



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111246654 B

(45) 授权公告日 2022. 04. 08

(21) 申请号 201911147902.7

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2019.11.21

H05H 7/18 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

H05H 7/04 (2006.01)

申请公布号 CN 111246654 A

H05H 13/10 (2006.01)

(43) 申请公布日 2020.06.05

审查员 王伟宁

(30) 优先权数据

18208924.3 2018.11.28 EP

(73) 专利权人 离子束应用股份有限公司

地址 比利时新鲁汶

(72) 发明人 M·阿布斯 杰里米·布里森

W·克里文

(74) 专利代理机构 北京安信方达知识产权代理

有限公司 11262

代理人 武娟 杨明钊

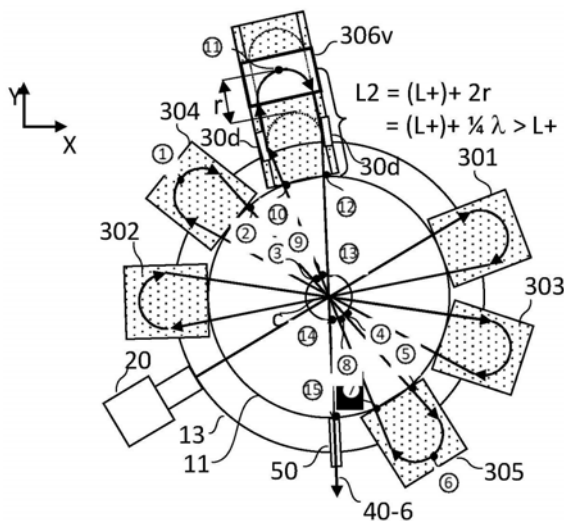
权利要求书3页 说明书14页 附图7页

(54) 发明名称

可变能量的电子加速器

(57) 摘要

本发明涉及电子加速器,包括:谐振腔,其由空心闭合导体组成且关于中平面对称;电子源,其被适配用于将电子束径向地注入到谐振腔中;RF系统,其耦合至谐振腔且被适配用于在谐振腔中生成电场;N个磁体单元,每个磁体单元以中平面为中心且被适配用于在与谐振腔流体连通的偏转腔室中生成磁场,该磁场被适配用于:使沿着第一径向轨迹离开谐振腔的电子束沿着第一偏转轨迹偏转,以沿不同于第一径向轨迹的第二径向轨迹将电子束重新引入到谐振腔中;出口,其用于沿着提取路径从谐振腔朝着靶提取能量为W的加速电子束,其特征在于,至少一个磁体单元被适配用于将相应的第一偏转轨迹修改为第二偏转轨迹,从而允许从出口提取的加速电子束的能量W的变化。



1. 一种电子加速器,包括:

(a) 谐振腔 (1),该谐振腔由空心闭合导体组成,该谐振腔包括:

- 外壁,该外壁包括外圆柱形部分,该外圆柱形部分具有中心轴线 Z_c 并且具有形成外导体段(1o)的内表面,以及

- 内壁,该内壁被封闭在该外壁内并且包括内圆柱形部分,该内圆柱形部分具有中心轴线 Z_c 并且具有形成内导体段(1i)的外表面,

其中,该谐振腔关于与该中心轴线 Z_c 垂直的中平面 P_m 对称;

(b) 电子源 (20),该电子源被适配用于沿着该中平面 P_m 从该外导体段上的引入口到该中心轴线 Z_c 将电子束 (40) 径向地注入到该谐振腔中;

(c) RF系统,该RF系统耦合至该谐振腔并且被适配用于在该外导体段与该内导体段之间生成电场 E ,该电场以频率 f_{RF} 进行振荡,以沿着该中平面 P_m 中从该外导体段朝着该内导体段延伸的径向轨迹以及从该内导体段朝着该外导体段延伸的径向轨迹改变该电子束的电子的速度;

(d) N 个磁体单元 (30i),其中 $N > 1$ 并且 $N \in \mathbb{N}$,该 N 个磁体单元中的每一个以该中平面 P_m 为中心、并且包括一组偏转磁体 (301-304),这些偏转磁体被适配用于在通过腔体出口孔和腔体入口孔与该谐振腔 (1) 流体连通的偏转腔室 (31) 中生成磁场,该磁场被适配用于:

- 使沿着该中平面 P_m 通过该谐振腔中的第一径向轨迹的末端处的该腔体出口孔进入该偏转腔室的电子束在具有附加长度 (L_+) 的第一偏转轨迹上偏转,所述第一偏转轨迹从该腔体出口孔延伸到该腔体入口孔,该腔体入口孔与该腔体出口孔相同或不同,该电子束通过该腔体入口孔沿着该中平面 P_m 中的第二径向轨迹朝着该中心轴线 Z_c 被重新引入到该谐振腔中,所述第二径向轨迹不同于该第一径向轨迹,其中

- 该附加长度 (L_+) 使得当该电子束被重新引入到该谐振腔中时,该RF系统被同步以施加电场从而沿着该第二径向轨迹使该电子束加速;

(e) 出口 (50),该出口用于从该谐振腔朝着靶 (100) 提取具有能量 W 的加速电子束,

其中,该 N 个磁体单元 (30i) 中的至少一个是可变-磁体单元 (306-5, 306-7, 306v),该可变-磁体单元被适配用于将相应的第一偏转轨迹修改为具有不同于该附加长度 (L_+) 的第二长度 (L_2) 的第二偏转轨迹,从而允许从该出口 (50) 提取的加速电子束的能量 W 的变化,

其特征在于,至少一个可变-磁体单元包括用于沿着与由该中心轴线 Z_c 处的该第一径向轨迹和该第二径向轨迹形成的角度的平分线平行的平分方向离散地或连续地来回径向移动该至少一个可变-磁体单元 (306-5, 306-7, 306v)、并且因此离散地或连续地改变从该出口 (50) 提取的加速电子束的能量 W 的移动装置。

2. 根据权利要求1所述的电子加速器,其中,该第二长度 (L_2) 大于该附加长度 (L_+)。

3. 根据权利要求1所述的电子加速器,其中,该第二长度 (L_2) 使得当该电子束被重新引入到该谐振腔中时,该RF系统被同步以施加电场从而沿着该第二径向轨迹使该电子束减速。

4. 根据权利要求2所述的电子加速器,其中,该第二长度 (L_2) 使得当该电子束被重新引入到该谐振腔中时,该RF系统被同步以施加电场从而沿着该第二径向轨迹使该电子束减速。

5. 根据权利要求1-4中任一项所述的电子加速器,其中,该至少一个可变-磁体单元(306-5,306-7,306v)包括:

- 第一组磁体(306-7),该第一组磁体以该中平面 P_m 为中心、位于距该中心轴线 Z_c 的第一径向距离处、并且被配置成用于使该电子束沿着具有附加长度(L_+)的偏转轨迹偏转,其中,该第一组磁体被配置成被激活或去激活,以在相应的偏转腔室中生成或不生成磁场;以及

- 第二组磁体(306-5),该第二组磁体以该中平面 P_m 为中心、与该第一组磁体径向对准、并且位于距该中心轴线 Z_c 的第二径向距离处,该第二径向距离大于该第一径向距离。

6. 根据权利要求5所述的电子加速器,其中,该第一组磁体(306-7)和该第二组磁体(306-5)被适配用于在以下腔室中生成磁场:

- 在该第一组磁体和该第二组磁体共用的单个偏转腔室中;或者
- 分别在第一偏转腔室和第二偏转腔室中,该第一偏转腔室通过一个或两个窗口与该第二偏转腔室流体连通。

7. 根据权利要求1-4中任一项所述的电子加速器,其中,该移动装置包括电机,该电机用于沿着相应的平分方向使该至少一个可变-磁体单元(306-5,306-7,306v)来回移位。

8. 根据权利要求6所述的电子加速器,进一步包括偏转器(30d),

- 用于在到达该腔体出口孔的该电子束被该磁体单元圆形地偏转之前,将该电子束从该第一径向轨迹定向到与由该中心轴线 Z_c 处的该第一径向轨迹和该第二径向轨迹形成的角度的平分线平行的轨迹;并且

- 用于在到达该腔体入口孔的该电子束被重新引入到该谐振腔中时,将该电子束从与跟随由该磁体单元施加的圆形偏转的该平分线平行的轨迹定向到该第二径向轨迹。

9. 根据权利要求3、4和6中任一项所述的电子加速器,其中,该第二长度(L_2)等于该附加长度(L_+)与该电场 E 的波长 λ 的一个半长或多个半长之和 $L_2 = (L_+) + n\lambda/2$,其中 $n \in \mathbf{N}$ 。

10. 根据权利要求1-4、6和8中任一项所述的电子加速器,其中,

- 该电子加速器是rhodotron,该rhodotron包括单个可变-磁体单元(306-5,306-7,306v),该可变-磁体单元直接定位在该出口(50)的上游,

- w_i 是电子束在一次穿过该谐振腔到达磁体单元(30i)或者一次从磁体单元穿过该谐振腔时得到或失去的能量,其中

- 对于 $i=1$ 至 N , w_i 的值是恒定的,并且其中

- 该电子束最后一次穿过该谐振腔到达该出口(50)的能量增益 w_i 的值在 $(-w_i)$ 与 $(+w_i)$ 之间。

11. 根据权利要求10所述的电子加速器,其中, N 等于6,对于 $i=1$ 至6, w_i 等于1MeV/穿过,并且对于最后一次穿过, w_i 在-1MeV/穿过与1MeV/穿过之间。

12. 根据权利要求10所述的电子加速器,其中,所提取的电子束在5MeV与7MeV之间。

13. 根据权利要求1-4、6、8和11-12中任一项所述的电子加速器,其中,该 N 个磁体单元中的每一个在该偏转腔室中形成在0.01T与1.3T之间的磁场。

14. 根据权利要求13所述的电子加速器,其中,该 N 个磁体单元中的每一个在该偏转腔室中形成0.02T至0.7T的磁场。

15. 根据权利要求1-4、6、8、11-12和14中任一项所述的电子加速器,其中,该电子束具

有在30kW与700kW之间的平均功率。

16. 根据权利要求15所述的电子加速器,其中,该电子束具有在150kW与650kW之间的平均功率。

17. 根据权利要求1-4、6、8、11-12、14和16中任一项所述的电子加速器,其中,该谐振腔由以下各项形成:

- 第一半壳(11),该第一半壳具有圆柱形外壁,该圆柱形外壁具有内半径R并且具有中心轴线 Z_c ;
- 第二半壳(12),该第二半壳具有圆柱形外壁,该圆柱形外壁具有内半径R并且具有中心轴线 Z_c ;以及
- 中心环元件(13),该中心环元件具有内半径R,在该中平面 P_m 的水平处夹置于该第一半壳与该第二半壳之间,

