(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 119213527 A
(43)申请公布日 2024.12.27

(21)申请号 202380041223.X
(22)申请日 2023.05.16
(30)优先权数据
63/343,082 2022.05.17 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2024.11.18
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2023/022436 2023.05.16
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2023/225033 EN 2023.11.23
(71)申请人 朗姆研究公司
地址 美国加利福尼亚州
(72)发明人 崔明烈 吴垠
迈克尔·约翰·马丁
亚历山大·米勒·帕特森
(74)专利代理机构 上海胜康律师事务所 31263
专利代理师 樊英如 张静
(51)Int.Cl.
H01J 37/32(2006.01)

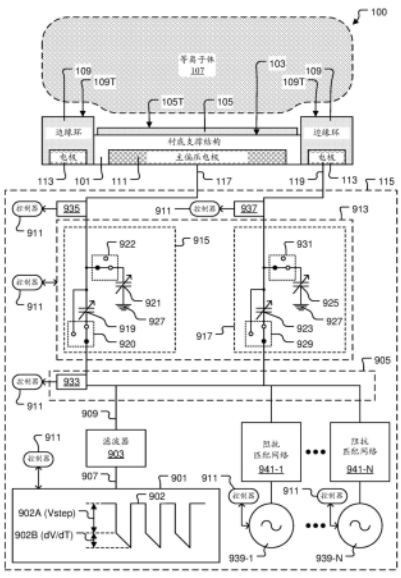
权利要求书4页 说明书21页 附图13页

(54)发明名称

利用非正弦电压源的在衬底边缘上方的离子能量分布控制

(57)摘要

偏压供应系统包括设置在衬底支撑表面下方的主偏压电极。主偏压电极系控制位于衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压。偏压供应系统包括设置在围绕衬底支撑表面的边缘环内的边缘环电极。边缘环电极控制在边缘环的顶表面上的电压。偏压供应系统包括电压供应系统,其在偏压供应节点上产生作为时间的函数的指定的电压波形。第一分支电路电连接偏压供应节点与主偏压电极。第二分支电路电连接偏压供应节点与边缘环电极。第二分支电路包括串联电容器和并联电容器。



CN 119213527 A

1.一种偏压供应系统,其包括:

主偏压电极,其设置在衬底支撑表面下方,所述主偏压电极被配置成控制在所述衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压;

边缘环电极,其设置在围绕所述衬底支撑表面的边缘环内,所述边缘环电极被配置成控制在所述边缘环的顶表面上的电压;

电压供应系统,其被配置成在偏压供应节点上产生作为时间的函数的指定的电压波形;

第一分支电路,其电连接于所述偏压供应节点与所述主偏压电极之间;以及

第二分支电路,其电连接于所述偏压供应节点与所述边缘环电极之间,所述第二分支电路包括串联电容器和并联电容器。

2.根据权利要求1所述的偏压供应系统,其中所述电压供应系统包括第一电压供应源和第二电压供应源,所述第一电压供应源被配置成产生随时间恒定的电压幅度,所述第二电压供应源被配置成产生随时间变化的电压,其中所述随时间恒定的电压幅度和所述随时间变化的电压组合以形成所述指定的电压波形。

3.根据权利要求2所述的偏压供应系统,其中所述随时间变化的电压作为时间的函数而基本上线性地变化。

4.根据权利要求2所述的偏压供应系统,其中所述第一电压供应源是第一直流电压供应源,所述第二电压供应源是第二直流电压供应源。

5.根据权利要求1所述的偏压供应系统,其中所述指定的电压波形是脉冲电压波形,所述脉冲电压波形被定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期包括开启持续时间和关断持续时间,在所述开启持续时间中所述脉冲电压波形具有负电压,而在所述关断持续时间中所述脉冲电压波形具有正电压。

6.根据权利要求5所述的偏压供应系统,其中所述并联电容器被设定以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间期间,在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间建立指定的电压差。

7.根据权利要求6所述的偏压供应系统,其中所述串联电容器被设定以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间内,将在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间的所述指定的电压差维持在基本上恒定的电平。

8.根据权利要求7所述的偏压供应系统,其中所述串联电容器被设定以改变在所述衬底的所述顶表面上的作为时间的函数的电压,以补偿在所述衬底的所述顶表面上的作为时间的函数的电释放。

9.根据权利要求1所述的偏压供应系统,其中所述串联电容器和所述并联电容器中的每一者是各自独立可控的可变电容器。

10.根据权利要求1所述的偏压供应系统,其还包括:

