



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113574632 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 30

(21) 申请号 201980089517.3

(22) 申请日 2019.01.11

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113574632 A

(43) 申请公布日 2021.10.29

(30) 优先权数据
62/769952 2018.11.20 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2021.07.19

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/US2019/013278 2019.01.11

(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/106310 EN 2020.05.28

(73) 专利权人 印地安纳大学理事会

地址 美国印第安纳州

(72) 发明人 M·F·贾罗德 A·R·托德

(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 史婧 张一舟

(51) Int.Cl.
H01J 49/42 (2006.01)
H01J 49/00 (2006.01)
H01J 49/02 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2009078866 A1, 2009.03.26

审查员 林兰兰

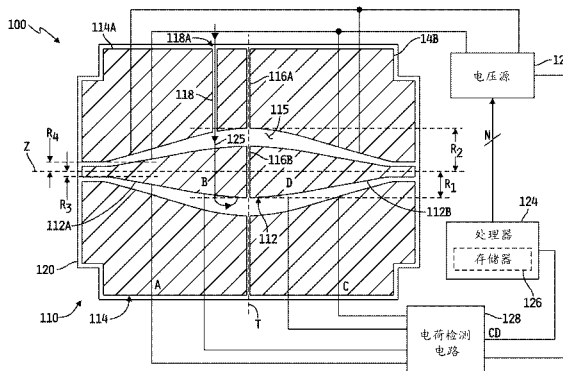
权利要求书6页 说明书14页 附图8页

(54) 发明名称

用于单粒子质谱分析的轨道阱

(57) 摘要

一种轨道阱可包括:细长的内电极和外电极,其中,内电极和外电极各自限定两个轴向地间隔开的电极半部,其中中心横向平面延伸穿过这些电极,也在两组电极半部之间穿过;空腔,其径向地围绕内电极和轴向地沿着内电极被限定在两个内电极半部与两个外电极半部之间;用于建立电场的器件,该电场被构造成在空腔中俘获离子并引起被俘获离子围绕内电极旋转并沿着内电极轴向地振荡,其中,旋转和振荡的离子在内电极半部和外电极半部上感应出电荷;以及电荷检测电路,其被构造成检测在内电极半部和外电极半部上感应出的电荷、以及组合针对每次振荡的检测到的电荷以产生所测量的离子电荷信号。



1. 一种轨道阱,其包括:

细长的内电极,其限定居中地穿过其的纵向轴线和居中地穿过其的横向平面,所述横向平面垂直于所述纵向轴线,所述内电极具有弯曲的外表面,所述外表面围绕所述横向平面所穿过的所述纵向轴线限定最大半径 R_1 ,

细长的外电极,其具有弯曲的内表面,所述内表面围绕所述横向平面所穿过的所述纵向轴线限定最大半径 R_2 ,其中, $R_2 > R_1$,使得在所述外电极的所述内表面与所述内电极的所述外表面之间限定空腔,以及

用于建立电场的器件,所述电场被构造成在所述空腔中俘获离子并引起被俘获离子围绕所述内电极旋转和沿着所述内电极轴向地振荡,其中,所述旋转和振荡的离子在所述内电极和外电极中的至少一者上感应出电荷,

其中, R_1 和 R_2 被选择为具有根据 $\ln(R_2/R_1)$ 来最大化感应电荷的百分比的值。

2. 根据权利要求1所述的轨道阱,其中,所述轨道阱围绕所述纵向轴线限定特性半径 R_m ,所述特性半径对应于距所述纵向轴线的径向距离,在所述径向距离处,所述建立的电场不再朝向所述纵向轴线吸引离子,

并且其中, R_m 和 R_2 被选择为具有根据 R_m/R_2 来最大化所述感应电荷的所述百分比的值。

3. 根据权利要求1或权利要求2所述的轨道阱,其中,所述内电极的所述外表面限定轴向地延伸的纺锤状轮廓,所述外表面在其纵向中间处具有所述最大半径 R_1 ,

并且其中,所述外电极的所述内表面遵循所述内电极的所述外表面的所述轮廓,所述内表面在其纵向中间处具有所述最大半径 R_2 ,使得所述外电极的所述内表面的所述最大半径 R_2 与所述内电极的所述外表面的所述最大半径 R_1 径向地相对。

4. 根据权利要求1或2所述的轨道阱,其中,所述内电极包括整体式构件,并且所述外电极包括两个轴向地间隔开的外电极半部,其中所述横向平面在其间穿过,

并且其中,所述旋转和振荡的离子在所述外电极半部中的每一者上感应出电荷,

并且所述轨道阱进一步包括电荷检测电路,所述电荷检测电路被构造成检测由所述旋转和振荡的离子在所述外电极半部上感应出的电荷、以及组合针对每次振荡的检测到的电荷以产生所测量的离子电荷信号。

5. 根据权利要求4所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:从在所述外电极半部中的一者上感应出的所述电荷中减去在所述外电极半部中的另一者上感应出的所述电荷。

6. 根据权利要求4所述的轨道阱,其进一步包括处理器,所述处理器被构造成处理所述所测量的离子电荷信号,以根据所述离子沿着所述纵向轴线的谐波振荡的频率来确定所述离子的质荷比、以基于所述所测量的离子电荷信号来确定所述离子的电荷、以及以基于所述确定的电荷和所述确定的质荷比来确定所述离子的质量。

7. 根据权利要求1或2所述的轨道阱,其中,所述内电极包括两个轴向地间隔开的内电极半部,其中所述横向平面在其间穿过,并且所述外电极包括两个轴向地间隔开的外电极半部,并且所述横向平面在其间穿过,

并且其中,所述旋转和振荡的离子在所述外电极半部中的每一者上和在内电极半部中的每一者上感应出电荷,

并且所述轨道阱进一步包括电荷检测电路,所述电荷检测电路被构造成检测由所述旋

转和振荡的离子在所述外电极半部上和在所述内电极半部上感应出的所述电荷、以及组合针对每次振荡的检测到的电荷以产生所测量的离子电荷信号。

8. 根据权利要求7所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:从在所述横向平面的一侧上在所述内电极半部上感应出的所述电荷和在所述外电极半部上感应出的所述电荷之和减去在所述横向平面中的另一侧上在所述内电极半部上感应出的所述电荷和在所述外电极半部上感应出的所述电荷之和。

9. 根据权利要求8所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路包括:

变压器,所述变压器具有:初级线圈,其具有联接到所述内电极半部中的相应各者的相对端;次级线圈,其具有联接到所述外电极半部中的对应的相应各者的相对端;以及辅助次级线圈,以及

信号放大器,其具有:输入端,其联接到所述辅助次级线圈的一端;以及输出端,其产生所述所测量的电荷信号。

10. 根据权利要求7所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:对在所述内电极半部中的一者上感应出的电荷与在所述内电极半部中的另一者上感应出的电荷的差异和在所述外电极半部中的一者上感应出的电荷与在所述外电极半部中的另一者上感应出的电荷的差异进行求和。

11. 根据权利要求7所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路包括:

电路,其用于将所述内电极半部和外电极半部中的每一者上检测到的电荷转换成数字电荷检测值,以及

处理器,其用于组合所述数字电荷检测值以产生呈数字测量电荷检测值形式的所测量的电荷检测信号。

12. 根据权利要求7所述的轨道阱,其进一步包括处理器,所述处理器被构造成处理所述所测量的离子电荷信号,以根据所述离子沿着所述纵向轴线的谐波振荡的频率来确定所述离子的质荷比、以基于所述所测量的离子电荷信号来确定所述离子的电荷、以及以基于所述确定的电荷和所述确定的质荷比来确定所述离子的质量。

13. 一种轨道阱,其包括:

细长的内电极,其限定居中地穿过其的纵向轴线和居中地穿过其的横向平面,所述横向平面垂直于所述纵向轴线,

细长的外电极,其限定弯曲的内表面,所述内表面具有围绕所述横向平面所穿过的所述纵向轴线的最大半径 R_2 ,其中,在所述内电极的外表面与所述外电极的所述内表面之间限定空腔,

用于建立电场的器件,所述电场被构造成在所述空腔中俘获离子并引起被俘获离子围绕所述内电极旋转和沿着所述内电极轴向地振荡,其中,所述旋转和振荡的离子在所述内电极和外电极中的至少一者上感应出电荷,以及

围绕所述纵向轴线的特性半径 R_m ,所述特性半径对应于距所述纵向轴线的径向距离,在所述径向距离处,所述建立的电场不再朝向所述纵向轴线吸引离子,

其中, R_m 和 R_2 的值被选择为根据 (R_m/R_2) 来最大化感应电荷的百分比。

14. 根据权利要求13所述的轨道阱,其中,所述内电极包括整体式构件,并且所述外电极包括两个轴向地间隔开的外电极半部,其中所述横向平面在其间穿过,

并且其中,所述旋转和振荡的离子在所述外电极半部中的每一者上感应出电荷,

并且所述轨道阱进一步包括电荷检测电路,所述电荷检测电路被构造成检测由所述旋转和振荡的离子在所述外电极半部上感应出的所述电荷、以及组合针对每次振荡的检测到的电荷以产生所测量的离子电荷信号。

15. 根据权利要求14所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:从在所述外电极半部中的一者上感应出的电荷中减去在所述外电极半部中的另一者上感应出的电荷。

16. 根据权利要求14或权利要求15所述的轨道阱,其进一步包括处理器,所述处理器被构造成处理所述所测量的离子电荷信号,以根据所述离子沿着所述纵向轴线的谐波振荡的频率来确定所述离子的质荷比、以基于所述所测量的离子电荷信号来确定所述离子的电荷、以及以基于所述确定的电荷和所述确定的质荷比来确定所述离子的质量。

17. 根据权利要求13所述的轨道阱,其中,所述内电极包括两个轴向地间隔开的内电极半部,其中所述横向平面在其间穿过,并且所述外电极包括两个轴向地间隔开的外电极半部,并且所述横向平面在其间穿过,

并且其中,所述旋转和振荡的离子在所述外电极半部中的每一者上和在所述内电极半部中的每一者上感应出电荷,

并且所述轨道阱进一步包括电荷检测电路,所述电荷检测电路被构造成检测由所述旋转和振荡的离子在所述内电极半部上和在外电极半部上感应出的电荷、以及组合针对每次振荡的检测到的电荷以产生所测量的离子电荷信号。

18. 根据权利要求17所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:从在所述横向平面的一侧上在所述内电极半部上感应出的电荷和在所述外电极半部上感应出的电荷之和减去在所述横向平面中的另一侧上在所述内电极半部上感应出的电荷和在所述外电极半部上感应出的电荷之和。

19. 根据权利要求18所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路包括:

变压器,所述变压器具有:初级线圈,其具有联接到所述内电极半部中的相应各者的相对端;次级线圈,其具有联接到所述外电极半部中的对应的相应各者的相对端;以及辅助次级线圈,以及

信号放大器,其具有:输入端,其联接到所述辅助次级线圈的一端;以及输出端,其产生所述所测量的电荷信号。

20. 根据权利要求17所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:对在所述内电极半部中的一者上感应出的所述电荷与在所述内电极半部中的另一者上感应出的所述电荷的差异和在所述外电极半部中的一者上感应出的所述电荷与在所述外电极半部中的另一者上感应出的所述电荷的差异进行求和。

21. 根据权利要求17所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路包括:

电路,其用于将所述内电极半部和外电极半部中的每一者上检测到的电荷转换成数字电荷检测值,以及

处理器,其用于组合所述数字电荷检测值以产生呈数字测量电荷检测值形式的所测量的电荷检测信号。

22. 根据权利要求17至21中任一项所述的轨道阱,其进一步包括处理器,所述处理器被

构造成处理所述所测量的离子电荷信号,以根据所述离子沿着所述纵向轴线的谐波振荡的频率来确定所述离子的质荷比、以基于所述所测量的离子电荷信号来确定所述离子的电荷、以及以基于所述确定的电荷和所述确定的质荷比来确定所述离子的质量。

23. 根据权利要求13至15中任一项所述的轨道阱,其中,所述内电极的所述外表面限定轴向地延伸的纺锤状轮廓,所述外表面在其纵向中间处具有围绕所述纵向轴线的最大半径 R_1 ,

并且其中,所述外电极的所述内表面遵循所述内电极的所述外表面的所述轮廓,所述内表面在其纵向中间处具有所述最大半径 R_2 ,使得所述外电极的所述内表面的所述最大半径 R_2 与所述内电极的所述最大半径 R_1 径向地相对。

24. 一种轨道阱,其包括:

细长的内电极,其限定居中地穿过其的纵向轴线和居中地穿过其的横向平面,所述横向平面垂直于所述纵向轴线,所述内电极限定两个轴向地间隔开的内电极半部,其中所述横向平面在其间穿过,

细长的外电极,其限定两个轴向地间隔开的外电极半部,其中所述横向平面在其间穿过,

空腔,其围绕所述纵向轴线径向地且沿着所述内电极和外电极轴向地限定在所述内电极的外表面与所述外电极的内表面之间,

用于建立电场的器件,所述电场被构造成在所述空腔中俘获离子并引起被俘获离子围绕所述内电极旋转和沿着所述内电极轴向地振荡,其中,所述旋转和振荡的离子在所述内电极半部和外电极半部上感应出电荷,以及

