中的电磁动力。特别地，这样的系统和方法能够实现电磁动力耦合，其中，等离子体被偏置到更高电压，诸如磁体之类的导电结构位于初级天线与等离子体离子源之间。

[0031] 示例性实例设想：将次级天线安置到限制等离子体源的电介质材料的表面上或其近处，由此能够使远程供应的EM能量耦合到等离子体源中，以积聚足够能量来生成或维持等离子体。在各种实施方案中，结果形成的等离子体源可为脉冲的或稳态的。

[0032] 这样的次级天线能够将等离子体源提升至高电压，同时使电磁发生器、初级天线、和其它电子部件保持在接地电势值或其接近值。能够实现电磁发生器、初级天线、和其它电子部件保持在接地电势值或其接近值，不需要电隔绝这样的部件，由此允许构建更小尺寸的发生器。另外，这样的构造不需要采用能够在高电势下操作的专用电子部件，而是允许使用较便宜的现货电子部件。另外，通过允许等离子体源提升至高电势，次级天线能够使标靶同时保持在接地电势值或其接近值。标靶保持在接近接地电势值，不需要将标靶封闭在电绝缘体内，由此能够使标靶在更接近于被检测或被探测对象处定位。标靶在更接近被检测对象处定位，允许最大通量区域(即，标靶)根据期望而相对于其它对象定位。另外，接地的标靶可容易地与其它部件热集成，以允许直接传导和对流。因此，保持在接近接地电势值的标靶能够比相对于接地值降低到极低电势值的标靶更容易地冷却。

[0033] 在各种实施例中，标靶却相对于接地值被偏置到负电势值以增强离子加速。当负偏置的标靶与正偏置的等离子体离子源结合使用时，两个较小的动力供应器可产生与一个大型动力供应器相同的电势差。采用两个动力供应器允许减小小直径应用的尺寸(相对于采用单个大型动力供应器而言)和产生更高的加速电势用于更多聚变反应。

[0034] 在一些实施例中采用的次级天线还能够使初级天线(或EM馈送)与等离子体源在空间上和在通电上(galvanically)解除耦合。因此,采用次级天线对于EM能量传输提供了更大程度的控制。另外,次级天线能够将远程供应EM能量传送到单个初级天线无法到达的区域中。特别地,次级天线可至少部分地位于将会对初级天线所产生EM场造成显著削弱的导电结构之内或之下。次级天线因而能够增大在磁结构与等离子体源之间区域中的EM场的强度,由此避免(circumvent)位于初级天线与等离子体源之间的磁结构将会对初级天线所生成EM场的削弱影响。

[0035] 本发明能够实现的中子发生器的紧凑尺寸对在尺寸、重量和动力上(SWaP)受限制的应用而言是理想的。这样的应用包括测井和货物检查,其中希望中子发生器具有小于2英寸的直径和低于20千克的重量。另外,本发明的特定实施例能够产生快速的等离子体上升下降时间(例如小于5微秒)。快速的上升下降时间、特别是下降时间是因为:通过使用次级天线能够在等离子体区域中实现小几何形状和高动力密度(上升时间和低抖动)。本发明的示例性实例以极快的上升下降时间(例如小于5微秒)在小的几何形状因子内(例如小于半英寸)实现高电流等离子体脉冲(例如大于10mA)

[0036] 以下部分详细描述采用次级天线耦合方案将电磁能量从远程就位初级天线耦合到被提升至高电压的紧凑式等离子体离子源中的多个实施例。在以下部分中描述的附图是示例性的实施例,而不是暗示对本发明的可替代实施例的部件和构造存在任何限制。

[0037] 图1图示出一种中子发生器,采用初级天线和次级天线的组合将电磁能量耦合到等离子体离子源中。中子发生器10包括:导电外包壳12,馈通件(feedthrough)14,和初级天线16。导电外包壳12用作系统的电接地处38。初级天线16通过馈通件14紧固到外包壳12。电介质22填充导电外包壳12的内表面与中子发生器10其余部件之间的空间。电介质22可以是但不限于SF6、油、Fluorinert、或塑料中的任意一种。

[0038] 中子发生器10进一步包括:等离子体离子源电介质26,等离子体离子源腔室48,次级天线42,阳极电极28,束流电极(beam stop electrode)24,连接体40,电连接部44、46。等离子体离子源电介质26的内表面限定等离子体离子源腔室48,在等离子体离子源腔室48中可形成等离子体离子源。束流电极24和阳极电极28沿中子发生器10的纵向轴线位于等离子体离子源腔室48的相反端处。束流电极24和阳极电极28中的每种或两种均可被构造以提升等离子体离子源电介质26(以及等离子体离子源腔室48)的电势。连接体40被构造将高电压馈送到束流电极24(即,提升束流电极24的电势)。

[0039] 次级天线42位于等离子体离子源电介质26的外表面之外,处于束流电极24与阳极电极28之间。次级天线42沿中子发生器10的纵向轴线位于等离子体离子源电介质26的外表面的近处,并沿中子发生器10的横向轴线封装(encapsulate)等离子体离子源电介质26。在各种实施方案中,次级天线42可具有从包括但不限于以下形状的组中选择的任何形状:线圈、条带,槽线(slot line)、螺旋、板、桨(paddle)、管。

