



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111279801 B

(45) 授权公告日 2022.06.07

(21) 申请号 201880070623.2

(22) 申请日 2018.11.06

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111279801 A

(43) 申请公布日 2020.06.12

(30) 优先权数据
2018-012145 2018.01.29 JP(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2020.04.29(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2018/041159 2018.11.06

(87) PCT国际申请的公布数据

W02019/146211 JA 2019.08.01

(73) 专利权人 株式会社日立制作所

地址 日本东京都

(72) 发明人 羽江隆光 关孝义 斋藤一义
野田文章 青木孝道 平本和夫(74) 专利代理机构 北京银龙知识产权代理有限公司 11243
专利代理人 张敬强 金成哲(51) Int.CI.
H05H 13/00 (2006.01)
A61N 5/10 (2006.01)

审查员 吴小云

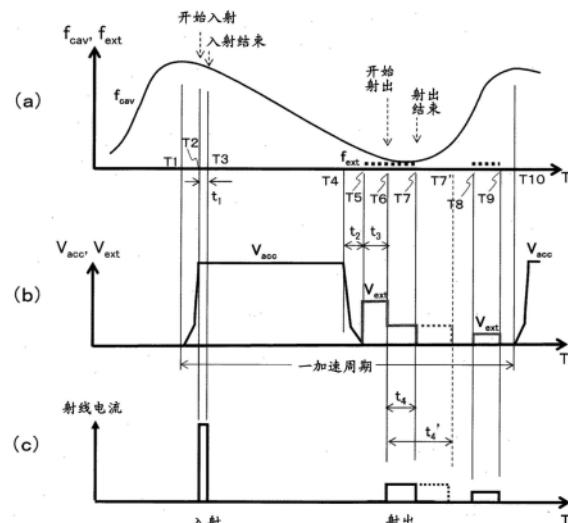
权利要求书2页 说明书10页 附图12页

(54) 发明名称

圆形加速器、具备圆形加速器的粒子线治疗系统以及圆形加速器的运转方法

(57) 摘要

在主磁场中通过施加高频而增加轨道半径并使带电粒子射线加速的圆形加速器中,通过向带电粒子射线施加与使用于加速的高频不同的高频而射出带电粒子射线。由此,在通过在主磁场中施加高频而增加轨道半径并使带电粒子线加速的圆形加速器中能够高精度地控制带电粒子线从圆形加速器中的射出。



1. 一种圆形加速器，其通过在主磁场中施加第一高频而一边增加轨道半径一边使带电粒子射线加速，该圆形加速器的特征在于，

通过在上述圆形加速器内部的上述带电粒子射线的轨道的聚集区域或者上述带电粒子射线的最大能量轨道上施加频率与上述第一高频不同的第二高频而射出上述带电粒子射线。

2. 根据权利要求1所述的圆形加速器，其特征在于，

上述圆形加速器具有施加上述第二高频的高压电极和接地电极，

上述高压电极和上述接地电极以夹着被加速至所期望的能量的上述带电粒子射线通过的轨道的方式设置。

3. 根据权利要求2所述的圆形加速器，其特征在于，

上述第二高频是增大上述带电粒子射线的轨道面内且作为与上述带电粒子射线的轨道正交的方向的水平方向的电子回旋加速振动的振幅的频率。

4. 根据权利要求3所述的圆形加速器，其特征在于，

上述第二高频所包含的高频成分与水平方向的上述电子回旋加速振动的振动数或上述振动数的小数部的任一个和上述所期望的能量的上述带电粒子射线的旋转频率的积大致相同。

5. 根据权利要求1所述的圆形加速器，其特征在于，

二极以上的极数的磁场成分和至少含有四极磁场成分的多重极磁场所存在的磁场区域在上述主磁场中至少具有两处。

6. 根据权利要求5所述的圆形加速器，其特征在于，

上述磁场区域所含有的四极以上的极数的多重极磁场成分是具有上述主磁场向径向外周侧而变强的磁场梯度的第一磁场区域。

7. 根据权利要求6所述的圆形加速器，其特征在于，

上述磁场区域所含有的四极以上的极数的多重极磁场成分是具有上述主磁场向径向外周侧而变弱的磁场梯度的第二磁场区域。

8. 根据权利要求7所述的圆形加速器，其特征在于，

上述第一磁场区域以及上述第二磁场区域位于比上述带电粒子射线在加速中进行旋转的轨道靠外周侧。

9. 根据权利要求7所述的圆形加速器，其特征在于，

若上述带电粒子射线被加速至所期望的能量，则截断上述第一高频，启用上述第二高频。

10. 根据权利要求9所述的圆形加速器，其特征在于，

在开始施加用于上述射出的高频之后，在射线到达上述第一磁场区域或上述第二磁场区域之前，以降低或截断上述第二高频的电压的方式进行控制。

11. 根据权利要求10所述的圆形加速器，其特征在于，

改变上述第二高频的施加时间、或在截断之后再次施加上述第二高频。

12. 根据权利要求1所述的圆形加速器，其特征在于，

上述圆形加速器具备：

包括形成上述主磁场且对置地配置的主磁极的主电磁铁；

向上述主磁极之间射入上述带电粒子射线的离子源；
配置于上述主磁极之间且施加上述第一高频的加速间隙；以及
从上述主磁场中向上述圆形加速器的外部射出上述带电粒子射线的射出路径，
上述加速间隙对上述第一高频进行频率调节。

13. 根据权利要求1所述的圆形加速器，其特征在于，

上述圆形加速器具备：

包括形成上述主磁场且对置地配置的主磁极的主电磁铁；

向上述主磁极之间射入上述带电粒子射线的离子源；

配置于上述主磁极之间且施加上述第一高频的加速间隙；以及

从上述主磁场中向上述圆形加速器的外部射出上述带电粒子射线的射出路径，

上述带电粒子射线进行旋转的轨道向某一方向偏移。

14. 一种粒子线治疗系统，其特征在于，

具备权利要求1所述的圆形加速器和向患者照射射线的照射装置。

15. 一种圆形加速器的运转方法，其是通过在主磁场中施加第一高频而一边增加轨道半径一边使带电粒子射线加速的圆形加速器的运转方法，该圆形加速器的运转方法的特征在于，

通过在上述圆形加速器内部的上述带电粒子射线的轨道的聚集区域或者上述带电粒子射线的最大能量轨道上施加频率与上述第一高频不同的第二高频而射出上述带电粒子射线。

圆形加速器、具备圆形加速器的粒子线治疗系统以及圆形加速器的运转方法

技术领域

[0001] 本发明涉及粒子线的圆形加速器、利用该圆形加速器的粒子线治疗系统、圆形加速器的运转方法。

背景技术

[0002] 在粒子线治疗中经常使用使射线旋转而加速的圆形加速器。即使在其中,使用超导线圈的同步回旋加速器对治疗设施的小型化、低成本也是有效的。在非专利文献1中公开了用于粒子线治疗的同步回旋加速器。同步回旋加速器中的射线在时间性恒定的主磁场中增加轨道的曲率半径并进行旋转,在旋转途中每次通过加速高频电场产生的加速间隙获得能量而被加速。由于主磁场是非等时性磁场,因此为了维持加速条件需要调节加速高频电场的频率,某频率调节模式在msec顺序的加速周期内被重复。即,反复若入射并被加速的射线到达最高能量则向加速器外射出的加速周期。

[0003] 在专利文献1中公开了在粒子线治疗中一般性的扫描照射法。射出的射线经过照射装置而照射患者患部。此时如果是粒子线治疗中一般的扫描照射方式,则配合患部形状,用扫描线圈使射线在与射线行进方向垂直的方向上扫描。另外,在射线行进方向上通过改变射线的能量并调整射程而配合患部形状地进行照射。

[0004] 现有技术文献

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:日本特开平10-118204号公报

[0007] 非专利文献

[0008] 非专利文献1:W.Kleeven, "The IBA Superconducting Synchrocyclotron Project S2C2", Proceedings of Cyclotrons 2013

发明内容

[0009] 发明所要解决的课题

[0010] 在非专利文献1的同步回旋加速器中重复若入射到加速器内的射线被加速至到达最高能量并通过回热器向加速器外射出这样的加速周期。即,重复具有脉冲状的时间结构的射线入射一脉冲、脉冲状的射线从一脉冲加速器射出的加速周期。被射出的射线量依存于入射的脉冲量与加速、射出的过程,任意地控制射出的射线脉冲的长度、电荷量是困难的。另外,由于还存在射出的射线电荷量被离子源中的离子生成量的时间变动、加速高频电场的时间性的稳定性等左右而每个加速周期不均的课题。

[0011] 在此,在扫描照射中,为了防止对患部的过少、过大照射,要求对每个照射点高精度的线量控制。可是,用同步回旋加速器进行扫描照射的情况下,如前述,仅用一加速周期中射出的一脉冲的射线电荷适量地照射一点量要求的线量困难。也会考虑调整离子源而抑制入射射线电荷或降低加速高频电压等至少抑制射出射线电荷,通过多脉冲量地射出低电