电荷检测电路,其被构造成检测由所述旋转和振荡的离子在所述内电极半部上和和所述外电极半部上感应出的电荷、以及组合针对每次振荡的检测到的电荷以产生所测量的离子电荷信号;

其中,所述内电极的外表面限定轴向地延伸的纺锤状轮廓,所述外表面在其纵向中间处具有围绕所述纵向轴线的最大半径 R_1 ,

并且其中,所述外电极的所述内表面遵循所述内电极的所述外表面的所述轮廓,所述内表面在其纵向中间处具有围绕所述纵向轴线的最大半径 R_2 ,其中 $R_2 > R_1$,并且所述外电极的所述内表面的所述最大半径 R_2 与所述内电极的所述最大半径 R_1 径向地相对;

其中:

R_1 和 R_2 被选择为具有根据 $\ln(R_2/R_1)$ 来最大化感应电荷的百分比的值;

和/或

其中,所述轨道阱围绕所述纵向轴线限定特性半径 R_m ,所述特性半径对应于距所述纵向轴线的径向距离,在所述径向距离处,所述建立的电场不再朝向所述纵向轴线吸引离子,并且其中, R_m 和 R_2 被选择为具有根据 R_m/R_2 来最大化所述感应电荷的所述百分比的值。

25. 根据权利要求24所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:从在所述横向平面的一侧上在所述内电极半部上感应出的所述电荷和在所述外电极半部上感应出的所述电荷之和减去在所述横向平面中的另一侧上在所述内电极半部上感应出的所述电荷和在所述外电极半部上感应出的所述电荷之和。

26. 根据权利要求25所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路包括:

变压器,所述变压器具有:初级线圈,其具有联接到所述内电极半部中的相应各者的相对端;次级线圈,其具有联接到所述外电极半部中的对应的相应各者的相对端;以及辅助次级线圈,以及

信号放大器,其具有:输入端,其联接到所述辅助次级线圈的一端;以及输出端,其产生所述所测量的电荷信号。

27. 根据权利要求24至26中任一项所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路被构造成通过以下步骤来组合所述检测到的电荷:对在所述内电极半部中的一者上感应出的所述电荷与在所述内电极半部中的另一者上感应出的所述电荷的差异和在所述外电极半部中的一者上感应出的所述电荷与在所述外电极半部中的另一者上感应出的所述电荷的差异进行求和。

28. 根据权利要求24至26中任一项所述的轨道阱,其中,所述电荷检测电路包括:

电路,其用于将所述内电极半部和外电极半部中的每一者上检测到的电荷转换成数字电荷检测值,以及

处理器,其用于组合所述数字电荷检测值以产生呈数字测量电荷检测值形式的所测量的电荷检测信号。

29. 根据权利要求24至26中任一项所述的轨道阱,其进一步包括处理器,所述处理器被构造成处理所述所测量的离子电荷信号,以根据所述离子沿着所述纵向轴线的谐波振荡的频率来确定所述离子的质荷比、以基于所述所测量的离子电荷信号来确定所述离子的电荷、以及以基于所述确定的电荷和所述确定的质荷比来确定所述离子的质量。

30. 一种用于分离离子的系统,所述系统包括:

离子源,其被构造成从样品生成离子,

至少一个离子分离仪器,其被构造成根据至少一种分子特性来分离所生成的离子,以及根据权利要求1至29中任一项所述的轨道阱,其进一步包括开口,所述开口被构造成允许离开所述至少一个离子分离仪器的一个离子进入所述空腔中以围绕所述内电极旋转并沿着所述内电极轴向地振荡。

31. 根据权利要求30所述的系统,其中,所述至少一个离子分离仪器包括以下各者的一个或任何组合:用于根据质荷比来分离离子的至少一个仪器、用于根据离子迁移率来分离离子的至少一个仪器、用于根据离子保留时间来分离离子的至少一个仪器、以及用于根据分子尺寸来分离离子的至少一个仪器。

32. 根据权利要求30所述的系统,其中,所述至少一个离子分离仪器包括质谱仪和离子迁移率谱仪的一者或任何组合。

33. 根据权利要求30至32中任一项所述的系统,其进一步包括被定位在所述离子源与所述至少一个离子分离仪器之间的至少一个离子处理仪器,被定位在所述离子源与所述至少一个离子分离仪器之间的所述至少一个离子处理仪器包括以下各者中的一者或任何组合:用于收集或存储离子的至少一个仪器、用于根据分子特性来过滤离子的至少一个仪器、用于解离离子的至少一个仪器、以及用于标准化或转变离子电荷态的至少一个仪器。

34. 根据权利要求30至32中任一项所述的系统,其进一步包括被定位在所述至少一个离子分离仪器与所述轨道阱之间的至少一个离子处理仪器,被定位在所述至少一个离子分离仪器与所述轨道阱之间的所述至少一个离子处理仪器包括以下各者中的一者或任何组

合:用于收集或存储离子的至少一个仪器、用于根据分子特性来过滤离子的至少一个仪器、用于解离离子的至少一个仪器、以及用于标准化或转变离子电荷态的至少一个仪器。

35. 根据权利要求30至32中任一项所述的系统,其中,所述轨道阱限定至少一个开口,所述开口被构造成允许离子从其离开,

并且其中,所述系统进一步包括至少一个离子分离仪器,所述离子分离仪器被定位成接收离开所述轨道阱的离子并根据至少一种分子特性来分离所述接收到的离子。

36. 根据权利要求35所述的系统,其进一步包括被定位在所述轨道阱与所述至少一个离子分离仪器之间的至少一个离子处理仪器,被定位在所述轨道阱与所述至少一个离子分离仪器之间的所述至少一个离子处理仪器包括以下各者中的一者或任何组合:用于收集或存储离子的至少一个仪器、用于根据分子特性来过滤离子的至少一个仪器、用于解离离子的至少一个仪器、以及用于标准化或转变离子电荷态的至少一个仪器。

37. 根据权利要求35所述的系统,其进一步包括被定位成接收离开自身被定位成接收离开所述轨道阱的离子的所述至少一个离子分离仪器的离子的至少一个离子处理仪器,被定位成接收离开被定位成接收离开所述轨道阱的离子的所述至少一个离子分离仪器的离子的所述至少一个离子处理仪器包括以下各者中的一者或任何组合:用于收集或存储离子的至少一个仪器、用于根据分子特性来过滤离子的至少一个仪器、用于解离离子的至少一个仪器、以及用于标准化或转变离子电荷态的至少一个仪器。

38. 根据权利要求30至32中任一项所述的系统,其中,所述轨道阱限定至少一个开口,所述开口被构造成允许离子从其离开,

并且其中,所述系统进一步包括被定位成接收离开所述轨道阱的离子的至少一个离子处理仪器,被定位成接收离开所述轨道阱的离子的所述至少一个离子处理仪器包括以下各者中的一者或任何组合:用于收集或存储离子的至少一个仪器、用于根据分子特性来过滤离子的至少一个仪器、用于解离离子的至少一个仪器、以及用于标准化或转变离子电荷态的至少一个仪器。

39. 一种用于分离离子的系统,所述系统包括:

离子源,其被构造成从样品生成离子;

第一质谱仪,其被构造成根据质荷比来分离所生成的离子,

离子解离级,其被定位成接收离开所述第一质谱仪的离子并被构造成解离离开所述第一质谱仪的离子,

第二质谱仪,其被构造成根据质荷比来分离离开所述离子解离级的解离离子,以及电荷检测质谱仪(CDMS),其包括根据权利要求1至29中任一项所述的轨道阱,所述电荷检测质谱仪与所述离子解离级并联联接并且联接到所述离子解离级,使得所述电荷检测质谱仪可以接收离开所述第一质谱仪和所述离子解离级中的任一者的离子,

其中,使用电荷检测质谱仪测量离开所述第一质谱仪的前体离子的质量,使用所述第二质谱仪测量前体离子的具有低于阈值质量的质量值的解离离子的质荷比,并且使用所述电荷检测质谱仪测量前体离子的具有等于或高于所述阈值质量的质量值的质荷比和解离离子的电荷值。

用于单粒子质谱分析的轨道阱

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2018年11月20日提交的美国临时申请序列号62/769,952的权益和优先权,该专利申请的公开内容通过引用整体地并入本文中。

技术领域

[0003] 本公开一般地涉及质谱分析仪器,且更具体地涉及采用轨道阱来测量离子 m/z 和电荷的单粒子质谱分析。

背景技术

[0004] 质谱分析通过根据离子质量和电荷分离物质的气态离子来实现对物质的化学成分的识别。已开发了各种仪器和技术来确定这种分离的离子的质量,并且对这种仪器和/或技术的选择一般地将通常取决于感兴趣粒子的质量范围。例如,在对亚兆道尔顿(sub-megadalton)范围内(例如,小于10,000Da)的“较轻”粒子的分析中,通常可使用常规质谱仪,其一些示例可包括飞行时间(TOF)质谱仪、反射式质谱仪、傅里叶变换离子回旋共振(FTICR)质谱仪、四极杆质谱仪、三重四极杆质谱仪、磁扇形质谱仪等。

[0005] 在对兆道尔顿范围内(例如,10,000Da和更大)的“较重”粒子的分析中,刚才描述的类型常规质谱仪由于这种仪器的众所周知的基本局限性而不是非常适合的。在兆道尔顿范围内,一种替代的质谱分析技术(称为电荷检测质谱分析(CDMS))一般地是更合适的。在CDMS中,根据所测量的离子质荷比(通常被称为“ m/z ”)和所测量的离子电荷来单独地针对每个离子确定离子质量。一些这种CDMS仪器采用静电线性离子阱(ELIT)检测器,在该ELIT检测器中,使离子通过电荷检测圆筒来回振荡。离子多次通过这种电荷检测圆筒提供了针对每个离子的多次测量,并且然后处理这种多次测量以确定离子质量和电荷。

[0006] 通过检测器的适当设计和操作,可以使ELIT中的离子电荷测量方面的不确定性忽略不计或差不多如此。然而,离子质荷比测量方面的不确定性在当前ELIT设计的情况下仍然是不期望地高的。在这方面,利用轨道阱可获得的质荷比分辨能力一般地被理解为远远超过在用于CDMS的ELIT中可以获得的质荷比分辨能力,不过糟糕的电荷测量准确性困扰着当前的轨道阱设计。

发明内容

[0007] 本公开可包括所附权利要求中叙述的特征中的一者或多者和/或以下特征中的一者或多者及其组合。在一个方面中,一种轨道阱可包括:细长的内电极,其限定居中地穿过其的纵向轴线和居中地穿过其的横向平面,该横向平面垂直于纵向轴线,该内电极具有弯曲的外表面,该外表面围绕横向平面所穿过的纵向轴线限定最大半径 R_1 ;细长的外电极,其具有弯曲的内表面,该内表面围绕横向平面所穿过的纵向轴线限定最大半径 R_2 ,其中, $R_2 > R_1$,使得在外电极的内表面与内电极的外表面之间限定空腔;以及用于建立电场的器件,该电场被构造成在空腔中俘获离子并引起被俘获离子围绕内电极旋转和沿着内电极轴向地

振荡,其中,旋转和振荡的离子在内电极和外电极中的至少一者上感应出电荷,其中, R_1 和 R_2 被选择为具有根据 $\ln(R_2/R_1)$ 来最大化感应电荷的百分比的值。

[0008] 在另一个方面中,一种轨道阱可包括:细长的内电极,其限定居中地穿过其的纵向轴线和居中地穿过其的横向平面,该横向平面垂直于纵向轴线;细长的外电极,其限定弯曲的内表面,该内表面具有围绕横向平面所穿过的纵向轴线的最大半径 R_2 ,其中,在内电极的外表面与外电极的内表面之间限定空腔;用于建立电场的器件,该电场被构造成在空腔中俘获离子并引起被俘获离子围绕内电极旋转和沿着内电极轴向地振荡,其中,旋转和振荡的离子在内电极和外电极中的至少一者上感应出电荷;以及围绕纵向轴线的特性半径 R_m ,该特性半径对应于距纵向轴线的径向距离,在该径向距离处,建立的电场不再朝向纵向轴线吸引离子,其中, R_m 和 R_2 的值被选择为根据 (R_m/R_2) 来最大化感应电荷的百分比。

[0009] 在又一方面中,一种轨道阱可包括:细长的内电极,其限定居中地穿过其的纵向轴线和居中地穿过其的横向平面,该横向平面垂直于纵向轴线,该内电极限定两个轴向地间隔开的内电极半部,其中横向平面在其间穿过;细长的外电极,其限定两个轴向地间隔开的外电极半部,其中横向平面在其间穿过;空腔,其围绕纵向轴线径向地且沿着内电极和外电极轴向地限定在内电极的外表面与外电极的内表面之间;用于建立电场的器件,该电场被构造成在空腔中俘获离子并引起被俘获离子围绕内电极旋转和沿着内电极轴向地振荡,其中,旋转和振荡的离子在内电极半部和外电极半部上感应出电荷;以及电荷检测电路,其被构造成检测由旋转和振荡的离子在内电极半部上和在外电极半部上感应出的电荷、以及组合针对每次振荡的检测到的电荷以产生所测量的离子电荷信号。