其中,形成该外导体段的该表面由该第一半壳和该第二半壳的圆柱形外壁的内表面并且由该中心环元件的内边缘形成,该内边缘与该第一半壳和该第二半壳两者的内表面齐平。

可变能量的电子加速器

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电子加速器,该电子加速器具有以中心轴线 Z_c 为中心的谐振腔、并且产生用于沿着形成花朵花瓣的多条径向轨迹使电子加速的振荡电场。**Rhodotron®**是这种电子加速器的示例。根据本发明的电子加速器可以沿着单条路径提取不同能量的电子束。

背景技术

[0002] 本领域中,具有谐振腔的电子加速器是众所周知的。例如,EP0359774描述了一种电子加速器,该电子加速器包括:

[0003] (a) 谐振腔,该谐振腔由空心闭合导体组成,该谐振腔包括:

[0004] • 外壁,该外壁包括外圆柱形部分,该外圆柱形部分以中心轴线 Z_c 为中心并且具有形成外导体段的内表面,以及

[0005] • 内壁,该内壁被封闭在该外壁内并且包括内圆柱形部分,该内圆柱形部分以该中心轴线 Z_c 为中心并且具有形成内导体段的外表面,

[0006] 该谐振腔关于与该中心轴线 Z_c 垂直并且与该外圆柱形部分和内圆柱形部分相交的中平面 P_m 对称;

[0007] (b) 电子源,该电子源被适配用于沿着该中平面 P_m 从该外导体上的引入口到该中心轴线 Z_c 将电子束径向地注入到该谐振腔中,

[0008] (c) RF系统,该RF系统耦合至该谐振腔并且被适配用于在该外导体与该内导体之间生成电场 E ,该电场以频率(f_{RF})进行振荡,以沿着该中平面 P_m 中从该外导体朝着该内导体延伸的径向轨迹以及从该内导体朝着该外导体延伸的径向轨迹使该电子束的电子加速;

[0009] (d) 磁体系统,该磁体系统包括多个电磁体,该多个电磁体被适配用于在偏转腔室中将该电子束的轨迹从一个径向轨迹偏转到不同的径向轨迹,每个径向轨迹都处于该中平面 P_m 中并且从该电子源穿过该中心轴线 Z_c 到达电子束出口。

[0010] 在下文中,术语“rhodotron”被用作具有谐振腔的电子加速器的同义词,该电子加速器适合用于使电子束在垂直于中心轴线 Z_c 并多次穿过该中心轴线的平面轨迹上加速。

[0011] 如图1(a)和图1(b)所示,电子束的电子沿着谐振腔的直径(两个半径,2R)被电场 E 加速,该电场由RF系统在外导体段与内导体段之间并且在内导体段与外导体段之间生成。振荡电场 E 首先在外导体段与内导体段之间的距离内使电子加速。当电子横跨谐振腔的包括在内圆柱形部分内的中心周围的区域时,电场的极性改变。谐振腔的中心周围的此区域提供从电场到以恒定速度继续其轨迹的电子的屏蔽。然后,在电子的轨迹的包括于内导体段与外导体段之间的部分中,电子被再次加速。当电子被电磁体偏转时,电场的极性再次改变。然后,按需要频繁重复该过程以使电子束达到其被排出rhodotron的目标能量。因此,电子在中平面 P_m 中的轨迹具有花的形状(见图1)。因此,可以从rhodotron提取具有给定能量的加速电子束。

[0012] rhodotron可以组合到如束线和束扫描系统等外部设备上。Rhodotron可以在包括

(例如对医疗设备的)杀菌、聚合物改性、聚合物交联、浆粕加工、晶体改性、半导体改进、束辅助化学反应、食物低温巴氏杀菌和防腐、检测和安全性目的、废料处理等的工业应用中使用。还可以通过将适当能量的电子束射入到金属靶中来产生X射线。X-射线可以在如例如(医学)放射性-同位素生产等不同的应用中使用。所需的电子束能量和密度高度取决于应用。通常,避免使用能量高于10MeV的电子束,以防止诱发和激活核反应。X-射线是从能量通常低于7.5MeV的电子束产生的。7MeV的电子束通常非常适合用于对医疗设备的杀菌、表面杀菌、聚合物交联等。通过电子束进行的食品加工应用可以大致分为:

- [0013] • 低能量(<1MeV),包括对包装材料的内联杀菌和对种子表面的内联杀虫/杀菌;
- [0014] • 中等能量(1-8MeV),包括对包装水果和包装蔬菜的植物检疫处理;以及
- [0015] • 高能量(8-10MeV)应用,包括对包装肉类、包装调味品、包装海鲜和包装食品添加剂的巴氏杀菌。

[0016] 从前述内容可以理解,如果给定的电子加速器允许所提取电子束的能量根据期望应用而变化,那将是有利的。rhodotron就是这种情况。参照图1(a)和图1(b),假设电子束每次穿过谐振腔的直径之后的能量增加是 $w_i = 1\text{MeV}/\text{穿过}$,则在七次穿过谐振腔之后可以提取7MeV的电子束,如图1(a)和图2(b1)和图2(b2)所示。如图1(b)和图2(c1)和图2(c2)所展示的,通过去激活或移除两个偏转腔室(305,306),穿过谐振腔的次数可以减少至五次,从而产生5MeV的所提取电子束。因此,通过简单地利用偏转腔室的数量从而限制了束在谐振腔上的“花瓣”数量或穿过次数,可以很容易地将rhodotron单元配置成用于提取不同能量的电子束。

[0017] 利用当前的加速器来改变所提取电子束的能量的问题在于提取路径随着每种能量而改变方向,这取决于所增加或移除的偏转腔室的数量和位置。如图1(a)和图1(b)所示,靶(100)沿着第一直线提取轨迹拦截7MeV的所提取电子束,但是如果该靶(100)必须被5MeV击中,则5MeV的所提取电子束必须沿着第二锯齿形轨迹偏离以到达该靶。电子束的每个偏离都会增加系统的复杂性和庞大、并且增加生产成本和安装成本。

[0018] EP3319403提出了一种安装在架子上的rhodotron,使得rhodotron的角取向可以改变,以在偏转腔室的数量改变时保持所提取电子束的相同取向。尽管与以前的加速器相比这种设计代表了巨大的突破,但是改变加速器相对于机架的取向是一项繁重的工作,并且不适用于从早上7MeV的第一应用更改为下午5MeV的第二应用。

[0019] 本发明提出了一种能够沿着单条提取路径提取不同能量的电子束的rhodotron。提取能量的变化是容易、快速且可靠的,并且该变化可以是离散的或连续的。这个解决方案可以被实施用于任何尺寸、能量和功率的rhodotron,并且还可以通过简单的修改被实施用于现有的rhodotron单元。在以下章节中更详细地描述了这些优点。

发明内容

[0020] 本发明在所附独立权利要求中被限定。优选实施例在从属权利要求中被限定。特别地,本发明涉及一种电子加速器,该电子加速器包括:

[0021] (a) 谐振腔,该谐振腔由空心闭合导体组成,该谐振腔包括:

- [0022] • 外壁,该外壁包括外圆柱形部分,该外圆柱形部分具有中心轴线 Z_c 并且具有形成外导体段的内表面,以及

[0023] • 内壁,该内壁被封闭在该外壁内并且包括内圆柱形部分,该内圆柱形部分具有该中心轴线 Z_c 并且具有形成内导体段的外表面,

[0024] 其中,该谐振腔关于与该中心轴线 Z_c 垂直的中平面 P_m 对称;

[0025] (b) 电子源,该电子源被适配用于沿着该中平面 P_m 从该外导体段上的引入口到该中心轴线 Z_c 将电子束径向地注入到该谐振腔中;

[0026] (c) RF系统,该RF系统耦合至该谐振腔并且被适配用于在该外导体段与该内导体段之间生成电场 E ,该电场以频率(f_{RF})进行振荡,以沿着该中平面 P_m 中从该外导体段朝着该内导体段延伸的径向轨迹以及从该内导体段朝着该外导体段延伸的径向轨迹改变该电子束的电子的速度;

[0027] (d) N 个磁体单元,其中 $N > 1$ 并且 $N \in \mathbb{N}$,该 N 个磁体单元中的每一个以该中-平面 P_m 为中心、并且包括一组偏转磁体,这些偏转磁体被适配用于在通过腔体出口孔和腔体入口孔与该谐振腔流体连通的偏转腔室中生成磁场,该磁场被适配用于:

[0028] • 使沿着该中平面 P_m 通过该谐振腔中的第一径向轨迹末端处的该腔体出口孔进入该偏转腔室的电子束在具有附加长度(L_+)的第一偏转轨迹上偏转,所述第一偏转轨迹从该腔体出口孔延伸到该腔体入口孔,该腔体入口孔可以与该腔体出口孔相同或不同,该电子束通过该腔体入口孔沿着该中平面 P_m 中的第二径向轨迹朝着该中心轴线被重新引入到该谐振腔中,所述第二径向轨迹不同于该第一径向轨迹,其中

[0029] • 该附加长度(L_+)使得当该电子束被重新引入到谐振腔中时,该RF系统被同步以施加电场从而沿着该第二径向轨迹使该电子束加速;

[0030] (e) 出口,该出口用于从该谐振腔朝着靶提取能量为 W 的加速电子束,

[0031] 其中,该 N 个磁体单元中的至少一个是可变-磁体单元,该可变磁体单元被适配用于将相应的第一偏转轨迹修改为具有不同于并且优选地大于该附加长度(L_+)的第二长度(L_2)的第二偏转轨迹,从而允许从该出口提取的加速电子束的能量 W 的变化。

[0032] 该第二长度(L_2)优选地使得当该电子束被重新引入到该谐振腔中时,该RF系统被同步以施加电场从而沿着该第二径向轨迹使该电子束减速。

[0033] 在第一实施例中,该至少一个可变-磁体单元是分立的可变磁体双单元,该分立的可变磁体双单元包括:

[0034] • 第一组磁体,该第一组磁体以该中-平面 P_m 为中心、位于距该中心轴线 Z_c 的第一径向距离处、并且被配置成用于使该电子束沿着具有附加长度 L_+ 的偏转轨迹偏转,其中,该第一组磁体可以被激活或去激活,以在相应的偏转腔室中生成或不生成磁场;以及

[0035] • 第二组磁体,该第二组磁体以该中平面 P_m 为中心、与该第一组磁体径向对准、并且位于距该中心轴线 Z_c 的第二径向距离处,该第二径向距离大于该第一径向距离。