[0040] 中子发生器10进一步包括:磁体组件20。本发明的各种实施例设想进一步包括:电介质套18。磁体组件20沿中子发生器10的横向轴线位于导电外包壳12的内表面与等离子体离子源电介质26的外表面之间。磁体组件20沿中子发生器10的纵向轴线的一部分位于次级天线42的近处。对于磁体组件20在次级天线42近处定位所沿的中子发生器10的纵向轴线的所述一部分,磁体组件20位于导电外包壳12的内表面与次级天线42之间。因此,在中子发生

器之外所见的透视图中，次级天线42的一部分在磁体组件20之下延伸。次级天线42的位于等离子体离子源电介质26与磁体组件20之间的该部分能够使EM能量耦合到等离子体离子源的以磁体组件截断由初级天线16所产生EM辐射的路径的区域中。

[0041] 磁体组件20被构造以提供高磁通密度区域以防止等离子体向等离子体离子源腔室48内表面的径向和轴向损失。另外，磁体组件20可被构造以产生适合在等离子体离子源腔室48内对于特定频率的EM能量进行共振波吸收的磁场区域。等离子体离子源腔室48可为直径小于1英寸的圆柱形管，磁体组件20沿等离子体离子源腔室的纵向轴线覆盖等离子体离子源腔室的长度的一半。设置磁体组件20可显著阻止电磁波从外部天线传播到等离子体离子源腔室48中。通过使次级天线42的一部分位于磁体组件20与等离子体离子源电介质26之间，次级天线42可从初级天线吸收EM能量并将EM能量再次直接辐射到等离子体离子源腔室48中。使用次级天线由此能够使等离子体离子源腔室的尺寸减小，同时保持等离子体离子源偏置到高正电压的能力。

[0042] 在图1中所示实施例中，可选的电介质套18沿中子发生器10的纵向轴线位于次级天线42的近处，并沿中子发生器10的横向轴线位于磁体20与次级天线42之间。可选的电介质套18在接地的导电外包壳12与中子发生器10内部中的正偏置的部件(例如，等离子体离子源腔室48以及其中包含的任意等离子体)之间提供额外的电势差异(standoff)。

[0043] 在中子发生器10中还包括：高电压绝缘体电介质30，电子抑制电极32，遮蔽绝缘体34，和标靶36。高电压绝缘电介质30能够保持在阳极28与抑制体32和标靶36之间形成的加速电场，该加速电场将从等离子体离子源提取的离子经过电子抑制电极32朝向标靶36引导。遮蔽绝缘体34将电子抑制电极32与标靶36分离，由此能够使标靶的电势保持在接地电势值或其接近值。在一些实施方案中，标靶36电连接到接地处38。

[0044] 在操作过程中，初级天线16通过来自保持在接地电势值或其接近值的外部EM能量源(未示出)的EM能量充能。EM能量从初级天线通过电介质22(在包括电介质套18的实施例中还通过电介质套18)耦合到次级天线。次级天线42将从初级天线16接收的EM能量耦合到等离子体离子源腔室48中以维持其中的任何等离子体。初级天线16可通过电容(电)耦合、电感(磁)耦合、或者共振(电和磁)耦合中的任意方式将EM能量耦合到次级天线42。次级天线42于是可以通过电容、电感或者共振耦合中的任意方式将EM能量耦合或传送到等离子体离子源腔室48中的等离子体。在次级天线42与等离子体离子源腔室48之间的共振耦合可包括：电子回旋加速器共振(ECR)、离子回旋加速器共振(ICR)、和和螺旋波、高混杂(upper hybrid)以及其它等离子体波相互作用。次级天线和传送线可起作用以改进每种耦合方法。初级天线16共振耦合到次级天线42可涉及利用初级天线16、次级天线42、或二者的固有电磁频率。初级天线到次级天线的耦合机制与次级天线到等离子体的耦合机制不需要相同。本发明的各种实施例采用初级天线到次级天线的耦合机制和次级天线到等离子体的耦合机制的各种组合。

[0045] 在图1中所示的实施例中，初级天线16共振耦合到次级天线42。在各种实施例中，导电外包壳12可被构造为与初级天线16共振。初级天线16和次级天线42可被构造为具有与外部EM能量源所发射的EM能量的频率接近的固有电磁频率，以促进各元件之间的有效能量耦合。在图1中所示实施例中，次级天线42通过电子回旋加速器共振(ECR)而共振耦合到等离子体48。ECR可通过以下方式实现：产生磁通密度(通过磁体组件20)，使得等离子体的一

部分中的电子具有与外部EM能量源所发射EM能量的频率相匹配的频率。

[0046] 图2图示出次级天线组件，用于将电磁能量通过共振耦合而耦合到等离子体离子源中。图2中所示的次级天线组件50包括：次级天线结构52，电连接部54、56，等离子体离子源电介质58，束流电极60，阳极电极62，离子加速区域的一部分64。图2中所示的特定元件对应于图1中所示元件。例如，次级天线结构52对应于次级天线42，电连接部54、56对应于电连接部44、46，等离子体离子源电介质58对应于等离子体离子源电介质26，束流电极60对应于束流电极24，阳极电极62对应于阳极电极28。