[0010] 在再另一个方面中,一种用于分离离子的系统可包括:离子源,其被构造成从样品生成离子;至少一个离子分离仪器,其被构造成根据至少一种分子特性来分离所生成的离子;以及如上文在以上方面中的任一者或组合中所描述的轨道阱,该轨道阱进一步包括开口,该开口被构造成允许离开所述至少一个离子分离仪器的一个离子进入空腔中以围绕内电极旋转和沿着内电极轴向地振荡。

[0011] 在另外的方面中,一种用于分离离子的系统可包括:离子源,其被构造成从样品生成离子;第一质谱仪,其被构造成根据质荷比来分离所生成的离子;离子解离级(stage),其被定位成接收离开第一质谱仪的离子并被构造成解离离开第一质谱仪的离子;第二质谱仪,其被构造成根据质荷比来分离离开离子解离级的解离离子;以及电荷检测质谱仪(CDMS),其包括如上文在以上方面中的任一者或组合中所描述的轨道阱,该CDMS与离子解离级并联连接并且联接到离子解离级,使得CDMS可以接收离开第一质谱仪和离子解离级中的任一者的离子,其中,使用CDMS测量离开第一质谱仪的前体离子的质量,使用第二质谱仪测量前体离子的具有低于阈值质量的质量值的解离离子的质荷比,并且使用CDMS测量前体离子的具有处于或高于阈值质量的质量值的解离离子的质荷比和电荷值。

附图说明

[0012] 图1是常规轨道阱系统的简化局部剖面(cutaway)图,该轨道阱系统包括常规轨道阱,该轨道阱具有联接到其的常规控制和测量部件。

[0013] 图2是根据本公开的轨道阱系统的实施例的简化横截面图,该轨道阱系统包括轨道阱的实施例,该轨道阱具有联接到其的控制和测量部件。

[0014] 图3是轨道阱的%所测量的电荷与变量 $\ln(R_2/R_1)$ 的关系图,其中, R_2 是外电极的内表面的相对于居中地延伸穿过内电极的纵向轴线的半径,并且其中, R_1 是内电极的外表面的也是相对于居中地延伸穿过内电极的纵向轴线的半径。

[0015] 图4是轨道阱的%所测量的电荷与变量 R_m/R_2 的关系图,其中, R_2 是外电极的内表面相对于居中地延伸穿过内电极的纵向轴线的半径,并且其中, R_m 是也相对于居中地延伸穿过内电极的纵向轴线的特性半径,并且是距居中地延伸穿过内电极的纵向轴线的径向距离,在该径向距离处,在内电极与外电极之间建立的电场不再朝向该轴线吸引离子。

[0016] 图5A是图2中所描绘的电荷检测电路的实施例的简化框图。

[0017] 图5B是图2中所描绘的电荷检测电路的另一个实施例的简化框图。

[0018] 图6A是图5A中所图示的类型的电荷检测电路的实施例的简化示意图。

[0019] 图6B是图5A中所图示的类型的电荷检测电路的另一个实施例的简化示意图。

[0020] 图7是图5B中所图示的类型的电荷检测电路的实施例的简化示意图。

[0021] 图8是图2中所描绘的电荷检测电路的再另一个实施例的简化框图。

[0022] 图9A是包括图2中所图示的类型的轨道阱的离子分离仪器的实施例的简化框图,其示出了示例离子处理仪器,这些离子处理仪器可形成在轨道阱上游的离子源的一部分和/或可安置在轨道阱下游以进一步处理离开轨道阱的(多个)离子。

[0023] 图9B是包括CDMS仪器的离子分离仪器的另一个实施例的简化框图,该CDMS仪器包括图2中所图示的类型的轨道阱或呈该轨道阱形式,其示出了将常规离子处理仪器与轨道阱和/或CDMS系统(其中轨道阱被实施为带电粒子检测器)组合的示例实施方式。

具体实施方式

[0024] 出于促进对本公开的的原理的理解的目的,现在将参考附图中示出的若干图示性实施例,并且将使用特定语言来描述这些实施例。

[0025] 本公开涉及用于实施对物质的单粒子质谱分析的设备和技術,所述物质可通常(尽管不是排他地)包括具有在兆道尔顿(MDa)范围内的粒子质量的粒子。如下文将详细描述,所述设备和技術包括作为其一个部件的所谓“轨道阱”的至少一个实施例。出于本公开的目的,“轨道阱”被定义为静电离子阱,其在静电场中采用轨道俘获,并且其中粒子既径向地围绕又沿着细长的中心或“内”电极的中心纵向轴线振荡。

[0026] 现在参考图1,示出了质谱仪或质谱分析系统的基于常规轨道阱的粒子检测系统10。系统10图示性地包括常规轨道阱11,该轨道阱操作性地联接到常规控制和测量电路。轨道阱11包括细长的、整体式、纺锤状内电极12,该内电极被拆分的外桶状电极14包围。轨道阱11的Z轴线居中地且轴向地延伸穿过内电极12。内电极12从以下意义上说是“纺锤状”的:它被成形为具有大致圆形横向截面的常规纺锤,该横向截面在纵向中心处具有最大外半径 R_1 ,该最大外半径沿轴向方向向下渐缩到在每一端处或邻近于每一端处的最小半径。最大外半径 R_1 是从Z轴线径向地测得的。

[0027] 外桶状电极14在两个轴向半部14A与14B之间被拆分,其中在这两个半部之间的空间16一般地与内电极12的轴向中心对准。在外电极14A和14B的内表面与内电极12的外表面之间形成空腔15,并且和内电极12的外表面一样,外电极14的两个轴向半部14A和14B的内表面对称,使得空腔15在外电极半部14A与内电极12之间的形状与空腔在外电极半部14B与

内电极12之间的形状相同(即,在空间16的每一侧上)。与内电极12的外表面相反,外电极14的内表面在纵向中心处(即,在空间16的相对边缘处)具有最大内半径 R_2 ,该最大内半径沿轴向方向向下渐缩到在一端处或邻近于一端处的最小半径。和内电极12的最大外半径 R_1 一样,外电极14的最大内半径 R_2 是从Z轴线径向地测得的。如由图1中的示例所图示的,常规轨道阱11的内电极12的外表面和外电极14的内表面的形状(即,弯曲的轮廓)一般地彼此不同,其中外电极的内表面一般地朝向其中心具有更大的斜率,使得 R_1 与 R_2 之间的距离(即,在电极12、14的轴向中心处)大于内电极12的外表面与外电极14的内表面之间的距离,因为这种表面远离它们的轴向中心渐缩。

[0028] 内电极12和外电极14中的每一者电连接到一个或多个电压源22,所述电压源可操作以将控制电压选择性地施加到每一者。在一些实施方式中,所述一个或多个电压源22经由N条信号路径电连接到处理器24,其中N可以是任何正整数。在这种实施方式中,存储器26具有存储在其中的指令,这些指令在由处理器24执行时引起处理器24控制所述一个或多个电压源22分别将控制或操作电压选择性地施加到内电极12和外电极14中的每一者。

[0029] 外电极14A和14B中的每一者电连接到常规差分放大器28的相应的输入端,并且差分放大器28的输出端电连接到处理器24。存储器26具有存储在其中的指令,这些指令在由处理器24执行时引起处理器24处理由差分放大器产生的输出信号以确定在轨道阱11内俘获的粒子的质荷信息。

[0030] 在操作中,首先控制所述一个或多个电压源22将合适的电位施加到内电极12和外电极14以形成对应的电场,该电场被定向成经由空间16的外部开口16A将带电粒子(即,离子)吸入空腔15中。然后控制所述一个或多个电压源22将合适的电位施加到内电极12和外电极14以在空腔15内形成静电场,该静电场在其中俘获带电粒子。内电极12与外电极14之间的这种静电场具有由以下方程式定义的电位分布 $U(r, z)$:

$$[0031] \quad U(r, z) = k/2(Z^2) - (r^2 - R_1^2)/2 + (k/2 \times R_m^2 \times \ln[r/R_1]) - Ur \quad (1),$$

[0032] 其中 r 和 z 是圆柱坐标(其中 $z=0$ 是场的对称平面), k 是场曲率, R_1 是内电极12的最大半径(如上文所描述),并且 Ur 是施加到内电极12的电位。 R_m 是所谓的“特性半径”,它是距Z轴线的径向距离,在该径向距离处,静电场不再朝向Z轴线吸引离子,并且一般地应理解,为在静电俘获期间实现离子的稳定径向振荡,通常必须满足关系 $R_m/R_2 > 2^{1/2}$ 。该静电场是离子阱11的四极杆场和圆柱形电容器的对数场之和,且因此一般地被称为四极-对数(quadro-logarithmic)场。

[0033] 在四极-对数场的影响下在轨道阱11的空腔15内俘获的离子的轨迹25是围绕内电极12的轨道运动和沿着内电极12沿Z轴线的方向的振荡的组合,如由图1中的示例所图示的。从沿四极-对数场的轴向方向(即,沿Z轴线的方向)的谐波振荡的频率导出离子质荷比,因为与围绕内电极12的轨道旋转的频率不同,这种轴向或Z平面离子振荡的频率与离子能量无关。这种轴向离子振荡在外电极半部14A、14B中的每一者上感应出像电荷,并且由差分放大器28产生的所得差分信号的频率由处理器24确定(例如,使用常规快速傅立叶变换算法),且然后进行进一步处理以获得被俘获离子的质荷比。

[0034] 通过求解边界条件 $U(R_2, 0) = 0$ 的方程式(1),由以下方程式定义场曲率 k :

$$[0035] \quad k = 2Ur \times (1/(R_m^2 \times \ln(R_2/R_1) - 1/2(R_2^2 - R_1^2))) \quad (2)。$$

[0036] 由于场曲率 k 由方程式(2)依据电极几何形状来定义,因此可以通过以下方程式使

轴向离子振荡的频率 ω 与离子质荷比(m/z)相关:

$$[0037] \quad \omega = \text{SQRT}(e \times k / (m/z)) \quad (3),$$

[0038] 其中e是单电子电荷。方程式(3)示出:离子轴向振荡频率(及因此m/z比)与离子动能无关。将(2)插入到(3)中产生以下关系:

$$[0039] \quad \omega = \text{SQRT}[(e/(m/z)) \times (2Ur \times (1/(R_m^2 \times \ln(R_2/R_1) - 1/2(R_2^2 - R_1^2)))))] \quad (4)。$$

[0040] 方程式(4)示出:离子振荡的频率 ω 与施加到内电极12的电位Ur的平方根成比例,与内电极最大半径 R_1 相关,并且与轨道阱11的其余径向尺寸呈负相关。使用方程式(1),形状 $z_{12}(r)$ 和z。

[0041] 使用方程式(1),可以如下推断内电极12的外表面和外电极14的内表面分别沿着z方向的径向形状(即,轮廓) $z_{12}(r)$ 和 $z_{14}(r)$:

$$[0042] \quad Z_{12}(r) = \text{SQRT}[1/2r^2 - 1/2R_1^2 + R_m^2 \times \ln(R_1/r)] \quad (5),$$

$$[0043] \quad Z_{14}(r) = \text{SQRT}[1/2r^2 - 1/2R_2^2 + R_m^2 \times \ln(R_2/r)] \quad (6)。$$

[0044] 现在参考图2,示出了根据本公开的质谱仪或质谱分析系统的基于常规轨道阱的粒子检测系统100的实施例。系统100图示性地包括轨道阱110的实施例,该轨道阱操作性地连接到控制和测量电路。与图1中所图示和上文中所描述的轨道阱11相比,如下文将详细描述,图2的轨道阱110在结构和/或其部件的某些几何关系方面图示性地进行了修改,以便针对单粒子检测来优化轨道阱110的电荷测量准确性。

[0045] 在图2中所图示的实施例中,轨道阱110包括细长的、纺锤状内电极112,该内电极被外桶状电极114包围,并且内电极112和外电极114的组合被接地屏蔽件120(例如,被控制到接地电位或其他合适的电位的导电屏蔽件或腔室)图示性地包围。轨道阱11的Z轴线居中地且轴向地延伸穿过内电极112。外桶状电极114在两个轴向半部114A与114B之间被拆分,其中在这两个半部之间的空间116A一般地与内电极112的轴向中心对准。外电极114的两个轴向半部114A、114B的内表面图示性地是彼此的镜像,每个内表面被定位在横向平面T的任一侧上,该横向平面在两个半部114A、114B之间居中地且横向地穿过。在一些实施例中,如由图2中的示例所图示的,内电极112也拆分成两个轴向半部112A、112B,其中这两个半部之间的空间116B一般地与内电极的轴向中心对准;即,使得空间116A、116B的纵向轴线彼此成一直线(即,共线),并且使得横向平面T在两个半部112A、112B之间横向地穿过。在这种实施例中,内电极112的两个轴向半部112A、112B的外表面图示性地是彼此关于横向平面T的镜像。在替代的实施例中,内电极112可不被拆分成两个轴向半部112A、112B,而是代之以以单个整体式本体的形式提供,即,使得空间116B被省略。在任何情况下,在外电极14A和14B的内表面与内电极12的外表面之间都形成空腔115,并且内电极112和外电极114的相对的表面关于空间116A的纵向轴线对称。

