



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102651942 B

(45) 授权公告日 2015.02.11

(21) 申请号 201210028229.7

(22) 申请日 2012.02.09

(30) 优先权数据

2011-041742 2011.02.28 JP

2011-244298 2011.11.08 JP

(73) 专利权人 三菱电机株式会社

地址 日本东京

(72) 发明人 田中博文 山本和男 春名延是

蒲越虎 新川宽治 加岛鹰之

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 崔成哲

(51) Int. Cl.

H05H 13/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101933406 A, 2010.12.29, 全文.

CN 101819845 A, 2010.09.01, 全文.

CN 101697658 A, 2010.04.21, 全文.

US 2006/0175991 A1, 2006.08.10, 全文.

US 2007/0171015 A1, 2007.07.26, 全文.

JP 平 5-501632 A, 1993.03.25, 全文.

US 5521469 A, 1996.05.28, 全文.

O. Brovko. Conceptual design of a 240 MeV superferric separated orbit cyclotron. 《Particle Accelerator Conference》. 1999, 第 4 卷第 2262 页 - 2264 页.

陈德智. 圆形加速器平衡轨道的计算. 《华中科技大学学报》. 2007, 第 35 卷 (第 5 期), 第 55 页 - 57 页.

C. Johnstone. Fixed field circular accelerator designs. 《Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference》. 1999, 第 3068 页 - 3070 页.

审查员 吴小云

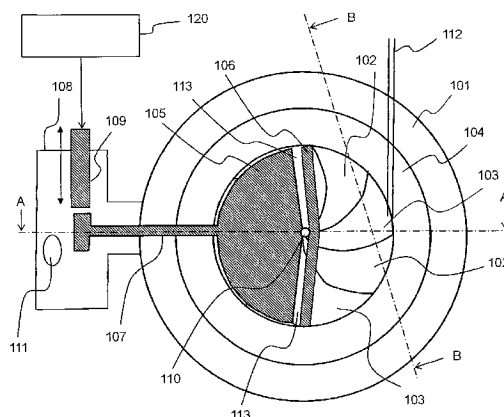
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 13 页

(54) 发明名称

圆形加速器以及圆形加速器的运转方法

(57) 摘要

本发明提供一种能够通过 1 台加速器容易地变更加速能量, 且在加速中不需要变更高频加速电极部的共振频率的圆形加速器。具备: 偏转电磁铁, 形成偏转磁场; 高频电源, 用于与带电粒子的旋绕频率相匹配地产生高频电场; 高频电磁场结合部, 与该高频电源连接; 加速电极, 与该高频电磁场结合部连接; 以及加速电极相对接地板, 设置成在与加速电极之间形成在带电粒子的旋绕方向产生高频电场的加速空隙, 偏转电磁铁生成如下偏转磁场, 使带电粒子的旋绕频率在带电粒子的入射至射出的期间, 相对带电粒子的射出部分的旋绕频率以 0.7% 以上 24.7% 以下的变化量变化。



1. 一种圆形加速器,使入射到中心的带电粒子通过偏转磁场沿着螺旋轨道旋绕的同时通过高频电场进行加速,其特征在于,具备:

偏转电磁铁,在所述带电粒子的旋绕方向交替配置构成窄的磁极空隙的电磁铁凸部和构成宽的磁极空隙的电磁铁凹部,并通过励磁线圈进行励磁,从而形成所述偏转磁场;

高频电源,用于与所述带电粒子的旋绕频率匹配地产生所述高频电场;

高频电磁场结合部,与该高频电源连接;

加速电极,与该高频电磁场结合部连接;以及

加速电极相对接地板,设置成在与所述加速电极之间形成在所述带电粒子的旋绕方向上产生所述高频电场的加速空隙,

所述偏转电磁铁生成如下偏转磁场:在所述带电粒子的入射至射出的期间,使所述带电粒子的旋绕频率相对所述带电粒子的射出部分的旋绕频率以 0.7% 以上 24.7% 以下的变化量变化。

2. 根据权利要求 1 所述的圆形加速器,其特征在于,

所述偏转电磁铁生成如下磁通密度分布:在通过带电粒子的射出位置处的半径的平均磁通密度 B_0 和所述射出位置处的带电粒子的能量 E_0 ,用 $B(r) = (B_0/E_0^x) * E(r)^x$ 表示半径 r 的位置处的所述带电粒子的旋绕方向上的平均磁通密度 $B(r)$ 和带电粒子的合计能量 $E(r)$ 的关系中, x 为并非 1 的常数。

3. 根据权利要求 2 所述的圆形加速器,其特征在于,

所述 x 是 $-0.2 < x < 0.97$ 。

4. 一种圆形加速器,使入射到中心的带电粒子通过偏转磁场沿着螺旋轨道旋绕的同时通过高频电场进行加速,其特征在于,具备:

偏转电磁铁,在所述带电粒子的旋绕方向上交替配置构成窄的磁极空隙的电磁铁凸部和构成宽的磁极空隙的电磁铁凹部,并通过励磁线圈进行励磁,从而形成所述偏转磁场;

高频电源,用于与所述带电粒子的旋绕频率匹配地产生所述高频电场;

高频电磁场结合部,与该高频电源连接;

加速电极,与该高频电磁场结合部连接;以及

加速电极相对接地板,设置成在与所述加速电极之间形成在所述带电粒子的旋绕方向上产生所述高频电场的加速空隙,

所述偏转电磁铁生成如下磁通密度分布:在通过带电粒子的射出位置处的半径的平均磁通密度 B_0 和所述射出位置处的带电粒子的能量 E_0 ,用 $B(r) = (B_0/E_0^x) * E(r)^x$ 表示半径 r 的位置处的所述带电粒子的旋绕方向上的平均磁通密度 $B(r)$ 和带电粒子的合计能量 $E(r)$ 的关系中, x 为并非 1 的常数,

所述 x 是 $-0.2 < x < 0.97$ 。

5. 根据权利要求 1 或者 4 所述的圆形加速器,其特征在于,

使从所述高频电源供给的高频的频率与所述带电粒子的旋绕频率的变化相匹配地变化。

6. 根据权利要求 5 所述的圆形加速器,其特征在于,

所述加速电极部的共振特性中的表示中心频率 f /半值宽度 Δf 的 Q 值是 100 以下。

7. 根据权利要求 6 所述的圆形加速器,其特征在于,

所述带电粒子的旋绕频率的变化量是所述加速电极部的共振特性的半值宽度以内。

8. 根据权利要求 1 或者 4 所述的圆形加速器,其特征在于,
具备变更加速电极部的共振频率的单元。

9. 根据权利要求 8 所述的圆形加速器,其特征在于,
所述高频电磁场结合部具备变更电感或者电容的单元。

10. 根据权利要求 1 或者 4 所述的圆形加速器,其特征在于,
具备修正所述偏转磁场的半径方向上的磁通密度分布的单元。

11. 根据权利要求 10 所述的圆形加速器,其特征在于,
在半径方向上具备多个用于对所述偏转磁场的半径方向上的磁通密度分布进行修正的磁场修正用线圈。

12. 根据权利要求 11 所述的圆形加速器,其特征在于,
将所述磁场修正用线圈设置于所述电磁铁凸部的位置。

13. 根据权利要求 10 所述的圆形加速器,其特征在于,
将用于对所述偏转磁场的半径方向上的磁通密度分布进行修正的磁场修正用线圈设置于与所述励磁线圈的半径方向位置相同的位置。

14. 根据权利要求 1 或者 4 所述的圆形加速器,其特征在于,
将所述加速电极配置于与所述电磁铁凹部对应的位置。

15. 一种权利要求 10 所述的圆形加速器的运转方法,其特征在于,
在从所述高频电源不供给高频的期间,修正所述偏转磁场的半径方向上的磁通密度分布,并且变更所述加速电极部的共振频率。

16. 根据权利要求 15 所述的圆形加速器的运转方法,其特征在于,
通过变更所述高频电磁场结合部的电感或者电容,而变更所述加速电极部的共振频率。

圆形加速器以及圆形加速器的运转方法

技术领域

[0001] 本发明涉及使带电粒子沿着大致圆形的螺旋轨道旋绕的同时加速至高能量并将加速后的带电粒子射出到外部的圆形加速器。

背景技术

[0002] 作为沿着螺旋轨道旋绕的同时使带电粒子加速至高能量的装置,有同步回旋加速器和回旋加速器。在这些同步回旋加速器、回旋加速器中,为了使带电粒子稳定地加速,需要“与通过加速电极的定时匹配地,在波束行进方向上施加规定的高频加速电场”、“在波束行进方向上提供规定的聚束力、在波束垂直方向上提供规定的聚束力”。

[0003] 同步回旋加速器例如如专利文献 1 记载的那样,由离子源产生的带电粒子通过偏转电磁铁形成旋绕轨道,同时每当通过加速电极时被逐渐加速。伴随着能量增加,旋绕轨道的半径逐渐变大,即成为螺旋轨道,如果加速后的带电粒子达到最高能量,则从射出通道被取出到加速器外部。在专利文献 1 记载的同步回旋加速器中,(1) 对于加速电极部的共振频率,在加速中以 1kHz 左右的周期高速地进行调制,并通过高速地频率调制了的高频加速电场进行加速;(2) 确保波束行进方向的聚束力;(3) 由于是弱聚束磁场,所以能够确保波束垂直方向的聚束力。在专利文献 1 记载的装置中,共振频率的 1kHz 等级的高速调制的难度非常高。

[0004] 回旋加速器例如如专利文献 2 记载的那样,由离子源产生的带电粒子通过由偏转电磁铁提供的偏转磁场形成旋绕轨道,同时每当通过加速电极时被逐渐加速。随着带电粒子被加速而能量增加,旋绕轨道的半径逐渐变大,即成为螺旋轨道,如果加速后的带电粒子达到最高能量,则从射出通道被取出到加速器外部。到此,与同步回旋加速器相同。

[0005] 在回旋加速器中为了使带电粒子稳定地加速,需要(4)在加速电极中,与带电粒子的通过的定时匹配地,在波束行进方向上施加规定的高频加速电场;(5)在波束垂直方向上提供规定的聚束力,并且(6)在波束行进方向上没有聚束力。

[0006] 在专利文献 2 记载的回旋加速器中,对于上述(4),以使带电粒子的旋绕频率不随着加速发生变化的方式,制作偏转电磁铁的磁场分布,所以无需对高频加速电场的频率进行调制。将该磁场称为等时性磁场。关于(6),在等时性磁场中在波束行进方向上没有聚束力,所以需要将电磁铁的磁场整形的精度提高至 1×10^{-6} 左右,并且增大加速电压而在几百转的程度下取出波束。另外,关于(5),为了设为等时性磁场,需要设为在半径大的方向上变强的磁场,在垂直方向上产生大的发散力。为了克服该发散力而得到垂直方向的聚束力,偏转电磁铁的结构成为在带电粒子的旋绕方向上大的磁极空隙和小的磁极空隙交替反复的结构,并且使磁极形状成为螺旋状的磁极形状。