荷的射线照射一点量的线量的方法。可是,在该方法中,作为单位时间照射量的线量率降低,在一次治疗中需要时间,降低患者处理量。

[0012] 因此,本申请的目的在于在通过在主磁场中施加高频增加轨道半径并使带电粒子线加速的圆形加速器中高精度地控制带电粒子射线从圆形加速器的射出而提高线量率。

[0013] 用于解决课题的方案

[0014] 在通过在主磁场中施加高频增加轨道半径并加速带电粒子束的圆形加速器中,通过向带电粒子射线施加与用于加速的高频频率不同的高频来射出带电粒子线。

[0015] 发明效果

[0016] 如果在通过在主磁场中施加高频增加轨道半径并使带电粒子线加速的圆形加速器中适用本发明,则能通过用于射出的高频高精度地控制每一加速周期的射出射线电荷。

附图说明

[0017] 图1是实施例1的圆形加速器的外观。

[0018] 图2是实施例1的圆形加速器的剖面结构。

[0019] 图3是图2的B-B' 向视图。

[0020] 图4是实施例1的高频喷射器的剖面结构。

[0021] 图5是从图4的B观察的高频喷射器的俯视图。

[0022] 图6是图2以及图10的A-A' 向视图。

[0023] 图7是图6的直线r上的主磁场分布图。

[0024] 图8是表示实施例1的加速器运转模式的图。

[0025] 图9是实施例1的加速高频电源、高频喷射器电源以及控制系统的方框图。

[0026] 图10是表示实施例1的粒子线治疗系统的整体结构的图。

[0027] 图11是实施例2的圆形加速器的剖面结构。

[0028] 图12是表示实施例2的圆形加速器的各能量之外的射线轨道的图。

[0029] 图13是实施例2的高频喷射器的剖面结构。

具体实施方式

[0030] 以下,使用附图说明本发明的实施例。而且,下述只不过是实施例,并不并不是将发明的内容限定于下述的具体方式的意思。发明自身可在下述实施例以外变形为多种形式。

[0031] 另外,涉及本发明的圆形加速器能够细致地控制射出的射线量,适于粒子线治疗系统、尤其是使用扫描照射法的粒子线治疗系统,但并不限于粒子线治疗系统的适用。

[0032] 实施例1

[0033] 说明作为本发明的优选的一实施例的实施例1的圆形加速器。本实施例的圆形加速器39是时间性地在恒定强度的主磁场中通过调频了的高频电场加速质子的射线的装置。该射出射线的能量例如是235MeV。

[0034] 在图1中表示圆形加速器39的外观,在图2中表示圆形加速器39的横剖面的构成图,在图3中表示圆形加速器30的纵剖面的构成图(图2的B-B' 向视图)。

[0035] 圆形加速器39通过可在上下方向上分割的主电磁铁40形成其外壳,主电磁铁40内

部的射线加速区域被抽真空。

[0036] 在主电磁铁40的上部设置生成用于向主电磁铁40入射的离子射线的离子源53。由离子源53生成的射线经过低能量射线输送系统54,从设置于上侧的主磁极38的中心附近的离子入射部52射入主电磁铁40内部的射线加速区域。作为离子源53能够适用ECR离子源等。并且,离子源53可以配置于主电磁铁40内部的被抽真空的射线加速区域内部,在该情况下,PIG型离子源等是合适的。

[0037] 主电磁铁40由主磁极38(参照图6)、磁轭41、主线圈42构成。磁轭41形成主电磁铁40的外观,在内部构成大致圆筒状的区域。主线圈42是圆环状的线圈,沿磁轭41的内壁设置。主线圈42是超导线圈,在主线圈42周围设置低温恒温器60而冷却。在主线圈42的内周侧以上下对置的方式设置主磁极38。通过在主线圈42中流经电流而被激发,将由主磁极38形成的上下方向的磁场称为主磁场。另外,加速区域称为用于加速主磁场中的射线的区域。

[0038] 在磁轭41中具有多个贯通孔。在上下磁极的连接面上设置用于射出其中被加速的射线的射线用贯通孔46、用于向外部引出磁轭41内部的多种线圈导体的线圈用贯通孔48、抽真空用贯通孔49、用于高频加速空腔10的高频系统用贯通孔50。

[0039] 高频加速空腔10是 $\lambda/2$ 共振型空腔,具有d型盒电极12、虚拟d型盒电极13、内导体14、外导体15、旋转电容器30。d型盒电极12是D字型的中空电极,与内导体14连接。虚拟d型盒电极13是接地电位的电极,与包覆内导体14的外导体15连接。虚拟d型盒电极13的形状不需要是D字型的中空形状,在与d型盒电极12之间形成加速间隙11。

[0040] 输入连接器20是用于向高频加速空腔10供给高频电力的设备,通过静电结合式或磁力结合式相对于内导体14进行连接。从加速高频电源25向输入连接器20供给电力,从外部通过输入连接器20对内导体14供给高频电力。由此,在d型盒电极12与虚拟d型盒电极13之间的加速间隙11中产生用于加速射线的高频加速电压、由高频加速电压产生的高频电场。

[0041] 旋转电容器30是用于调制高频加速空腔10的共振频率的设备,包括电机31、固定电极32、与固定电极32对置的旋转电极33。固定电极32形成在内导体14上。另外,旋转电极33虽然邻接于外导体15、未与外导体15物理性地连接,但是通过静电容量与外导体15电连接。并且,可以是在外导体15上形成固定电极32、旋转电极33静电结合于内导体14的结构。

[0042] 旋转电容器30通过用电机31使旋转电极33旋转,使固定电极32与旋转电极33的对置部面积变化,时间性地使形成于与固定电极32之间的静电容量变动。通过使静电容量时间性地变动,改变高频加速空腔10的共振频率,形成频率调节模式。通过旋转电容器30进行了频率调节的加速电压产生于d型盒电极12与虚拟d型盒电极13之间的加速间隙11。图2所示的加速间隙11表示谐波数为1的情况、即轨道频率与加速频率相同的情况,根据射线的轨道形状形成。

[0043] 圆形加速器39作为用于射出射线的设备,具有高频喷射器70、隔垫线圈43、高能射线输送系统47。被加速的射线从射线射出路径入口82向加速区域外射出。隔垫线圈43配置于该射线射出路径入口82。并且,隔垫线圈43可以在射线行进方向上分割为两个以上而配置。用于从主电磁铁40的内部向外部输送射出射线的高能射线输送系统47连接于隔垫线圈43,通过射线用贯通孔46而配置至主电磁铁40的外部。高频喷射器70是向通过自身内部的圆周射线施加高频电压的设备。隔垫线圈43是用于使射线向水平方向外周侧偏转的线圈,

具有线圈导体43-1和线圈导体43-2。隔垫线圈43将加速区域与线圈导体43-1隔开地接触。通过在线圈导体43-1、43-2中流经电流而在隔垫线圈43内部产生相对于射线圆周轨道鉛垂方向的磁场。通过该磁场,在隔垫线圈43内部行进的射线偏转,向高能射线输送系统47中前进。并且,隔垫线圈43可以是具备铁芯等的磁性体型芯的结构。另外,隔垫线圈43只要能使进入内部的射线向高能射线输送系统47的方向偏转,也能够由不使用线圈而仅使用磁性体、永久磁铁的被动的结构代替。

[0044] 另外,在主电磁铁40的内部形成作为由二极磁场、多重极磁场形成的扰乱磁场的剥离磁场区域44与再生磁场区域45。在射线射出中使用高频喷射器70、剥离磁场区域44、再生磁场区域45、隔垫线圈43、及高能射线输送系统47。关于射线射出的详细内容后述。

[0045] 在此,关于在圆形加速器39中射入射线之后至射出的射线的动作简单地进行说明。

[0046] 首先,在离子源53中生成的带电粒子的射线通过低能射线输送系统54,从离子入射部52射入主电磁铁40内部的射线加速区域。入射的射线在高频电场中被加速,一边增加能量一边在主磁场中旋转。射线随着被加速而增加其轨道的曲率半径,射线从加速区域的中心向外侧描绘螺旋状的轨道。

[0047] 在此,在射线加速区域内,将射线开始加速直至成为最大能量(例如,235MeV)之前所通过的轨道称为旋转轨道。在旋转轨道中,将最大能量的射线所通过的轨道称为最大能量轨道80。另外,将旋转轨道描绘螺旋的面称为轨道面或轨道平面。另外,将从作为将加速区域的中心作为原点的轨道面的二维坐标系时的中心的半径外侧方向的轴作为r轴。

[0048] 该旋转时,射线的带电粒子向与射线的轨道正交的方向振动,将该振动称为电子回旋加速振动、将该振动的振动频率称为电子回旋加速振动频率。另外,将每旋转一周的振动频率称为谐波,将每旋转一周向轨道面外侧的射线的r轴上位移称为转向分离。另外,旋转的射线将轨道面内且与射线的轨道正交的方向的电子回旋加速振动称为水平方向的电子回旋加速振动、将谐波称为水平方向谐波。该电子回旋加速振动具有若施加适合的高频电压则产生共振而振幅急剧增大的性质。

[0049] 主磁场除了在圆周方向上使主磁场强度为恒定的类型以外,也可以是AVF(Azimuthal Varying Field)型,但由于任何情况下主磁场分布都是非等时性磁场,因此满足式(1)中表示的n值比0大且小于1的射线稳定化条件。

[0050] [数1]

$$[0051] n = -\frac{\rho}{|B|} \frac{\partial B}{\partial r} \quad \cdots (1)$$

[0052] 在此,ρ为设计轨道的偏转半径,B是磁场强度,dB/dr是径向的磁场梯度。在上述的射线稳定化条件中,在从设计轨道向径向微小地偏移的射线受到如返回设计轨道那样的复原力的同时,向相对于轨道面垂直方向偏移的射线也在返回轨道面的方向上从主磁场受到复原力。即,射线在设计轨道附近进行电子回旋加速振动,能够稳定地旋转、加速射线。另外,在全能量的射线中,平行于轨道面内且与轨道正交的方向的电子回旋加速振动频率(水平方向谐波)v_r设定为接近1的值。