[0046] 内电极112的外表面在其轴向中心处具有最大外半径 R_1 ,并且外电极114的内表面同样在其轴向中心处具有最大内半径 R_2 。内电极112的外表面沿着Z轴线从在其轴向中心处的最大半径 R_1 图示性地向下渐缩到在每个相对端处或附近的减小的半径 R_3 ,即,使得 $R_1 > R_3$ 。外电极114的内表面同样沿着Z轴线从在其轴向中心处的最大半径 R_2 图示性地向下渐缩到在每个相对端处或附近的减小的半径 R_4 ,即,使得 $R_2 > R_4$ 。一般地, $R_2 > R_1 > R_3$ 。

[0047] 内电极112和外电极114中的每一者电连接到一个或多个电压源122,所述电压源可操作以将控制电压选择性地施加到每一者。在所图示的实施例中,所述一个或多个电压

源122经由N条信号路径电连接到处理器124,其中N可以是任何正整数。存储器126图示性地具有存储在其中的指令,这些指令在由处理器124执行时引起处理器124控制所述一个或多个电压源122分别将控制或操作电压选择性地施加到内电极112和外电极114中的每一者。在替代的实施例中,所述一个或多个电压源122可以是或包括一个或多个可编程电压源,所述可编程电压源可以被编程为将控制或操作电压选择性地施加到电极112、114中的任一者或两者。在一些这种实施例中,所述一个或多个这种可编程电压源的操作可以以常规方式与处理器124同步。

[0048] 内电极112和外电极114中的每一者电联接到电荷检测电路128的相应的输入端,并且电路128的电荷检测输出端电联接到处理器124。存储器126图示性地具有存储在其中的指令,这些指令在由处理器124执行时引起处理器124处理由电路128产生的电荷检测输出信号CD以确定在轨道阱110内俘获的单粒子的质荷和电荷信息。在其中内电极112以单个整体式本体的形式提供的实施例中,电路128可图示性地采取图1中所图示的类型的差分放大器的形式。在其中内电极112拆分成如上文所描述的两个相等的、轴向地间隔的内电极半部112A、112B的实施例中,除了外电极114之外,还将内电极112图示性地用作离子电荷检测器,并且电路128图示性地包括用于组合在四个电极半部112A、112B、114A和114B上感应出的像电荷的电路。这种电路128的各种示例实施例在图5A-8中描绘并且下文将进行详细描述。

[0049] 图2中所图示的轨道阱110的各种部件的一些尺寸及其间的关系图示性地被选择为优化或至少改进在俘获单个带电粒子时的电荷测量准确性。例如,由单个离子在轨道阱的检测电极上感应出的电荷的量取决于该离子在测量时的位置,并且在该离子沿着内电极振荡和围绕内电极绕轨道而行时,由该离子在检测电极上感应出的电荷可因此变化。此外,由于各个离子并非都遵循相同的轨迹,因此在检测电极上感应出的电荷的分数(fraction)随离子的不同而不同。在轨道阱的正常操作模式下,即,当俘获和处理离子的集合时,离子的这种后一变化被平均掉。然而,对于各个离子,这些变化促成了单个被俘获离子的电荷测量方面的不确定性。为了针对单个离子的电荷测量来优化图2中所图示的轨道阱110,轨道阱110的各种部件的几何形状图示性地被设计成增加检测到的离子电荷的分数并减少检测到的电荷的分数在离子与离子之间的(ion-to-ion)变化。

[0050] 为了增加检测到的离子电荷的分数,轨道阱110图示性地被设计成提供在轨道阱110中俘获的单个带电粒子的径向轨迹和轴向轨迹的一致性。对于径向离子轨迹,以下简化的方程式将离子的径向运动与圆形轨迹相关,其中该圆形轨迹的半径r是动能和空腔115内的电场的函数:

$$[0051] \quad R = 2 \times E_k / F \quad (7),$$

[0052] 其中, E_k 是进入动能(即,离子进入空腔115的动能),并且F是离子由于空腔115内建立的电场而经历的力。当施加俘获用电场(由施加通过所述一个或多个电压源122供应的对应电位产生)时,只有靠近内电极112的外表面的窄离子分布是可俘获的。该分布连同进入动能的分布促成了轨道阱110中的径向离子分布。由以下方程式定义在轨道阱空腔115中俘获离子所需的进入动能:

$$[0053] \quad E_k = (k/4) \times (R_m^2 - R^2) \times (R/R_i)^2 \quad (8),$$

[0054] 其中R是离子在阱中的最终径向位置(也称为离子的轨道半径),并且 R_i 是离子的

注入半径,即,离子在其被注入到空腔115中时相对于Z轴线的径向位置。方程式(8)表明:离子动能分布的对离子电荷测量的影响取决于比 R/R_1 ,并且这种影响可以通过相对于R的值来最大化 R_1 的值而被最小化。然而,如果只有外电极114将被用于检测离子电荷,则轨道半径R应被最大化以增加感应出的且因此在外电极114上可检测到的离子电荷的分数。比 R/R_1 的值范围由 R_1 和 R_2 的最大值和最小值来定义。

[0055] 在检测电极上感应出的离子电荷的分数还取决于离子沿着Z轴线的轨迹;更具体地,取决于在离子沿着Z轴线移动时感应电荷的分数相对于内电极112的外表面和外电极114的内表面的几何形状(即,弯曲的轮廓)如何变化。内电极112的外表面和外电极114的内表面的径向形状(即,弯曲的轮廓) $z_{12}(r)$ 和 $z_{14}(r)$ 分别由方程式(5)和(6)定义,并且因此主要取决于 R_1 、 R_2 和 R_m 的值。

[0056] 因此, R_1 、 R_2 和 R_m 的值以及其间的关系是影响在轨道阱110中俘获的单个带电粒子的径向轨迹和轴向轨迹的主要变量,且因此是可被优化以最大化在检测电极上感应出的电荷的分数的主要变量。在这方面,在图3中示出了由单个离子在轨道阱110的实施例(在该实施例中,以单个整体式本体的形式提供内电极112)的外电极114上感应出的所测量的电荷的分数随变量 $\ln(R_2/R_1)$ 的变化的图。如由该图所论证的,在外电极114上感应出的所测量的电荷的分数随着 $\ln(R_2/R_1)$ 的增加而增加,在大约1.48的 $\ln(R_2/R_1)$ 值(对应于大约4.4的 R_2/R_1)处达到大约80%的峰值,且然后在更高的 $\ln(R_2/R_1)$ 值处再次下降。在图4中示出了由单个离子在同一轨道阱110的外电极114上感应出的所测量的电荷的分数随变量 R_m/R_2 的变化的另一个图。如由该图所论证的,在外电极114上感应出的所测量的电荷的分数在大约12.2的 R_m/R_2 值处达到大约80%的峰值。将图3和图4的这些比(这些比与80%的所测量的电荷分数相关)整合到图2中所图示的轨道阱110的设计中导致与图1中所图示的轨道阱11相比、 $\ln(R_2/R_1)$ 和 R_m/R_2 更大。更大的 $\ln(R_2/R_1)$ 和 R_m/R_2 进而通过相对于轨道阱11增加轨道阱110的离子轨道半径R和沿着Z轴线的振荡距离来增加所测量的电荷的分数。

[0057] 运行多次模拟,这些模拟将由单个被俘获离子在图1中所图示的类型的两个不同常规轨道阱11的外电极14上感应出的电荷的所测量的分数与由单个被俘获离子在图2的轨道阱110(没有拆分的内电极112(即,具有单个整体式内电极112))的外电极114上感应出的电荷的分数进行比较,其中实施图3和图4中所图示的这些比的最佳值。所模拟的轨道阱11的第一种几何形状是常规构型,其中 $\ln(R_2/R_1) = 0.916$ 且 $R_m = \sqrt{2R_2}$ 。对于这种几何形状,(电荷为 $100e$ 的离子的)所测量的电荷的平均分数为52.9%,并且标准偏差为5.93%。不确定性由在轨道阱中具有不同轨迹的离子产生。在轨道阱11的第二种几何形状中,模拟了常规“高场”几何形状,其中 $\ln(R_2/R_1) = 0.470$ 且 $R_m = \sqrt{2R_2}$ 。对于这种几何形状,(电荷为 $100e$ 的离子的)所测量的电荷的平均分数为45.7%,并且标准偏差为9.85%。

[0058] 在图2的轨道阱110中,将 $\ln(R_1/R_2)$ 增加到或接近图3所建议的最佳比导致电极112、114之间的空腔115更大,因此允许更多的离子电荷被外电极114拾取。除了更多信号被拾取之外,扩大内电极112与外电极114之间的距离还允许离子沿着Z轴线的进入位置118A、118移动远离中心空间116A(如由图2中的示例所图示的),同时还确保 $R > R_1$ 。如由图2中的离子轨迹125进一步图示的,例如,离子经由开口118A进入轨道阱110并且向下延伸穿过空间118进入空腔115中,其中,空间118与中心空间116A轴向地间隔开。一旦在空腔115内,离子轨迹125就包括围绕内电极112的轨道运动和沿着内电极112沿Z轴线的方向的振荡的组合,

如上文所描述的。此外,增加内电极112与外电极114之间的间隙结合内电极112的外表面和外电极114的内表面的减小的曲率(分别由将 R_m/R_2 增加到或接近图4所建议的最佳比产生)导致了沿Z轴线的方向更长的空腔115,由此增加离子沿着Z轴线的振荡距离。这实际上增加了在外电极114的拆分的电极114A、114B处检测到的最大信号值与最小信号值之间的差异,并且其中进行的离子电荷测量越精确,信号因此横跨的范围越大。第一次模拟的轨道阱110的几何形状是这样的构型,即在该构型中,内电极112是单个整体式本体, $\ln(R_2/R_1) = 1.48$ 且 $R_m/R_2 = 12.2$ 。对于这种几何形状,(电荷为 $100e$ 的离子的)所测量的电荷的平均分数为81.6%,并且标准偏差为1.17%,这论证了对上文所描述的常规轨道阱几何形状的实质性改进。

[0059] 在图2中所图示的实施例中,内电极112图示性地被示为轴向地拆分成两个相等的半部112A、112B,其中间隙116B沿着Z轴线轴向地分离两个半部112A、112B。在该实施例中,和外电极114一样,内电极112可用于检测在离子沿着Z轴线振荡时在两个半部112A、112B中的每一者上感应出的离子电荷。将内电极112用作第二组检测电极112A、112B导致离子电荷的可测量分数增加。如果在俘获期间施加到内电极112和外电极114的电位彼此相等且相反,则可以通过检测四个电荷信号A、B、C和D并将其与图2中所描绘的电路128组合来测量在电极112A、112B、114A、114B上感应出的电荷。

[0060] 现在参考图5A,示出了图2的电荷检测电路128的实施例128₁。在所图示的实施例中,使用信号求和电路130将信号A和B加在一起,这些信号分别对应于在外电极114A上和在内电极112A上测得的感应离子电荷。同样使用另一个信号求和电路132将信号C和D加在一起,这些信号分别对应于在外电极114B上和在内电极112B上测得的感应离子电荷。求和电路130和132的输出被作为输入施加到差分放大器134,并且由电路128₁产生的电荷检测信号CD因此为 $CD = (A+B) - (C+D)$ 。本领域技术人员将认识到,可使用任何已知的(多个)设计来实施求和电路130、132和差分放大器134,并且将理解的是,任何这种(多个)设计都旨在落入本公开的范围。本领域技术人员将进一步认识到,仅描绘了图5A中所图示的电路128的实施例128₁的功能部件,并且电路128₁可替代地或附加地包括其他常规电路部件,诸如但不限于在电极112A、112B、114A、114B中的每一者与电路128₁的对应输入端之间的一个或多个电容器、在内电极112与外电极114之间的一个或多个电容器等。

[0061] 现在参考图5B,示出了图2的电荷检测电路128的另一个实施例128₂。在所图示的实施例中,将信号A和C(这些信号分别对应于在外电极114A和114B上测得的感应离子电荷)作为输入提供给第一差分放大器136,同样将信号C和D(这些信号分别对应于在内电极114A和114B上测得的感应离子电荷)作为输入提供给第二差分放大器138,并且使用信号求和电路140将两个差分放大器136、138的输出加在一起。信号求和电路140的输出是由电路128₁产生的电荷检测信号CD,且因此为 $CD = (A-C) + (B-D)$ 。本领域技术人员将认识到,可使用任何已知的(多个)设计来实施差分放大器136、136和信号求和电路140,并且将理解的是,任何这种(多个)设计都旨在落入本公开的范围。本领域技术人员将进一步认识到,仅描绘了图5B中所图示的电路128的实施例128₂的功能部件,并且电路128₂可替代地或附加地包括其他常规电路部件,诸如但不限于上文关于图5A所描述的电路部件中的任何一者或多者。

[0062] 现在参考图6A,示出了图5A中所描绘的电荷检测电路128₁的实施例150。在所图示的实施例中,电路150包括用以根据关于图5A所描述的布置来组合信号A-D的常规变压器