[0036] 该第一组磁体和该第二组磁体优选地被适配用于在以下腔室中生成磁场:

[0037] • 在这两组磁体共用的单个偏转腔室中;或者

[0038] • 分别在第一偏转腔室和第二偏转腔室中,该第一偏转腔室通过一个或两个窗口与该第二偏转腔室流体连通。

[0039] 在第二实施例中,该至少一个可变-磁体单元是移动的可变-磁体单元,该移动的可变磁体单元包括用于沿着与由该中心轴线 Z_c 处的第一径向轨迹和第二径向轨迹形成的角度的平分线平行的平分方向离散地或连续地来回径向移动该至少一个可变-磁体单元、

并且因此离散地或连续地改变从该出口提取的加速电子束的能量 W 的移动装置。该移动装置可以包括电机,该电机用于沿着相应的平分方向该使至少一个移动的可变-磁体单元来回移位。

[0040] 在优选的实施例中,rhodotron可以进一步包括偏转器,

[0041] • 用于在到达该腔体出口孔的该电子束被该磁体单元圆形地偏转之前,将该电子束从该第一径向轨迹定向到与由该中心轴线 Z_c 处的第一径向轨迹和第二径向轨迹形成的角度的平分线平行的轨迹;并且

[0042] • 用于在到达该腔体入口孔的该电子束被重新引入到该谐振腔中时,将该电子束从与跟随由该磁体单元施加的圆形偏转的该平分线平行的轨迹定向到该第二径向轨迹。

[0043] 偏转器的使用具有以下优点:电子束的回转半径以及因此磁场的大小既不需要随第一组磁体和第二组磁体的径向距离变化,也不需要需随移动的可变-磁体的径向距离变化。

[0044] 该第二长度(L_2)优选地等于附加长度(L_+)与电场 E 的波长 λ 的一个半长或多个半长之和,即 $L_2 = (L_+) + n\lambda/2$,其中 $n \in \mathbf{N}$,并且 n 优选地等于1。

[0045] rhodotron的优选示例包括单个可变-磁体单元,该单个可变磁体单元直接定位在出口的上游。Rhodotron的特征在于电子束在一次穿过谐振腔到达第 i 个磁体单元或者一次从第 $i-1$ 个磁体单元穿过谐振腔时的能量增益或能量损失,该能量增益或能量损失限定如下:

[0046] • 对于 $i=1$ 至 N , w_i 的值是恒定的,并且

[0047] • 电子束最后一次(第 $N+1$ 次)穿过谐振腔到达出口的能量增益或能量损失 w_i 的值包括在 $(-w)$ 与 $(+w_i)$ 之间。

[0048] 磁体单元的数量 N 优选地等于6,对于 $i=1$ 至6, w_i 优选地等于 $1\text{MeV}/$ 穿过 $\pm 0.2\text{MeV}/$ 穿过、并且对于最后一次(第7次)穿过, w_i 包括在 -1 与 $1\text{MeV}/$ 穿过 $\pm 0.2\text{MeV}/$ 穿过之间,并且其中,所提取的电子束优选地包括在 $5\text{MeV} \pm 0.2\text{MeV}$ 与 $7\text{MeV} \pm 0.2\text{MeV}$ 之间。

[0049] 该 N 个磁体单元中的每一个在偏转腔室中生成优选地包括在 0.01T 与 1.3T 之间、更优选地 0.02T 至 0.7T 的磁场。电子束可以具有包括在 30kW 与 700kW 之间、优选地在 150kW 与 650kW 之间的平均功率。

[0050] 在优选的实施例中,该谐振腔由以下各项形成:

[0051] • 第一半壳,该第一半壳具有圆柱形外壁,该圆柱形外壁具有内半径 R 并且具有中心轴线 Z_c ;

[0052] • 第二半壳,该第二半壳具有圆柱形外壁,该圆柱形外壁具有内半径 R 并且具有中心轴线 Z_c ;以及

[0053] • 中心环元件,该中心环元件具有内半径 R ,在该中-平面 P_m 的水平处夹置于该第一半壳与该第二半壳之间,

[0054] 其中,形成该外导体段的表面由该第一半壳和该第二半壳的圆柱形外壁的内表面并且由该中心环元件的内边缘形成,该内边缘优选地与该第一半壳和该第二半壳两者的内表面齐平。

附图说明

[0055] 将通过示例的方式并参照附图对本发明的这些和进一步方面进行更详细解释。

[0056] 图1示意性地示出了沿着垂直于现有技术的电子加速器的中心轴线 Z_c 的平面的俯视图的两个示例,该电子加速器被布置用于通过从实施例(a)中移除两个偏转腔室来传递(a) 7MeV的所提取电子束和(b) 5MeV的所提取电子束。

[0057] 图2示出了(a) RF电场 E 振幅作为rhodotron中电子束遵循的轨迹的距离 d 的函数。在图2(b1)中针对(b1) 7MeV的所提取电子束、并且在图2(c1)中针对5MeV的所提取电子束示出了电子束的能量 W 作为现有技术的rhodotron中的位置的函数的演变。带圆圈的数字分别对应于相应的图2(b2)和图2(c2)的rhodotron中的电子束位置,图2(b2)和图2(c2)示出了被配置成用于传递(b2) 7MeV的电子束和(c2) 5MeV的电子束的现有技术rhodotron的截面视图。

[0058] 图3示出了(a) RF电场 E 振幅作为rhodotron中电子束的位置 d 的函数。针对(b1) 7MeV的所提取电子束、(c1) 5MeV的所提取电子束以及(d1) 6MeV的所提取电子束示出了电子束的能量 W 作为根据本发明的rhodotron中的位置的函数的演变。带圆圈的数字对应于相应的图3(b2)、图3(b3)、图3(c2)、图3(c3)和图3(d2)的rhodotron中的电子束位置,其中图3(b2)和图3(b3)示出了提取7MeV的电子束的rhodotron的两个实施例,图3(c2)和图3(c3)示出了提取5MeV的电子束的rhodotron的两个实施例,并且图3(d2)示出了6MeV下的第二实施例。

[0059] 图4示意性地示出了沿着平行于电子加速器的中心轴线 Z_c 的平面的截面视图,其表示沿着中心轴线 Z_c 的电场 E 的轮廓。

[0060] 图5示出了(a)用于生产rhodotron的模块,以及(b)在中心环元件的厚度中形成的偏转腔室。

[0061] 这些附图不是按比例绘制的。

具体实施方式

[0062] Rhodotron

[0063] 图1、图2(b2)和图2(c2)以及图4示出了rhodotron的示例,该rhodotron包括:

[0064] • 谐振腔(1),该谐振腔由空心闭合导体组成;

[0065] • 电子源(20);

[0066] • 真空系统(未示出);

[0067] • RF系统(70);

[0068] • 磁体系统,该磁体系统包括至少一个磁体单元(30i)。

[0069] 谐振腔

[0070] 谐振腔(1)包括:

[0071] • 中心轴线 Z_c ;

[0072] • 外壁,该外壁包括外圆柱形部分,该外圆柱形部分与中心轴线 Z_c 同轴并且具有形成外导体段(1o)的内表面;

[0073] • 内壁,该内壁被封闭在该外壁内并且包括内圆柱形部分,该内圆柱形部分与中心轴线 Z_c 同轴并且具有形成内导体段(1i)的外表面;

[0074] • 两个底盖(11b,12b),这些底盖连接外壁和内壁,由此闭合谐振腔;

[0075] • 中平面 P_m ,该中平面垂直于中心轴线 Z_c 并且与内圆柱形部分和外圆柱形部分相交。中平面与中心轴线的交点限定了谐振腔的中心。

[0076] 谐振腔(1)关于中平面 P_m 被分成两个对称部分。谐振腔关于中平面的这种对称性关系到谐振腔的几何结构并且忽略了例如用于连接RF系统(70)或真空系统的任何开口的存在。因此,谐振腔的内表面形成呈环形体形状的空心闭合导体。沿中心轴线 Z_c 测得的谐振腔的高度通常为 $1/2\lambda$,其中 λ 为RF波长。垂直于中心轴线 Z_c 测得的谐振腔的直径可以为 0.72λ ,以允许偏转腔室内的传输。

[0077] 中平面 P_m 可以是竖直的、水平的或者关于rhodotron所停留的地面具有任何适当定向。优选地,中平面是水平的或者竖直的。

[0078] 谐振腔(1)可以包括用于连接RF系统和真空系统(未示出)的开口。优选地,这些开口形成于这两个底盖(11b,12b)中的至少一个中。

[0079] 外壁还包括与中平面 P_m 相交的孔。例如,外壁包括用于将电子束(40)引入到谐振腔(1)中的引入口。外壁还包括用于将被加速到期望能量的电子束(40-5至40-7)排出谐振腔的电子束出口(50)。外壁还包括使谐振腔与相应的偏转腔室(31,见下文)流体连通的腔体出口孔/腔体入口孔(31w)。通常,rhodotron包括多个磁体单元和多个腔体出口孔/腔体入口孔。

[0080] Rhodotron通常使电子束的电子加速到可以包括在1MeV与50MeV之间(优选地,在3MeV与20MeV之间;更优选地,在5MeV与10MeV之间)的能量。如上所讨论的,为了避免核反应,在大多数工业应用中应用不超过10MeV的能量。电子是相对论的,在50keV时电子达到 $0.4c$ (其中 c 是光速),在1MeV时电子达到大约 $0.94c$,并且在10MeV时电子达到 $0.9988c$ 。在一次穿过谐振腔之后,能量通常为1MeV的电子的速度可以稳定地近似为基本上恒定。

[0081] Rhodotron具有高平均功率,该平均功率可以包括在30kW至700kW之间,优选地在150kW与650kW之间,更优选地在160kW与190kW之间。例如,IBA的rhodotron模型TT50可以提取能量最高达10MeV的束,平均功率包括在1kW与10kW之间。TT50具有直径0.6m的谐振腔,并且以每次穿过1MeV/穿过的能量增益 w_i 使电子束加速。具有直径1m的谐振腔的IBA的rhodotron模型TT100可以提取能量包括在3MeV与10MeV之间的电子束,在最高达40kW的功率下每次穿过的能量增益 w_i 为 $0.83\text{MeV}/\text{穿过}$ 。具有直径2m的谐振腔的TT200以 $w_i = 1\text{MeV}/\text{穿过}$ 的速率且最高达190kW的功率提取3MeV至10MeV的电子束。TT1000具有与TT200相同的直径2m的谐振腔、但是以最高达630kW的功率下 $w_i = 1.2\text{MeV}/\text{穿过}$ 的速率提取3MeV至7MeV的束。