射频功率供应源,其被电连接以伴随着通过所述电压供应系统产生所述指定的电压波形而供应射频信号至所述偏压供应节点。

11.根据权利要求1所述的偏压供应系统,其中所述串联电容器是第一串联电容器,而所述并联电容器是第一并联电容器,所述第一分支电路包括第二串联电容器和第二并联电容器。

12.根据权利要求11所述的偏压供应系统,其中所述指定的电压波形是脉冲电压波形,所述脉冲电压波形被定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期系包括开启持续时间和关断持续时间,在所述开启持续时间中所述脉冲电压波形具有负电压,在所述关断持续时间中所述脉冲电压波形具有正电压,以及其中所述第一并联电容器和所述第二并联电容器被共同地设定,以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间期间,在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间建立指定的电压差。

13.根据权利要求12所述的偏压供应系统,其中所述第一串联电容器和所述第二串联电容器被共同地设定,以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间内,将在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间的所述指定的电压差维持在基本上恒定的电平。

14.根据权利要求11所述的偏压供应系统,其中所述第一串联电容器是第一可变电容器,所述第一并联电容器是第二可变电容器,所述第二串联电容器是第三可变电容器,所述第二并联电容器是第四可变电容器,以及其中所述第一可变电容器、所述第二可变电容器、所述第三可变电容器和所述第四可变电容器相对于彼此是独立可控的。

15.根据权利要求11所述的偏压供应系统,其还包括:

射频功率供应源,其被电连接以伴随着通过所述电压供应系统产生所述指定的电压波形而供应射频信号至所述偏压供应节点。

16.一种偏压供应系统,其包括:

主偏压电极,其设置在衬底支撑表面下方,所述主偏压电极被配置成控制在所述衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压;

边缘环电极,其设置在围绕所述衬底支撑表面的边缘环内,所述边缘环电极被配置成控制在所述边缘环的顶表面上的电压;

第一电压供应系统,其被配置成在所述主偏压电极上产生作为时间的函数的第一指定的电压波形,其中所述第一电压供应系统包括第一电压供应源和第二电压供应源,所述第一电压供应源被配置成产生一第一随时间恒定的电压幅度,所述第二电压供应源被配置成产生第一随时间变化的电压,其中所述第一随时间恒定的电压幅度和所述第一随时间变化的电压组合以形成所述第一指定的电压波形;以及

第二电压供应系统,其被配置成在所述边缘环电极上产生作为时间的函数的第二指定的电压波形,其中所述第二电压供应系统包括第三电压供应源和第四电压供应源,所述第三电压供应源被配置成产生第二随时间恒定的电压幅度,所述第四电压供应源被配置成产生第二随时间变化的电压,其中所述第二随时间恒定的电压幅度和所述第二随时间变化的电压组合以形成所述第二指定的电压波形。

17.根据权利要求16所述的偏压供应系统,其中所述第一指定的电压波形是第一脉冲电压波形,所述第一脉冲电压波形被定义为连续的第一系列脉冲周期,其中每个脉冲周期包括开启持续时间和关断持续时间,在所述开启持续时间中所述第一脉冲电压波形具有负电压,在所述关断持续时间中所述第一脉冲电压波形具有正电压,

其中所述第二指定的电压波形是第二脉冲电压波形,所述第二脉冲电压波形被定义为连续的第二系列脉冲周期,其中每个脉冲周期包括开启持续时间和关断持续时间,在所述开启持续时间中所述第二脉冲电压波形具有负电压,在所述关断持续时间中所述第二脉冲

电压波形具有正电压,以及

其中所述第一脉冲电压波形和所述第二脉冲电压波形是同步的。

18.根据权利要求16所述的偏压供应系统,其还包括:

射频功率供应源,其电连接以伴随着通过所述第一电压供应系统产生所述第一指定的电压波形以及通过所述第二电压供应系统产生所述第二指定的电压波形而供应射频信号至所述主偏压电极和所述边缘环电极两者。

19.一种在衬底的等离子体处理期间供应偏压的方法,其包括:

在偏压供应节点上产生作为时间的函数的指定的电压波形;

将所述指定的电压波形的第一变体从所述偏压供应节点传送至设置在衬底支撑表面下方的主偏压电极,以控制位于所述衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压;以及