152。特别地,信号B和D被施加到初级线圈154的相对端,并且信号A和C被施加到次级线圈156的相对端。初级线圈154的中心抽头从电压源122中的一者接收正电压(例如,500伏特),并且次级线圈的中心抽头从电压源122中的一者接收相等且相反的负电压(例如,-500伏特)。在一个实施例中,中心抽头电压(+500v和-500v)与在离子俘获期间分别施加到外电极114和内电极112的电压相同。在任何情况下,变压器152的辅助次级线圈158电联接到信号放大器160(例如,常规低噪声放大器)的输入端,并且放大器160的输出是电荷检测信号CD。变压器152将信号A和B(这些信号分别对应于外电极114A和内电极112A上的信号)图示性地加在一起,并且同样将信号C和D(这些信号分别对应于外电极114B和内电极112B上的信号)加在一起,并且在辅助次级线圈158中感应出这些相加的信号(A+B)与(C+D)之间的差异,将该差异放大以产生电荷检测信号 $CD = (A+B) - (C+D)$ 。

[0063] 现在参考图6B,示出了图5A中所描绘的电荷检测电路128₁的另一个实施例170。在所图示的实施例中,电路170包括第一单位增益信号加法放大器172,其中信号A和B分别通过电阻器R1和R2被馈送到放大器172的+输入端,并且其中放大器172的输出被馈送回到-输入端。图示性地, $R1 = R2$ 和放大器172的输出因此为A+B。电路170进一步包括第二单位增益信号加法放大器174,其中信号C和D分别通过电阻器R3和R4被馈送到放大器174的+输入端,并且其中放大器174的输出被馈送回到-输入端。图示性地, $R3 = R4$ (并且也等于R1和R2),并且放大器174的输出因此为C+D。放大器172、174的输出被作为输入施加到常规差分放大器176,并且差分放大器176的输出是电荷检测信号 $CD = (A+B) - (C+D)$ 。

[0064] 现在参考图7,示出了图5B中所描绘的电荷检测电路128₂的实施例180。在所图示的实施例中,电路180包括:第一常规差分放大器182,其接收信号A和C作为输入;以及第二常规差分放大器184,其接收信号B和D作为输入。差分放大器182、184的输出分别通过电阻器R1和R2被馈送到常规单位增益放大器186的+输入端,并且放大器186的输出被馈送回到-输入端。图示性地, $R1 = R2$,并且放大器186的输出因此为分别由差分放大器182、184产生的差分信号(A-C)和(B-D)之和,使得放大器186的电荷检测信号输出CD为 $CD = (A-C) + (B-D)$ 。

[0065] 现在参考图8,示出了图2的电荷检测电路128的另一个实施例190。在所图示的实施例中,电路190图示性地包括四个常规放大器192A-192D,每个放大器接收上文所描述的信号A-D中的相应一者作为输入。放大器192A-192D的输出各自被提供给四个常规模数(A/D)转换器电路194A-194D中的相应一者的输入端。A/D转换器电路194A-194D的输出分别是电荷检测信号CDA、CDB、CDC和CDD的数字表示,这些电荷检测信号作为输入被供应给处理器124。在该实施例中,存储器126图示性地包括指令,这些指令在由处理器124执行时引起处理器124将信号CDA-CDD组合以根据图5A中所图示的布置(即, $CDS = (CDA+CDB) - (CDC+CDD)$)或根据图5B中所图示的布置(即, $CDS = (CDA-CDC) + (CDB-CDD)$)来产生数字电荷检测信号CDS。

[0066] 本领域技术人员将认识到,在一些实施例(例如,图6A-8中所图示的实施例)中,固有的电路部件不匹配和/或在这种电路部件的操作中可能(或可能不)在确定电荷检测信号CD(或CDS)时导致错误。本领域技术人员将进一步认识到,在一些情况下,可使用常规电路设计技术来消除或可接受地最小化或减少这种错误。在其他情况下,可通过以单个、一体化专用集成电路的形式提供整个电路170、180或190来消除或可接受地最小化或减少这种错误。将理解的是,任何这种错误消除、减少或最小化技术或结构都旨在落入本公开的范围

内。

[0067] 还运行多次模拟,这些模拟将由单个被俘获离子在被实施于上文所描述的两个不同常规轨道阱11中的两个外电极14和两个(拆分)内电极的组合上感应出的电荷的所测量的分数与由单个被俘获离子在图2的轨道阱110(其中也实施图3和图4中所图示的这些比的最佳值)的两个外电极114A和114B和两个(拆分)内电极112A、112B的组合上感应出的电荷的分数进行比较。所模拟的轨道阱11的第一种几何形状是常规构型,其中和前文一样, $\ln(R2/R1) = 0.916$ 且 $R_m = \sqrt{2R2}$ 。对于这种几何形状,使用拆分的内电极,(电荷为100e的离子的)所测量的电荷的平均分数显著地增加到98.5%,并且标准偏差为0.274%。在轨道阱11的第二种几何形状中,模拟常规“高场”几何形状,其中也和前文一样, $\ln(R2/R1) = 0.470$ 且 $R_m = \sqrt{2R2}$ 。对于这种几何形状,使用拆分的内电极,(电荷为100e的离子的)所测量的电荷的平均分数为97.0%,并且标准偏差为0.804%。在图2的轨道阱110(在该轨道阱中实施拆分的内电极112A、112B,并且该轨道阱在其他方面如上文在先前模拟中所描述的那样)中,电荷确定方面的不确定性从1.71%降低到0.15%。

[0068] 因此,不管轨道阱部件的几何形状如何,将内电极拆分成轴向半部并使用所有四个电极半部来测量感应离子电荷都导致了与其中实施单个整体式内电极的相同仪器相比电荷不确定性的降低。因为在轨道阱的每一侧上的内检测电极和外检测电极上的感应电荷被求和且然后使这两个和彼此相减,因此可以减小两组内电极与外电极之间的曲率差异对所测量的电荷的影响。在具有内电极与外电极之间的大曲率差异(诸如,在常规轨道阱中发现的内电极与外电极之间的大曲率差异)的轨道阱中,可以实现电荷检测错误的实质性改进。在这种常规轨道阱中实施拆分的内电极导致所测量的电荷百分数接近100%(如刚才在以上模拟中所描述的),因此论证了:在不以本文中所描述的方式修改轨道阱的几何参数的情况下,在常规轨道阱中可以实现电荷测量准确性方面的实质性改进。然而,如本文中所描述的,实施拆分的内电极和优化轨道阱的几何参数的组合产生了最高程度的电荷测量准确性,如也在上述模拟中所论证的。

[0069] 现在参考图9A,示出了离子分离仪器200的实施例的简化框图,该离子分离仪器可包括本文中所描述的轨道阱110的任何实施例,该离子分离仪器可包括在轨道阱110上游的离子源202和/或可包括至少一个离子处理仪器204,所述离子处理仪器安置在轨道阱110下游并被构造成处理离开轨道阱110的(多个)离子。在包括安置在轨道阱110下游的至少一个离子处理仪器204的一些实施例中,可图示性地控制施加到内电极112和外电极114的电压,以允许离子从轨道阱110轴向地(即,从限定在电极112与外电极114之间的空腔115轴向地)离开,或允许离子从中心空间116A径向地离开。在包括安置在轨道阱110下游的至少一个离子处理仪器204的其他实施例中,可将轨道阱110修改为包括穿过外电极114的另一个离子通路和开口,例如与图2中所图示的开口118A和通路118类似或相同,并且可图示性地控制施加到内电极112和外电极114的电压以允许离子从这种离子通路和开口轴向地离开。

[0070] 离子源202图示性地包括至少一个常规离子生成器,其被构造成从样品生成离子。离子生成器可以是例如但不限于至少一个离子生成装置的一个或任何组合,所述离子生成装置诸如是电喷雾电离源、基质辅助激光解吸电离(MALDI)源等。在一些实施例中,离子源202可进一步包括任何数量的离子处理仪器,所述离子处理仪器被构造成在检测之前通过如上文所描述的轨道阱110作用在一些或全部的所生成的离子上。在这方面,离子源202在

图9A中被图示为包括数量为Q的离子源级 IS_1-IS_Q ,这些离子源级可以是或可形成离子源202的一部分,其中Q可以是任何正整数。离子源级 IS_1 将通常是或包括如上文所描述的一个或多个常规离子源。(多个)离子源级 IS_2-IS_Q 在包括一个或多个这种级的实施例中可图示性地是或包括:一个或多个常规仪器,其用于根据一种或多种分子特性(例如,根据离子质量、电荷、离子质荷、离子迁移率、离子保留时间等)来分离离子;和/或一个或多个常规离子处理仪器,其用于收集和/或存储离子(例如,一个或多个四极杆、六极杆和/或其他离子阱)、用于过滤离子(例如,根据一种或多种分子特性,诸如离子质量、电荷、离子质荷、离子迁移率、离子保留时间等)、用于碎片化或以其他方式解离离子、用于标准化或转变离子电荷态等。将理解的是,离子源202可包括任何这种常规离子源、离子分离仪器和/或离子处理仪器的按任何顺序的一个或任何组合,并且一些实施例可包括任何这种常规离子源、离子分离仪器和/或离子处理仪器中的邻近或间隔开的多者。在离子源202包括用于根据离子质量、电荷或质荷比来分离离子的一个或多个仪器的实施例中,离子源202和轨道阱110图示性地一起形成了如图9A中所图示的常规电荷检测质谱仪(CDMS)206。

[0071] 在一些实施例中,仪器200可包括联接到轨道阱110的离子出口的离子处理仪器204如由图9A中的示例所图示的,离子处理仪器204在包括它的实施例中可以以任何数量的离子分离和/或处理级 OS_1-OS_R 的形式提供,其中R可以是任何正整数。离子分离和/或处理级 OS_1-OS_R 中的所述一者或多者的示例可包括但不限于:用于根据一种或多种分子特性(例如,根据离子质量、电荷、离子质荷、离子迁移率、离子保留时间等)来分离离子的一个或多个常规仪器;用于收集和/或存储离子(例如,一个或多个四极杆、六极杆和/或其他离子阱)的一个或多个常规仪器;用于过滤离子(例如,根据一种或多种分子特性,诸如离子质量、电荷、离子质荷、离子迁移率、离子保留时间等)的一个或多个常规仪器;用于碎片化或以其他方式解离离子的一个或多个常规仪器;用于标准化或转变离子电荷态的一个或多个常规仪器,等。将理解的是,离子处理仪器204可包括任何这种常规离子分离仪器和/或离子处理仪器的按任何顺序的一个或任何组合,并且一些实施例可包括任何这种常规离子分离仪器和/或离子处理仪器中的邻近或间隔开的多者。在离子源202和/或离子处理仪器204包括一个或多个质谱仪的任何实施方式中,任何一个或多个这种质谱仪均可具有任何常规设计,包括例如但不限于飞行时间(TOF)质谱仪、反射式质谱仪、傅里叶变换离子回旋共振(FTICR)质谱仪、四极杆质谱仪、三重四极杆质谱仪、磁扇形质谱仪等。

[0072] 作为图9A中所图示的离子分离仪器200的一个特定实施方式(该实施方式不应以任何方式被认为是限制性的),离子源202图示性地包括3个级,并且省略了离子处理仪器204。在该示例实施方式中,离子源级 IS_1 是常规离子源(例如,电喷雾、MALDI等),离子源级 IS_2 是常规离子过滤器(例如,四极杆或六极杆离子导向器),并且离子源级 IS_3 是上文所描述的任何类型的质谱仪。在该实施例中,以常规方式控制离子源级 IS_2 ,以预先选择具有期望的分子特性的离子以供由下游的质谱仪进行分析并且仅将这种预先选择的离子传递到质谱仪,其中,由轨道阱110分析的离子将是预先选择的离子,其由质谱仪根据质荷比进行分离。离开离子过滤器的预先选择的离子例如可以是:具有指定的离子质量、电荷或质荷比的离子;具有高于和/或低于指定的离子质量、电荷或离子质荷比的离子质量、电荷或离子质荷比的离子;具有在离子质量、电荷或离子质荷比的指定范围内的离子质量、电荷或离子质荷比的离子;等。在该示例的一些替代的实施方式中,离子源级 IS_2 可以是质谱仪且离子源

级IS₃可以是离子过滤器,并且如刚才所描述的,离子过滤器可以是以其他方式可操作的,以预先选择具有期望的分子特性的离开质谱仪的离子,以供由下游的轨道阱110分析。在该示例的其他替代的实施方式中,离子源级IS₂可以是离子过滤器,并且离子源级IS₃可包括质谱仪、接着是另一个离子过滤器,其中,这些离子过滤器各自如刚才所描述的那样来操作。

[0073] 作为图9A中所图示的离子分离仪器200的另一个特定实施方式(其不应以任何方式被认为是限制性的),离子源202图示性地包括2个级,并且再次省略了离子处理仪器204。在该示例实施方式中,离子源级IS₁是常规离子源(例如,电喷雾、MALDI等),离子源级IS₂是上文所描述的任何类型的常规质谱仪。在该实施方式中,仪器200采取电荷检测质谱仪(CDMS)206的形式,在该CDMS中,轨道阱110可操作以分析离开质谱仪的离子。