[0007] 【专利文献 1】日本特表 2008-507826 号公报

[0008] 【专利文献 2】日本特表平 5-501632 号公报

发明内容

[0009] 以往的圆形加速器存在以下那样的问题。在专利文献 1 的同步回旋加速器、专利文献 2 的回旋加速器中,为了加速至在粒子射线治疗中使用那样的几百 MeV 等级,都难以通过 1 台加速器变更加速能量。另外,在专利文献 1 的同步回旋加速器中,在加速中需要高频加速电极部的共振频率的高速调制,以 1kHz 对施加大功率的部分进行高速驱动,所以难以确保可靠性。另一方面,在专利文献 2 的回旋加速器中,电磁铁的磁场的必要精度是 $\Delta B/B = 1 \times 10^{-6}$ 左右,而需要通过在实际设置的场所反复进行磁场测定和磁极加工来实现上述精度这样的烦杂的作业。

[0010] 本发明是为了解决上述课题而完成的,其目的在于提供一种圆形加速器,能够通过 1 台加速器容易地变更加速能量,在加速中不需要使高频加速电极部的共振频率变化且可靠性高。

[0011] 本发明提供一种圆形加速器,具备:偏转电磁铁,在带电粒子的旋绕方向上交替配置构成窄的磁极空隙的电磁铁凸部和构成宽的磁极空隙的电磁铁凹部,并通过励磁线圈进行励磁,从而形成偏转磁场;高频电源,用于与带电粒子的旋绕频率匹配地产生高频电场;高频电磁场结合部,与该高频电源连接;加速电极,与该高频电磁场结合部连接;以及加速电极相对接地板,设置成在与加速电极之间形成在带电粒子的旋绕方向上产生高频电场的加速空隙,偏转电磁铁生成如下偏转磁场:在带电粒子的入射至射出的期间,使带电粒子的旋绕频率相对带电粒子的射出部分的旋绕频率以 0.7% 以上 24.7% 以下的变化量变化。

[0012] 根据本发明,得到能够通过 1 台加速器改变加速能量,而且在加速中不需要使高频加速电极部的共振频率变化的圆形加速器。

附图说明

[0013] 图 1 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器的概略结构的剖面示意图。

[0014] 图 2 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器的概略结构的、图 1 的 A-A 剖面中的剖面示意图。

[0015] 图 3 是仅示出图 1 的 B-B 剖面中的电磁铁的结构的上半部分的剖面图。

[0016] 图 4 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器的磁场分布的一个例子的线图。

[0017] 图 5 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器的磁场分布的其他例子的线图。

[0018] 图 6 是示出以往的圆形加速器的磁场分布的例子的线图。

[0019] 图 7 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器的带电粒子的旋绕频率的半径依赖性的一个例子的线图。

[0020] 图 8 是概念地表现了本发明的高频的动作与以往的回旋加速器以及以往的同步回旋加速器的高频的动作的差异的图。

[0021] 图 9 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器的加速电极部的共振频率与此时得到的射出质子能量的关系的一个例子的线图。

[0022] 图 10 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器中的、将射出质子能量作为参数时的磁场分布的例子的线图。

[0023] 图 11 是示出通过本发明的实施方式 1 的圆形加速器使质子加速了时的波束轨道解析结果的例子的图。

[0024] 图 12 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器所需的高频电源输出的例子的线图。

图。

[0025] 图 13 是示出本发明的实施方式 2 的圆形加速器的概略结构的横截面示意图。

[0026] 图 14 是示出本发明的实施方式 2 的圆形加速器的磁场修正用线圈的配置的例子图。

[0027] 图 15 是示出本发明的实施方式 2 的圆形加速器中的用于说明磁场修正用线圈的动作的磁场分布的例子线图。

[0028] 图 16 是示出本发明的实施方式 2 的圆形加速器的其他概略结构的横截面示意图。

[0029] 图 17 是示出本发明的实施方式 3 的圆形加速器的概略结构的剖面示意图。

[0030] 图 18 是示出本发明的实施方式 4 的圆形加速器的概略结构的剖面示意图。

[0031] (符号说明)

[0032] 101:电磁铁旁轭;102:电磁铁凹部;103:电磁铁凸部;104:励磁线圈;105:加速电极;106:加速电极相对接地板;108:高频电磁场结合部;109、119:调谐器;110:离子源;111:RF 功耗负载;112:射出通道;113:加速空隙;120:高频电源;129:旋转电容器(调谐器);202、203:磁场修正用线圈

具体实施方式

[0033] 实施方式 1.

[0034] 图 1 是示出本发明的实施方式 1 的圆形加速器的概略结构的剖面示意图。图 1 示出用带电粒子旋绕的轨道平面切断了了的剖面的设备配置。另外,图 2 是图 1 的 A-A 剖面中的剖面示意图。进而,图 3 是仅示出图 1 的 B-B 剖面中的电磁铁的结构的上半部分的剖面图。使用图 1~图 3,说明本发明的实施方式 1 的圆形加速器的结构以及动作。

[0035] 通过偏转电磁铁,在图 1 的纸面垂直方向上形成规定的偏转磁场,该偏转电磁铁具有电磁铁旁轭 101、形成宽的磁极空隙的电磁铁凹部 102、形成窄的磁极空隙的电磁铁凸部 103、励磁线圈 104。通过该偏转磁场,形成由离子源 110 产生的带电粒子的旋绕轨道。在图 2 中,用单点划线示出了旋绕轨道的轨道面 0。另外,经由高频电磁场结合部 108 从高频电源 120 供给高频,对在加速电极(D形(dee))105 与加速电极相对接地板(伪 D 形(dummy dee))106 之间形成的加速空隙 113 施加高频的加速电场。每当带电粒子通过加速空隙 113 时,通过该加速电场逐渐被加速。每当带电粒子被加速,带电粒子的旋绕轨道的半径逐渐变大,即旋绕轨道成为螺旋轨道,最后,从射出通道 112 向加速器外部取出加速了的带电粒子。另外,如果离子源 110 中的阳极、离子源取出窗长期间使用,则产生损伤,所以设为将离子源 110 取出到加速器外而能够保养的结构。

[0036] 从图 1 以及图 3 可知,带电粒子交替通过电磁铁的厚度薄且磁极空隙宽的电磁铁凹部 102 和电磁铁的厚度厚且磁极空隙窄的电磁铁凸部 103。由此,能够取得带电粒子的垂直方向的聚束力。为了得到垂直方向的充分的聚束力,电磁铁凸部 103 的形状优选为图 1 所示那样的旋涡(螺旋)形状。如果成为旋涡形状,则带电粒子的行进方向和磁极的边缘部带有角度,所以在带电粒子通过时,能够得到垂直方向的规定的聚束力。

[0037] 另外,如图 2 所示,磁极的空隙作为整体随着带电粒子的旋绕半径越大即越向外周变得越窄,实现了带电粒子的旋绕半径越大,磁场强度越增加的磁场分布。另外,例如,随着半径越大,使电磁铁凸部 103 的部分所占的角度(扇形角度)越宽,也能够增加平均的磁

场强度。

[0038] 图 4 示出在使质子加速至 230MeV 时所需的半径方向的平均磁通密度分布。在图 4 中,横轴表示半径 R(m)、纵轴表示偏转磁场强度(磁通密度)B(T)。此处,平均磁通密度是指,其半径位置处的 1 周范围的平均的磁通密度。图 4 的 a 所示的曲线是本发明的磁场分布。为了比较,用曲线 b 示出专利文献 2 等以往的回旋加速器的典型的磁场分布。

[0039] 在本发明中,加速区域的半径 r 的位置处的平均磁通密度 B(r) 成为用下式 (1) 表示的磁场分布。

$$[0040] \quad B(r) = (B_0/E_0^x) * E(r)^x \quad (1)$$

[0041] 其中,E(r) 是粒子的半径 r 的位置处的合计能量、x 是并非 1 的常数、下标 0 是某位置的 B 和 E,例如 B₀ 以及 E₀ 是射出位置的半径(螺旋轨道的最外周)中的平均磁通密度以及粒子的合计能量。

[0042] 图 4 的曲线 a 示出 x = 0.9 时的磁场分布。另外,作为以往的回旋加速器的典型的磁场分布的曲线 b 相当于在式 (1) 中设为 x = 1 时的磁场分布。

[0043] 图 5 示出在使质子加速至 230MeV 时所需的半径方向的平均磁通密度分布的其他例子。横轴表示半径 R(m)、纵轴表示偏转磁场强度(磁通密度)B(T)。图 5 的 a 所示的曲线是本发明的磁场分布的例子,是式 (1) 中的 x = 0.8 时的磁场分布。在图 5 中,为了比较,作为曲线 b,示出了专利文献 2 等以往的回旋加速器的典型的磁场分布。

[0044] 为了参考,图 6 示出专利文献 2 等以往的回旋加速器、以及专利文献 1 等以往的同步回旋加速器的典型的磁场分布。图 6 是在使质子加速至 230MeV 时所需的半径方向的平均磁通密度分布,图中的 b 是专利文献 2 等以往的回旋加速器的磁场分布且与图 4 以及图 5 的曲线 b 相同的磁场分布,图中的 c 是专利文献 1 等以往的同步回旋加速器的典型的磁场分布。

[0045] 从图 4 至图 6 可知,本发明的圆形加速器中的偏转磁场的磁场分布是以往的回旋加速器的典型的磁场分布与以往的同步回旋加速器的典型的磁场分布的中间的磁场分布。本发明中的磁场分布无需是在从带电粒子的产生至射出的全部区域中即对整个半径范围满足式 (1) 的磁场分布,由于带电粒子的产生部、射出部成为磁铁的中心、端部,所以在这些位置也可以从式 (1) 稍微有偏差。如果磁场分布从式 (1) 有偏差的部分成为全部半径的两成左右以上,则加速效率降低,所以需要设为两成以下。

[0046] 图 7 示出本发明中的、图 4 的曲线 a 所示的磁场分布的由圆形加速器使质子加速至 230MeV 时的带电粒子的旋绕频率的半径依赖性。在图 7 中,横轴表示半径 R(m)、纵轴表示带电粒子的旋绕频率(Hz)。对于带电粒子的旋绕频率,从入射部分的 25.9MHz 至射出部分的 25.3MHz 左右,变化 0.6MHz,相对射出部分的频率变化约 2%。与该变化匹配地,使从高频电源 120 供给的高频的频率变化。即使从高频电源 120 供给的高频的频率变化,在该程度的变化的情况下,只要加速电极部的共振的锐度(Q 值:中心频率 f/半值宽度 Δf) 是 100 以下、优选 50 左右,则在不改变加速电极部的共振频率而恒定的状态下使用 10kW 左右的高频电源,就能够加速至 230MeV。在图 7 的例子情况下,将加速电极部的共振频率预先设为入射部分的带电粒子的旋绕频率 25.9MHz 与射出部分的带电粒子的旋绕频率 25.3MHz 的中间值 25.6MHz 即可。此处,加速电极部的共振频率是指,包括加速电极 105、加速电极相对接地板 106、加速空隙 113、加速电极延长电极 107、高频电磁场结合部 108 等而从高频电