[0082] 内壁包括与相应的腔体出口孔/腔体入口孔(31w)径向对准的开口,这些开口允许电子束沿着(与中心轴线 Z_c 相交的)直线径向轨迹穿过内圆柱形部分。

[0083] 谐振腔(1)的由空心闭合导体组成的表面由导电材料制成。例如,导电材料可以是金、银、铂、铝、(优选地)铜之一。外壁和内壁以及底盖可由涂覆有导电材料层的钢制成。

[0084] 谐振腔(1)可以具有包括在0.3m与4m之间(优选地,在0.4m与3m之间;更优选地,在0.5m与2m之间)的直径 $2R$ 。

[0085] 谐振腔(1)的平行于中心轴线 Z_c 测得的高度可以包括在0.3m与4m之间(优选地,在0.4m与1.2m之间;更优选地,在0.5m与0.7m之间)。

[0086] 包括谐振腔(1)、电子源(20)、真空系统、RF系统以及一个或多个磁体单元(30i)的rhodotron的平行于中平面 P_m 测得的外径可以包括在1m与5m之间(优选地,在1.2m与2.8m之间;更优选地,在1.4m与1.8m之间)。rhodotron的平行于中心轴线 Z_c 测得的高度可以包括在0.5m与5m之间(优选地,在0.6m与1.5m之间;更优选地,在0.7m与1.4m之间)。

[0087] 电子源、真空系统和RF系统

[0088] 电子源(20)被适配用于生成电子束(40)并且用于通过引入口沿着中平面 P_m 朝着中心轴线 Z_c 将该电子束引入到谐振腔中。例如,电子源可以是电子枪。如本领域的普通技术人员熟知的,电子枪是产生具有精确动能的窄准直电子束的电气部件。

[0089] 真空系统包括用于将空气泵出谐振腔(1)并且在其中产生真空的真空泵。

[0090] RF系统经由耦合器耦合至谐振腔(1)并且通常包括被设计用于以谐振频率 f_{RF} 振荡以生成波长为 λ 的RF信号的振荡器,随后是一个放大器或一串放大器,用于在该串的端部实现期望输出功率。因此,RF系统在谐振腔中生成谐振径向电场 E 。在没有任何相反的措施的情况下,谐振径向电场 E 进行振荡以使电子束(40)的电子沿着位于中平面 P_m 中的轨迹从外导体段朝着内导体段并且随后从内导体段朝着腔体出口孔(31w)加速。谐振径向电场 E 通常属于“TE001”型,其限定了电场是横向的(“TE”)、具有旋转对称性(第一个“0”)、不沿着腔体的一个半径抵消(第二个“0”)并且在平行于中心轴线 Z_c 的方向上是所述场的半周期。

[0091] 磁体单元(30i)

[0092] N 个磁体单元(30i)围绕外壁的外圆周分布、并且以中-平面 P_m 为中心,其中 $N > 1$ 并且 $N \in \mathbb{N}$ 。该 N 个磁体单元中的每一个包括一组偏转磁体,这些偏转磁体被适配用于在偏转腔室(31)中生成磁场。偏转腔室通过腔体出口孔和腔体入口孔与谐振腔(1)流体连通,腔体出口孔和腔体入口孔可以是分开的孔或者合并为单个孔,所有这些孔都由标记(31w)表示。所有的偏转腔室封闭中-平面 P_m 的一部分。

[0093] 优选地,磁体系统包括多个磁体单元(30i,其中 $i = 1, 2, \dots, N$)。 N 等于磁体单元的总数并且包括在1与15之间(优选地,在4与12之间;更优选地,在5与10之间)。在常规的rhodotron中,数量 N 的磁体单元在电子束(40)以给定能量 $(N+1) * w_i$ 离开rhodotron之前产生对该电子束的电子的 $(N+1)$ 次加速,其中 w_i 是电子束在一次穿过谐振腔到达磁体单元(30i)或者一次从磁体单元(30(i-1))穿过谐振腔时得到或失去的能量。例如,图1(a)和图2(b2)展示了具有 $N=6$ 个磁体单元(301-306)的rhodotron。图1(b)和图2(c2)示出了具有 $N=4$ 个磁体单元(301-304)的rhodotron。图2(b1)和图2(c1)中展示的每次穿过谐振腔的能量增益 w_i 为1MeV/穿过,分别产生能量为 $(N+1) * 1\text{MeV} = 7\text{MeV}$ 和 5MeV 的所提取电子束。

[0094] 由相应的磁体单元在每个偏转腔室中生成的磁场被适配用于使沿着中平面 P_m 通过谐振腔中第一径向轨迹末端处的腔体出口孔进入偏转腔室的电子束在具有附加长度 $(L+)$ 的第一偏转轨迹上偏转。第一偏转轨迹从腔体出口孔延伸到腔体入口孔,腔体入口孔可以与腔体出口孔相同或不同,电子束通过腔体入口孔沿着中平面 P_m 中的第二径向轨迹朝着中心轴线被重新引入到谐振腔中。第二径向轨迹不同于第一径向轨迹、并且在中心轴线 Z_c 处与第一径向轨迹相交。附加长度 $(L+)$ 使得当电子束被重新引入到谐振腔中时,RF系统被同步以施加电场从而沿着腔体入口孔与中心轴线 Z_c 之间的第二径向轨迹(参见图2(a)、图2(b1)、图2(c1)、图3(a)和图3(b1)-图3(d1)中位置(2)与(3)之间的部分)使电子束加速。

[0095] 电子束由电子源(20)通过引入口沿着中平面 P_m 注入谐振腔中。电子束遵循中平面

P_m中的第一径向轨迹,所述轨迹依次穿过:

- [0096] • 外壁(通过腔体入口孔(31w));
- [0097] • 内壁(通过腔体出口孔);
- [0098] • 谐振开口的中心(即,中心轴线Z_c);
- [0099] • 内壁(通过腔体入口孔);
- [0100] • 外壁(通过腔体出口孔(31w));
- [0101] • 第一偏转腔室(31);并且
- [0102] • 通过腔体入口孔穿回外壁,该腔体入口孔可以与上一个腔体出口孔相同或不同。

[0103] 如图3(b1)-图3(b3)中展示的,通过腔体出口孔离开谐振腔的电子束被磁体单元(30i)的偏转磁体偏转、并且通过第一腔体入口孔(31w)(该第一腔体入口孔可以与第一腔体出口孔相同或不同)沿着不同的径向轨迹被重新引入到谐振腔中,从而形成花朵的第一花瓣。电子束可以遵循这样的路径N次,从而形成以中心轴线Z_c为中心并且包含在中-平面P_m中的N个花瓣,直到电子束达到目标能量。然后,电子束通过电子束出口(50)被提取出谐振腔。

[0104] 偏转腔室中需要的磁场必须足以使沿着径向轨迹通过腔体出口孔(31w)离开谐振腔的电子束的轨迹按角度大于180°的圆弧弯曲以便驱动该电子束沿着第二径向轨迹返回到谐振腔中。例如,在包括九(9)个磁体单元(30i)的rhodotron中,该角度可以等于198°。圆弧的半径(即,回转半径)可以为大约40mm到250mm,优选地,在50mm与180mm之间。因此,腔室表面必须在径向方向上具有大约65mm到260mm的长度。根据期望的回转半径,将电子束弯曲成这种圆弧所需的磁场在大约0.01T与1.3T之间,优选地,0.02T到0.7T,例如0.2T或者0.3T。

[0105] 磁体单元可以包括电磁体,该电磁体允许容易地控制在磁体单元中产生的磁场的大小。在优选的实施例中,代替第一电磁体和第二电磁体或除了第一电磁体和第二电磁体之外,一个或多个磁体单元(优选地,N个磁体单元)可以包括第一永磁体和第二永磁体。永磁体和电-磁体在下文进行讨论。

[0106] 在本文档中,径向轨迹被定义为包括在中-平面P_m并且与中心轴线Z_c垂直相交的直线轨迹。

[0107] 可变-磁体单元

[0108] 在从现有技术的rhodotron中提取的电子束的目标能量的变化伴随着所述电子束的提取路径的取向的变化而需要将电子束朝向靶(100)重新定向的情况下,如图1(a)中针对7MeV能量以及图1(b)中针对5MeV能量所展示的,本发明的要点是提供N个磁体单元(30i)中的至少一个作为“可变-磁体单元”(306-5,306-7,306v),该可变磁体单元是一种磁体单元,其被适配用于将相应的第一偏转轨迹修改为具有不同于并且优选地大于附加长度(L₊)的第二长度(L₂)(即L₂>L₊)的第二偏转轨迹,从而允许从出口(50)提取的加速电子束的能量W的变化。通过将图3(b2)与图3(c2)的rhodotron进行比较以及将图3(3)与图3(c3)和3(d3)的rhodotron进行比较,可以看出使用可变-磁体单元允许通过单个出口(50)沿着单条提取路径提取不同能量的电子束(40-5,40-6,40-7)。

[0109] 如在常规的rhodotron中一样,根据本发明的设有包括至少一个可变-磁体单元

(306-5,306-7,306v)的N个磁体单元(301-305)的rhodotron可以在电子束(40)以给定能量 $(N+1)*w_i$ 离开rhodotron之前生成对该电子束的电子的(N+1)次加速。这在图3(b1)至图3(b3)中进行了展示,其中包括N=6个磁体单元(包括可变-磁体单元(306-5,306-7,306v))的rhodotron在电子束连续(N+1)=7次穿过谐振腔之后提取7MeV的电子束。这个结果是通过将可变-磁体单元(306-5,306-7,306v)中的偏转轨迹的长度设置为与其他(非可变)磁体单元(301-305)的偏转轨迹相同的附加长度 $L+$ 获得的。因此,rhodotron表现类似于现有技术的传统rhodotron。

[0110] 可变磁体单元(306-5,306-7,306v)适用于将偏转腔室中电子束的偏转轨迹从长度为 $L+$ 的第一偏转轨迹改变为长度为 L_2 的第二偏转轨迹,第二偏转轨迹的长度不同于(优选地大于)第一偏转轨迹的附加长度 $L+$ 。这具有相对于RF电场E的频率改变对电子束通过腔体入口孔(31w)穿透进入谐振腔的同步的效果。