[0074] 作为图9A中所图示的离子分离仪器200的又一特定实施方式(其不应以任何方式被认为是限制性的),离子源202图示性地包括2个级,并且省略了离子处理仪器204。在该示例实施方式中,离子源级IS₁是常规离子源(例如,电喷雾、MALDI等),并且离子源级IS₂是常规单级或多级离子迁移率谱仪。在该实施方式中,离子迁移率谱仪可操作以根据一个或多个离子迁移率函数随时间来分离由离子源级IS₁生成的离子,并且轨道阱110可操作以分析离开离子迁移率谱仪的离子。在该示例的替代的实施方式中,离子处理仪器204可包括常规单级或多级离子迁移率谱仪作为唯一的级OS₁(或作为多级仪器210的级OS₁)。在该替代的实施方式中,轨道阱110可操作以分析由离子源级IS₁生成的离子,并且离子迁移率谱仪OS₁可操作以根据一个或多个离子迁移率函数随时间来分离离开轨道阱110的离子。作为该示例的另一个替代的实施方式,单级或多级离子迁移率谱仪可跟随离子源级IS₁和轨道阱110两者。在该替代的实施方式中,跟随离子源级IS₁的离子迁移率谱仪可操作以根据一个或多个离子迁移率函数随时间来分离由离子源级IS₁生成的离子,轨道阱110可操作以分析离开离子源级离子迁移率谱仪的离子,并且在跟随轨道阱110的离子处理级OS₁中的离子迁移率谱仪可操作以根据一个或多个离子迁移率函数随时间来分离离开轨道阱110的离子。在本段落中所描述的实施例的任何实施方式中,附加变型可包括这样的质谱仪,即该质谱仪操作性地被定位在位于离子源202中和/或离子处理仪器204中的单级或多级离子迁移率谱仪上游和/或下游。

[0075] 作为图9A中所图示的离子分离仪器200的再另一个特定实施方式(其不应以任何方式被认为是限制性的),离子源202图示性地包括2个级,并且省略了离子处理仪器204。在该示例实施方式中,离子源级IS₁是常规液相色谱仪(例如,HPLC等),其被构造成根据分子保留时间来分离溶液中的分子,并且离子源级IS₂是常规离子源(例如,电喷雾等)。在该实施方式中,液相色谱仪可操作以分离溶液中的分子组分,离子源级IS₂可操作以从离开液相色谱仪的溶液流生成离子,并且轨道阱110可操作以分析由离子源级IS₂生成的离子。在该示例的替代的实施方式中,离子源级IS₁可代替地是常规尺寸排阻色谱(SEC),其可操作以按尺寸来分离溶液中的分子。在另一个替代的实施方式中,离子源级IS₁可包括常规液相色谱仪、接着是常规SEC,或反之亦然。在该实施方式中,由离子源级IS₂从经两次分离的溶液生成离子;一次是根据分子保留时间,接着第二次是根据分子尺寸,或反之亦然。在本段落中所描述的实施例的任何实施方式中,附加变型可包括这样的质谱仪,即该质谱仪操作性地被定位在离子源级IS₂与轨道阱110之间。

[0076] 现在参考图9B,示出了离子分离仪器210的另一个实施例的简化框图,该离子分离

仪器图示性地包括多级质谱仪仪器220并且其还包括包括了轨道阱110的CDMS206(即,如上文所描述的基于轨道阱的CDMS206),该轨道阱被实施为高质量离子分析部件。在所图示的实施例中,多级质谱仪仪器220包括:离子源(IS)202,如本文中所示和描述的;接着是并且联接到第一常规质谱仪(MS1)222;接着是并且联接到常规离子解离级(ID)224,该ID可操作以解离离开质谱仪222的离子,例如通过碰撞诱导解离(CID)、表面诱导解离(SID)、电子捕获解离(ECD)和/或光诱导解离(PID)等中的一者或多者;接着是并且联接到第二常规质谱仪(MS2)226;接着是常规离子检测器(D)228,例如,诸如微通道板检测器或其他常规离子检测器。CDMS206与离子解离级224并联联接并且联接到该离子解离级,使得CDMS206可从质谱仪222和/或从离子解离级224选择性地接收离子。

[0077] MS/MS,例如仅使用离子分离仪器220,是一种行之有效的方法,其中特定分子量的前体离子由第一质谱仪222(MS1)基于它们的 m/z 值来选择。在离子解离级224中,碎片化依质量选择的前体离子,例如通过碰撞诱导解离、表面诱导解离、电子捕获解离或光诱导解离。碎片离子然后由第二质谱仪226(MS2)进行分析。在MS1和MS2两者中只测量前体离子和碎片离子的 m/z 值。对于高质量离子,电荷态未被解析,且因此不可能单独地基于 m/z 值来选择具有特定分子量的前体离子。然而,通过将仪器220联接到如图9B中所图示的CDMS206,有可能选择窄范围的 m/z 值且然后使用CDMS206来确定依 m/z 选择的前体离子的质量。质谱仪222、226可以是例如磁扇形质谱仪、飞行时间质谱仪或四极杆质谱仪的一个或任何组合,不过在替代的实施例中,可使用其他质谱仪类型。在任何情况下,离开MS1的具有已知质量的依 m/z 选择的前体离子可以在离子解离级224中碎片化,并且所得碎片离子然后可以由MS2(在仅测量 m/z 比的情况下)和/或由CDMS仪器206(在同时测量 m/z 比和电荷的情况下)进行分析。低质量碎片(即,具有低于阈值质量值(例如,10,000Da(或其他质量值)的质量值)的前体离子的解离离子因此可以由常规MS使用MS2进行分析,而高质量碎片(在电荷态未被解析的情况下)(即,具有等于或高于阈值质量值的质量值的前体离子的解离离子)可以由CDMS206进行分析。

[0078] 将理解的是,一种或多种电荷检测优化技术可单独地和/或在附图中所图示和本文中所描述的系统200、210中的任一者中与轨道阱110一起使用,例如用于电荷检测事件。在2018年6月4日提交的共同未决的美国专利申请序列号62/680,296中和在2019年1月11日提交的共同未决的国际专利申请号PCT/US2019/_____中图示和描述了一些这种电荷检测优化技术的示例,这两个专利申请的标题都为“APPARATUS AND METHOD FOR CAPTURING IONS IN AN ELECTROSTATIC LINEAR ION TRAP”,并且这两个专利申请的公开内容两者都通过引用整体明确地并入本文中。

[0079] 将进一步理解的是,一个或多个电荷校准或复位设备可单独地和/或在附图中所图示和本文中所描述的系统200、210中的任一者中与轨道阱110的内电极和/或外电极一起使用。在2018年6月4日提交的共同未决的美国专利申请序列号62/680,272中和在2019年1月11日提交的共同未决的国际专利申请号PCT/US2019/_____中图示和描述了一个这种电荷校准或复位设备的示例,这两个专利申请的标题都为“APPARATUS AND METHOD FOR CALIBRATING OR RESETTING A CHARGE DETECTOR”,并且这两个专利申请的公开内容两者都通过引用整体明确地并入本文中。

[0080] 仍将进一步理解的是,一种或多种离子源优化设备和/或技术可与从中生成进入

轨道阱110的离子的源(诸如,在本文中所图示和描述的系统200、210中的任一者中的源202中)的一个或多个实施例一起使用,在2018年6月4日提交的标题为“HYBRID ION FUNNEL-ION CARPET (FUNPET) ATMOSPHERIC PRESSURE INTERFACE FOR CHARGE DETECTION MASS SPECTROMETRY”的共同未决的美国专利申请序列号62/680,223中和在2019年1月11日提交的标题为“INTERFACE FOR TRANSPORTING IONS FROM AN ATMOSPHERIC PRESSURE ENVIRONMENT TO A LOW PRESSURE ENVIRONMENT”的共同未决的国际专利申请号PCT/US2019/_____中图示和描述了所述一种或多种离子源优化设备和/或技术的一些示例,这两个专利申请的公开内容两者都通过引用整体明确地并入本文中。

[0081] 又将进一步理解,还应进一步理解的是,单独地和/或在被实施于附图中所图示和本文中所描述的系统200、210中的任一者中的轨道阱110可在被构造成根据实时分析和/或实时控制技术来操作的系统中实施,在2018年6月4日提交的共同未决的美国专利申请序列号62/680,245中和在2019年1月11日提交的共同未决的国际专利申请号PCT/US2019/_____中图示和描述了所述轨道阱的一些示例,这两个专利申请的标题都为“CHARGE DETECTION MASS SPECTROMETRY WITH REAL TIME ANALYSIS AND SIGNAL OPTIMIZATION”,并且这两个专利申请的公开内容两者都通过引用整体明确地并入本文中。

[0082] 仍将进一步理解的是,可以以具有两个或更多个轨道阱的至少一个轨道阱阵列的形式提供系统(诸如,附图中所图示和本文中所描述的系统200、210中的任一者)中的轨道阱110,并且本文中所描述的概念直接可应用于包括一个或多个这种轨道阱阵列的系统。在2018年6月4日提交的共同未决的美国专利申请序列号62/680,315中和在2019年1月11日提交的共同未决的国际专利申请号PCT/US2019/_____中图示和描述了其中可布置有两个或更多个轨道阱110的一些这种阵列结构的示例,这两个专利申请的标题都为“ION TRAP ARRAY FOR HIGH THROUGHPUT CHARGE DETECTION MASS SPECTROMETRY”,并且这两个专利申请的公开内容两者都通过引用整体明确地并入本文中。

[0083] 虽然本公开已在前面的附图和描述中进行了详细的图示和描述,但是这种图示和描述将被认为是图示性的且本质上不是限制性的,应理解的是,仅已示出和描述其图示性实施例,并且期望在本公开的精神内的所有更改和修改都得到保护。例如,已描述了在轨道阱中的单个离子电荷检测准确性方面的一些改进,这些改进包括设计各种轨道阱部件几何形状以达到指定的几何形状目标。还已描述了在轨道阱中的单个离子电荷检测准确性方面的其他改进,这些改进包括将内电极拆分成相同的轴向半部并将这两个内电极半部用作第二离子电荷检测器,其中,在外电极上测得的电荷检测信号与在内电极上测得的电荷检测信号进行组合以产生复合电荷检测信号。根据本公开,将理解的是,在一些实施例中,可在轨道阱中实施任一组改进(另一组改进被排除在外),并且在其他实施例中,可在轨道阱中一起实施两组改进。

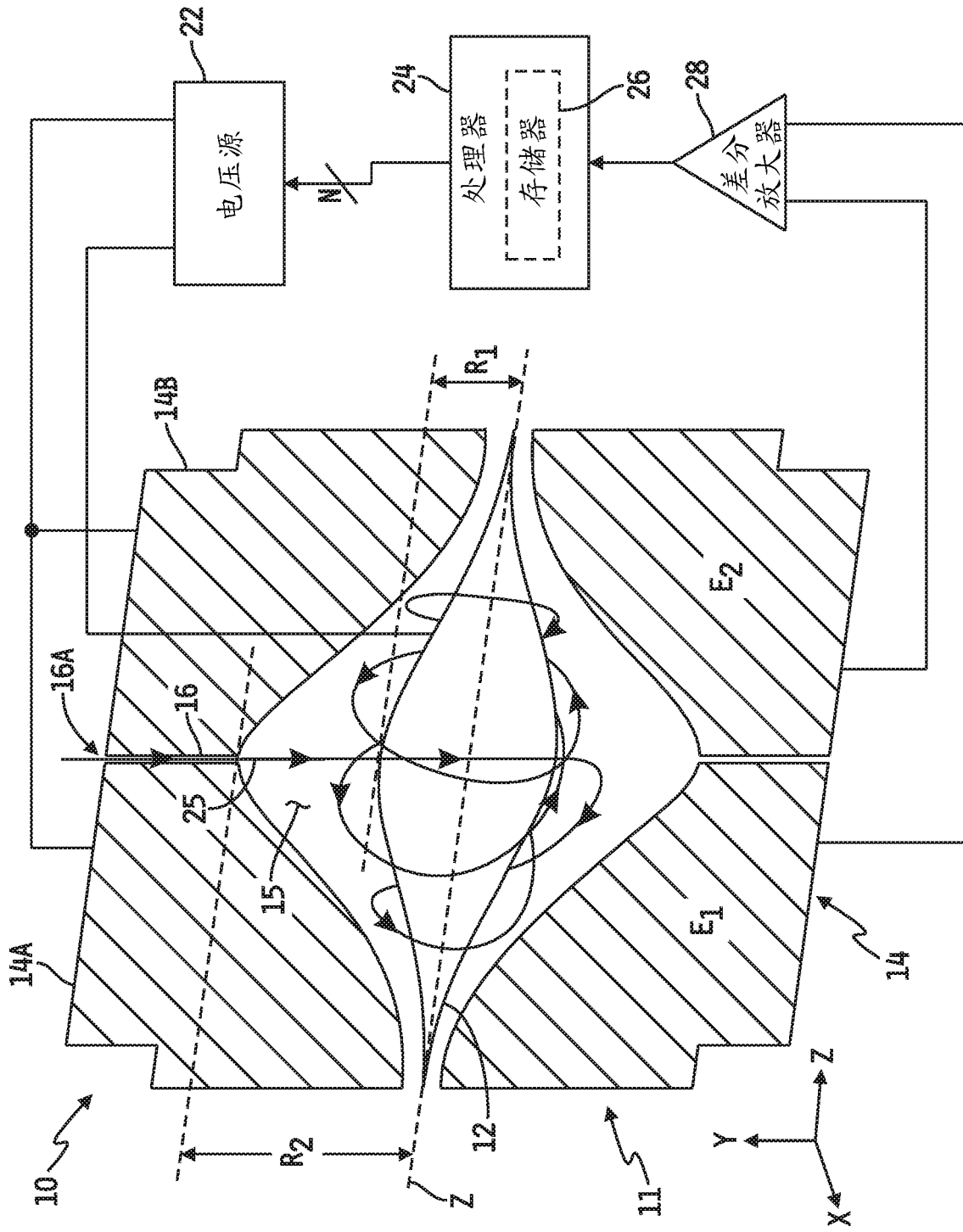


图 1 (现有技术)