将所述指定的电压波形的第二变体传送至设置在边缘环内的边缘环电极,以控制在所述边缘环的顶表面上的电压,所述边缘环围绕所述衬底支撑表面。

20.根据权利要求19所述的方法,其中产生所述指定的电压波形包括产生随时间恒定的电压幅度、产生随时间变化的电压以及组合所述随时间恒定的电压幅度和所述随时间变化的电压以在所述偏压供应节点上形成所述指定的电压波形。

21.根据权利要求20所述的方法,其中所述随时间变化的电压作为时间的函数而基本上线性地变化。

22.根据权利要求19所述的方法,其中所述指定的电压波形是脉冲电压波形,所述脉冲电压波形被定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期包括开启持续时间和关断持续时间,在所述开启持续时间中所述脉冲电压波形具有负电压,在所述关断持续时间中所述脉冲电压波形具有正电压。

23.根据权利要求22所述的方法,其还包括:

使用在从所述偏压供应节点延伸至所述边缘环电极的电路内的串联电容器和并联电容器,以产生所述指定的电压波形的所述第二变体。

24.根据权利要求23所述的方法,其还包括:

控制所述并联电容器,以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间期间,在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间建立指定的电压差。

25.根据权利要求24所述的方法,其还包括:

控制所述串联电容器,以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间内,将在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间的所述指定的电压差维持在基本上恒定的电平。

26.根据权利要求25所述的方法,其还包括:

控制所述串联电容器,以改变在所述边缘环的所述顶表面上的作为时间的函数的电压,以补偿在所述边缘环的所述顶表面上的作为时间的函数的电释放。

27.根据权利要求22所述的方法,其还包括:

使用在从所述偏压供应节点延伸至所述主偏压电极的第一电路内的第一串联电容器和第一并联电容器,以产生所述指定的电压波形的所述第一变体;以及

使用在从所述偏压供应节点延伸至所述边缘环电极的第二电路内的第二串联电容器和第二并联电容器,以产生所述指定的电压波形的所述第二变体。

28.根据权利要求27所述的方法,其还包括:

控制所述第一并联电容器和所述第二并联电容器,以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间期间,在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间建立指定的电压差。

29.根据权利要求28所述的方法,其还包括:

控制所述第一串联电容器和所述第二串联电容器,以在所述脉冲电压波形的每个脉冲周期的所述开启持续时间内,将在所述衬底的所述顶表面与所述边缘环的所述顶表面之间的所述指定的电压差维持在基本上恒定的电平。

30.根据权利要求19所述的方法,其还包括:

伴随着在所述偏压供应节点上产生所述指定的电压波形而供应射频信号至所述偏压供应节点。

利用非正弦电压源的在衬底边缘上方的离子能量分布控制

背景技术

[0001] 等离子体处理系统用于在半导体晶片上制造半导体设备,例如芯片/管芯。在等离子体处理系统中,半导体晶片暴露于各种类型的等离子体,以使半导体晶片的状态发生指定的变化,例如经由材料沉积和/或材料去除和/或材料植入和/或材料修饰等。在半导体晶片的等离子体处理期间,射频(RF)功率经由室内的处理气体传输,以将处理气体转化为等离子体,使其与半导体晶片接触。等离子体中的反应性成分(例如自由基和离子)与半导体晶片上的材料相互作用,以在半导体晶片上产生指定的效果。在一些等离子体处理系统中,在半导体晶片的水平处施加偏压,以将等离子体内的带电成分吸引朝向半导体晶片。

[0002] 随着半导体工业继续朝向更小的芯片尺寸以及提高的芯片性能的方向发展,需要使用更高密度和高深宽比的特征来定义在芯片上的晶体管,这导致晶体管对制造处理变化更加敏感。随着芯片上特征尺寸的缩小,一些仅仅几个原子的制造处理变化可能需要蚀刻均匀性控制的改善。在半导体晶片的最边缘(例如,距边缘约5毫米(mm)内)的均匀离子通量是对微电子制造的等离子体蚀刻和沉积的严格要求。此外,在半导体晶片的边缘处实现基本上均匀的离子通量是有意义的挑战,因为在衬底上大约10%的管芯(die)会受到距半导体晶片的外周边缘约5mm径向距离内所发生的制造处理结果的影响。由于在半导体晶片的周缘附近的结构、时间、和/或电气不连续,所以在半导体晶片的外周边缘附近可能发生制造处理结果的不均匀。在此背景下产生本文中所述的多种实施方案。