磁场结合部 108 的输入端观察的负载整体的共振频率。

[0047] 这样,减小加速电极部的共振的锐度(Q 值),而即使从高频电源 120 供给的高频的频率变化,也不使加速电极部的共振频率变化地对加速电极 105 与加速电极相对接地板 106 之间施加规定的加速电场。为了减小 Q 值,能够通过增大加速电极整体的金属(通常的材质是铜)的表面粗糙度来实现。但是,在本实施方式 1 中,为了抑制加速电极整体中产生热,如图 1 所示,在高频电磁场结合部 108 中安装 RF 功耗负载 111,通过该部分消耗 RF 功率,从而减小 Q 值。

[0048] 图 8 是概念地表现了本发明的高频的动作、与以往的回旋加速器、以及以往的同步回旋加速器的高频的动作的差异的图。图的横轴表示频率、纵轴表示能够对加速电极施加的高频功率。即,图 8 的曲线示出加速电极部的共振特性,粗实线的曲线是本发明的加速电极部的共振特性,细实线的曲线是以往的回旋加速器的加速电极部的共振特性,虚线的曲线是以往的同步回旋加速器中的加速电极部的共振特性。另外,箭头分别表示供给的高频的频率的变化趋势。在以往的回旋加速器中,加速电极部的共振特性尖锐(Q 值大),所供给的高频的频率恒定。另外,在以往的同步回旋加速器中,使加速中供给的高频的频率变化,并且与该变化对应地使加速电极部的共振频率也变化。相对于此,在本发明的圆形加速器中,使加速中供给的高频的频率稍微变化,但其比例相比于以往的同步回旋加速器小。因此,预先以使供给的高频的频率的变化量成为共振特性的例如半值宽度以下的方式,减小加速电极部的共振特性的 Q 值,不使加速电极部的共振频率变化地对加速空隙施加加速电场。

[0049] 在本发明中,在不使带电粒子加速时、即装置的准备阶段中,通过变更加速电极部的共振频率,大幅改变从高频电源 120 供给的高频,能够改变射出带电粒子的能量。图 9 示出加速电极部的共振频率与射出质子的能量的关系。在图 9 中,横轴是射出质子的能量(MeV)且纵轴是共振频率(MHz)。在以 70MeV 射出时,设为约 16MHz 的共振频率即可,在以 230MeV 射出时,设为约 26MHz 的共振频率即可。

[0050] 如图 1 以及图 2 所示,与加速电极 105 连接的加速电极延长电极 107 与高频电磁场结合部 108 连接。在变更射出带电粒子的能量的情况下,在不使带电粒子加速时,使高频电磁场结合部 108 中设置的调谐器 109 向箭头方向移动,从而变更高频电磁场结合部 108 中的电容或者电感。这样,变更加速电极部的共振频率。另外,图 2 的调谐器 119 和图 1 的调谐器 109 的形状不同,但发挥同样的作用,也就是使高频电磁场结合部 108 的电容或者电感变化的作用。在变更射出能量时,在不使带电粒子加速时,使调谐器 109、119 缓慢移动即可,所以能够容易实现所期望的共振频率。

[0051] 在使带电粒子的加速能量变化时,需要变更偏转电磁铁的磁场强度和磁场分布,通过调整图 2 所示的励磁线圈 104 中流过的电流和磁场修正用线圈 202 中流过的电流,对磁场分布进行整形。即,对通过励磁线圈 104 和电磁铁旁轭 101 在磁性空隙中形成的磁场,施加通过在磁场修正用线圈 202 中流过的电流而产生的磁场,从而对磁场分布进行整形。通过磁场修正用线圈 202 施加的磁场的方向与通过励磁线圈 104 和电磁铁旁轭 101 而在磁性空隙中形成的磁场的方向有时相反,在该情况下降低磁场。

[0052] 图 10 示出射出质子的能量不同的情况的偏转磁场的半径方向的平均磁通密度分布。在图 10 中,横轴是半径 R(m)、纵轴是磁通密度 B(T)。a、b、c、d、e 分别是射出能量为

235MeV、190MeV、150MeV、120MeV、70MeV 的情况的磁场分布。通过改变励磁线圈 104、磁场修正用线圈 202 的励磁电流,进行平均磁通密度的磁场整形。

[0053] 图 11 示出通过本发明的圆形加速器使质子加速至 180MeV 的波束轨道解析例。横轴表示加速相位(度)、纵轴表示能量(MeV)。是对从离子源 110 产生 30keV 的质子,并在高频电场和旋绕磁场中如何被加速进行波束轨道解析而得到的结果。以 $x = 0.92$ 来,计算磁场分布。从图可知,形成非常大的纵向的稳定区域,同时被稳定地加速。从高能量的加速粒子逐渐到达射出通道 112 而被取出到加速器外。

[0054] 图 12 示出加速区域的磁场分布、也就是使式(1)所示的平均磁通密度的 x 变化了时的为了对加速电极进行激励而所需的高频电源输出(kW)。在图 12 中,横轴是式(1)的 x 的值、纵轴是高频电源输出(kW)。如图所示, x 的值越接近 1,高频电源输出越小。另一方面,如果进行与图 11 同样的计算,则在 $x > 0.98$ 的情况下,由于起因于偏转电磁铁的误差电磁场的影响,而无法稳定地使带电粒子加速。另外,在 $x < -0.2$ 的情况、即高频功率的值超过 120kW 的情况下,在降低了共振的 Q 值时,加速电极内的发热大,而通常的方法中的水冷变得困难。根据以上, x 的值优选为 $-0.2 < x < 0.97$ 。如果将该条件置换为带电粒子的旋绕频率的变化 Δf ,则相对带电粒子的射出部分的旋绕频率 f_0 ,成为

$$[0055] \quad 0.007 * f_0 < \Delta f < 0.247 * f_0$$

[0056] 即,本发明的偏转磁场的磁场分布成为如下磁场:使带电粒子的旋绕频率在带电粒子的入射至射出的期间,相对射出部分中的带电粒子的旋绕频率,以 0.7% 以上 24.7% 以下的变化量变化。换言之,意味着将本发明的偏转磁场的分布设定为如下那样的磁场分布:产生上述那样的带电粒子的旋绕频率的变化的磁场分布、或者能够通过使所供给的高频的频率如上所述变化而加速的磁场分布。

[0057] 另外,在图 1 的例子中,在圆形加速器的入射位置配置离子源 110 而产生了带电粒子,但即使在加速器的外部产生带电粒子,并使其通过设置于与离子源 110 相同的场所的入射电极,而向加速器内入射(一般被称为外部入射)带电粒子,也起到相同的效果。

[0058] 另外,在图 1 的例子中,通过 RF 功耗负载 111 消耗 RF 功率而减小了 Q 值,但也可以通过在 RF 功耗负载 111 的场所设置耦合器等 RF 功率取出部,取出 RF 功率并在加速器外消耗 RF 功率,来减小 Q 值。

[0059] 如上所述,在本发明的实施方式 1 的圆形加速器中,使式(1)中的 x 成为 1 以外的值,也就是使磁场分布成为以往的回旋加速器的典型的磁场分布与以往的回旋加速器的典型的磁场分布之间的磁场分布。但是,磁场分布也可以并非精确地依照式(1)的磁场分布,也可以使半径整体的两成左右的部分从式(1)有偏差。该偏转磁场的磁场分布成为如下磁场:使带电粒子的旋绕频率在带电粒子的入射至射出的期间,相对带电粒子的射出部分中的旋绕频率,以 0.7% 以上 24.7% 以下的变化量变化。另外,减小加速电极部的共振特性中的 Q 值,而即使供给的高频的频率变化,也不会使加速电极部的共振频率变化地对加速空隙施加加速电场。作为 Q 值,优选为 100 以下,供给的高频的频率变化成为加速电极部的共振特性的半值宽度以下。如果使共振特性的 Q 值过于降低,则高频损失过于增加。

[0060] 通过以上那样的结构,能够通过 1 台加速器改变加速能量,而且在加速中无需使加速电极部的共振频率变化,所以可靠性高,电磁铁的磁场的必要精度是 2×10^{-3} 左右即可,起到得到在组装后无需对磁极进行再加工的圆形加速器这样的效果。

[0061] 实施方式 2.

[0062] 图 13 是示出本发明的实施方式 2 的圆形加速器的概略结构的横截面示意图,是与实施方式 1 的图 2 相当的图。在图 13 中,与图 1、图 2 相同的符号表示同一或者相当的部分。在本实施方式 2 中,如图 13 所示,在磁极面排列多个磁场修正用线圈 202 而以越是外侧成为越强的磁场的方式进行励磁。图 14 示出磁场修正用线圈 202 的更具体的配置的例子。图 14 是从轨道平面观察了电磁铁旁轭 101 的磁极面、即电磁铁凸部 103 和电磁铁凹部 102 交替反复的部分的图。至少在电磁铁凸部 103 的磁极面上以在周方向上流过电流的方式配置了磁场修正用线圈 202。对通过励磁线圈 104 和电磁铁旁轭 101 而在磁性空隙中形成的磁场,施加通过该磁场修正用线圈 202 中流过的电流而产生的磁场,从而对磁场分布进行整形。通过越是外侧的磁场修正用线圈使流过电流越多、或者越是外侧使线圈的密度越高等,越是外侧使磁场越强。在实施方式 1 中,仅在 1 个位置设置了磁场修正用线圈 202,但在本实施方式 2 中,如上所述设置多个磁场修正用线圈 202,以越是外侧使磁场越强的方式进行励磁。

[0063] 接下来,参照图 15,说明磁场修正用线圈 202 的动作。图 15 与前面说明的图 10 同样地,示出质子的能量不同的情况的偏转磁场的半径方向的平均磁通密度分布。a、b、c、d、e 分别是射出能量为 235MeV、190MeV、150MeV、120MeV、70MeV 的情况的磁场分布。例如,通过磁极空隙的形状和励磁线圈 104,生成图 15 的 c 的曲线所示的与 150MeV 相当的偏转磁场的平均磁通密度分布。之后,在将能量变更为 235MeV 的情况下,使励磁线圈 104 的磁动势增加,但仅凭增加磁动势,仅能够得到图 15 的 a1 的虚线所示的偏转磁场的平均磁通密度分布。在该情况下,得不到 a 所示的规定的磁场分布、即得不到用于得到 235MeV 的能量的磁场分布。因此,通过施加由磁场修正用线圈 202 产生的校正磁场,使 a1 所示的磁场分布成为 a 的磁场分布,从而得到能够使射出能量成为 235MeV 的方式加速的磁场分布。另外,在将能量变更为 70MeV 的情况下,使线圈的磁动势减少,但认为仅凭减少线圈的磁动势,仅能够得到图 15 的 e1 的虚线所示的偏转磁场的平均磁通密度分布。在该情况下,得不到 e 所示的规定的磁场分布。因此,通过磁场修正用线圈 202 产生负即逆向的校正磁场,使 e1 所示的磁场分布成为 e 的磁场分布,从而得到能够使射出能量成为 75MeV 的方式加速的磁场分布。