[0047] 在图2中所示的实施例中，次级天线结构52围绕等离子体离子源电介质58。次级天线结构52在各种实施例中可为：槽线天线，慢波天线、Lisitano线圈、或各种其它天线结构。在操作过程中，来自初级天线(未示出)的电磁能量被次级天线结构52接收，能量作为电流积聚。为了使初级天线与次级天线结构52之间的共振耦合最大化，次级天线的共振电磁频率应被调整以匹配于或至少近似于由初级天线所供应的电磁能量的频率。例如，在次级天线结构52是槽线天线的实施例中，应选择槽线的长度约等于由初级天线供应的电磁能量的波长的一半。

[0048] 电连接部54、56可用于将高电压供应到束流电极60和阳极电极62(即，升高束流电极60和阳极电极62的电势)。电连接部54、56可为次级天线结构52电路的一部分，或者可为独立结构。

[0049] 在图2中所示实施例中，次级天线结构位于等离子体离子源电介质58的外表面上。由于这种构造，传播通过次级天线结构52的电磁波分量所具有的表观速度不同于在真空中的电磁辐射速度。在图2中所示实施例中，次级天线结构52可被称为慢波结构。通过次级天线结构52耦合到等离子体离子源中的电磁辐射的表观速度的减小有利于在次级天线结构52与等离子体离子源之间的共振耦合，例如电子回旋加速器、低混杂(lower-hybrid)、高混杂(upper-hybrid)共振耦合。在图2中所示的实施例中，次级天线52与所希望的等离子体状态和外部施加的磁场(未示出)匹配以实现在次级天线与等离子体之间的共振耦合。这改善了动力耦合，并允许在紧凑形状因子内的高密度等离子体生成。例如，约300～360高斯的磁通密度值对于以频率915MHz微波辐射驱动的等离子体的电子回旋加速器共振耦合而言是理想的，约300～360高斯的激励磁通密度值对于电子回旋加速器共振耦合而言是理想的。使用慢波天线允许对于共振行为在离子源等离子体区域58内使用较低磁场(lower B-field)的同时以更高初始驱动频率(例如2.45GHz)操作。

[0050] 图3图示出次级天线组件70，用于将电磁能量通过电容耦合而耦合到等离子体离子源中。图3中所示的次级天线组件70包括：次级天线结构72，束流电极60，阳极电极62，和离子加速区域的一部分64。图3中所示的特定元件对应于图1中所示的元件。例如，次级天线结构72对应于次级天线42，束流电极60对应于束流电极24，阳极电极62对应于阳极电极28。

[0051] 图3中所示的次级天线结构72包括：围绕离子源电介质(未示出，隐藏在次级天线结构72之下)的表面卷绕的线圈，其中所述离子源电介质封闭等离子体离子源并形成连接到束流电极60和阳极电极62的真空管。

[0052] 在操作过程中，来自初级天线(未示出)的电磁能量通过卷绕线圈次级天线结构72收集，由此产生足以在位于次级天线结构72之下的等离子体离子源电介质内生成和维持等离子体的电压和电流。次级天线结构72能够通过电容耦合将电磁能量耦合到等离子体离子

源。将电磁能量电容耦合到等离子体区域中，可通过选择卷绕线圈中的匝数以及线圈72上的厚度和间隔而规模化(scale)。特别地，次级天线结构72的性能可根据所希望的等离子体状态和外部施加磁场而调整，以在次级天线与等离子体之间实现电容耦合效果。例如，匝比和线圈间隔可在等离子体内生成所希望的电压，以利于轴向电子运动，从而在束流电极60和阳极电极62之间高效生成等离子体。

[0053] 图4图示出次级天线组件80，用于将电磁能量通过电感耦合而耦合到等离子体离子源中。图4中所示的次级天线组件80包括：初级收集元件82，次级天线结构84，电连接部86、88、90，等离子体离子源电介质58，束流电极60，阳极电极62，离子加速区域的一部分64。图4中所示的特定元件对应于图1中所示的元件。例如，次级天线结构84对应于次级天线42，等离子体离子源电介质58对应于等离子体离子源电介质26，束流电极60对应于束流电极24，阳极电极62对应于阳极电极28。

[0054] 图4中所示次级天线结构84包括：稀疏卷绕的线圈，其位于等离子体离子源电介质58内的其中生成有等离子体的区域上。次级天线结构84允许高电流流动(例如在无线电频率下)，以通过电磁感应将电磁能量耦合到等离子体中。在图4中所示实施例的操作过程中，次级天线结构84通过使初级天线(未示出)电容耦合到初级收集元件82而被激励。初级收集元件82通过连接体86而激励次级天线结构84。可替代地，若初级天线分别电容耦合到束流电极60和阳极电极64，则次级天线结构可通过连接体88、90被激励。在图4中所示的实施例中，能量从次级天线组件80的接收部分(例如，初级收集元件82)被传送到次级组件80的等离子体耦合部分。在一些实施方案中，磁结构位于等离子体耦合部分与初级天线之间，而接收部分位于磁结构之外。通过这种方式，电磁能量可从磁结构禁止从初级天线直接耦合的地点耦合到等离子体。在束流电极60与阳极电极62之间的电连接部88、90也可用于升高整个次级天线组件80的电势。