[0111] 在优选的实施例中,第二长度(L_2)使得当电子束被重新引入到谐振腔中时,RF系统被同步以施加电场从而沿着第二径向轨迹使电子束减速,从而减少电子束的能量W。例如,在图3(a)、图3(c1)和图3(c2)中展示的实施例中,第二长度 L_2 比附加长度 $L+$ 长 $1/2\lambda$ (即, $L_2=(L+)+1/2\lambda$),使得通过可变-磁体单元中的具有附加长度 $L+$ 的偏转轨迹之后的腔体入口孔穿透进入谐振腔的第一电子会遇到电场E,该电场的振幅与由在具有第二长度($L_2>L+$)的偏转轨迹之后的第二电子遇到的电场相同、但符号相反。当第一电子在穿透进入谐振腔时被加速时,由于较长的偏转轨迹而延迟的第二电子被符号相反的电场减速。

[0112] 参照图3(b1)可以看出,在偏转了附加长度 $L+$ 之后,第一电子被外壁(即,位置(12))与内壁(即,位置(13))之间的负电场加速(能量W增加),并且在穿过中心轴线 Z_c 之后,第一电子再被正电场(在位置(14)与(15)之间)加速,从而达到7MeV的能量,可以通过出口(50)提取该能量的第一电子。相比之下,参照图3(c1),第二电子在被偏转了比附加长度 $L+$ 长 $1/2\lambda$ 的第二长度 L_2 之后,被外壁(即,位置(12))与内壁(即,位置(13))之间的正电场减速(能量W下降),并且在穿过中心轴线 Z_c 之后,再被负电场(在位置(14)与(15)之间)减速,从而达到5MeV的能量,可以通过与第一电子的情况相同的出口(50)提取该能量的第二电子。

[0113] 本文所使用的术语“加速”和“减速”指的是能量变化,尽管相对论电子束迅速地接近光速,并且其速度可以近似为基本上恒定、但不是完全恒定。不管电子的相对论表现如何,电子束的能量在每次穿过谐振腔时通过暴露于电场都会增加($W=q E d$)。

[0114] 如果可变-磁体单元(306v,306-5)到中心轴线 Z_c 的径向距离增大,则相应的第一径向轨迹和第二径向轨迹会延长,并且由于第一径向轨迹和第二径向轨迹是发散的,所以连接第一径向轨迹和第二径向轨迹的自由端所需的偏转轨迹的半径(称为“回转半径”)也必须增大。由于回转半径与磁场成反比,因此在没有防止回转半径的这种增大的任何其他措施的情况下,可变-磁体单元的磁场必须随着到中心轴线 Z_c 的径向距离的增大而减小。在图3(c2)和图3(d3)中可以清楚地看到回转半径随着可变-磁体单元到中心轴线 Z_c 的径向距离的增大而增大。

[0115] 在图3(b3)、图3(c3)和图3(d2)中展示的优选实施例中,通过使用偏转器(30d)来如下使电子束的轨迹偏转可以使可变-磁体单元的回转半径保持恒定、而与该可变量单元到中心轴线 Z_c 的径向距离无关:

[0116] • 在到达腔体出口孔的电子束被磁体单元圆形地偏转之前,将该电子束从第一径

向轨迹定向到与由中心轴线 Z_c 处的第一径向轨迹和第二径向轨迹形成的角度的平分线平行的轨迹;并且

[0117] • 在到达腔体入口孔的电子束被重新引入到谐振腔中时,将该电子束从与跟随由磁体单元施加的圆形偏转的平分线平行的轨迹定向到第二径向轨迹。

[0118] 在优选的实施例中, rhodotron包括单个可变-磁体单元(306-5,306-7,306v),该可变磁体单元直接定位在出口(50)的上游。电子束在一次穿过谐振腔到达磁体单元(30i)或者一次从磁体单元(30(i-1))穿过谐振腔时得到或失去的能量 w_i 对于 $i=1$ 至 N 是恒定的,并且在电子束最后一次(第 $(N+1)$ 次)穿过谐振腔到达出口(50)时 w_i 在 $(-w_i)$ 与 $(+w_i)$ 之间变化。如在图3的实施例中,在 $N=6$,并且对于 $i=1$ 至 6 , $w_i=1\text{MeV/穿过}$,并且对于最后一次(第7次)穿过, w_i 包括在 -1MeV/穿过 与 1MeV/穿过 之间的情况下,所提取的电子束(40-5至40-7)具有包括在 5MeV 与 7MeV 之间的能量。

[0119] 在rhodotron中使用至少一个可变-磁体单元(306v,306-5,306-7)很好地解决了沿单条路径提取不同能量 W 的电子束(40-5至40-7)的问题。在本发明中可以实施不同类型的可变磁体单元,包括分立的可变-磁体双单元(306-5,306-7)和移动的可变-磁体单元(306v)。

[0120] 分立的可变-磁体双单元

[0121] 在图3(b2)和图3(c2)中展示的第一实施例中,可变-磁体单元(306-5,306-7)包括两组磁体。

[0122] • 第一组磁体(306-7)以中-平面 P_m 为中心、位于距中心轴线 Z_c 的第一径向距离处、并且被配置成用于使电子束偏转附加长度 L_+ ,其中,该第一组磁体可以被激活或去激活,以生成或不生成磁场;当被激活时,该第一组磁体使电子束穿透进入谐振腔与加速电场 E 同步。

[0123] • 第二组磁体(306-5)以中平面 P_m 为中心、与第一组磁体径向对准、并且位于距中心轴线 Z_c 的第二径向距离处,该第二径向距离大于第一径向距离。当第一组磁体(306-7)被去激活时,第二组磁体(306-5)被配置成用于使电子束偏转第二长度 $L_2>L_+$ 。当第一组磁体被去激活时,第二组磁体将电子束穿透进入谐振腔与电场 E 同步,该电场不像第一组磁体一样进行加速。优选地,电子束穿透进入谐振腔与减速电场 E 同步。

[0124] 第一组磁体和第二组磁体(306-7,306-5)可以被适配用于在这两组磁体共用的单个偏转腔室(31)中生成磁场,或者分别在第一偏转腔室和第二偏转腔室(31)中生成磁场,第一偏转腔室通过一个或两个窗口与第二偏转腔室流体连通。本发明的两-腔室选项可以很容易地在现有的常规rhodotron上实施。

[0125] 前述可变-磁体单元配置允许在两个预定义且离散的能量 W 值之间切换。出于这个原因,本实施例可以称为“分立的可变-磁体双单元”。从第一组磁体(306-7)切换到第二组磁体(306-5)可以通过激活和去激活第一组磁体(306-7)很容易地完成。去激活第一组磁体可以利用电磁体通过馈送或者不馈送电流很容易地执行。如果使用永磁体来代替,则这些永磁体必须从偏转腔室移开足够远,以使磁场下降到中-平面 P_m 的水平。优选地,第一组磁体包括电-磁体。

[0126] 在图3中,在五个非-可变磁体单元(301-305)之一发生偏转之后的每次穿过都会产生每次穿过能量增益 $w_i=1\text{MeV/穿过}$,对应于IBA生产的TT200 rhodotron模型。因此,电

子束以累积能量 $(N+1)w_i = 6\text{MeV}$ 穿透进入可变-磁体单元。第六可变-磁体单元 (306-5, 306-7, 306v) 是出口 (50) 之前的最后一个可变磁体单元。因此, 示例3中的可变-磁体单元可以将所提取电子束的能量改变为以 $6\text{MeV} \pm 1\text{MeV}$ 为中心的值。

[0127] 当然, 磁体的数量 N 不一定是6, 非-可变磁体单元 (301-305) 的数量可以不同于5, 并且可变-磁体单元的数量可以不止一个、并且不一定位于出口 (50) 之前的最后位置。如果可变磁体单元不在最后位置, 则应当注意与由可变-磁体单元所激发的RF电场的同步的变化应保持到后续的穿过 (包括非-可变磁体单元)。技术人员可以轻松设计出可变-磁体单元与非-可变-磁体单元的最佳布置, 以产生期望能量范围的所提取电子束。

[0128] 分立的可变磁体双单元仅提供两个预定义的第二长度 L_2 之间的切换。可以设想第三磁体单元, 但是包括这种分立的可变-磁体三 (或更多) 单元的 rhodotron 的尺寸会相应增大。如果期望两种以上的能量 (第二长度 L_2), 则可以使用其他设计, 如移动的可变-磁体单元。

[0129] 移动的可变-磁体单元

[0130] 在图3 (c2)、图3 (c3) 和图3 (d2) 中展示的第二实施例中, 该至少一个可变-磁体单元 (306v) 包括用于沿着与由中心轴线 Z_c 处的第一径向轨迹和第二径向轨迹形成的角度的平分线平行的平分方向离散地或连续地来回径向地移动该至少一个可变-磁体单元的移动装置。这样, 偏转轨迹的第二长度 L_2 可以根据可变-磁体单元的径向位置而变化, 并且可以设置与RF电场的期望同步以获得期望的电子束能量 W 。当前面讨论的分立的可变-磁体双单元仅提供与两个预定义第二长度 L_2 相对应的两个预定义电子束能量之间的切换时, 移动的可变-磁体单元的本实施例允许第二长度 L_2 在两个以上的预定义值上变化。移动的可变-磁体单元可以在两个边界位置之间沿着平分方向离散地或连续地移动。例如, 该两个边界位置可以包括:

[0131] • 与具有附加长度 L_+ 的偏转轨迹相对应的最接近位置, 该偏转轨迹与RF电场同步以产生对穿过谐振腔的电子束的连续加速; 以及

[0132] • 比最接近位置离中心轴线 Z_c 更远的最远位置, 并且该最远位置对应于具有第二长度 $L_2 = (L_+) + 1/2\lambda$ 的偏转轨迹, 该偏转轨迹与RF电场同步以产生对穿过谐振腔的电子束的连续减速。优选地, 最远位置定义了等于附加长度 (L_+) 与电场 E 的波长 λ 的一个半长或多个半长之和的第二长度 $L_2 (L_2 = (L_+) + (n/2)\lambda)$ 。

[0133] 移动的可变磁体单元 (306v) 可以在最近位置与最远位置之间连续地移动或在离散位置移动, 以改变 L_+ 与 $(L_+) + 1/2\lambda$ 之间的第二长度 L_2 , 从而在下次穿过谐振腔时获得包括在 w_i 与 $-w_i$ 之间的能量增益。在图3的示例中, $w_i = 1\text{MeV}$ /穿过, 使得电子束在下次穿过谐振腔时得到 (或失去) 的能量可以在 -1MeV 与 $+1\text{MeV}$ 之间变化。在穿透进入最后一个可变-磁体单元之前的六次穿过之后, 电子束已经积累了 $(N+1)w_i = 6\text{MeV}$ 的能量。因此, 所提取电子束的能量可以以如下方式变化。