发明内容

[0003] 在一示例性实施方案中,公开一种偏压供应系统。该偏压供应系统包括:主偏压电极,其设置在衬底支撑表面下方。该主偏压电极被配置成控制存在于该衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压。该偏压供应系统还包括:边缘环电极,其设置在围绕该衬底支撑表面的边缘环内。该边缘环电极被配置成控制在该边缘环的顶表面上的电压。该偏压供应系统还包括:电压供应系统,其被配置成在偏压供应节点上产生作为时间的函数的指定的电压波形。该偏压供应系统还包括:第一分支电路,其电连接于该偏压供应节点与该主偏压电极之间。该偏压供应系统还包括:第二分支电路,其电连接于该偏压供应节点与该边缘环电极之间。该第二分支电路包括串联电容器和并联电容器(shunt capacitor)。

[0004] 在一示例性实施方案中,公开了一种偏压供应系统。该偏压供应系统包括:主偏压电极,其设置在衬底支撑表面下方。该主偏压电极被配置成控制存在于该衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压。该偏压供应系统还包括:边缘环电极,其设置在围绕该衬底支撑表面的边缘环内。该边缘环电极被配置成控制在该边缘环的顶表面上的电压。该偏压供应系统还包括:第一电压供应系统,其被配置成在该主偏压电极上产生作为时间的函数的第一指定的电压波形。该第一电压供应系统包括第一电压供应源和第二电压供应源。该第一电压供应源被配置成产生第一随时间恒定的(temporally constant)电压幅度。该第二电压供应源被配置成产生第一随时间变化的(temporally varying)电压。该第一随时间恒定的电压幅度和该第一随时间变化的电压系结合以形成该第一指定的电压波形。该偏压供应

系统还包括:第二电压供应系统,其被配置成在该边缘环电极上产生第二作为时间的函数的指定的电压波形。该第二电压供应系统系包括第三电压供应源和第四电压供应源。该第三电压供应源被配置成产生第二随时间恒定的电压幅度。该第四电压供应源被配置成产生第二随时间变化的电压。该第二随时间恒定的电压幅度和该第二随时间变化的电压结合以形成该第二指定的电压波形。

[0005] 在一示例性实施方案中,公开了一种在衬底的等离子体处理期间供应偏压的方法。该方法包括:在偏压供应节点上产生作为时间的函数的指定的电压波形。该方法还包括:将该指定的电压波形的第一变体从该偏压供应节点传送至设置在衬底支撑表面下方的主偏压电极,以控制位于该衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压。该方法还包括:将该指定的电压波形的第二变体传送至设置在边缘环内的边缘环电极,以控制在该边缘环的顶表面上的电压,该边缘环围绕该衬底支撑表面。

[0006] 从以下的详细描述以及附图中,将更清楚地看到本文所公开的实施方案的其他方面以及优点。

附图说明

[0007] 图1A示出了根据一些实施方案的示例性衬底等离子体处理系统的一部分的竖直剖面图。

[0008] 图1B根据一些实施方案示出了设置在衬底支撑结构上的衬底的在图1A中被标记为A-A的俯视图,其中边缘环围绕衬底支撑结构。

[0009] 图2A根据一些实施方案示出了紧邻衬底支撑结构的边缘环的示例图,其中衬底位于衬底支撑表面上。

[0010] 图2B根据一些实施方案示出了施加至衬底顶表面的RF偏压的波形、以及施加至边缘环顶表面的RF偏压的波形。

[0011] 图3根据一些实施方案示出了示例性任意(非正弦)偏压波形,其可分别通过主偏压电极和边缘环电极而施加至衬底顶表面和边缘环顶表面中的每一者。

[0012] 图4根据一些实施方案示出了将脉冲电压波形施加至主偏压电极和边缘环电极两者,以产生在图2A的示例中的平的等离子体鞘边界。

[0013] 图5根据一些实施方案示出了伴随着将较短工作周期的脉冲电压波形施加至边缘环电极,将图4的脉冲电压波形施加至主偏压电极。

[0014] 图6根据一些实施方案示出了施加至衬底顶表面的脉冲电压波形以及施加至边缘环顶表面的脉冲电压波形,其中在边缘环上的脉冲电压波形相对于在衬底上的脉冲电压波形是相位偏移的。

[0015] 图7根据一些实施方案示出了将具有图3的增加幅度斜率的脉冲电压波形施加至主偏压电极、以及将具有图3的减少幅度斜率的脉冲电压波形施加至边缘环电极。

[0016] 图8根据一些实施方案示出了将脉冲电压波形施加至主偏压电极,同时将脉冲电压波形施加至边缘环电极,其中在边缘环上的脉冲电压波形包括电平到电平(level-to-level)脉冲状态。