[0055] 在此实施例中，稀疏卷绕次级天线84可以与所希望的等离子体状态和外部施加磁场(未示出)匹配，以在次级天线与等离子体之间实现电感耦合效果。例如，可选择匝比和线圈间隔以通过等离子体离子源生成所希望的射频电流，以利于方位(azimuthal)电子运动，从而在稀疏卷绕次级天线84之下高效生成等离子体。

[0056] 图5图示出用于生成等离子体离子源的设备，包括：初级天线，其被构造以通过电感耦合将电磁能量耦合到次级天线。图5中所示的所有元件对应于图1中相同附图标记的元件。图5进一步包括：稀疏卷绕线圈初级天线102，其被构造以将电磁能量电感耦合到次级天线42。在各种实施例中，次级天线42通过电感、电容、或共振耦合将能量耦合到等离子体。

[0057] 图6图示出的初级天线结构能够被构造为：通过电容耦合将电磁能量耦合到次级天线。图6中所示的所有元件对应于图4中相同附图标记的元件。图6进一步包括：桨(paddle)型的初级天线，其包括电极132、134。电极132、134被构造以将电磁能量电容耦合到次级天线结构84。在此情况下，束流电极60被构造为收集电极，将从电极132、134接收的电磁能量通过连接体88耦合到次级天线结构84。初级收集元件82也将从电极132、134接收的电磁能量通过连接体86耦合到次级天线结构84。

[0058] 虽然本发明已经在附图和以上描述中例示和详细描述，不过，这样的例示和描述应被认为是例示性的或示例性的，而不是限制性的。应理解，在所附权利要求书的范围内，本领域普通技术人员可以进行改变和修改。特别地，本发明涵盖进一步的实施例，其中具有

来自前述和后述的不同实施例中的特征的任意组合。

[0059] 在权利要求书中使用的术语应被理解为具有与以上描述一致的范围最广的合理解释。例如，在引入元件时使用的介词“一个”或“所述”应被理解为不排斥多个元件。同样地，“或”的表述应被理解为是包括性的，使得“A或B”的表述不排斥“A和B”，除非从应用环境或以上描述中显见A和B中将仅采用一个。进一步地，“A、B、C中的至少一个/一种”的表述应被理解为包括A、B、C的元件的组中的一个或多个，而不应被理解为需要所列元件A、B、C的每种中的至少一个，无论A、B、C是否涉及类别。另外，“A、B和/或C”或“A、B或C中的至少一个/一种”的表述应被理解为包括：来自所列元件的任意单个对象(例如A)、来自所列元件的任意子集(例如A和B)、或者所有罗列的A、B和C。