[0053] 上述主磁场分布通过主磁极38、及设置于主磁极38的表面的微调线圈(未图示)、

磁极片(未图示)而形成。这些形成主磁场分布的构成元件由于相对于轨道平面对称地配置,因此主磁场在轨道平面上只具有与轨道平面垂直的方向的磁场成分。

[0054] 在该主磁场中若射线被加速至最大能量,则在加速间隙11中停止用于加速射线的高频加速电压,射线在最大能量轨道80上旋转。并且,若射线进入设置于最大能量轨道80上并施加高频的高频喷射器70,则施加高频电压,射线的电子回旋加速振动振幅增大。

[0055] 电子回旋加速振动振幅增大了的射线不久在最大能量轨道80的外周侧上到达从最大能量轨道80间隔某距离而设置的剥离磁场区域44与再生磁场区域45。到达剥离磁场区域44的射线碰撞轨道面的外周侧,到达再生磁场区域45的射线碰撞轨道面的内周侧。在此,所谓碰撞是指通过施加电场或磁场使射线偏转的情况。因由剥离磁场区域44的四极磁场成分而产生的碰撞,射线进一步增大电子回旋加速振动振幅,转向分离增大。同时,通过再生磁场区域45的磁场,射线的水平方向谐波不会剧烈地变动,在射出射线之前的期间,电子回旋加速振动在与水平方向90度正交的垂直方向上发散而防止射线损失。若得到充足的转向分离,射线进入隔垫线圈43,在轨道面外侧上碰撞,通过高能射线输送系统47,向圆形加速器39的外侧射出。

[0056] 就转向偏离的增大幅度而言,相比于高频喷射器70产生的幅度,由剥离磁场区域44与再生磁场区域45引起的增幅更大。因此,通过调整由高频喷射器70施加的高频电压,能调整在最大能量轨道80上旋转的射线中、到达剥离磁场区域44与再生磁场区域45的射线的量。即,在现有的圆形加速器中,在射线到达最大能量之后,不进行射出电荷量的控制而全部射出。相对于此,通过在射线射出途中停止向高频喷射器70的高频施加,射线不会到达剥离磁场区域44与再生磁场区域45,能够中断从圆形加速器39中的射线射出。通过在高频喷射器70中重启施加也能够实现射线射出的重启。

[0057] 另外,通过控制向高频喷射器70施加的电压的强度、高频的振幅、相位、频率的任一个,能够控制从圆形加速器39中射出的射线的强度。

[0058] 而且,在现有的圆形加速器中,由于离子源中的离子生成量的时间变动、加速高频电场的时间性的稳定性等,射出的射线电荷量在每个脉冲中不均。相对于此,在本技术中,通过调整向高频喷射器70施加的电压,吸收影响这些射线稳定性的因素而能够高精度地控制射出射线的电荷量。

[0059] 在图4中表示高频喷射器70的剖面构成。另外,在图5中表示从图4中C方向观察高频喷射器的俯视图。高频喷射器70由接地电极71与高压电极72构成。两电极以夹住最大能量轨道80的方式,内周侧的接地电极71、外周侧的高压电极72对置配置。并且,接地电极71与高压电极72以高频电场在轨道面内与轨道正交的方向上进行作用的方式确定形状、即接地电极71与高压电极72大致平行于最大能量轨道80的曲线的形状。在接地电极71中安装金属制的突起部73,也能够提高在接地电极71与高压电极72之间生成的高频电场的集中。施加高频电压的高压电极72被绝缘支撑。在圆筒状的加速区域中,射线在该圆筒的高度方向正中央附近描绘轨道平面。在射线与接地电极71、高压电极72中一起通过的轨道平面附近具备通过口。该通过口考虑因射线的电子回旋加速振动而引起的扩大,可以是不会引起射线碰撞程度的宽度。本实施例的高频喷射器70如图5所示是端面打开的形状,但除了射线通过口以外用接地电极堵塞端面,也能够为共振器结构。高频喷射器70只要配置在最大能量轨道80上就在哪里都可以,例如如图2所示配置于射线输出路径入口82的附近。

[0060] 剥离磁场区域44、再生磁场区域45是存在作用于射线的多重极磁场的区域。在该多重极磁场中至少包括四极磁场成分,也可以包括四极以上的多极磁场、或二极磁场。在剥离磁场区域44中为向径向外周侧而弱化主磁场的方向的磁场梯度,在再生磁场区域45中为相反地向径向外周侧而强化主磁场的方向的磁场梯度。并且,作为剥离磁场区域44也能够利用磁极端部的主磁场减少的区域。剥离磁场区域44、再生磁场区域45在最大能量轨道80的外周侧分别配置于夹住射线射出路径入口82的方位角区域。另外,为了在通过高频喷射器70增大电子回旋加速振动振幅之前射线不会在剥离磁场区域44或再生磁场区域45中推进,剥离磁场区域44与再生磁场区域45优选从最大能量轨道80中隔开比电子回旋加速振动的共振前的振幅量大的宽度而配置于外周侧。另外,优选相对于射线行进方向在上游侧配置剥离磁场区域44、在下游侧配置再生磁场区域45,但也可以相反。并且,在图2中分别各设置一个剥离磁场区域44与再生磁场区域45,也可以在主磁场中设置于多处。

[0061] 在剥离磁场区域44以及再生磁场区域45的附近用非磁性材料固定配置磁性体制的多个磁极片或线圈、或其两者,形成所期望的多重极磁场。例如,关于剥离磁场区域44以及再生磁场区域45的各个,用多个磁极片形成多重极磁场、用线圈形成二极磁场。多个磁极片与线圈既能靠近配置,也能够配置于空间上离开的位置。

[0062] 在图6中表示作为图1的A-A'向视图的再生磁场区域45的磁极片配置例。作为磁极片使用在再生磁场区域45中产生磁场梯度的磁场梯度用垫片36、用于磁场梯度用垫片36消除产生于最大能量轨道80的内周侧的不需要磁场的磁场修正用垫片37。另外,图6举例说明再生磁场区域45,但关于剥离磁场区域44也使用在剥离磁场区域44中也产生磁场梯度的磁场梯度用垫片36、用于磁场梯度用垫片36消除产生于最大能量轨道80的内周侧的不需要磁场的磁场修正用垫片37。

[0063] 图7表示图6中r轴上的主磁场的分布。在最大能量轨道80之前,磁场梯度 dB/dr 稍稍下降,式(1)的n值满足稳定化条件而射线稳定地旋转。可是,在再生磁场区域45中,磁场梯度剧烈地上升,射线不稳定而碰撞于轨道面内周侧。另外,在剥离器磁场区域44中与再生磁场区域45相反,磁场梯度剧烈地下降,即使在剥离磁场区域44中射线也不稳定,碰撞于轨道面外周侧。

[0064] 并且,由高频喷射器70产生的电子回旋加速振动振幅的增大幅度比由剥离磁场区域44与再生磁场区域45产生的电子回旋加速振动振幅的增大幅度小,但即使不设置剥离磁场区域44与再生磁场区域45,通过由高频喷射器70产生的电子回旋加速振动振幅的增大效果也可实现射线的射出。

[0065] 图8是关于射线的射出顺序进行说明的图。图8中的(a)是表示高频加速空腔10的共振频率 f_{cav} 、作为通过高频喷射器70向射线施加的高频电场的频率的高频喷射器频率 f_{evt} 、时刻T的关系的图表。图8中的(b)是表示产生于加速间隙11中的加速电压 V_{acc} 、施加于高频喷射器70的高频喷射器电压 V_{ext} 、时刻T的关系的图表。图8中的(c)是表示入射的射线的电流、射出的射线的电流、时刻T的关系的图表。

[0066] 一加速周期从加速电压 V_{acc} 的升起(时刻T1)开始。然后,若加速电压 V_{acc} 充分地上升,则从离子源53输入射线(时刻T2)。在射入射线之后经过时间 t_1 后结束射线的高频捕获。通过加速电压 V_{acc} 开始加速被捕获的射线、即入射的射线中已备齐加速准备的射线(时刻T3)。若射线达到作为最大能量的235MeV,则开始加速高频的截断(时刻T4),那之后若经过

时间 t_2 ，则加速高频电压 V_{acc} 成为断开状态。与此同时，开始向高频喷射器 70 施加高频电压 V_{ext} (时刻 $T5$)。并且，开始向高频喷射器 70 施加高频电压 V_{ext} (时刻 $T5$) 与加速高频电压 V_{acc} 为断开状态可以不是严格的同时。高频电压 V_{ext} 的施加开始既可以是加速高频的截断开始(时刻 $T4$)的不久之前、同时、不久之后，也可以是加速高频电压 V_{acc} 为断开状态的不久之前、不久之后。

[0067] 高频喷射器 70 的高频电压如果以高频喷射器 70 不是共振器结构、静电容量为合适的值的方式设计就会以数 μ s 的应答而快速地上升。在此，电子回旋加速振动在谐波或谐波的小数部中的任一个与射线的旋转频率的积与被施加的高频电压的频率大致相同时，具有振幅共振性地增大的性质。因此，该高频电压的频率 f_{ext} 与最大能量射线的水平方向谐波 v_r 的小数部 Δv_r 、最大能量射线的旋转频率 f_{rev} 的积 $\Delta v_r \times f_{rev}$ 大致相同。其结果，水平方向电子回旋加速振动的振幅共振性地持续增大，不久后射线就会到达剥离磁场区域 44 与再生磁场区域 45 (时刻 $T6$)。并且，频率电压的频率 f_{ext} 可以与最大能量的水平方向谐波 v_r 、最大能量射线的旋转频率 f_{rev} 的积 $\Delta v_r \times f_{rev}$ 相等。