[0064] 图 16 是示出本发明的实施方式 2 的圆形加速器的其他概略结构的横截面示意图。在图 16 中,与图 13 相同的符号表示同一或者相当的部分。认为仅通过图 14 所示那样的电磁铁凸部 103 中设置的磁场修正用线圈 202,特别在电磁铁旁轭 101 产生了磁饱和的情况等下,无法实现最外周附近的急剧的磁场梯度。在该情况下,如图 16 所示,将励磁线圈 104 分割成励磁线圈 104 和磁场修正用线圈 203,即将磁场修正用线圈 203 设置于与励磁线圈 104 的半径方向位置相同的位置。在电磁铁旁轭 101 磁饱和的区域中,通过磁场修正用线圈 203 产生修正磁场,能够实现最外周附近的急剧的磁场梯度。

[0065] 这样,根据本发明,电磁铁的磁场的必要精度是 2×10^{-3} 左右即可,所以作为产生磁场的结构,能够采用如磁场修正用线圈 202、203 那样将线圈配置于适当的位置等各种结构。另外,还起到不需要进行以往的回旋加速器中必需的、在设备组装后对磁极进行再加工等磁场的再调整的效果。

[0066] 实施方式 3.

[0067] 图 17 是示出本发明的实施方式 3 的圆形加速器的概略结构的剖面示意图,是与实施方式 1 的图 1 相当的图。在图 17 中,与图 1、图 2 相同的符号表示同一或者相当的部分。在本实施方式 3 的圆形加速器中,与图 1 相比,高频电磁场结合部 108 中的调谐器的结构不同,将调谐器替换为旋转电容器 129。通过旋转电容器 129 的电极旋转,变更电容,而变更加速电极部的共振频率。在本发明的圆形加速器中,对于加速电极部的共振频率的变更,在变更能量的情况下进行加速电极部的共振频率的变更,且在带电粒子的加速中不进行加速电极部的共振频率的变更。因此,使旋转电容器 129 缓慢旋转几秒钟即可,而无需如以往的不同步回旋加速器那样,在对带电粒子进行加速中以 1kHz 这样的高速进行共振频率的变更,所以能够实现可靠性高的系统。

[0068] 实施方式 4.

[0069] 图 18 是示出本发明的实施方式 4 的圆形加速器的概略结构的剖面示意图,是与实施方式 1 的图 1 相当的图。在图 18 中,与图 1、图 2 相同的符号表示同一或者相当的部分。在本实施方式 4 的圆形加速器中,与图 1 相比,加速电极的结构不同,如图 18 那样,将加速电极 115 仅设置于电磁铁凹部 102(磁极空隙宽的部分)的部分。在该情况下,与在加速电极 115 的两侧的加速空隙 113 中为了设为对带电粒子进行加速的高频电场的相位而使用了图 1 等所示的结构的加速电极的情况相比,将供给的高频的频率提高到 N 倍(N 是 2 以上的正整数)即可。通过设为这样的结构,能够确保加速电极 115 的设置空间,同时减小电磁铁凸部 103(磁极空隙窄的部分)的磁极空隙,所以起到能够确保强的垂直方向的波束聚束力且能够使波束稳定地加速这样的效果。