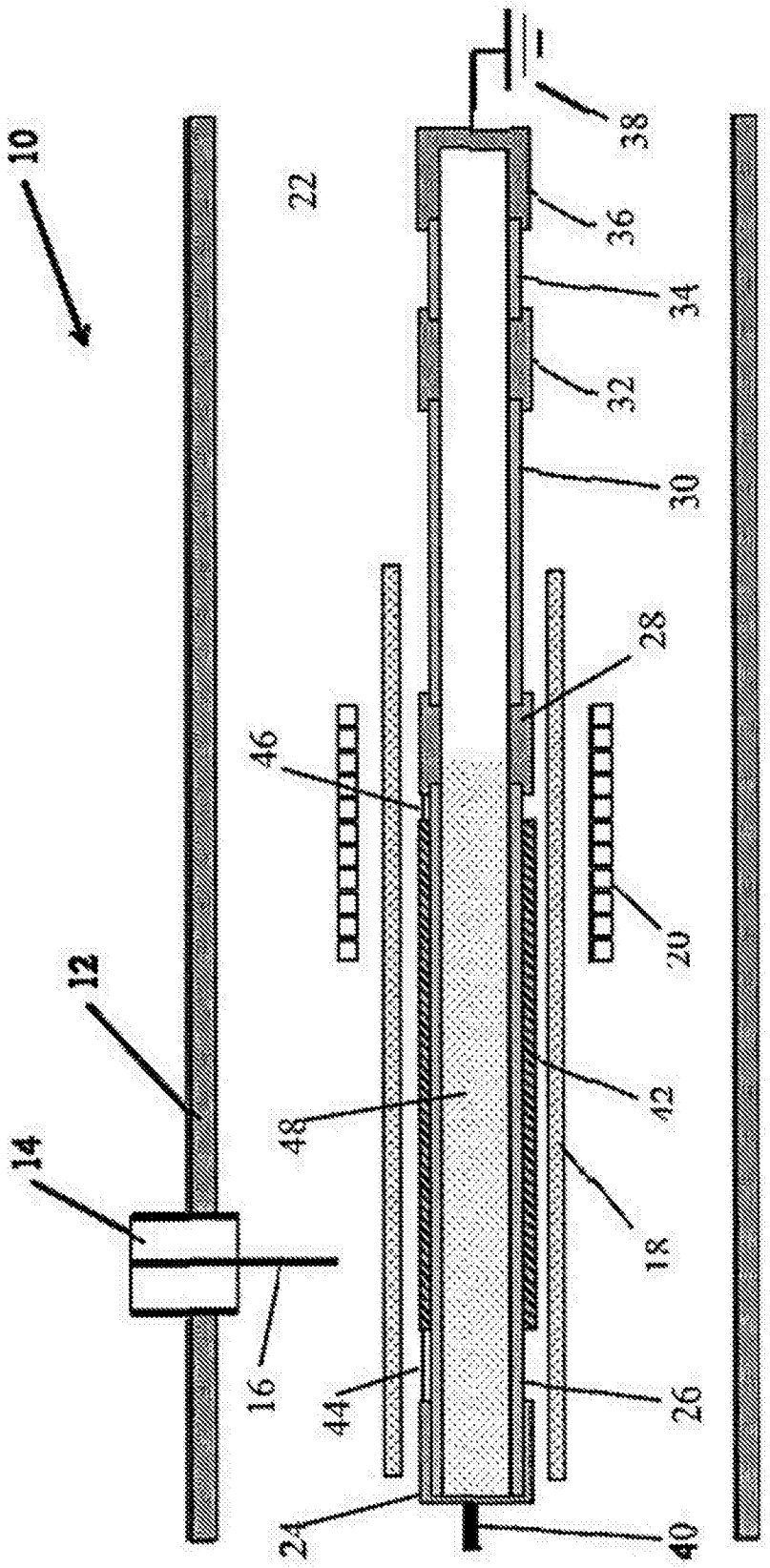


图1

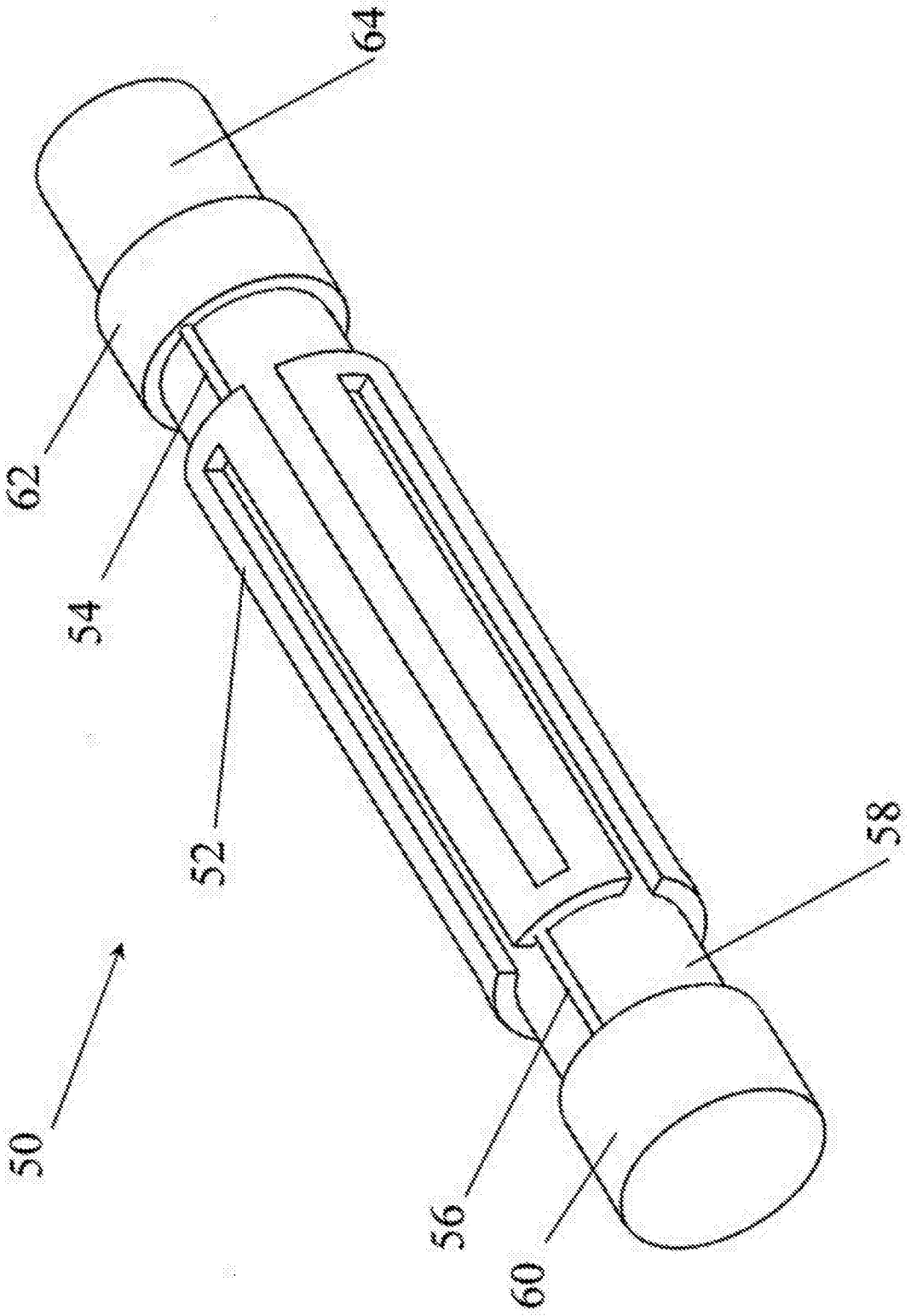