[0134] • 在具有长度 L_+ 的偏转轨迹之后通过最接近位置处的可变磁体单元 (306v) 穿过谐振腔的能量增益 w_i 因此为 $+1\text{MeV}$, 从而在图3 (b1) 和图3 (b3) 的示例中产生 7MeV 的所提取电子束 (40-7)。

[0135] • 在具有长度 $(L_+) + 1/2\lambda$ 的偏转轨迹之后通过最远位置处的可变磁体单元 (306v) 穿过谐振腔的能量增益 (损失) 因此为 -1MeV , 从而在图3 (c1) 和图3 (c3) 的示例中产生 5MeV

的所提取电子束(40-5)。

[0136] • 如果可变磁体单元(306v)位于最近位置与最远位置之间的中间位置,如图3(d2)所展示的,则下一次穿过谐振腔期间的能量增益 w_i 包括在-1MeV与+1MeV之间。参照图3(d1),可以看出如果第二长度 $L_2 = (L+) + 1/4\lambda$,则下一次穿过时的能量增益 $w_i = 0\text{MeV}$,从而产生6MeV的所提取电子束(40-6)。

[0137] 因此,在图3中展示的示例中,所提取电子束的能量可以被设置为包括在5MeV与7MeV之间的任何值。

[0138] 连续移动有利于在控制所提取电子束的能量方面具有更高的灵活性。另一方面,对于操作员而言,许多预定义的离散位置更易于使用,其中第二长度 L_2 被策略性地预定义为 $L_2 = (L+) + (n/m)\lambda$,其中, n/m 定义了简单分数,其中 n 和 $m \in \mathbb{N}$,并且 $n \leq m \leq 6$ 。

[0139] 如图3(d3)中展示的,移动的可变-磁体单元(306v)可以被配置成使得磁场的大小根据该移动的可变磁体单元到中心轴线(Z_c)的径向距离而自动减小,以使回转半径的值适应第一径向轨迹与第二径向轨迹之间的距离。这可以通过控制馈送给电-磁体的电流来轻松实现。

[0140] 替代性地,可以使用上文讨论的偏转器(30d)来代替。偏转器(30d)将腔体出口孔/腔体入口孔与可变-磁体单元之间的电子束轨迹定向到与由中心轴线 Z_c 处的第一径向轨迹和第二径向轨迹形成的角度的平分线平行的直线段。此实施例是有利的,因为其允许使由可变-磁体单元生成的磁场保持恒定,而不管可变-磁体单元(306v)的位置如何。因此,第二偏转轨迹的第二长度 L_2 仅等于 $L_2 = (L+) + 2r$,其中, r 是可变-磁体单元到中心轴线 Z_c 的距离增加(参见图3(c3)和图3(d2))。偏转器(30d)的使用允许可变-磁体单元代替电磁体或者除电-磁体之外还包括永磁体。

[0141] 移动的可变-磁体单元(306v)的移动装置可以包括电机,该电机用于沿着相应的平分方向使该移动的可变-磁体单元(306v)来回移位。

[0142] 包括 N 个磁体单元(其中 $(N-1)$ 个磁体单元是非可变磁体单元(301-305),并且仅有一个磁体单元是直接位于出口(50)上游的可变磁体单元(306-5,306-7,306v))的rhodotron可以提取能量介于 $w_i(N \pm 1)$ 之间的电子束。每次电子束穿过图3中展示的rhodotron的谐振腔时,该电子束会得到能量 $w_i = 1\text{MeV}$ /穿过。由于图3的rhodotron包括 $(N-1) = 5$ 个非可变磁体单元(301-305),因此这些非可变磁体单元可以提取能量包括在5MeV与7MeV之间的电子束(参见图3(c2)和图3(c3)中的#40-5,图3(d2)和图3(d3)中的#40-6,以及图3(b2)和图3(b3)中的#40-7)。

[0143] 永磁体和电-磁体

[0144] 常规rhodotron中的磁体单元通常设有电-磁体。在EP3319402中已经讨论了可以使用设有永磁体的磁体单元来代替。根据本发明的rhodotron可以仅包括电-磁体、仅包括永磁体或者包括电-磁体与永磁体的组合。

[0145] 如EP3319402中所讨论的,永磁体在降低rhodotron的能耗方面具有优于电-磁体的优势,因为与电-磁体相反,永磁体不需要被供电。永磁体可以直接耦合在谐振腔的外壁上,而电磁体的线圈必须定位在距外壁的一定距离处。通过允许磁体单元直接邻近外壁,大大简化了rhodotron的构造并且相应地降低了生产成本。

[0146] 永磁体的一个主要缺点在于磁场不能像电-磁体那样容易改变。如图4中展示的,

EP3319402提出了通过将多个分立磁体元件(32)并排地布置为平行于中平面 P_m 的阵列以形成磁体单元的第一永磁体和第二永磁体中的每一个来解决此问题。该阵列由一行或多行分立磁体元件形成。阵列关于中平面 P_m 布置在偏转腔室的任一侧。通过改变每个阵列中的分立磁体元件的数量,可以相应地改变在偏转腔室中产生的磁场。

[0147] 相比之下,由电-磁体生成的磁场的大小很容易通过控制馈送给电-磁体的线圈的电流来控制。但是,电磁体是笨重的并且需要布线,这使rhodotron的生产复杂化。因此,可以使用电-磁体与永磁体的组合来获取这些优势、并且避免每种磁体的缺点。在优选的实施例中,所有磁体单元都包括永磁体,但是永磁体需要频繁对磁场进行微调。这些包括例如:

[0148] • 定位在电子源(20)对面的第一磁体单元(301)可以不同于其他(N-1)个磁体单元,这是因为相比其他磁体单元,电子束以更低的速度到达所述第一磁体单元。为了使电子束与振荡电场同相地返回到谐振腔中,第一磁体单元中的偏转路径必须稍微不同于剩余(N-1)个磁体单元。因此,第一磁体单元(301)可以是电-磁体,从而允许容易地对相应的偏转腔室(31)中生成的磁场进行微调。

[0149] • 分立的可变-磁体双单元的第一组磁体(306-7)必须被关断以使电子束到达第二组磁体(306-5)(参见图3(b2)和图3(c2))。另一方面,第二组磁体可以包括永磁体。

[0150] • 没有任何偏转器(30d)的移动的可变-磁体单元(306v),因为磁场必须根据可变-磁体单元的位置而变化,以为期望的偏转轨迹产生相应的回转半径(参见图3(d3))。

[0151] 如EP3319403中所述,rhodotron可以具有模块化结构,如图5(a)的分解视图所展示的。形成谐振腔的第一半壳和第二半壳中的每个半壳都包括圆柱形外壁、底盖(11b,12b)以及伸出底盖的中心柱(15p)。中心腔室(15c)可以夹置于第一半壳和第二半壳的中心柱之间。

[0152] 如在图5(a)中可见的,中心环元件(13)夹置于第一半壳与第二半壳之间。中心环元件具有通过其厚度彼此分离的第一主表面和第二主表面。中心环元件的一部分径向地延伸到第一半壳和第二半壳两者的外壁的外表面之外,从而形成径向地向外延伸的凸缘。磁体单元(30i)可以安装或装配到所述凸缘上。优选地,磁体单元与凸缘之间的装配对于将磁体单元与中-平面 P_m 以及电子束的轨迹精确对准来说起到一定作用。

[0153] 在图5(b)中展示的优选实施例中,磁体单元的偏转腔室(31)可以由采用中心环元件的厚度的空心腔形成,其中腔体出口孔/腔体入口孔(31w)面向中心环元件的中心和中心轴线 Z_c 形成于中心环元件的内边缘处。空心腔可以由盖子(13p)封闭。优选地,多个偏转腔室(更优选地,rhodotron的所有偏转腔室)由采用中心环元件的厚度的单独空心腔形成,其中相应的腔体出口孔/腔体入口孔面向中心轴线 Z_c 形成于中心环元件的内边缘中。出于以下原因,相比于常规设计,这种构造大大降低了rhodotron的生产成本。

[0154] 优势

[0155] 利用本发明,现在能够沿着单条提取路径提取不同能量的电子束。这种解决方案对行业非常有利,因为通过对该一个或多个可变-磁体单元进行单次微调就可以将单个rhodotron用于不同的应用,如对医疗设备进行杀菌或对不同的食品进行处理。

[0156]

附图标记 #	特征
1 i	内导体
1 o	外导体
1	谐振腔
11	第一半壳
11 b	第一半壳的底盖
12	第二半壳
12 b	第二半壳的底盖
13	中心环
13 p	盖板
14	密封 O 形环
20	电子源
30 1...	单独磁体单元
30 i	磁体单元 (总体上)
30 6-5	用于使电子束减速的分立的可变磁体双单元
30 6-7	用于使电子束加速的分立的可变磁体双单元
306 v	移动的可变磁体单元
31 w	偏转窗口
31	偏转腔室
32 i	分立磁体元件
32	永磁体
33 c	腔室表面
33 m	磁体表面
33	支撑元件

[0157]

35	磁体单元的磁轭
40	电子束
40 -5	5 MeV 电子束
40 -7	7 MeV 电子束
50	电子束出口
50 -5	5 MeV 电子束出口 (现有技术)
50 -7	7 MeV 电子束出口 (现有技术)
60	用于添加或移除磁体元件的工具
61	工具的细长型材
62	工具的细长推进件
70	RF 系统
100	靶

图 1(a) 7 MeV (现有技术)