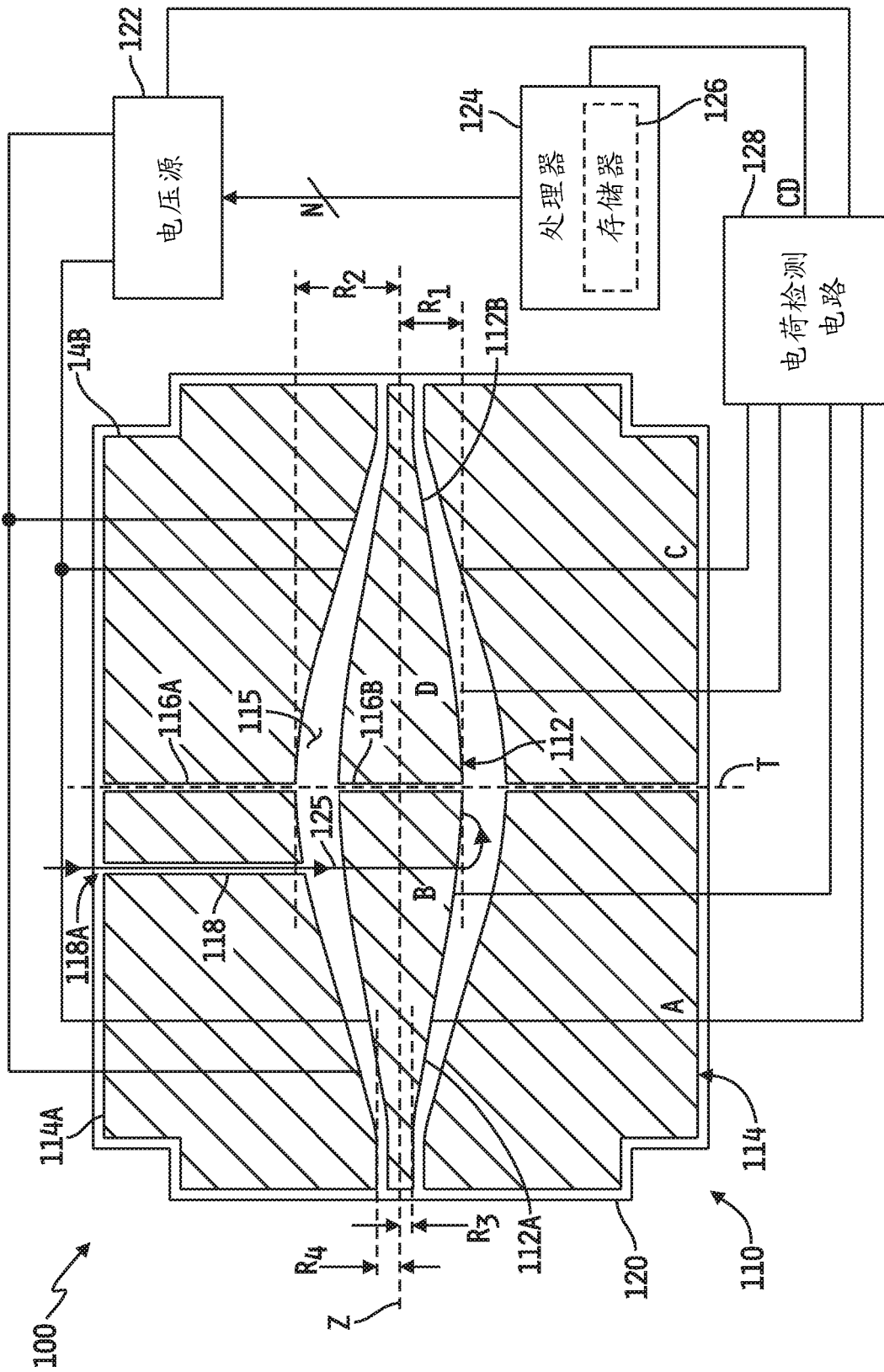


图 2

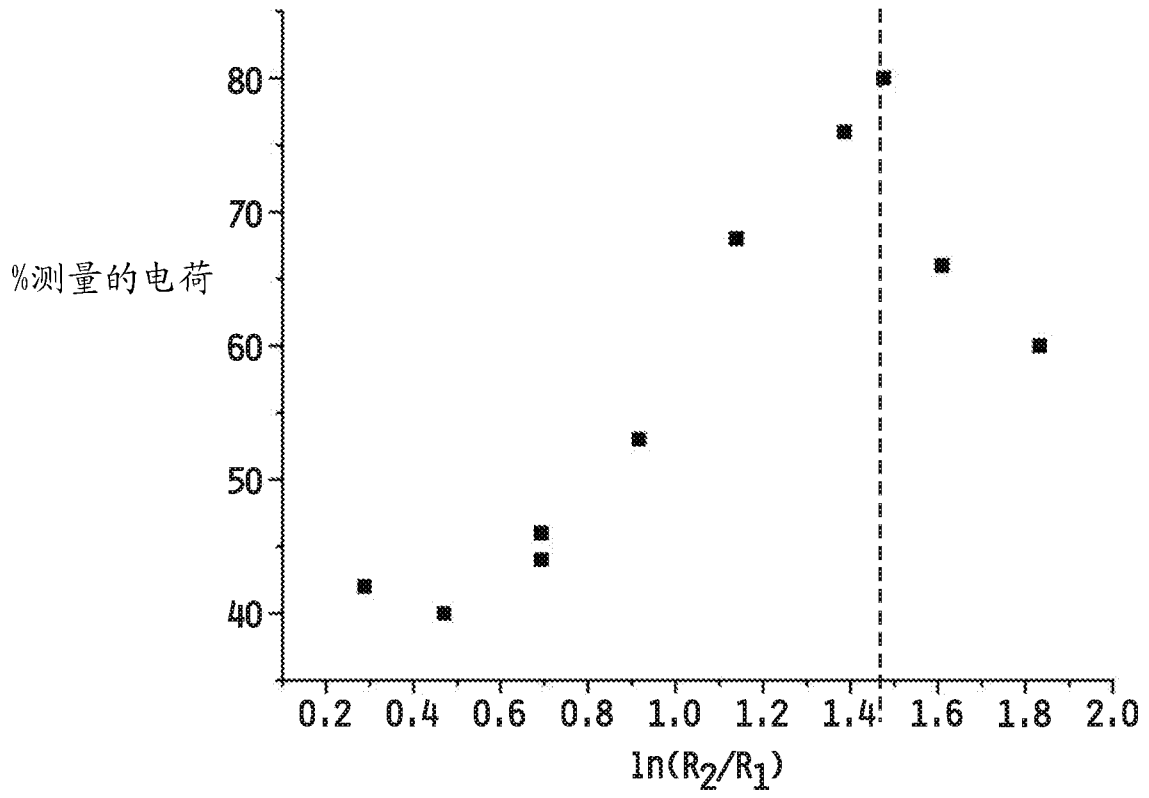


图 3

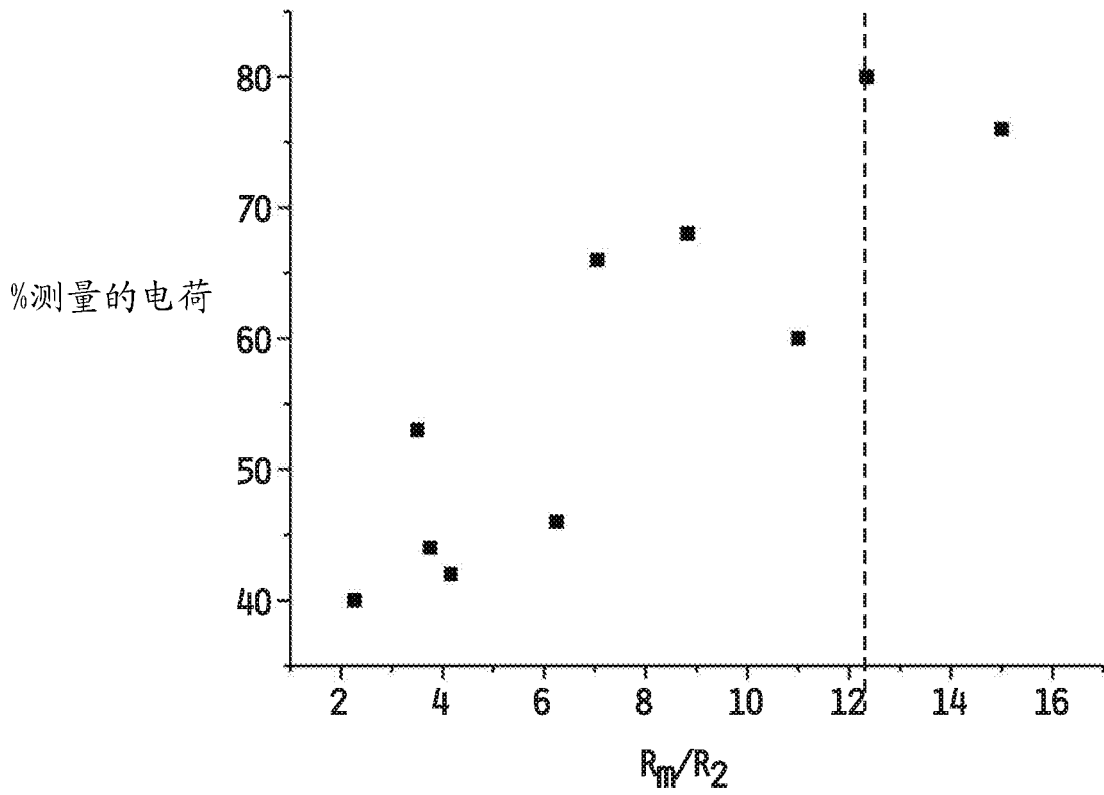


图 4

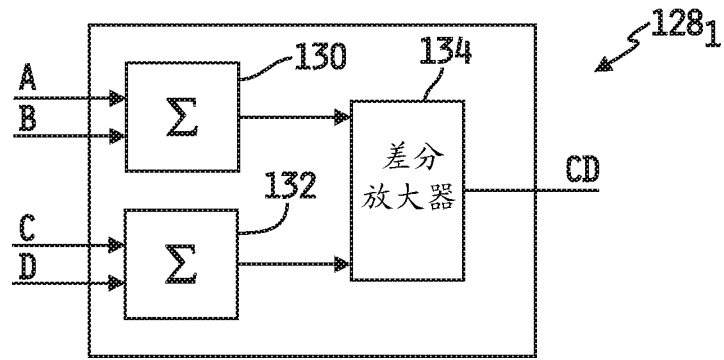


图 5A

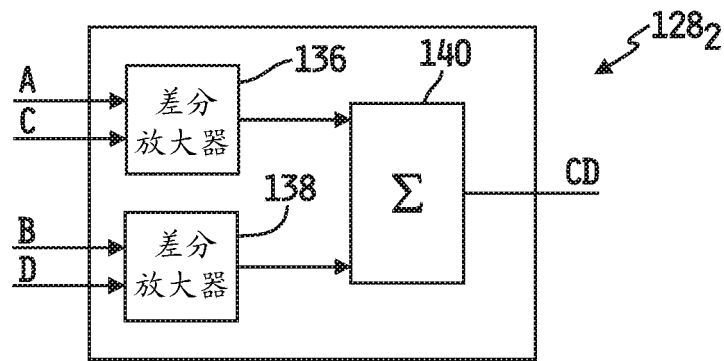


图 5B

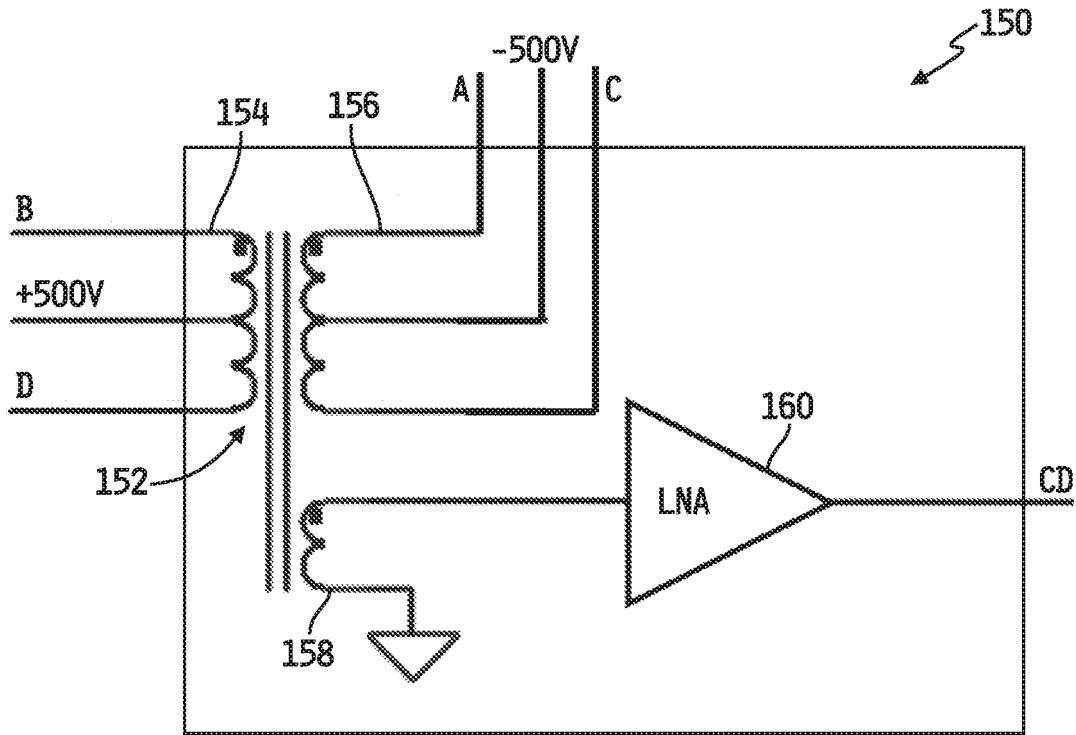