图2

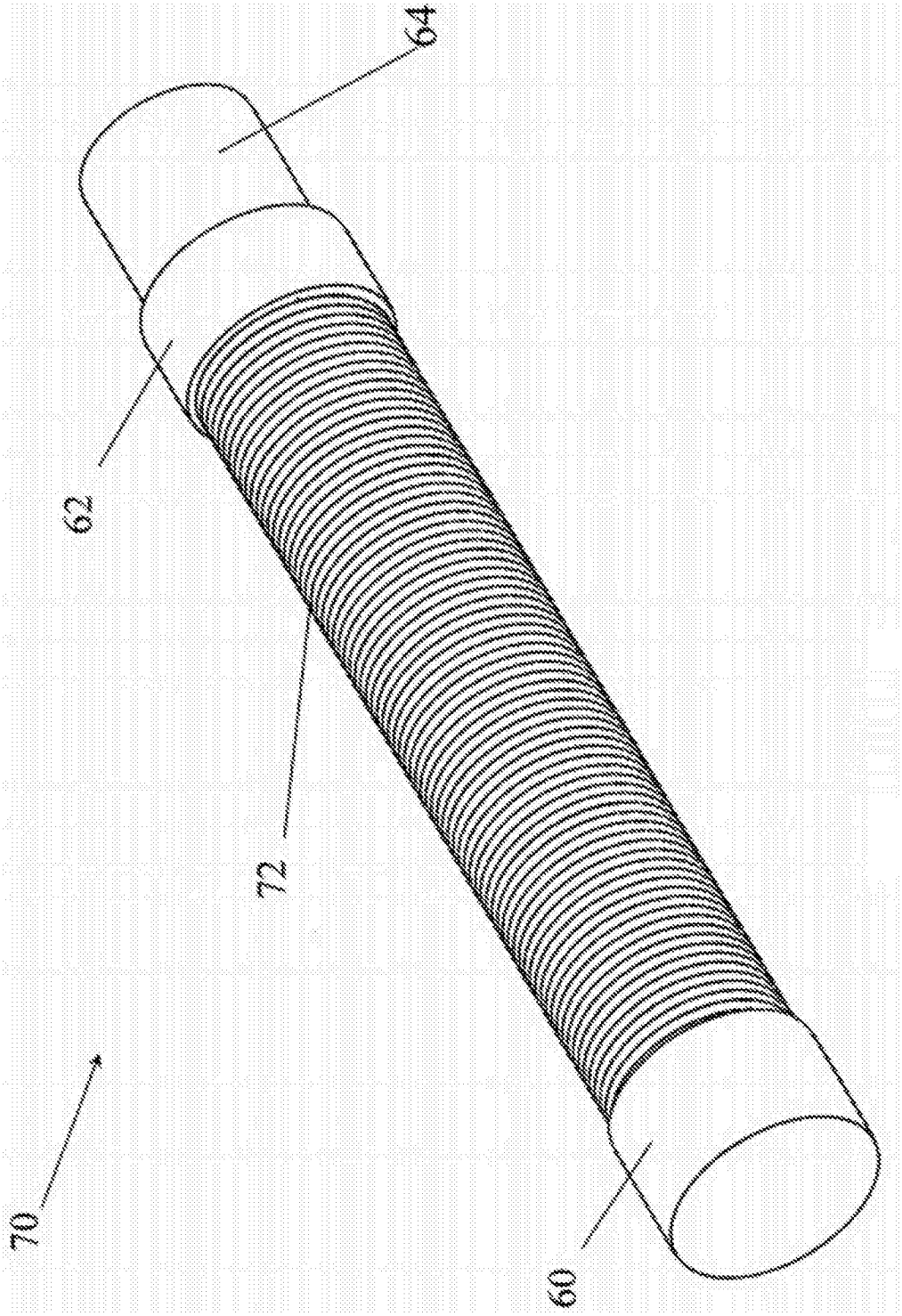


图3