[0068] 射线若通过剥离磁场区域 44 就会碰撞于外周侧，若通过再生磁场区域 45 相反就会碰撞于内周侧。由于剥离磁场区域 4、再生磁场区域 45 在径向上都具备磁场梯度，因此在多次射线进行旋转中，碰撞量依次增加，转向偏离增大。即，通过利用 $2v_r = 2$ 的电子回旋加速振动的共振条件而能够增大转向偏离。

[0069] 在射线射出路径入口 82 上设置隔垫线圈 43。若不久后得到大大超过设置于隔垫线圈 43 的内周侧的线圈导体 43-1 的厚度的转向偏离，则射线向隔垫线圈 43 内部引导，承受充分的偏转而向高能射线输送系统 47 引导并被射出。

[0070] 并且，开始向高频喷射器 70 施加高频电压不久之后(时刻 $T5$)，通过施加尽可能大的高频电压、快速地增大射线的振幅而能够缩短射线射出之前的时间。并且，在射线到达剥离磁场区域 44 或再生磁场区域 45 不久之前(时刻 $T6$)降低高频电压，通过调整在剥离磁场区域 44 与再生磁场区域 45 中行进的射线的量，能够细致地控制射线射出电流。代替降低高频电压 V_{ext} ，即使扫描向高频喷射器 70 施加的高频频率、或改变该高频的相位，也能够改变射线的射出电流。这利用包含于射线的带电粒子的电子回旋加速振动数具有某种分布而不均的性质(谐波传播)。通过改变高频的频率配合引起共振的带电粒子的振动数的分布的哪一个区域，能够改变射线的射出电流。另外，可以代替降低高频电压 V_{acc} 而切断。

[0071] 并且，通过在从射线射出开始(时刻 $T6$) 经过时间 t_4 之后停止向高频喷射器 70 施加高频电压 V_{ext} 而停止射线的射出(时刻 $T7$)。通过调整该时间 t_4 能够控制射线的射出时间。

[0072] 通过控制向高频喷射器 70 施加的高频电压而能够调整射线射出电流，由于如果停止施加该高频电压就能停止射线射出，因此能够用一次射出脉冲射线而正好地照射以扫描照射所要求的聚光量，提高线量率。例如，如图 8 所示，如果从射线的射出开始(时刻 $T6$) 至经过时间 $t4'$ 之后持续向高频喷射器 70 施加高频电压 V_{ext} ，则能够射出射线直至时刻 $T7'$ 。

[0073] 另外，如果在射出之后残留在加速器内旋转的射线，则通过再次施加该高频电压 V_{ext} 而能再度开始射线射出(时刻 $T8$)，不会再次入射、捕获、加速射线而能够使用于下次的聚集照射。即，由于能够在一加速周期内多次射出射线，能够有效地使用从离子源 53 入射的电荷，因此进一步提高线量率。并且，如果再次开始提高加速电压 V_{acc} ，则开始新的加速周期(时刻 $T10$)。

[0074] 在图9中表示实现以上的射出方法的高频电源与控制系统的方框图。加速高频电源25具有负极电阻22、正极电源23、三极管24。高频喷射器电源86具有正极电源26、三极管24、桥接偏置电源89、前级增幅器94。图9是与加速高频电源25、高频喷射器电源86一起使用三极管的情况的结构,除此以外也可以使用四极管、半导体增幅器。

[0075] 加速高频电源25为自激振荡式,为用耦合环21将加速高频的一部分复原为负极回路的方式。高频加速电压通过高速地调节正极电源23的输出电压而进行控制。负极偏置电位如图9所示以用负极电阻22将正极电位分压的形式分配、或使用负极电源分配。

[0076] 原振荡器92在高频喷射器70使用中生成某种频率区域的信号。在此,在原振荡器92的信号中考虑射线的谐波传播量、在向高频喷射器70的高频电压施加中水平方向谐波变动的情况,为含有必要的频率带成分的信号。该信号在经过开关93用前级增幅器94进行增幅中,用三极管24进行增幅并向高频喷射器70供给。高频喷射器70的高频电压通过改变前级增幅器94的收益、或高速地调节正极电源26的输出电压而进行控制。

[0077] 计算装置91将从旋转电容器30的角度检测机构90、或从加速高频的接收信号中检测的加速高频的频率调节模式、各照射点所要求线量作为基础,控制加速高频的接通/断开时机与电压振幅、这些和高频喷射器70的接通断开时机与电压振幅。

[0078] 另外,为了监视残留在加速器内部的旋转电荷量,在最大能量轨道80上的某个位置上设置静电性或磁力性地检测射线电荷量的射线监视器。并且,要是减少至具有旋转电荷量水平以下,则计算装置91再次开始加速电压的施加,重复捕获、加速、获取的加速周期。

[0079] 在图10中表示粒子线治疗系统的整体结构。在图10中,粒子线治疗系统由圆形加速器39、旋转机架190、包括扫描线圈的照射装置192、治疗台201以及控制这些的控制装置191构成。从圆形加速器39射出的射线通过旋转机架190被输送至照射装置192。被输送的离子射线以通过照射装置192以及射线能量的调整与患部形状一致的方式被整形,以预定量对横卧于治疗台201的患者200的患部目标进行照射。照射装置192内置线量监视器,检测对患者200的每个照射点所照射的线量。以该线量数据为基础,控制装置191计算对各照射点所要求的线量,作为向图9的计算装置91的输入数据。

[0080] 以上是实施例1的说明。通过本实施例,通过在中途停止高频喷射器70的高频施加,射线不会到达剥离磁场区域44与再生磁场区域45,能进行射线从圆形加速器39射出的中断。通过向高频喷射器70再次开始施加,也能够没有再次入射、捕获、加速射线地再次开始射线的射出。另外,通过控制施加于高频喷射器70的电压的强度、高频的振幅、相位、频率的任一个而能够控制从圆形加速器39中射出的射线的强度。而且,通过调整施加于高频喷射器70的电压,能够吸收影响射线的稳定性的因素,射出稳定的射线。即,由于通过使用于射出的高频能够高精度地控制每一加速周期的射出射线电荷,因此适用于扫描的线量控制成为可能。因此,能够增加线量率,缩短照射时间,提高粒子线治疗系统的患者处理量。

[0081] 实施例2

[0082] 关于实施例2的圆形加速器进行说明。本实施例中,关于与实施例1相同的结构省略说明,仅关于不同的结构进行说明。

[0083] 在本实施例中,为了在70MeV至235MeV之间能任意地改变射线能量并从加速器射出,使用以向射线射出路径入口82侧使射线轨道偏心的方式形成主磁场的偏心轨道型加速器。

[0084] 在图11中表示偏心轨道型加速器的剖面结构。作为从图2中的结构上的变更点,能举出d型盒电极12、虚拟d型盒电极13的形状、及形成于其之间的加速间隙11的形状。在此,将通过旋转电容器30的旋转轴与加速区域的圆的中心的线作为中心线。离子入射部52在中心线上相比于加速区域的中心配置于靠射线射出路径入口82侧。另外,未图示,为了形成后述的磁场,主磁极38的上下对置的面的形状与实施例1也有较大的不同。高频喷射器70的结构也如图13所示不同。

[0085] 在图12中表示各能量的轨道,说明偏心轨道的实现方法。旋转轨道用实线表示从最大能量235MeV每隔磁力刚性率0.04Tm50种的能量轨道。虚线是将各轨道的相同的旋转相位连结的线,称为等旋转相位线。等旋转相位线从聚集区域每隔旋转相位 $\pi/20$ 进行图示。形成于与d型盒电极12对置的虚拟d型盒电极13之间的加速间隙11沿等旋转相位线设置。更具体的说,d型盒电极12呈将同心轨道的中心附近作为前端,半径沿等旋转相位线的如扇形的中空的形状。

[0086] 在射线的能量低的区域中,回旋加速器同样地靠近将离子的入射部52附近作为中心的同心轨道,更大的能量的轨道在射线射出路径入口82的附近密集地聚集,相反地在内导体14的附近处于各能量轨道相互离开的位置关系。将该轨道密集地聚集的点称为聚集区域、将离散的区域称为离散区域。作为这样的轨道配置,通过从聚集区域附近获取射线,能够缩小所需要的射线碰撞量,因此能够容易地进行能量可变的射线射出。

[0087] 为了产生如上述的轨道结构与轨道附近中的稳定的振动,在本实施例的加速器中,通过主磁极38的形状、设置于其表面的微调线圈、磁极片形成随着向径向外周侧而主磁场变小的分布。另外,在沿设计轨道的线上主磁场为恒定值。因此,设计轨道为圆形。

[0088] 其次,关于射线的射出方法进行说明。在射线的射出中使用设置于聚集所有的射出能量的射线轨道的聚集区域附近的高频喷射器70、配置于其两侧的剥离磁场区域44、再生磁场区域45、隔垫线圈43与高能射线输送系统47。在本实施例中,在使用于射出的上述元件中,高频喷射器70的结构与实施例1不同。

[0089] 在图13中表示本实施例的高频喷射器70的剖面结构。高频喷射器70与实施例1相同由接地电极71与突起部73、高压电极72构成,但接地电极71与高压电极72以夹住最大能量轨道80与最低射出能量轨道81的方式配置。并且,以高频电场作用于与在轨道面内与各个轨道正交的方向靠近的方向的方式确定接地电极71与高压电极72的形状。即,接地电极71与高压电极72为沿最低射出能量轨道81与最大能量轨道80的曲线大致平行地排列的形状。在此,最低射出能量轨道81是能够从圆形加速器28射出的最低能量(例如,70MeV)的射线通过的轨道。并且,突起部73可以省略。