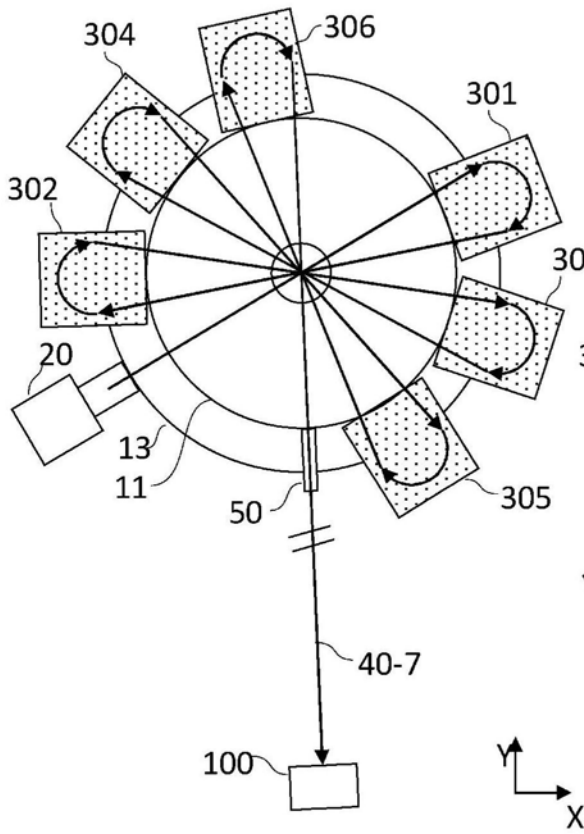
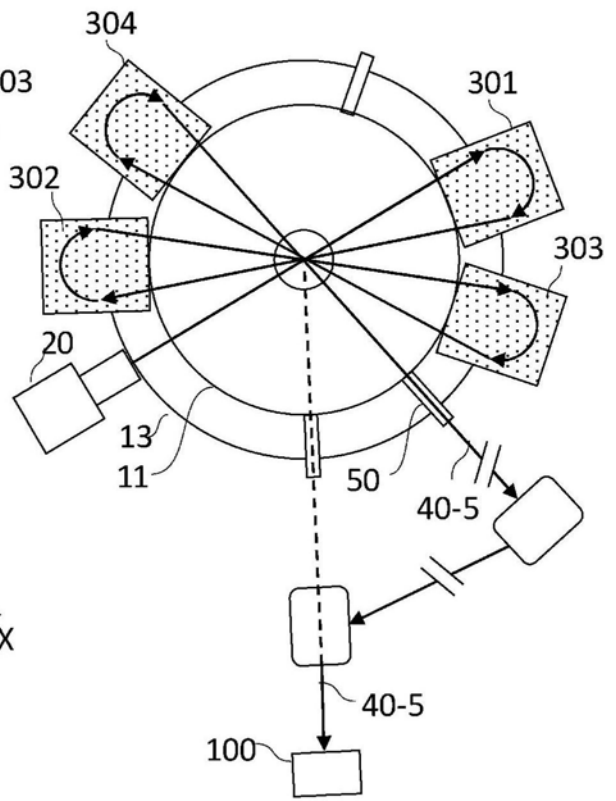


图 1(b), 5MeV (现有技术)



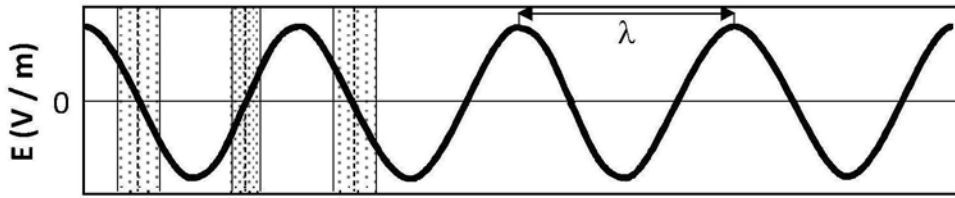


图 2(a)

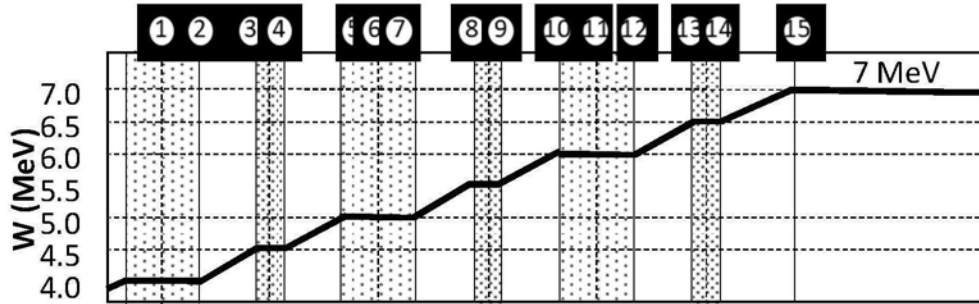


图 2(b1)
7 MeV

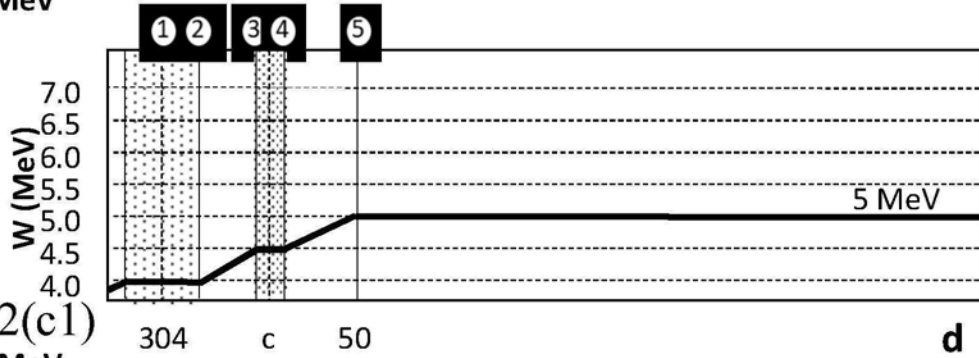


图 2(c1)
5 MeV

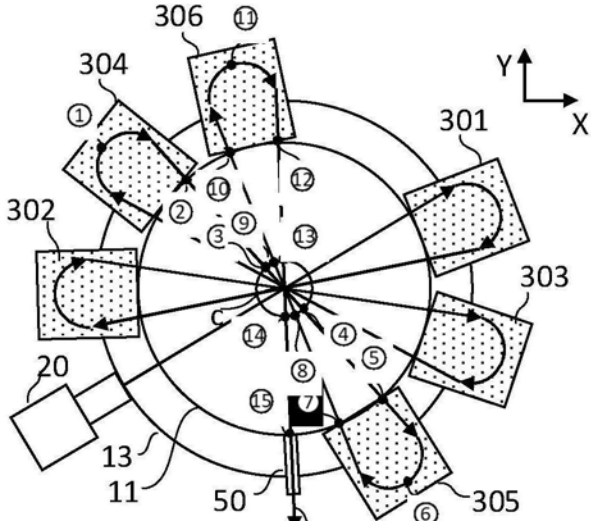


图 2(b2) 7 MeV

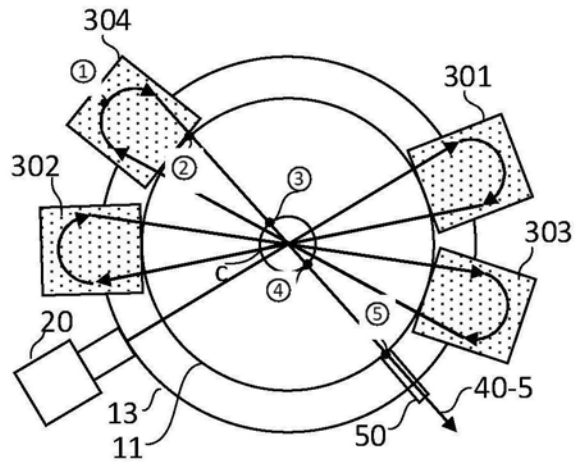


图 2(c2) 5 MeV

(现有技术)

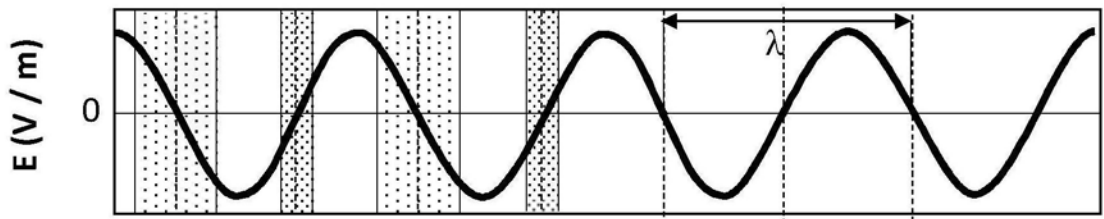


图 3(a)