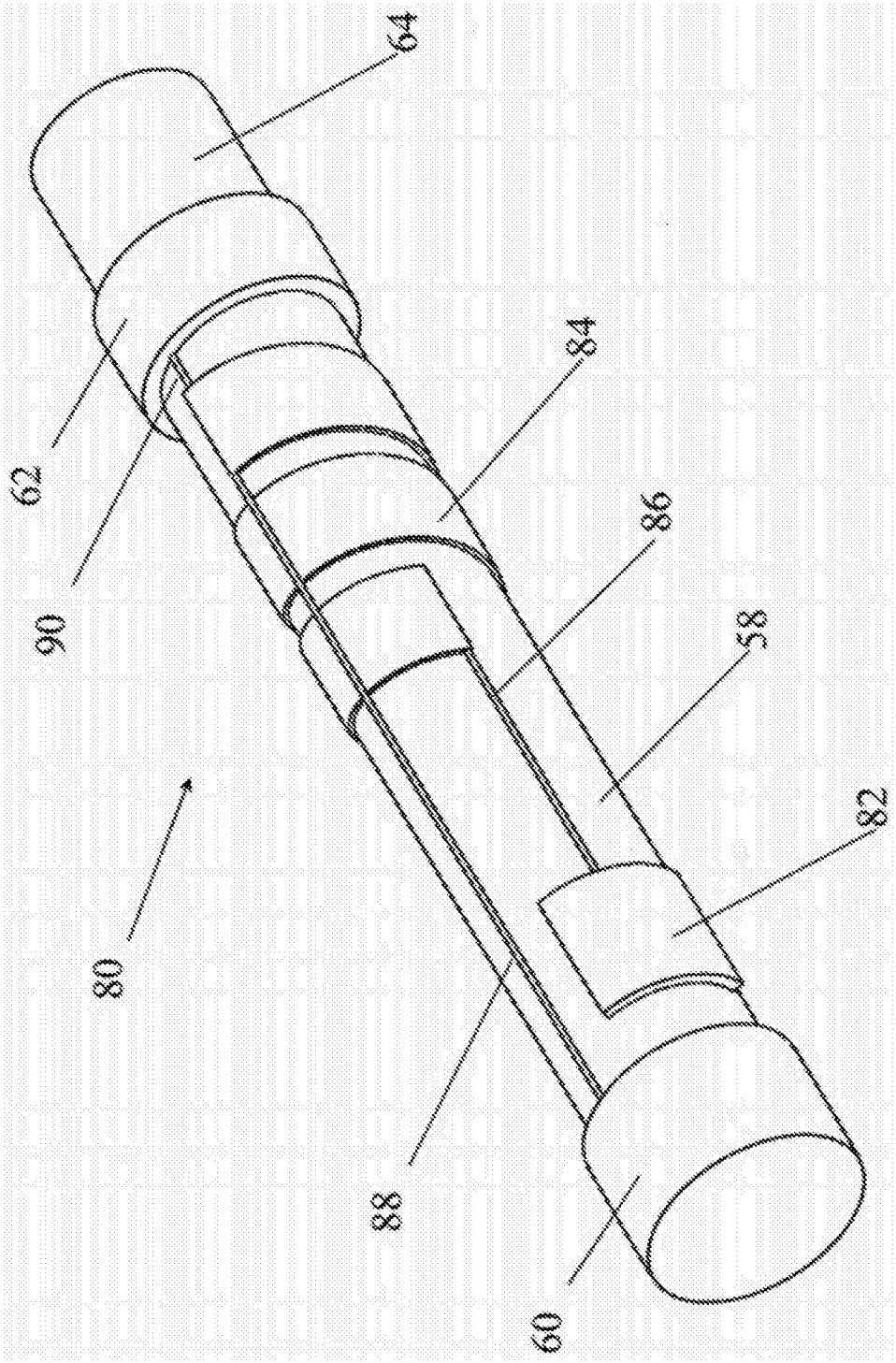


图4

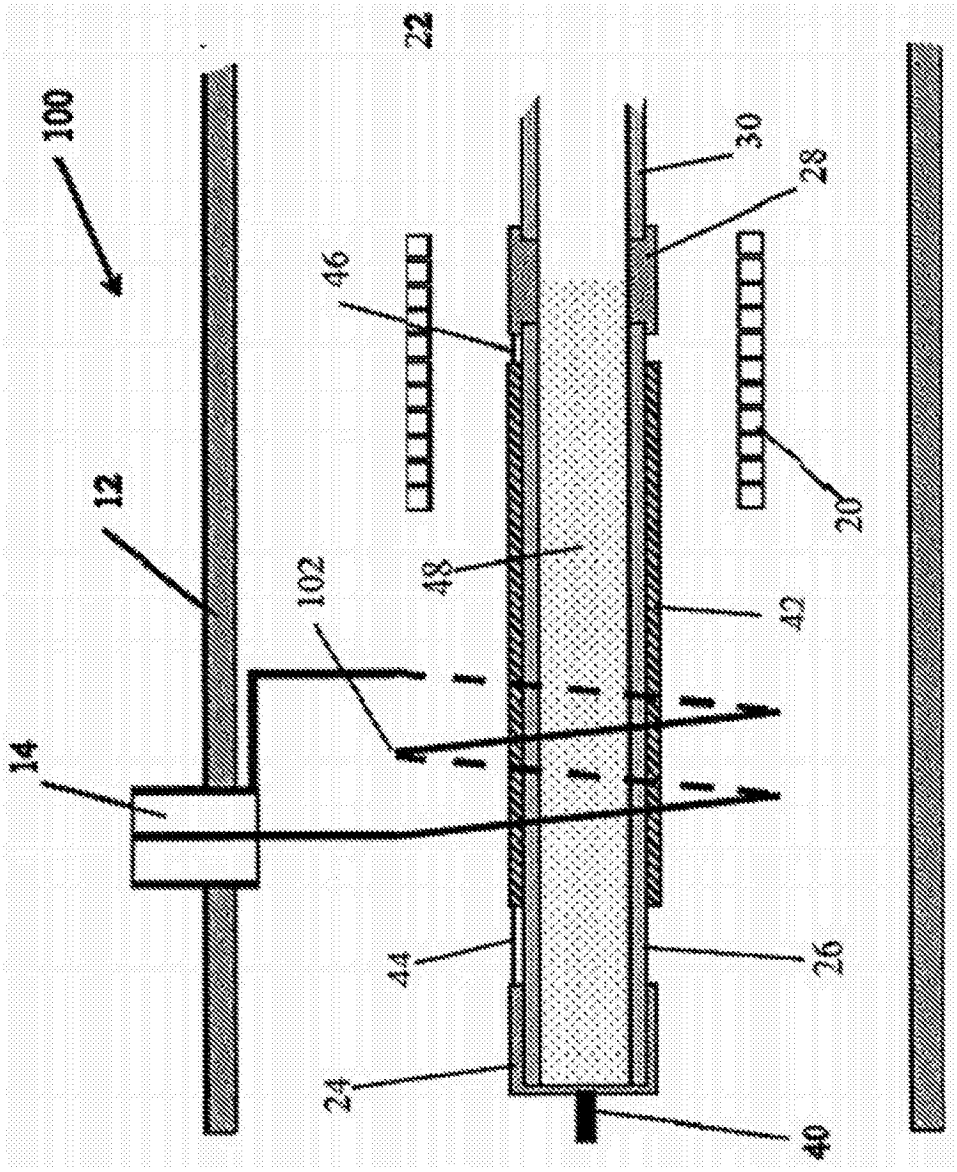