[0090] 射线的射出顺序基本与实施例1中说明的内容相同,但如果使截断加速高频电压 V_{acc} 的时刻(时刻T4)与向高频喷射器70开始施加高频电压 V_{ext} 的时刻(时刻T5)提前偏离,能够射出任意能量的射线。换而言之,在已加速的射线到达所期望的能量的时机,通过开始加速高频电压 V_{acc} 的截断(时刻T4)而中断射线的加速。并且,通过开始施加高频电压 V_{ext} (时刻T5),所期望能量的射线的电子回旋加速振动的振幅通过高频喷射器70增大。不久,该射线到达剥离磁场区域44与再生磁场区域45而被射出。

[0091] 另外,隔垫线圈43、及配置于高能射线输送系统47的光学参数调整用的线圈需要根据射出的射线能量改变励磁电流。因此,关于这些线圈使用空芯结构或层叠钢板,成为在

一匝至数匝左右的线圈中进行脉冲通电的结构。隔垫线圈43可以在射线行进方向中分割为二个以上进行配置。

[0092] 以上是实施例2的说明。根据实施例2的记载,能够起到与实施例1相同的效果。而且,通过为如以上的结构,本发明的圆形加速器39由于不需要延迟就能进行可变能量射线的射出,因此能最小限地保留取出时失去的射线电流值,射线利用率变高,相比于实施例1能够实现更高的线量率。还具有由于能够电性地变更射出能量而相比于机械性地移动的方式,能量切换所需要的时间短的优点。

[0093] 符号说明

[0094] 10—高频加速空腔,11—加速间隙,12—d型盒电极,13—虚拟d型盒电极,14—内导体,15—外导体,20—输入连接器,21—耦合环,22—负极电阻,23—正极电源,24—三极管,25—加速高频电源,26—正极电源,30—旋转电容器,31—电机,32—固定电极,33—旋转电极,36—磁场梯度用垫片,37—磁场修正用垫片,38—主磁极,39—圆形加速器,40—主电磁铁,41—磁轭,42—主线圈,43—隔垫线圈,44—剥离磁场区域,45—再生磁场区域,46—射线用贯通孔,47—高能射线输送系统,48—线圈用贯通孔,49—抽真空用贯通孔,50—高频系统用贯通孔,52—离子入射部,53—离子源,54—低能射线输送系统,60—低温恒温器,70—高频喷射器,71—接地电极,72—高压电极,73—突起部,80—最大能量轨道,81—最低射出能量轨道,82—射线射出路径入口,86—高频喷射器电源,89—桥接偏置电源,90—角度检测机构,91—计算装置,92—原振荡器,93—开关,94—前级增幅器,190—旋转机架,191—控制装置,192—照射装置,200—患者,201—治疗台。