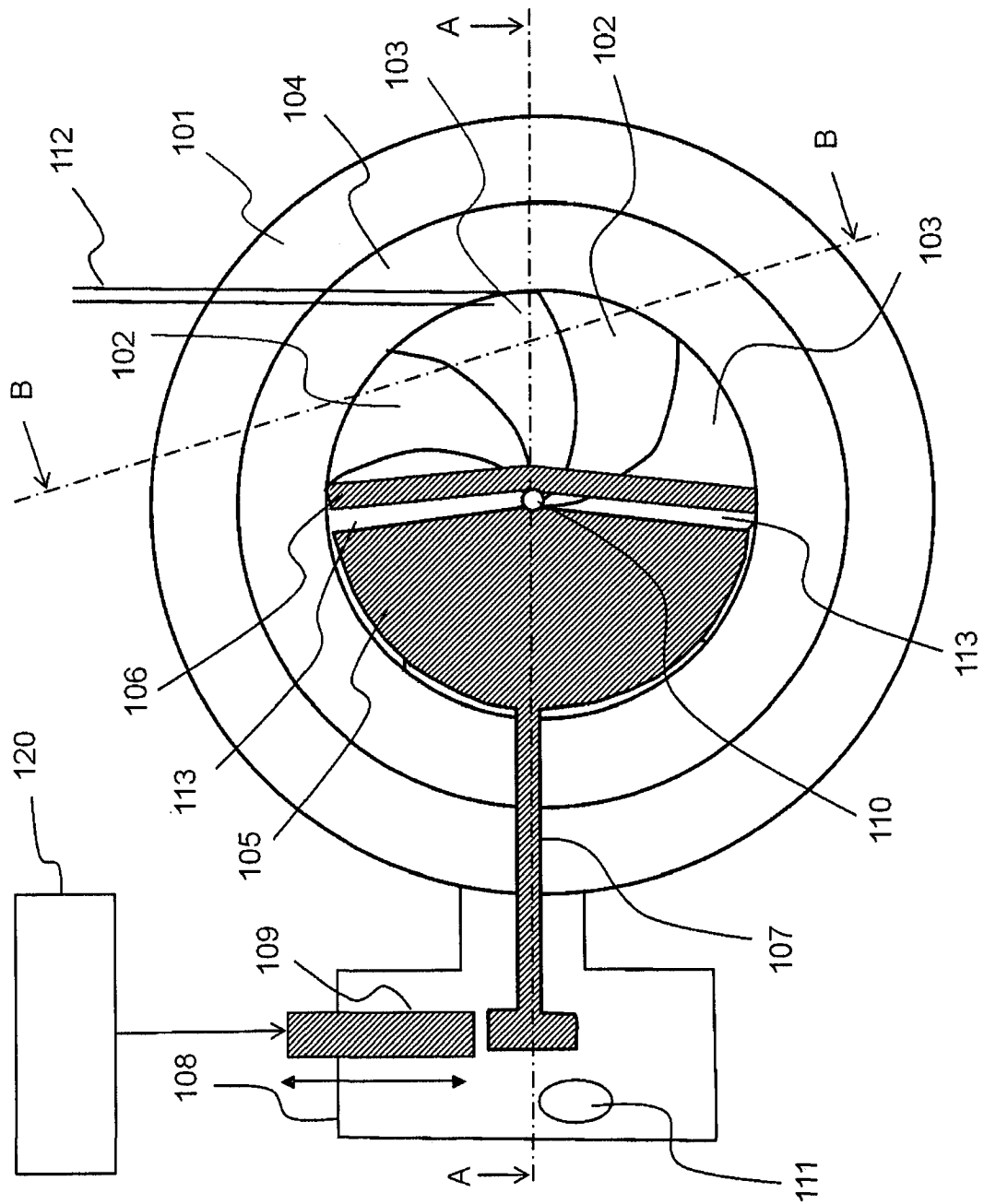


图 1

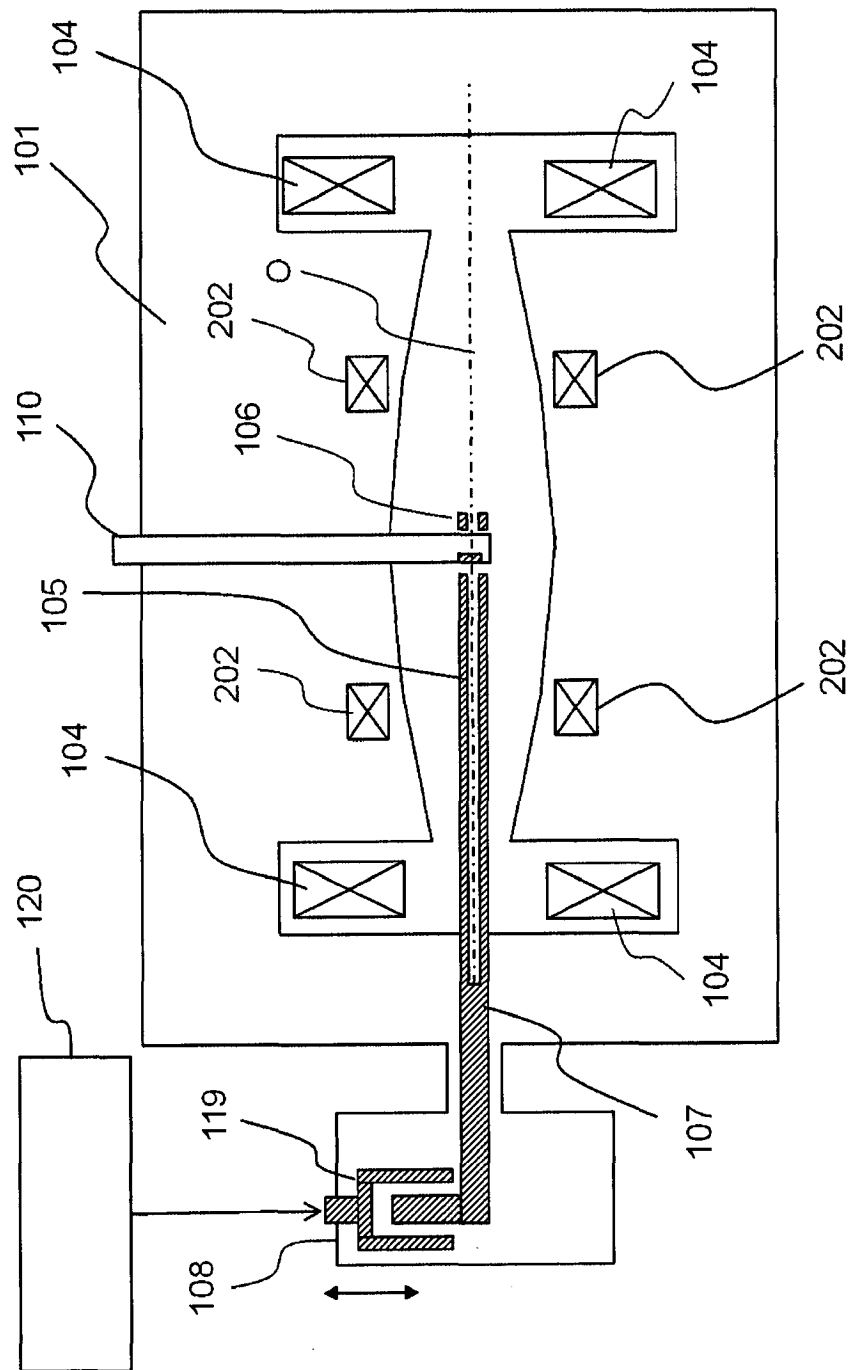


图 2

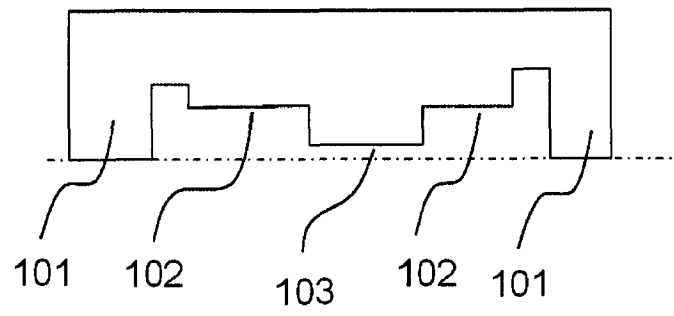


图 3

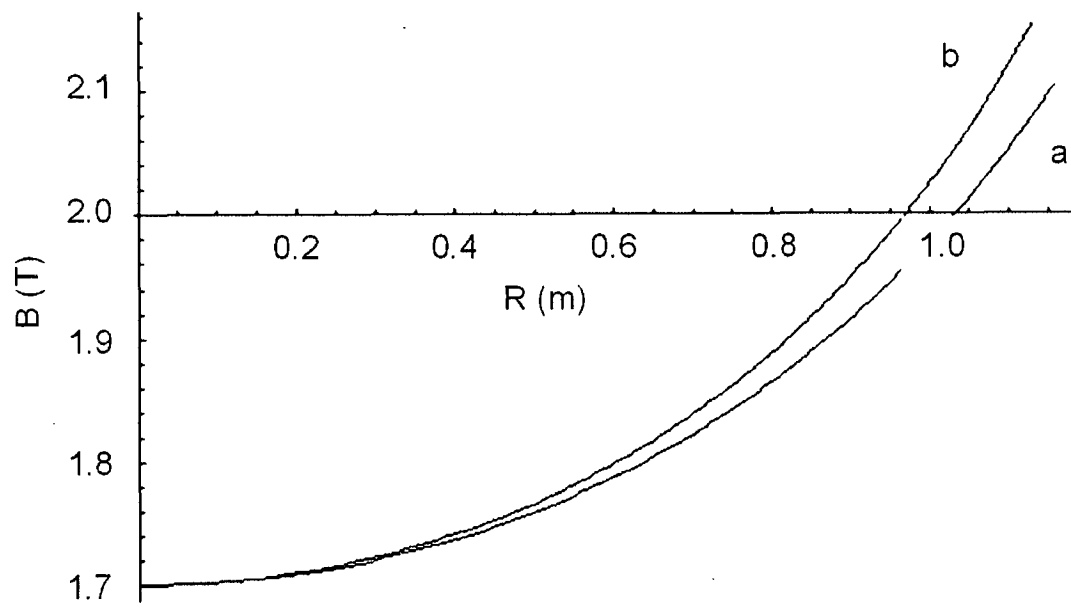


图 4

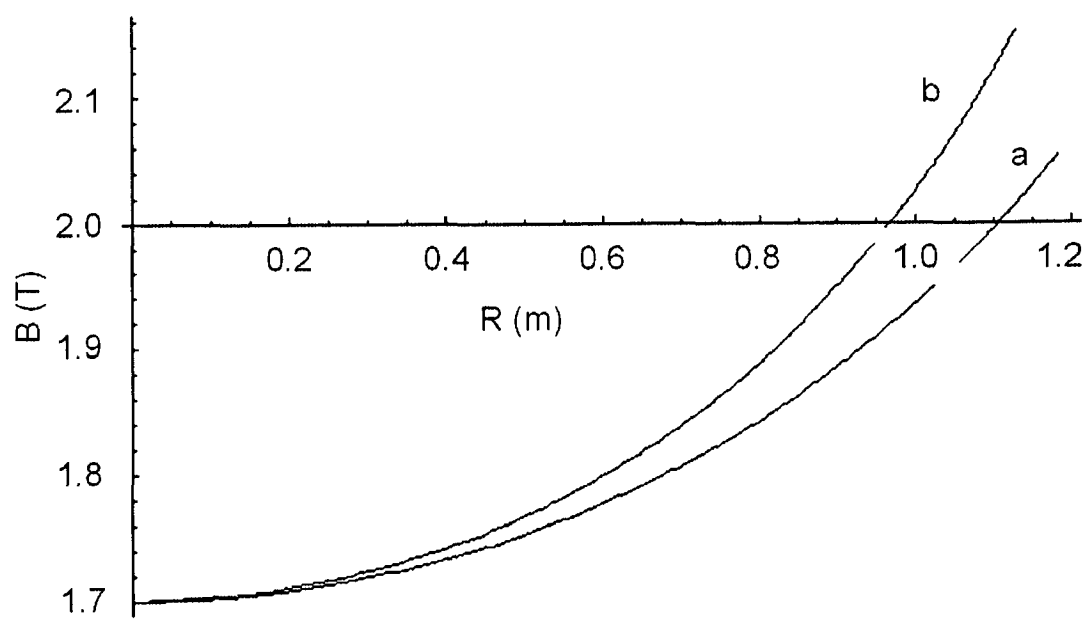