图5

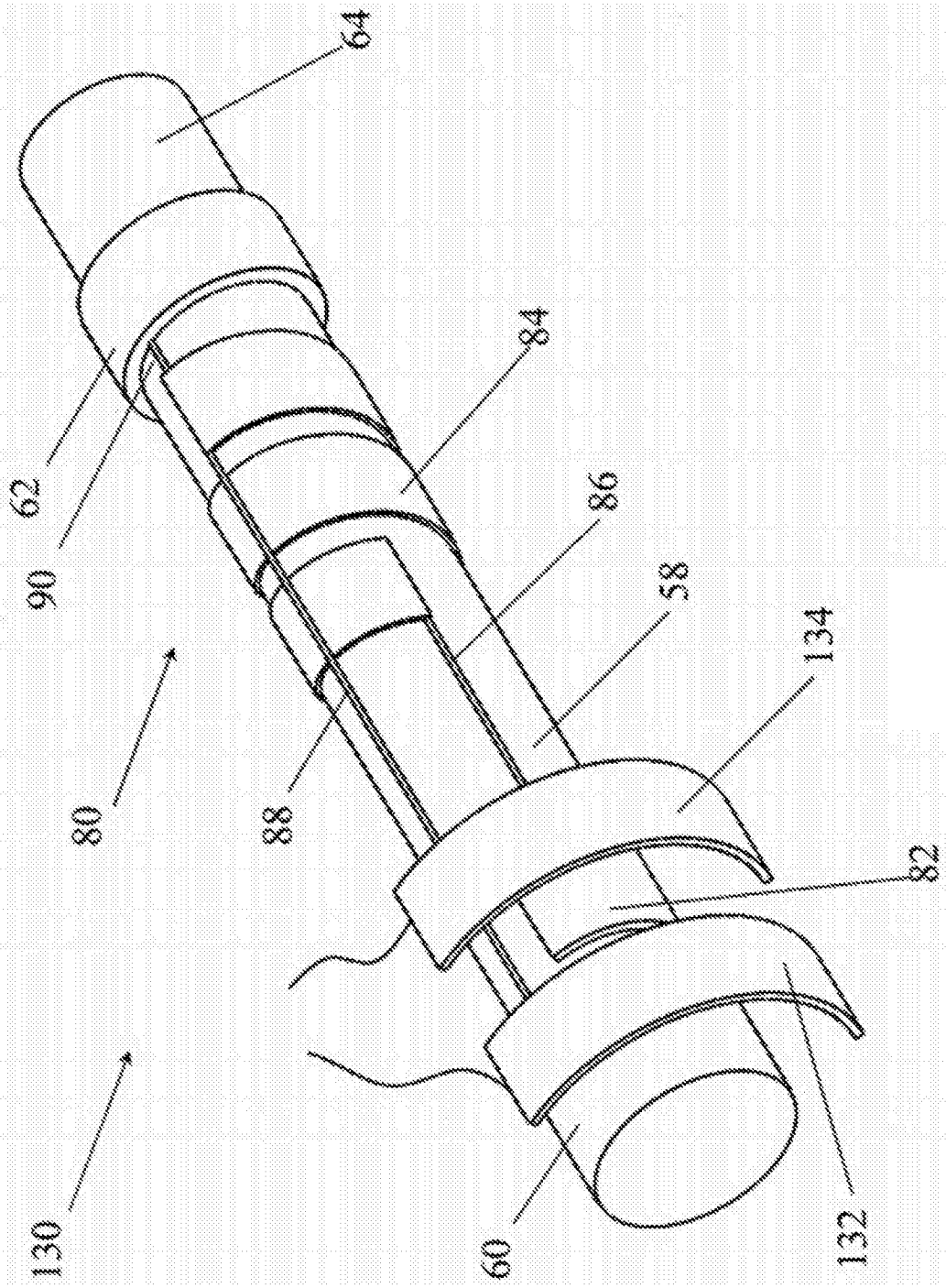


图6