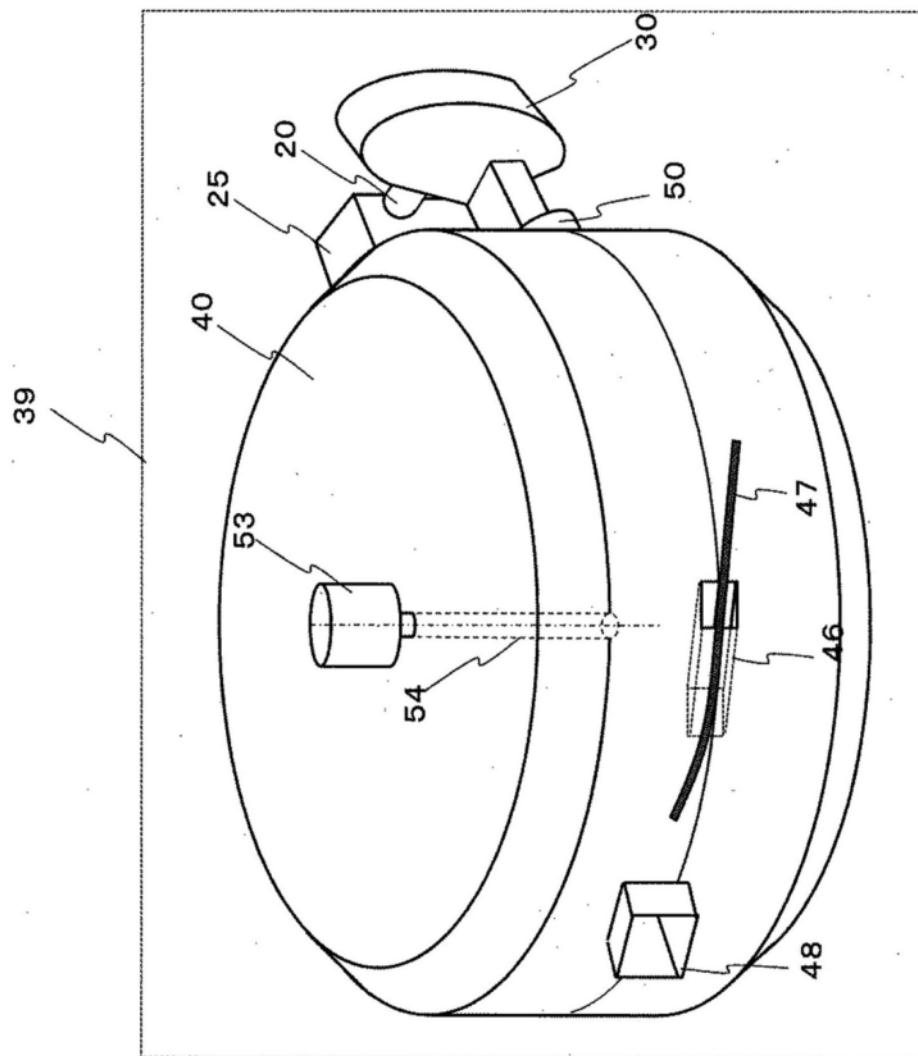


图1

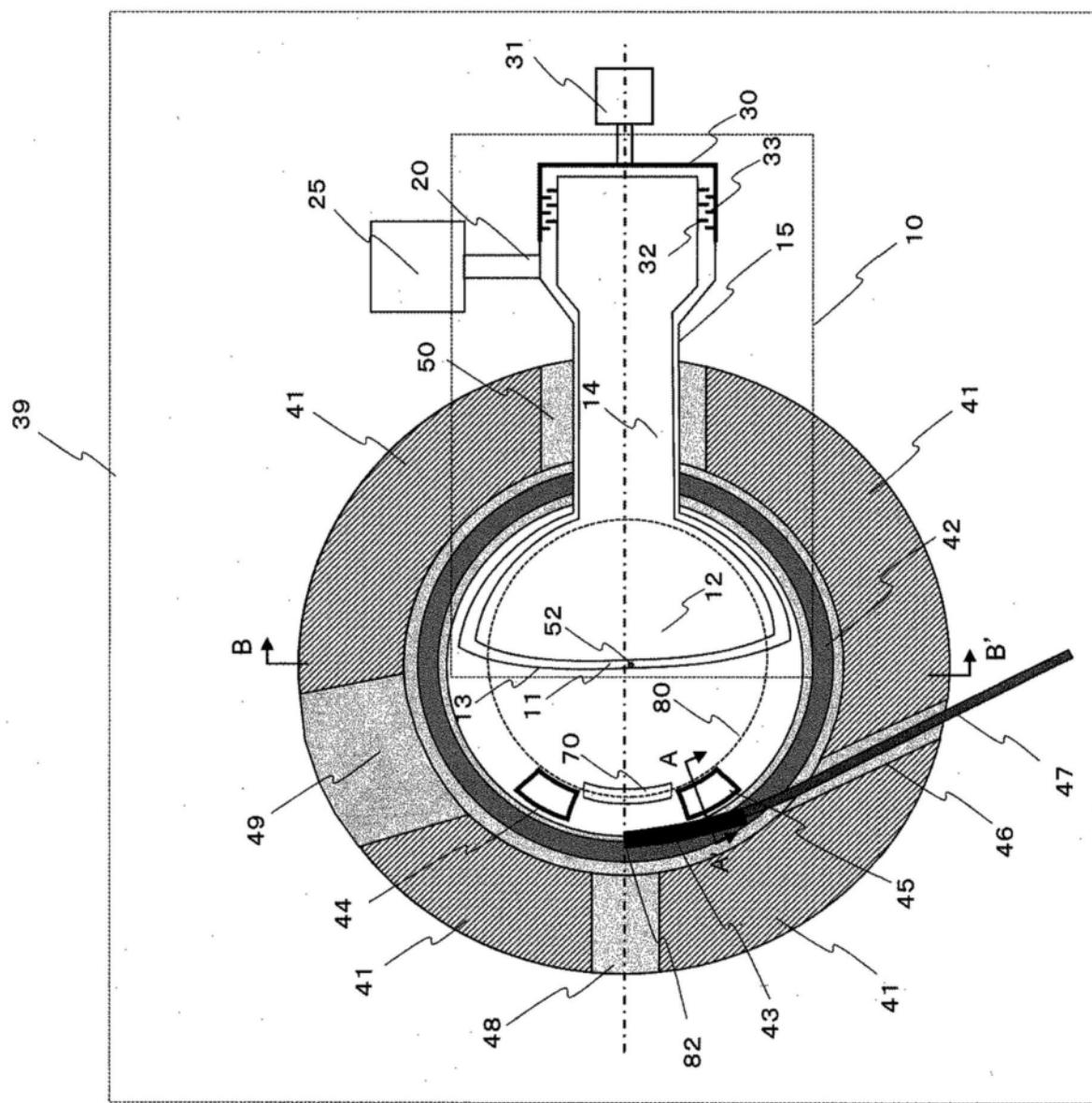


图2

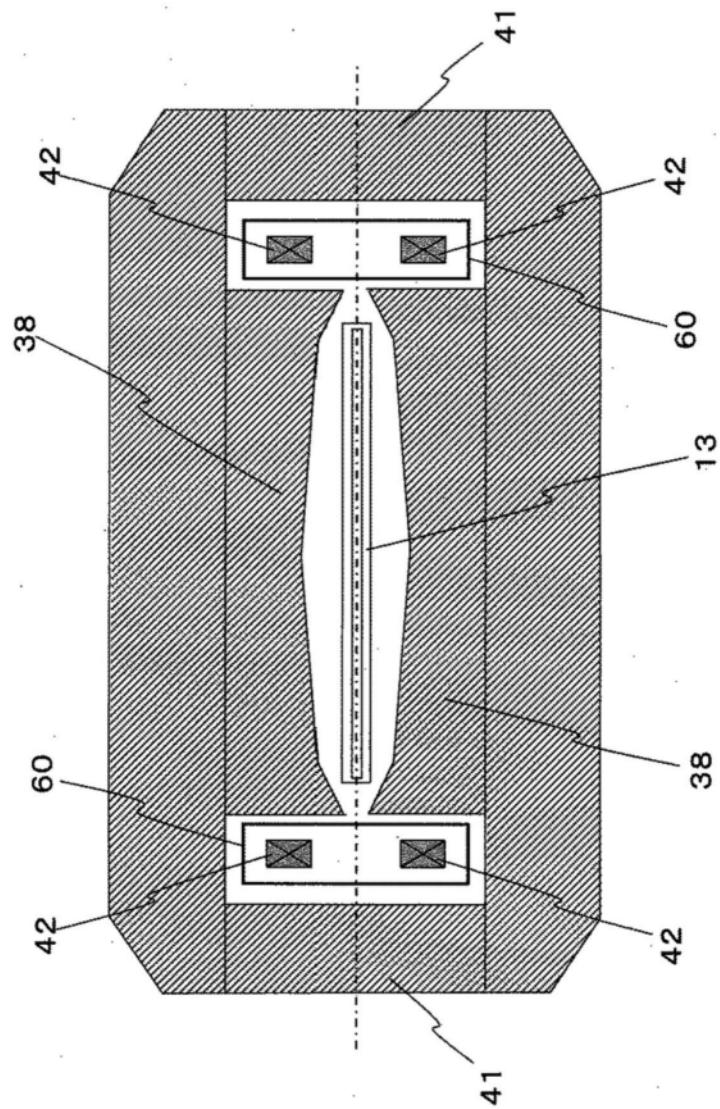


图3

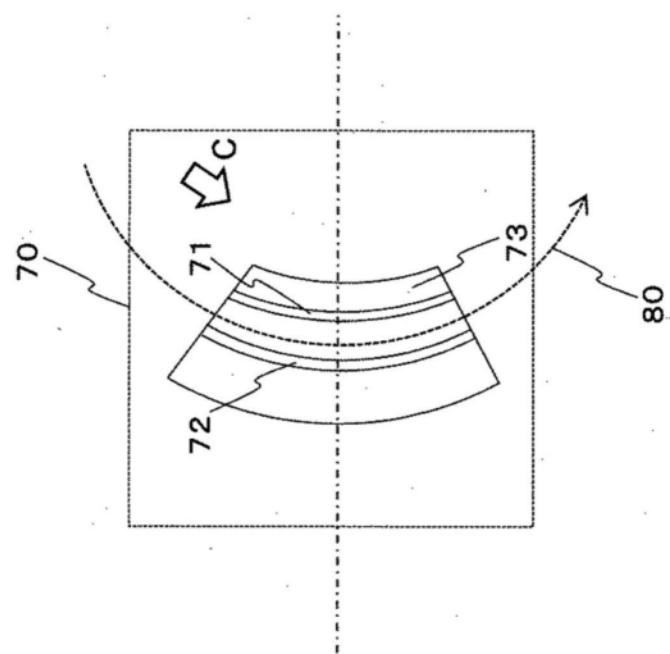


图4