图 5

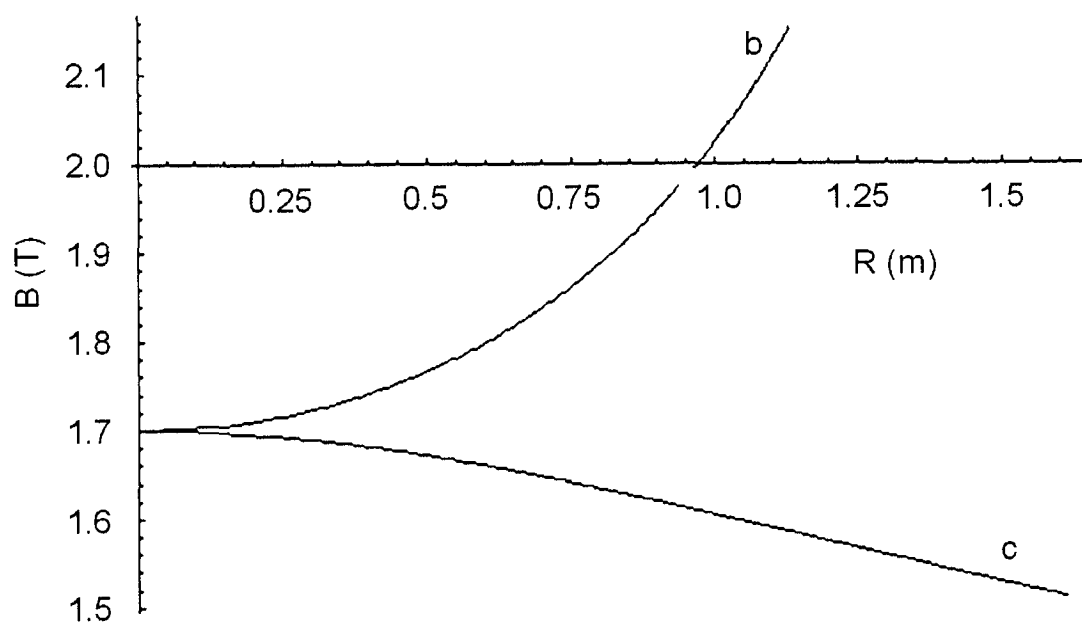


图 6

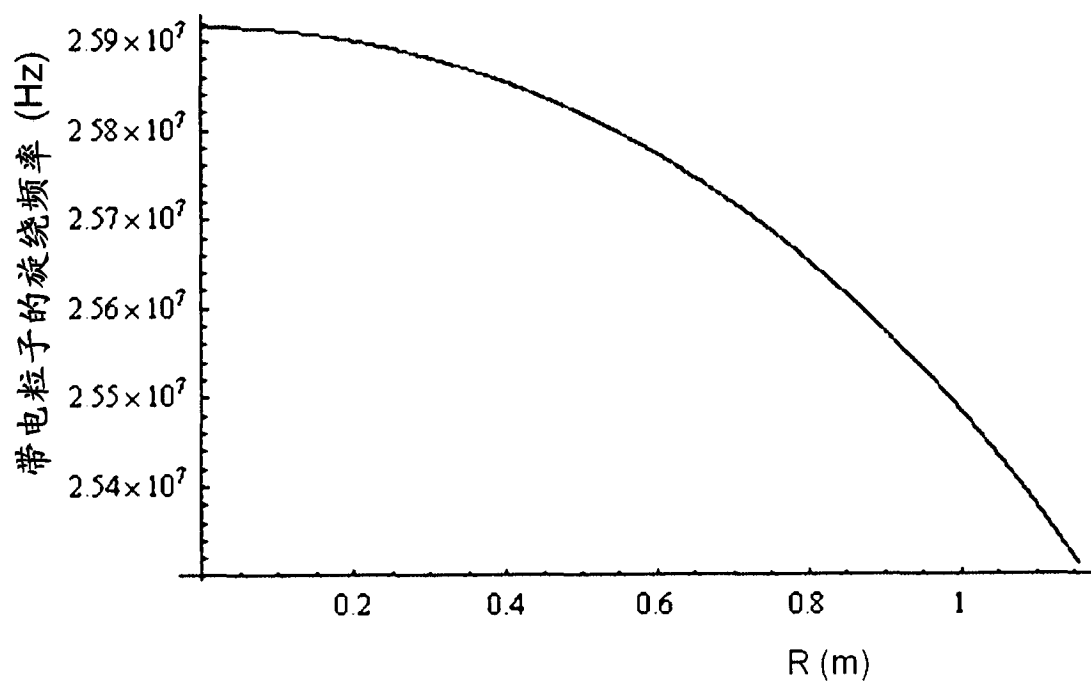


图 7

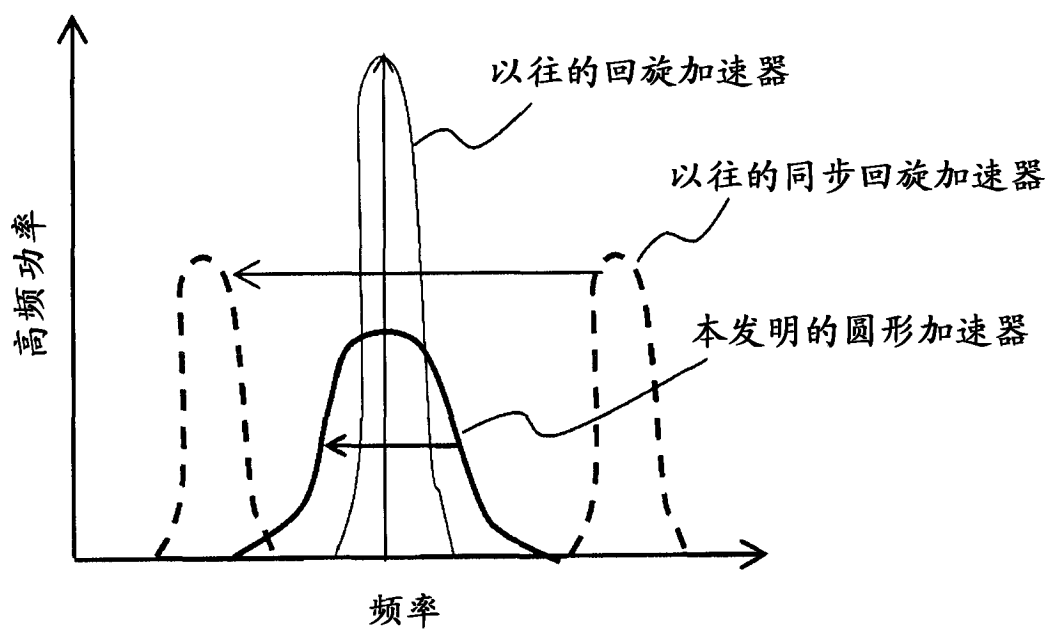


图 8

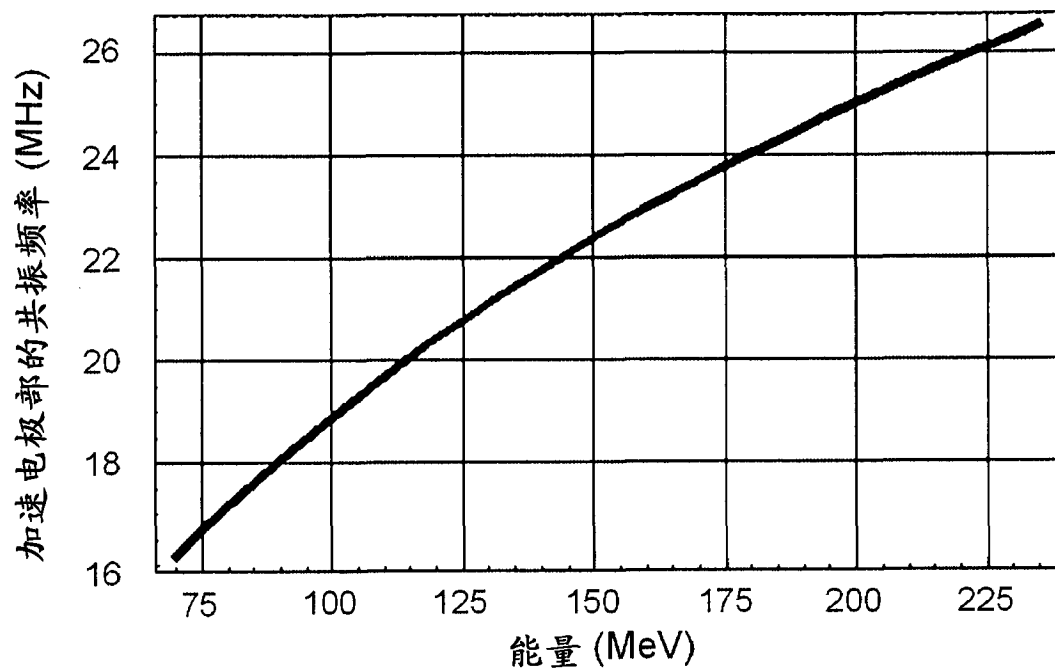


图 9