图 6A

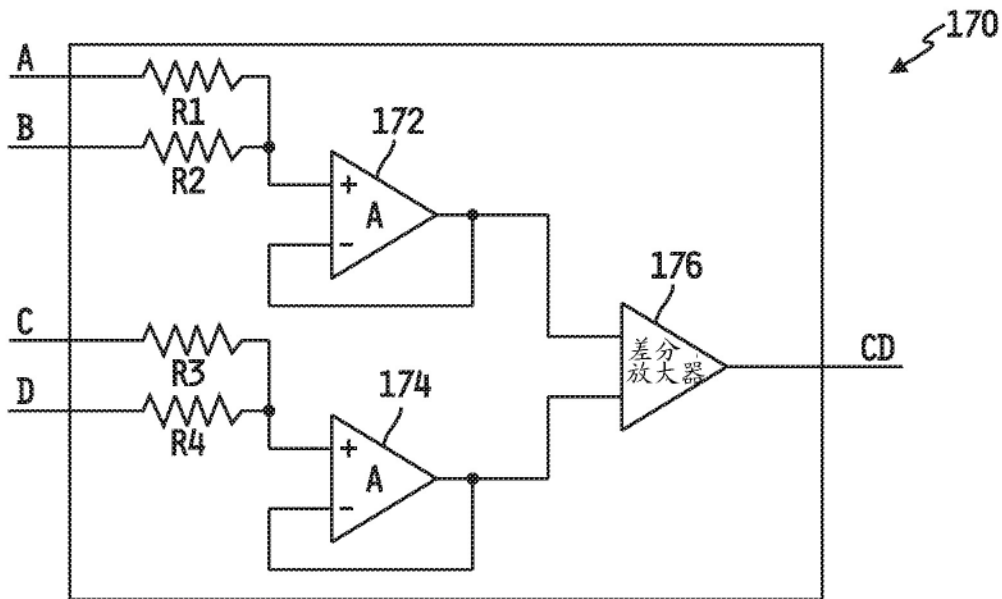


图 6B

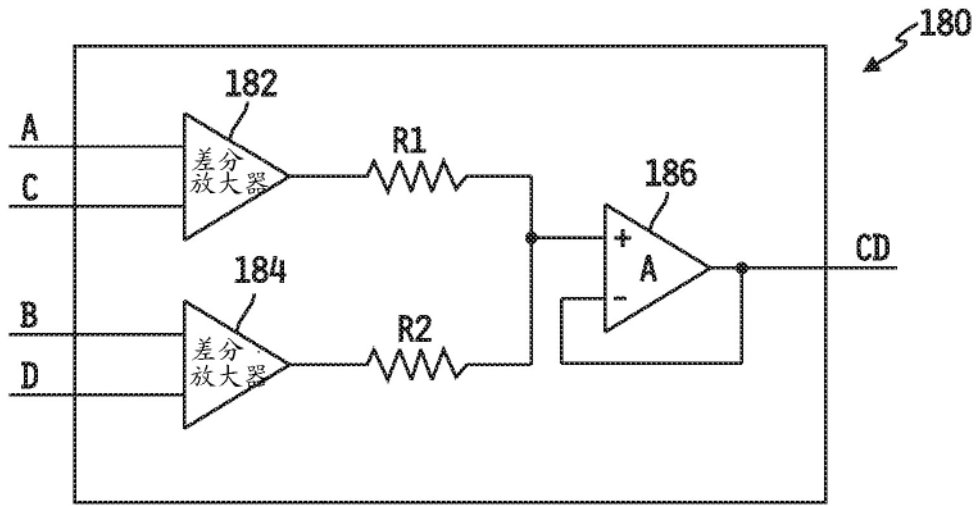


图 7

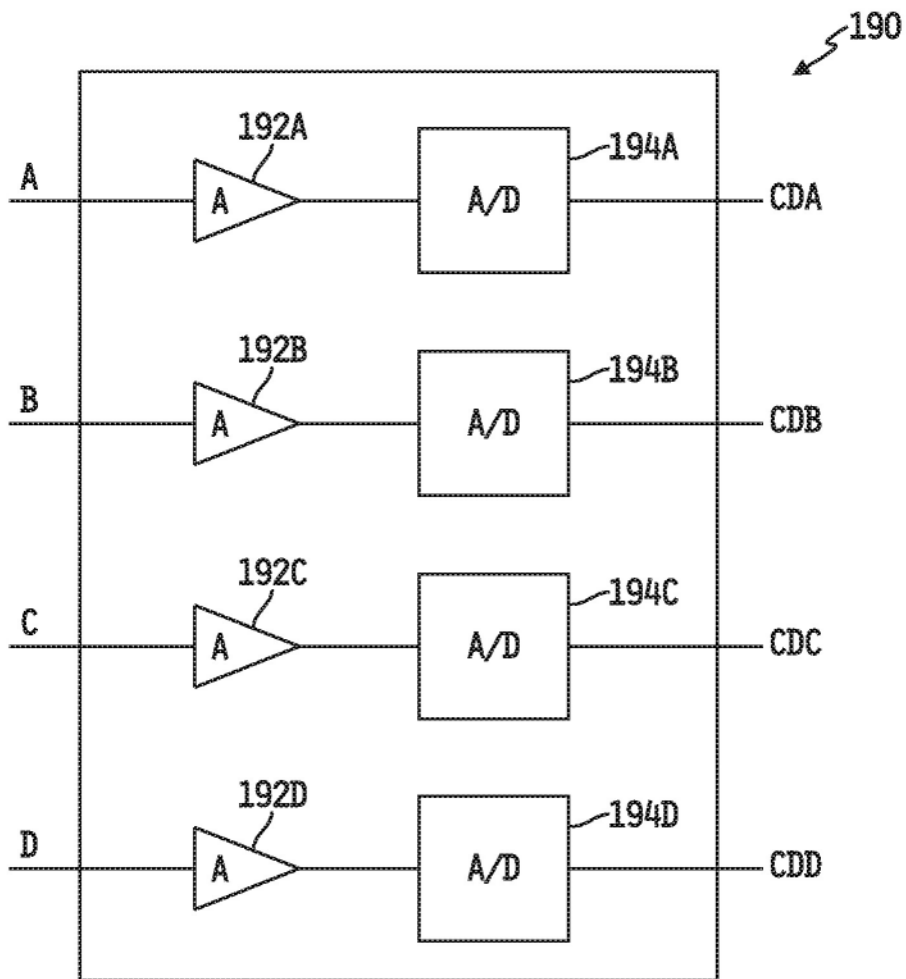


图 8

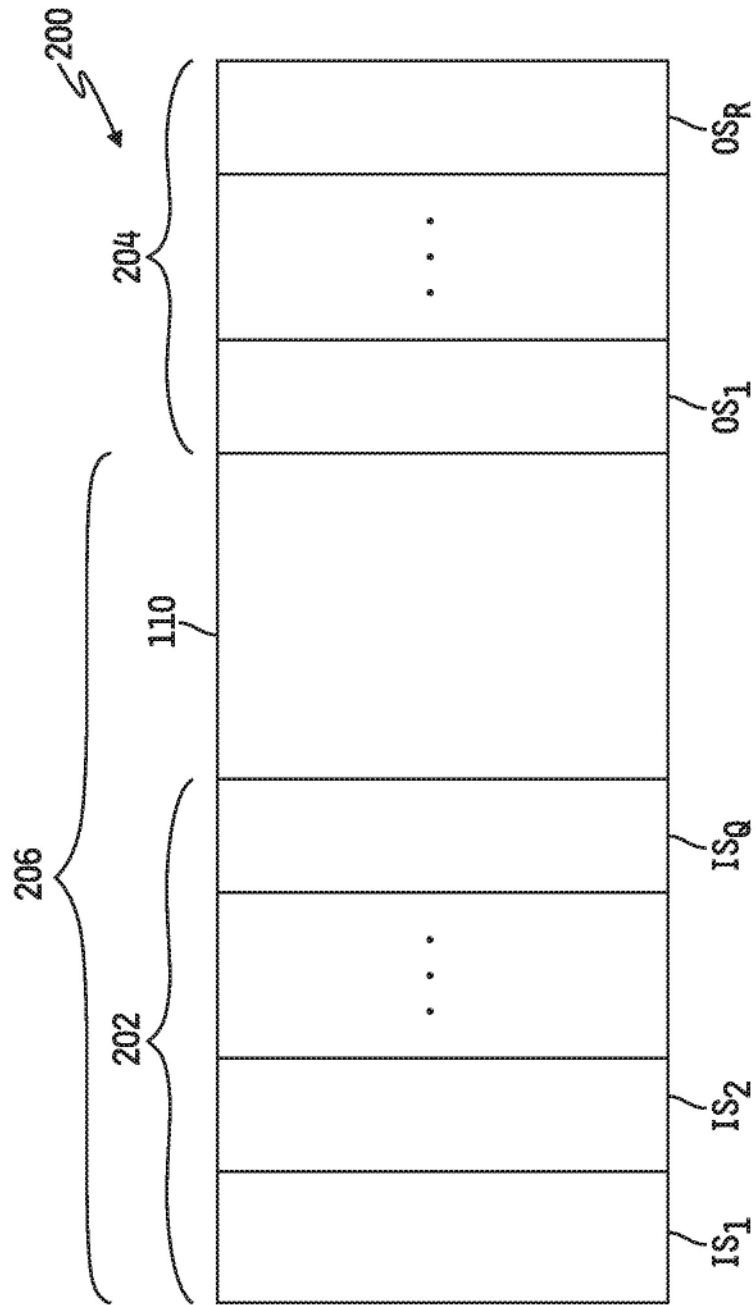


图 9A

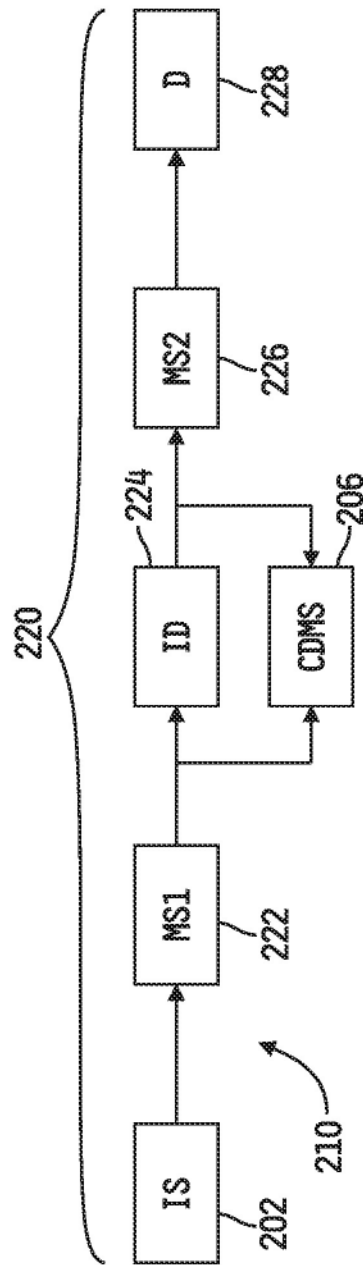


图 9B