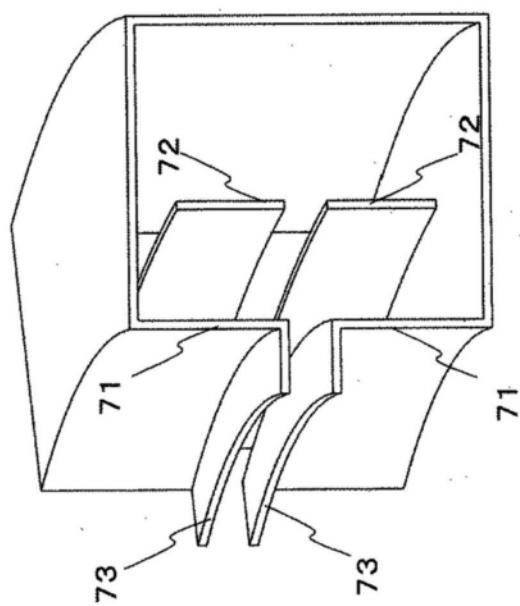


图5

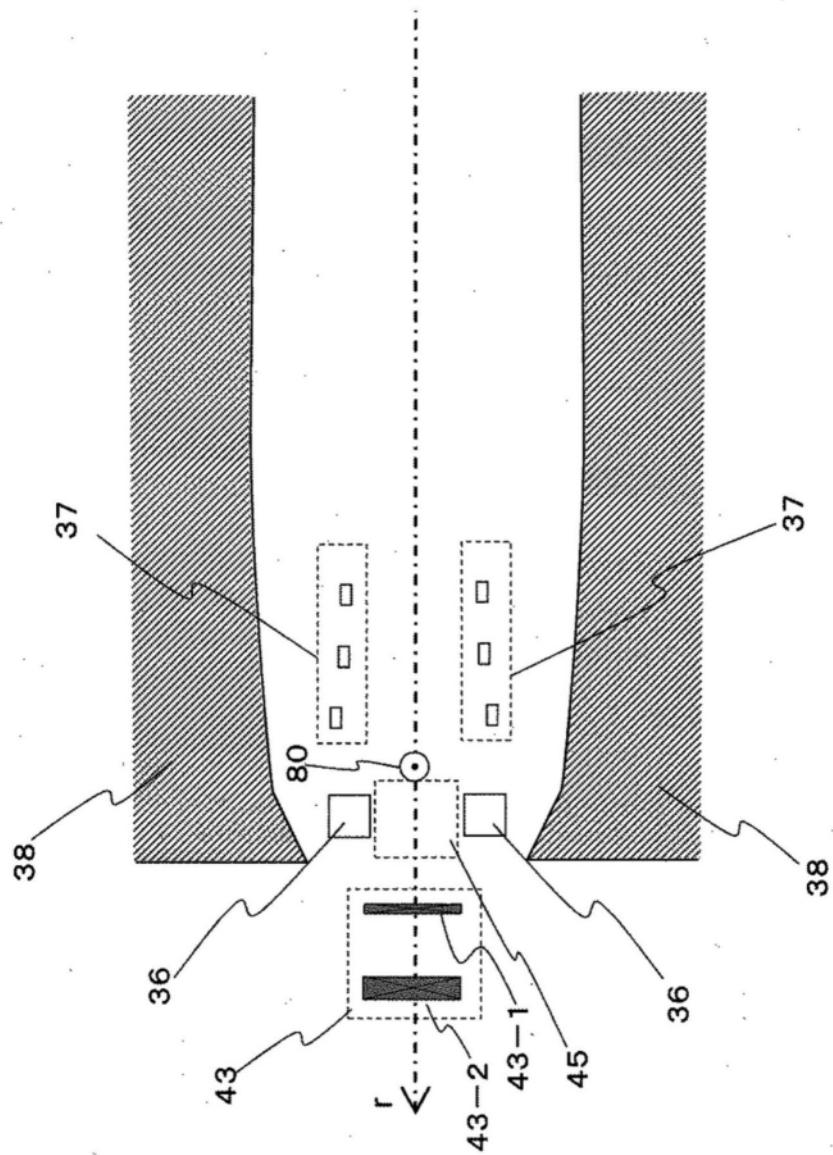


图6

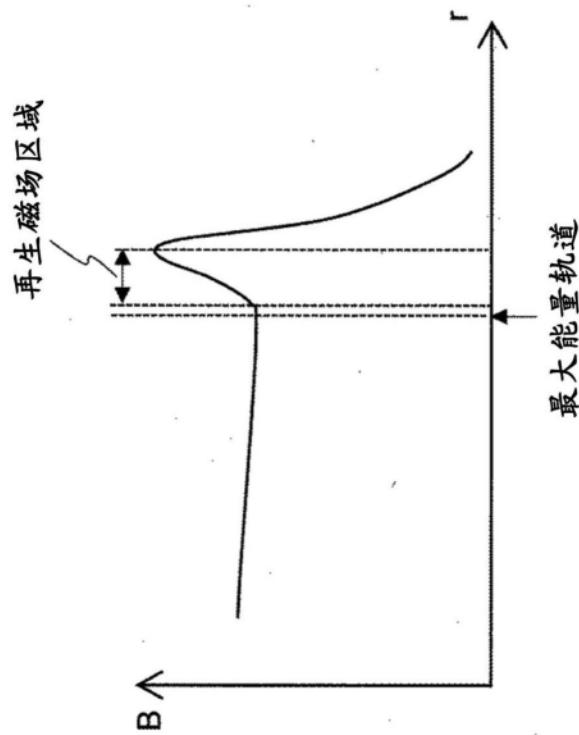


图7

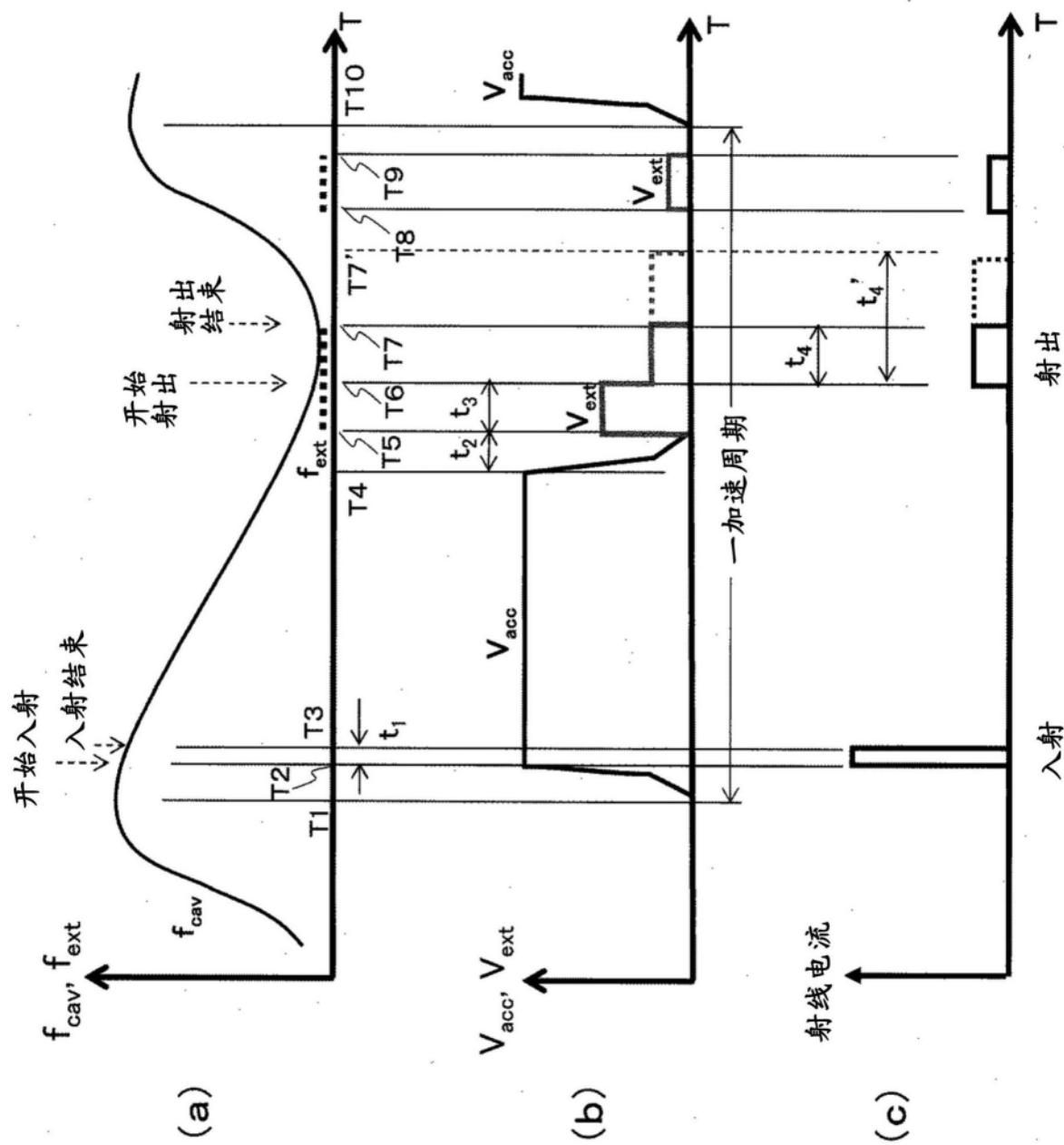
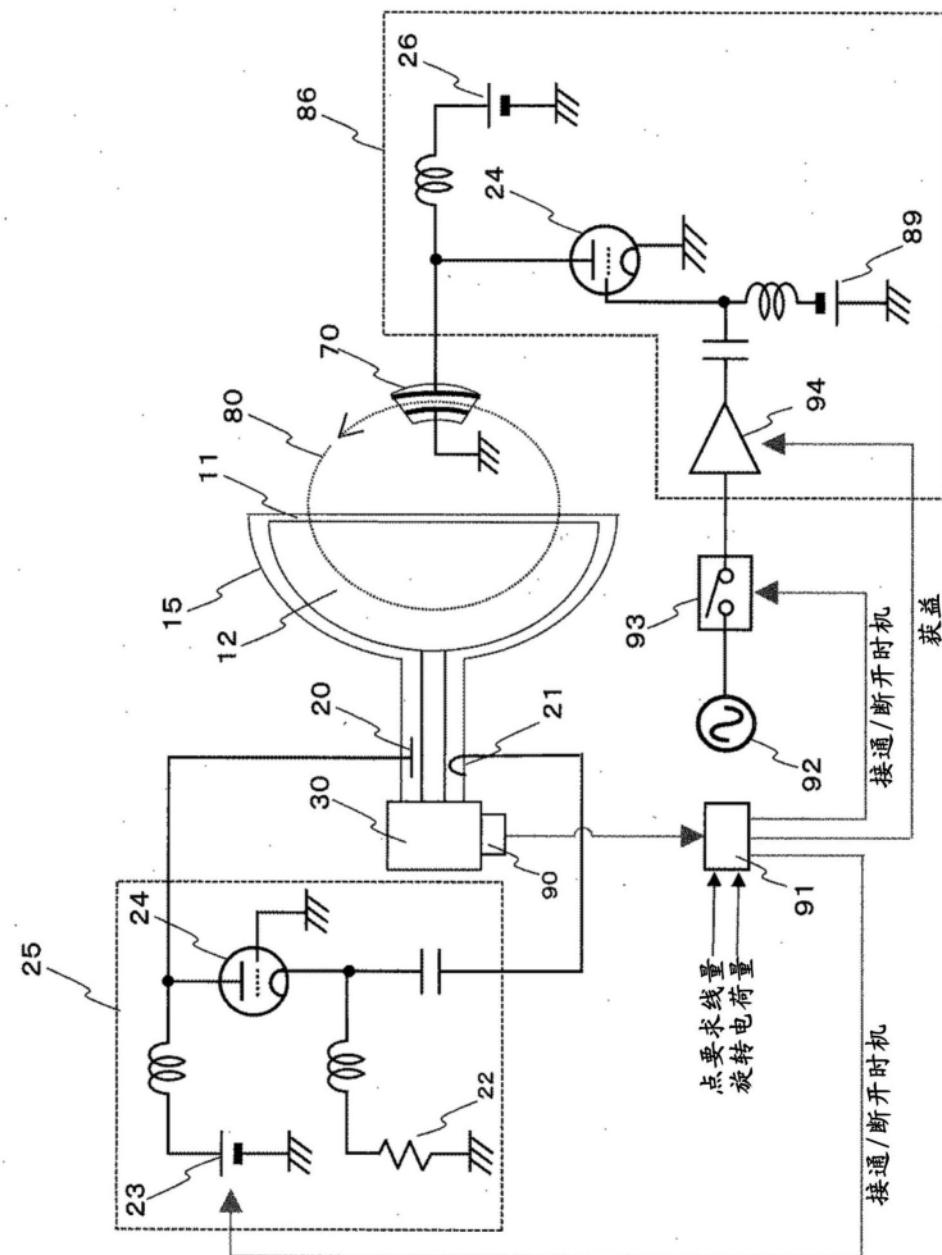