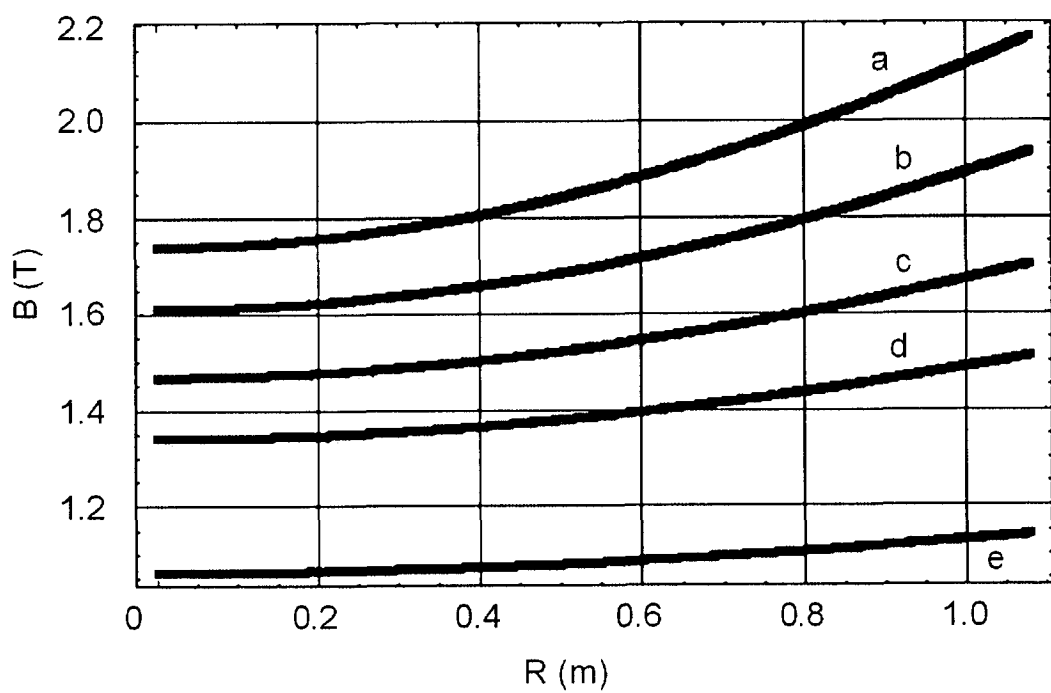


图 10

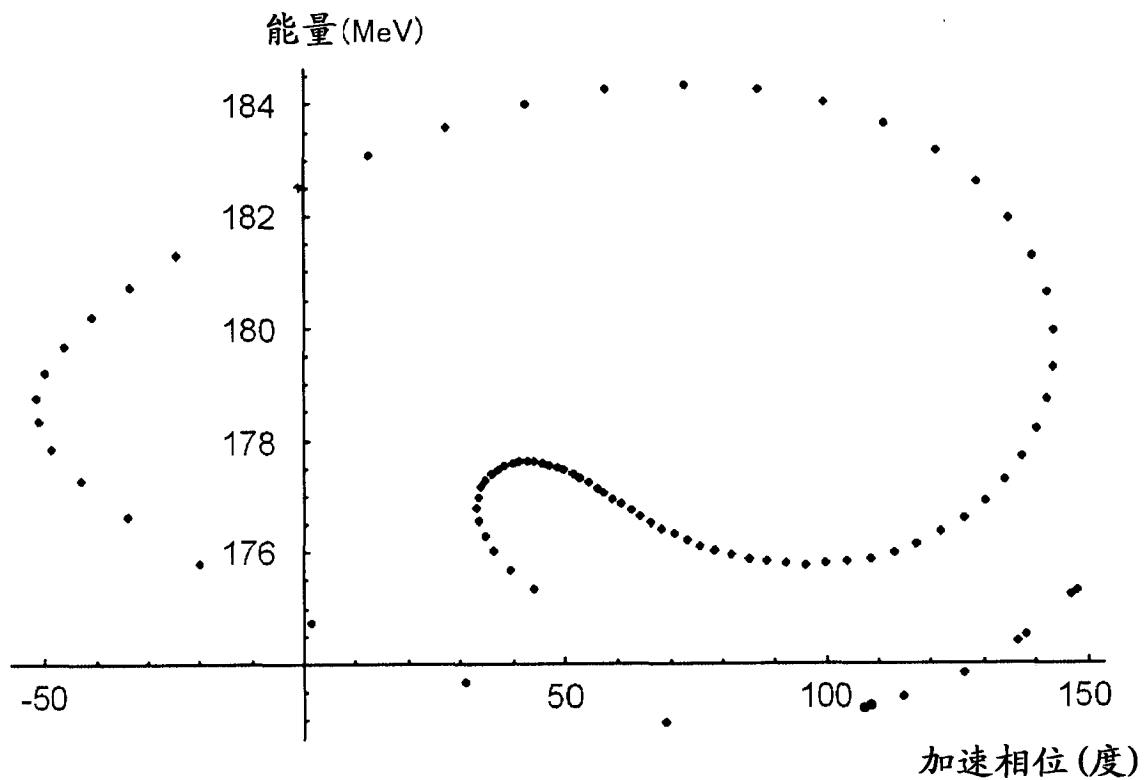


图 11

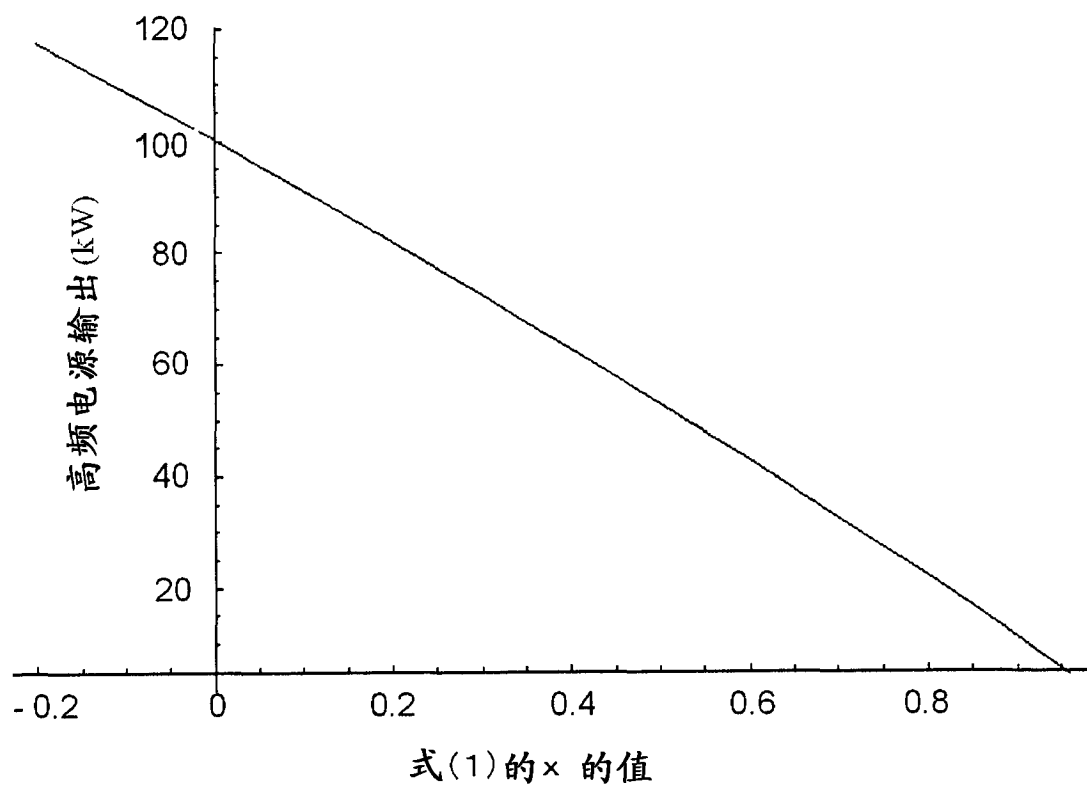


图 12

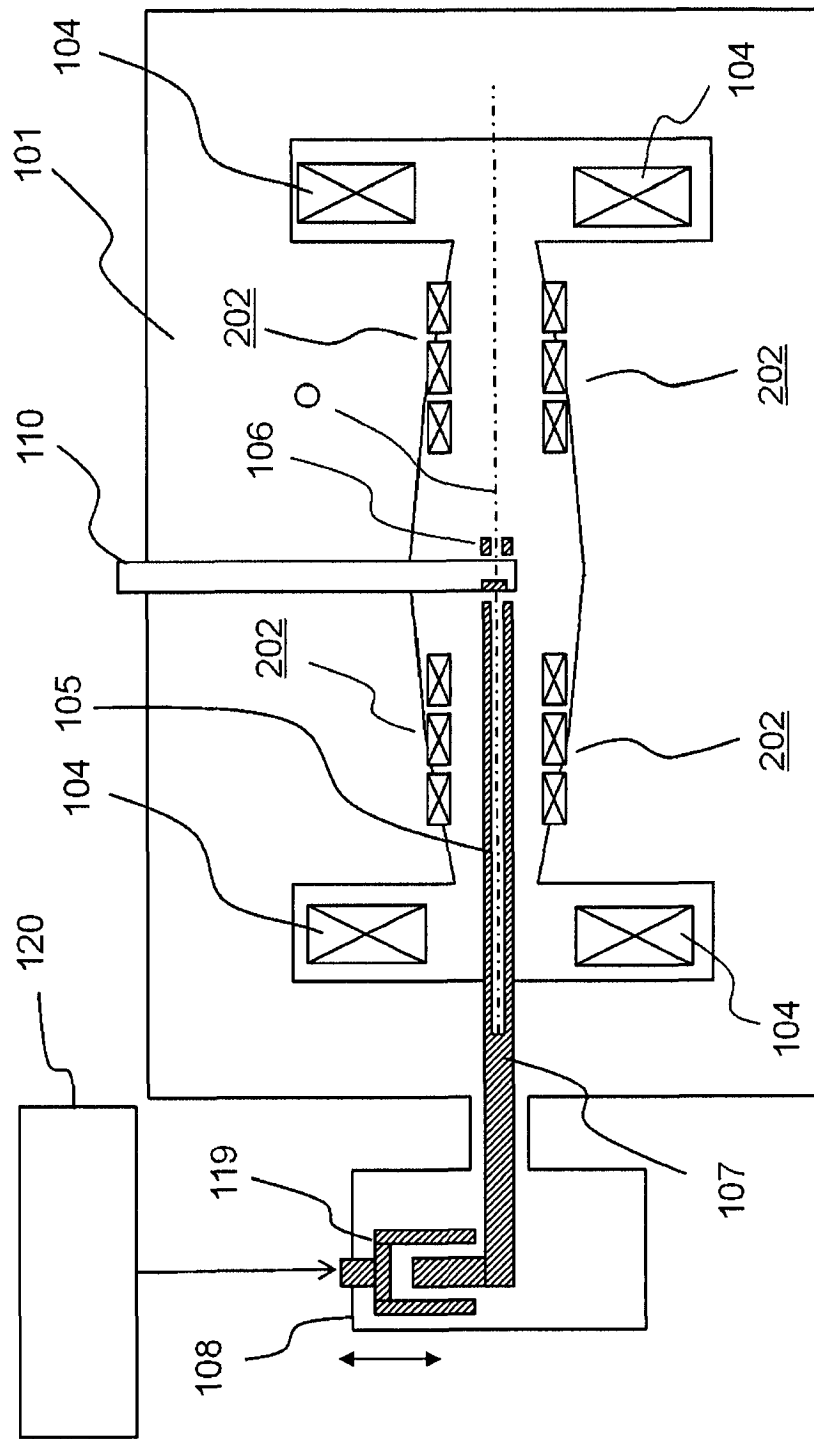


图 13

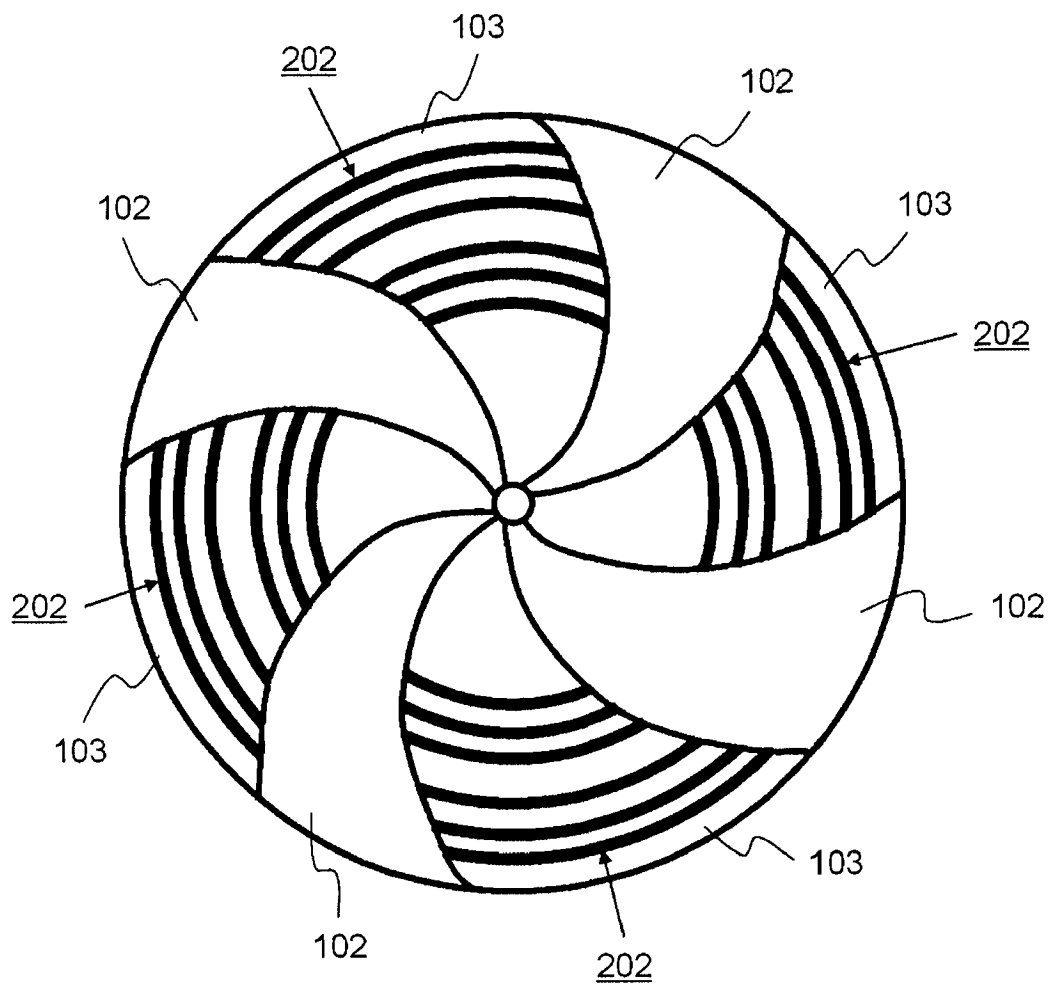