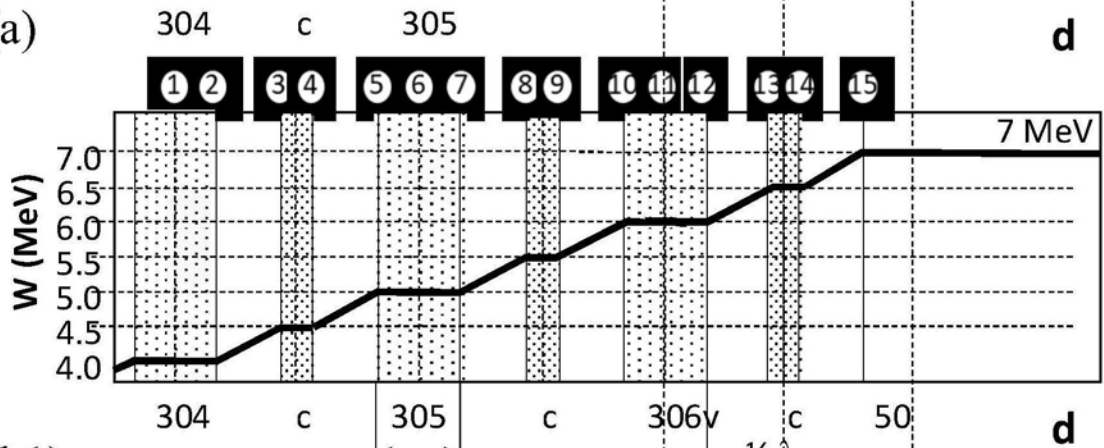


图 3(b1) 7 MeV

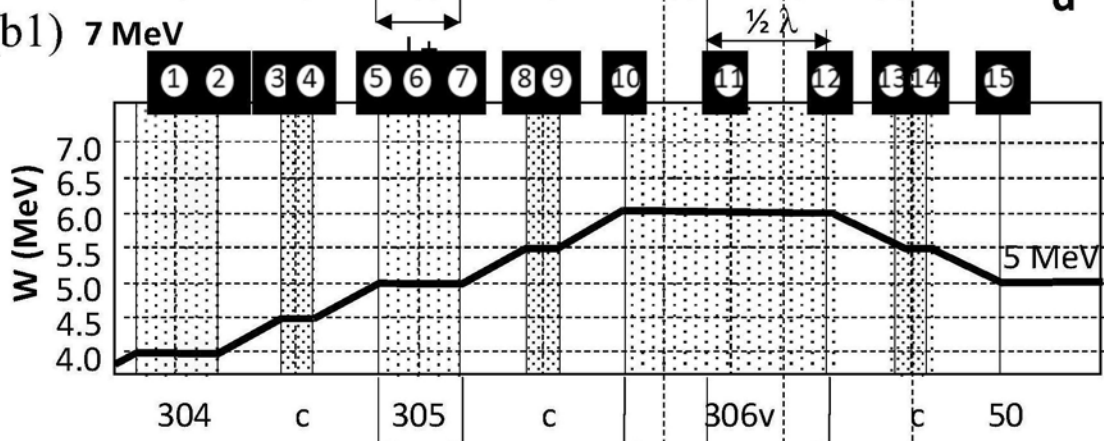


图 3(c1) 5 MeV

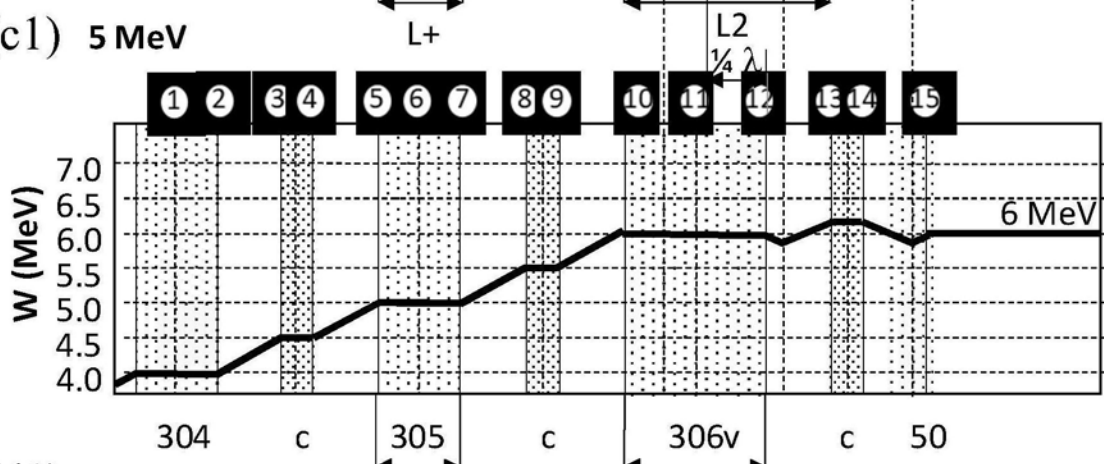


图 3(d1) 6 MeV

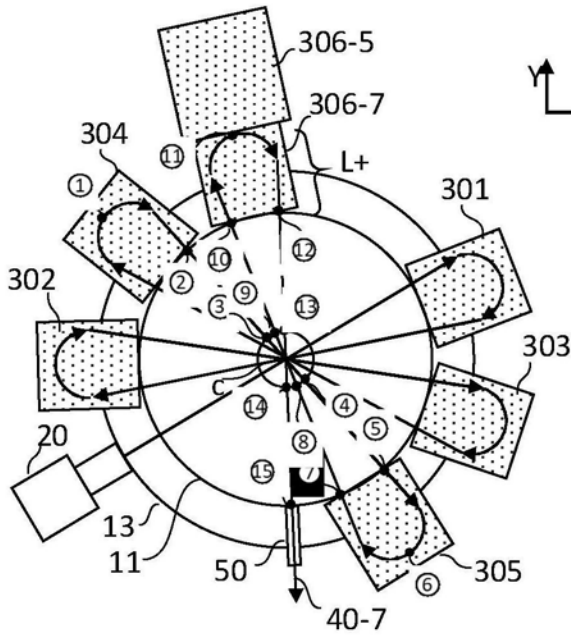


图 3(b2) 7 MeV

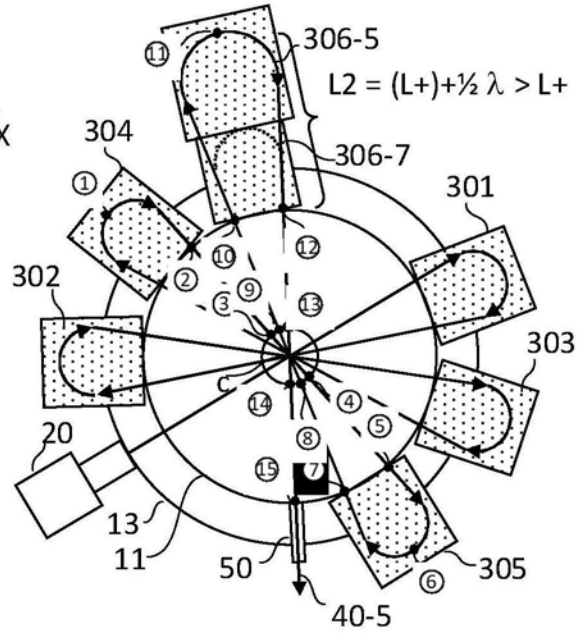


图 3(c2) 5 MeV

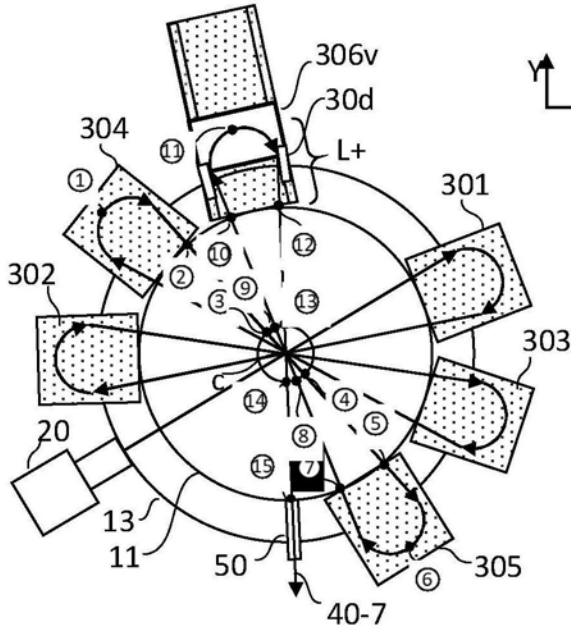


图 3(b3) 7 MeV

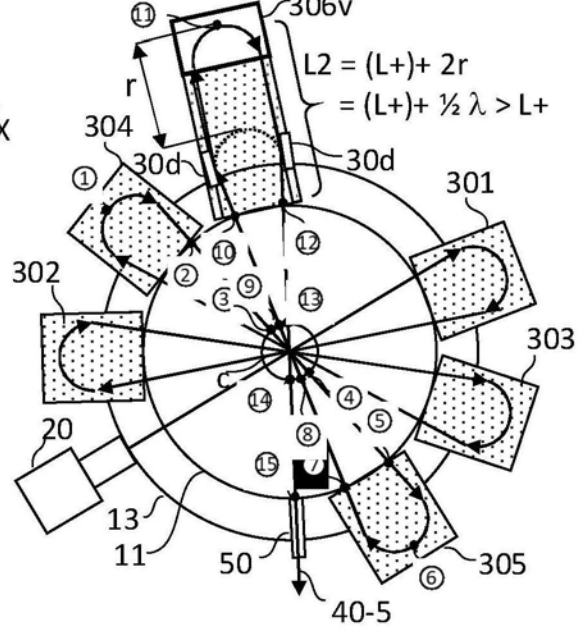


图 3(c3) 5 MeV

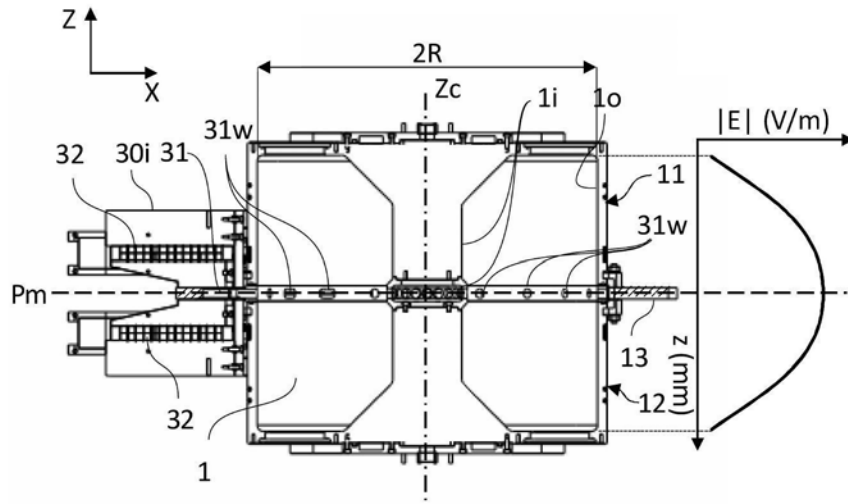


图4

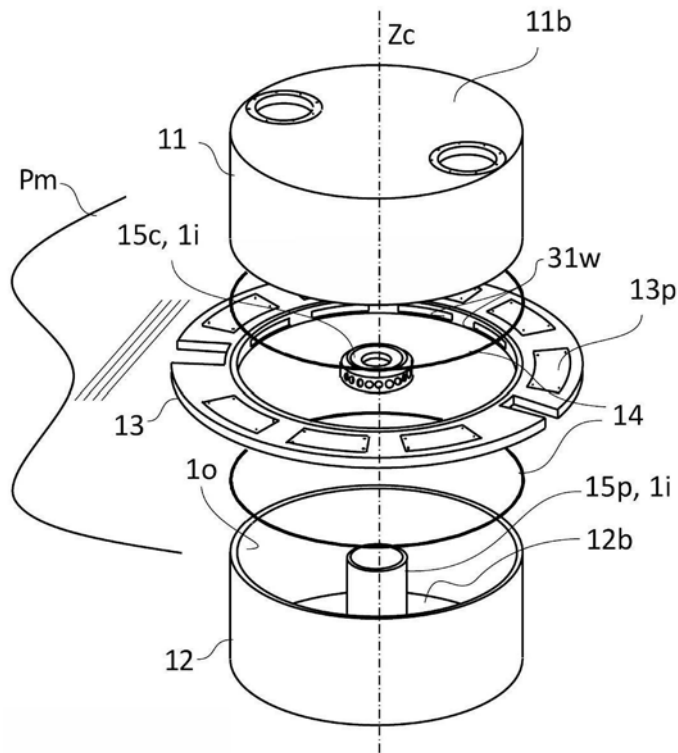
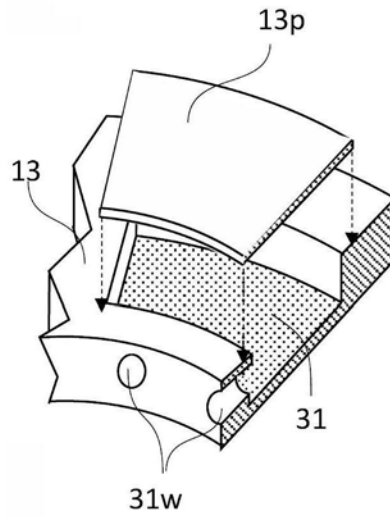


图5(a)



(b)

图5 (b)