图8



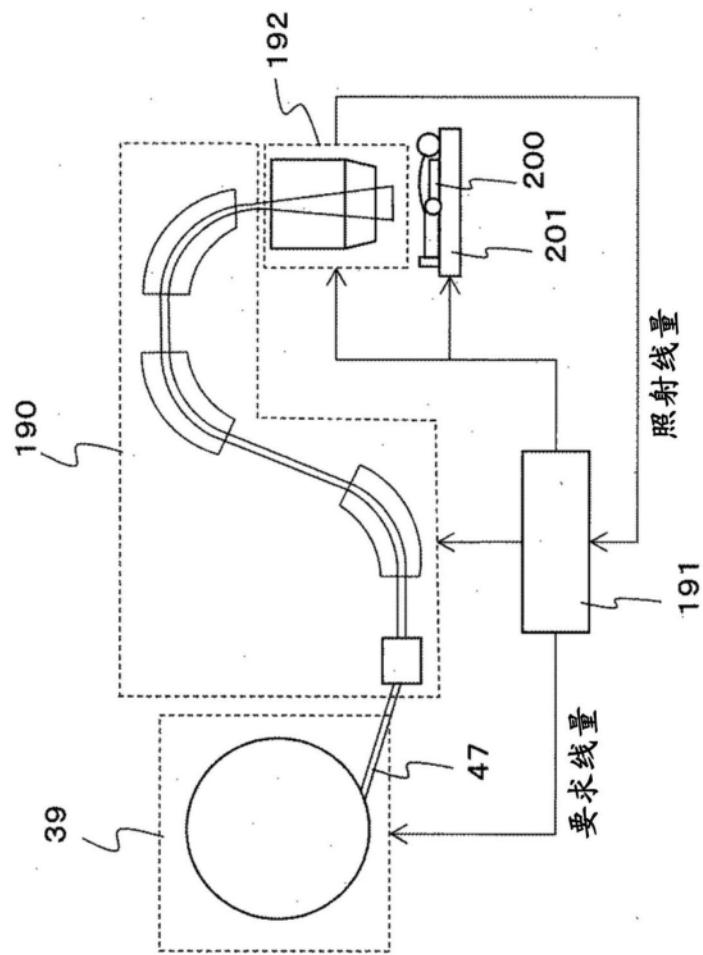


图10

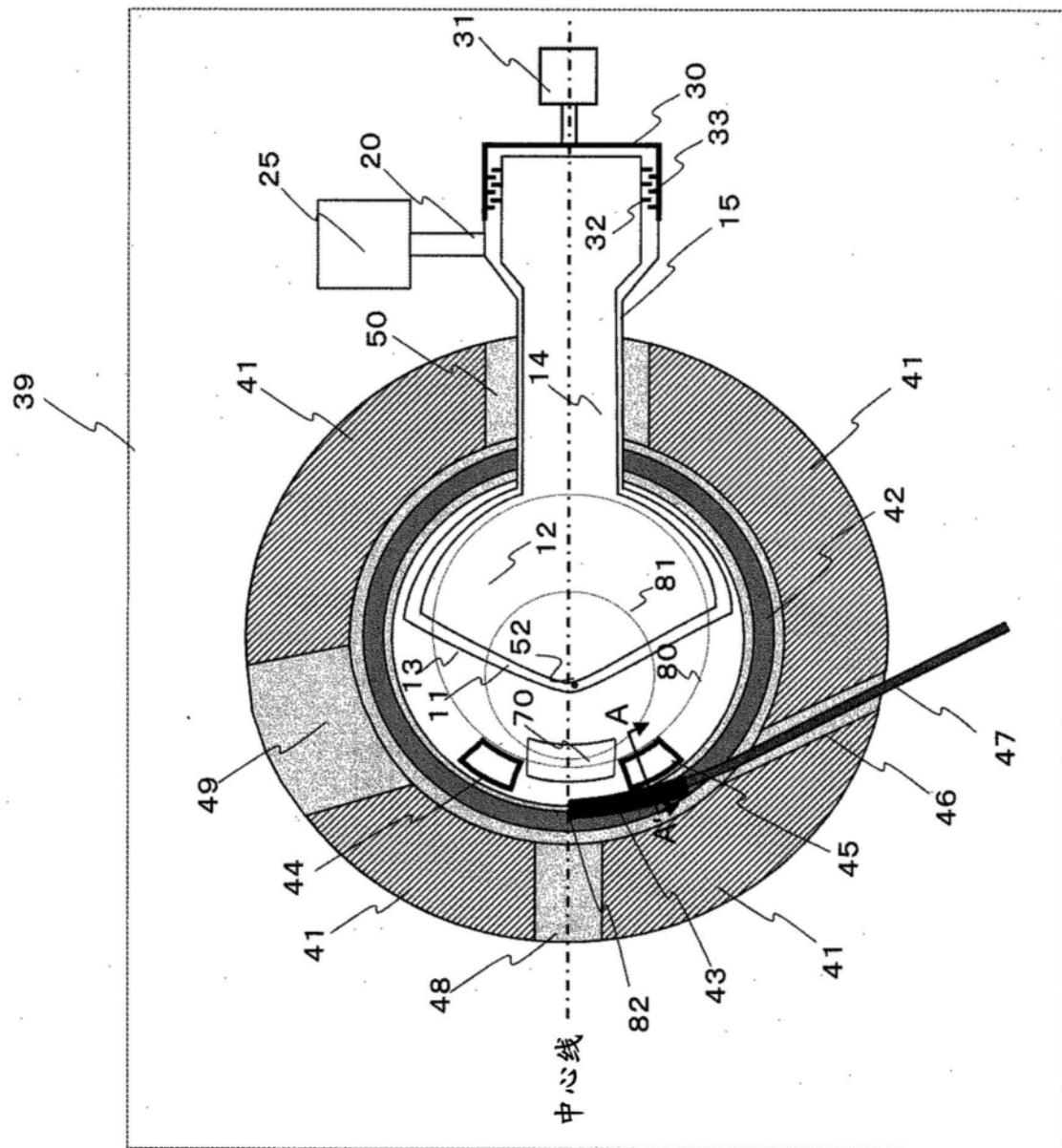


图11

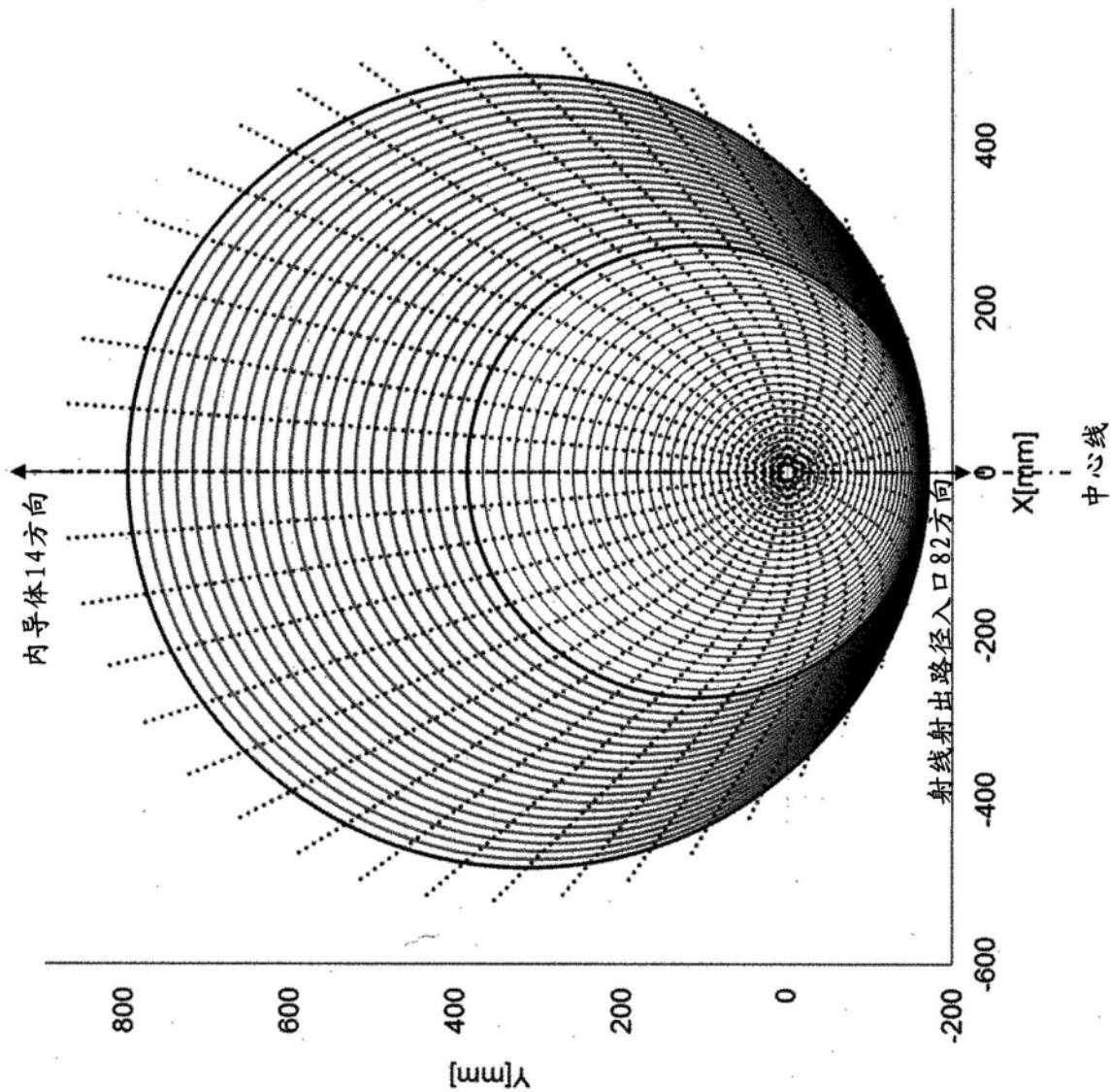


图12

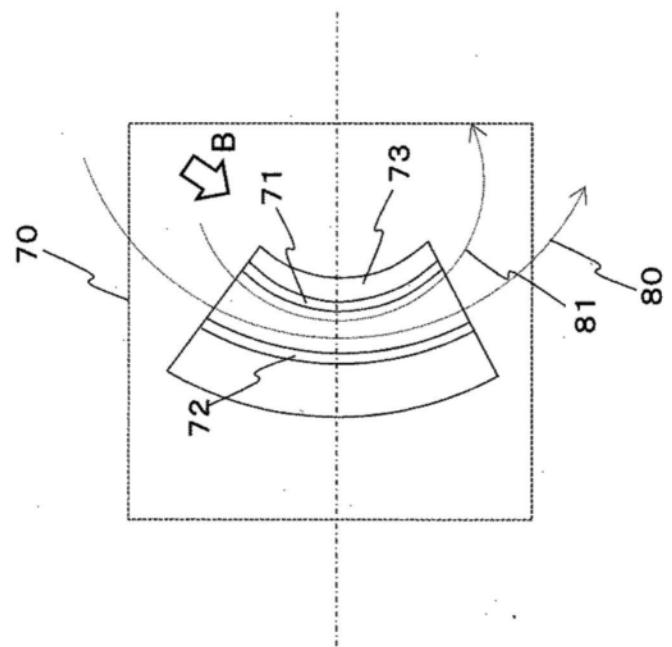


图13