图 14

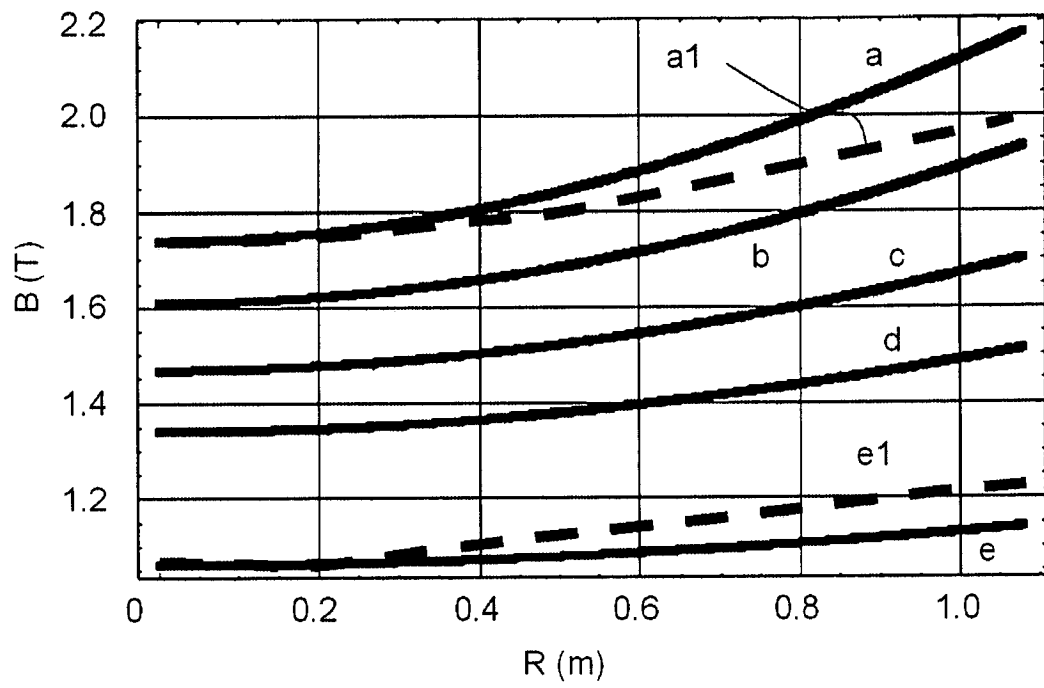


图 15

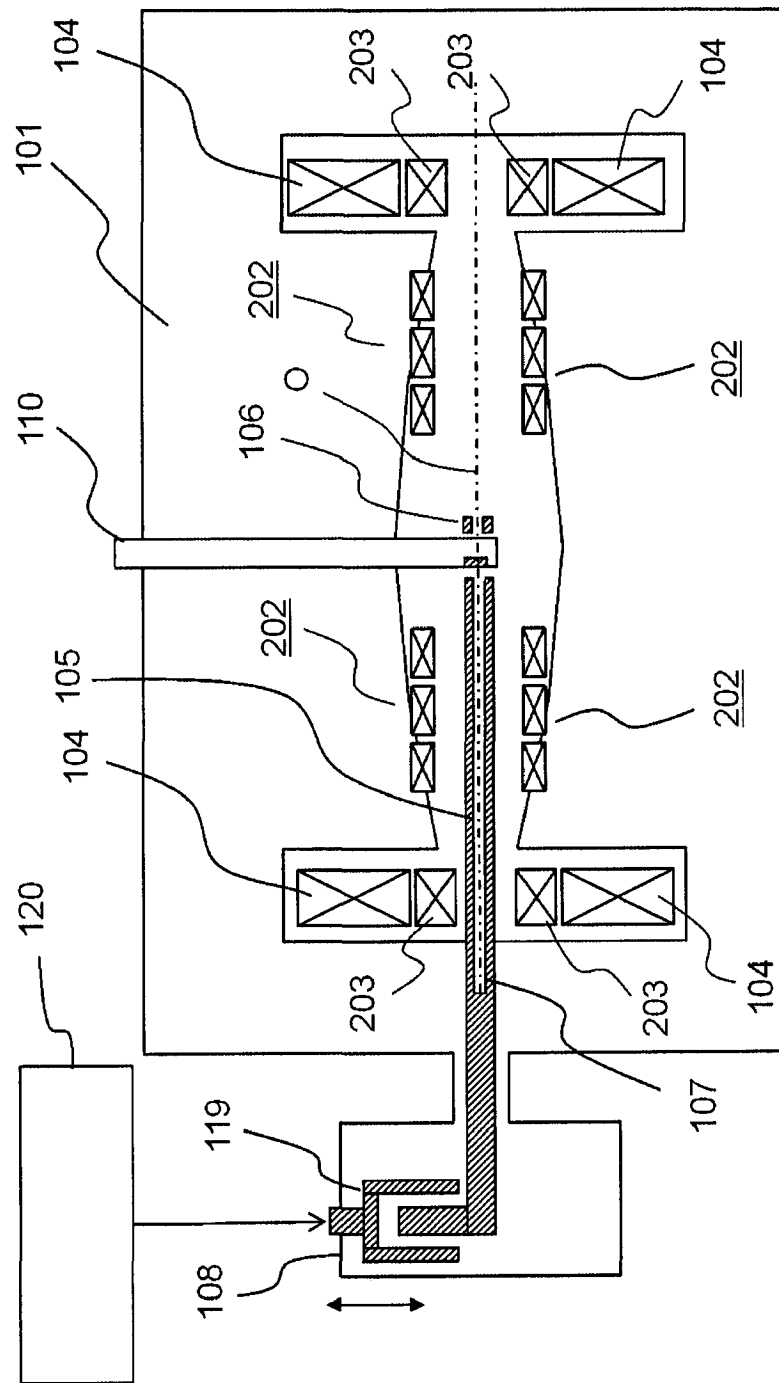


图 16

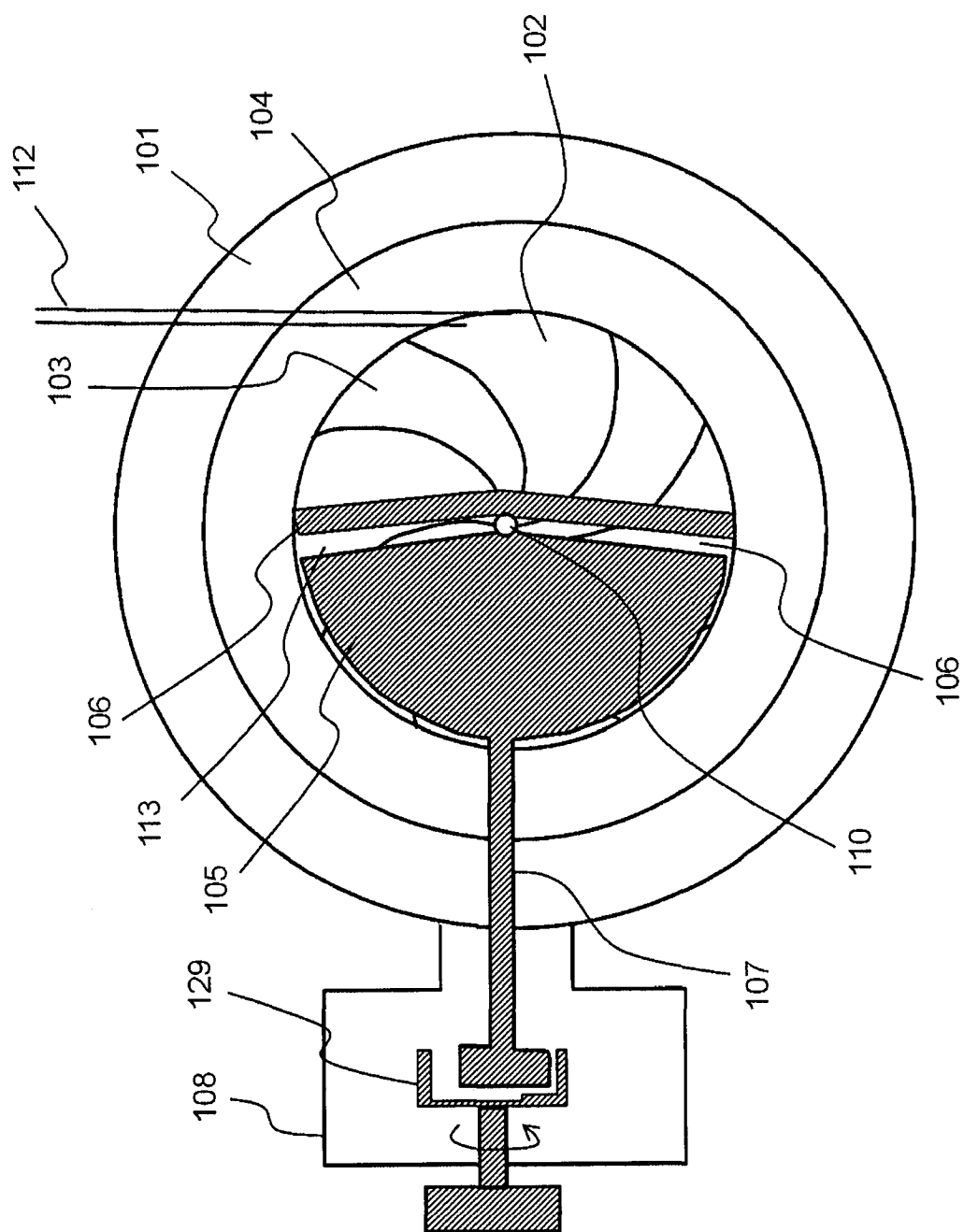


图 17

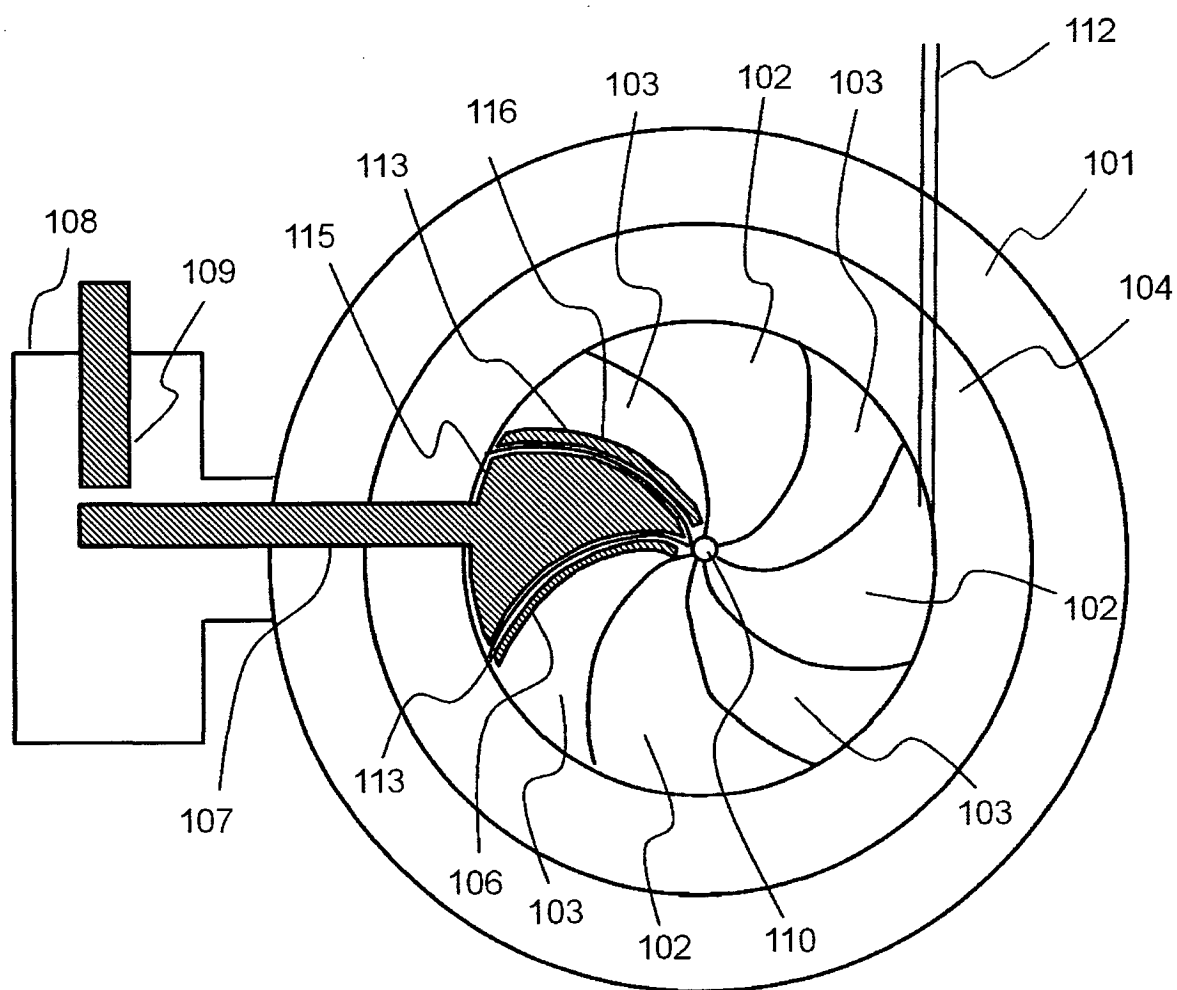


图 18