[0017] 图9A根据一些实施方案示出了用于实施关于图3至图8所述的各种方法的图1A的偏压供应系统的示例性实现方案,其中将各种偏压波形施加至衬底顶表面和边缘环顶表

面,以控制衬底边缘附近的等离子体鞘边界轮廓。

[0018] 图9B根据一些实施方案示出了电压供应系统的示例性实现方案。

[0019] 图10根据一些实施方案示出了由电压供应系统所产生的示例性偏压脉冲波形、以及在衬底顶表面上的对应偏压波形、以及在边缘环顶表面上的对应偏压波形。

[0020] 图11A根据多种实施方案示出了可在图9A的偏压供应系统中配置分流电路的各种方式的图表。

[0021] 图11B根据一些实施方案示出了描绘如图11A中所标记的串联电容器、并联电容器、串联电容器和并联电容器的可能的接合/不接合(engagement/disengagement)设置的图表。

[0022] 图12根据一些实施方案示出了伴随着偏压脉冲波形而产生的示例性RF偏压波形。

[0023] 图13根据一些实施方案示出了用于实施关于图3至图8所述的各种方法的另一偏压供应系统,其中将各种偏压波形施加至衬底顶表面和边缘环顶表面,以控制在衬底边缘附近的等离子体鞘边界轮廓。

[0024] 图14根据一些实施方案示出了控制器的示例图。

[0025] 图15根据一些实施方案示出了用于在衬底的等离子体处理期间供应偏压的方法的流程图。

具体实施方式

[0026] 在以下描述中,提出了许多特定细节以提供对于本公开内容的彻底理解。然而,对于本领域技术人员来说显而易见的是,本公开内容的实施方案可在没有这些特定细节的部分或全部的情况下实施。在其它情况下,公知的处理操作并未详细地描述,以免不必要地使本公开内容难以理解。

[0027] 图1A根据一些实施方案示出了通过示例性衬底等离子体处理系统100的一部分的竖直横剖面图。系统100包括衬底支撑结构101,其具有衬底支撑表面103,在通过在衬底支撑结构101上方产生的等离子体107以处理衬底105期间,衬底支撑表面103被配置成支撑衬底105。在一些实施方案中,衬底支撑结构101为静电卡盘,其被配置成产生将衬底105保持至衬底支撑表面103的静电力。在一些实施方案中,边缘环109围绕衬底支撑结构101,使得衬底支撑表面103受到边缘环109的限制。

[0028] 图1B根据一些实施方案示出了设置在衬底支撑结构101上的衬底105的在图1A中被标记为A-A的俯视图,其中边缘环109围绕衬底支撑结构101。在一些实施方案中,RF功率从线圈、电极和/或天线而传送至在衬底支撑结构101上方的等离子体处理区域中,处理气体(或气体混合物)被供应到等离子体处理区域中。RF功率将处理气体/混合物转变成在等离子体处理区域内的等离子体107。使等离子体107产生,以便以受控的方式引起衬底105的改变。在各种制造处理中,衬底105的改变可为衬底105上的表面条件或材料的改变。例如,在各种制造处理中,衬底105的改变可包括从衬底105蚀刻材料、在衬底105上沉积材料、和/或存在于衬底105上的材料的改性中的一或多者。应当理解,等离子体处理系统100可为任何类型的等离子体处理系统,其中RF功率被传送至在等离子体处理区域内的处理气体/混合物,以在支撑于衬底支撑结构101上的衬底105上方产生等离子体107。

[0029] 在一些实施方案中,衬底105为进行制造程序的半导体晶片。然而,应当理解,在多

种实施方案中,衬底105基本上可为经受基于等离子体的制造处理的任何类型的衬底。例如,在一些实施方案中,衬底105由硅、蓝宝石、GaN、GaAs或SiC、和/或其它衬底材料形成,并且可包括玻璃面板/衬底、金属箔、金属片、聚合物材料等。而且,在多种实施方案中,衬底105可在形式、形状和/或尺寸上变化。例如,在一些实施方案中,衬底105为外径200mm、300mm、450mm或其它尺寸的半导体晶片。此外,在一些实施方案中,衬底105为非圆形衬底,例如用于平板显示器的矩形衬底等、以及其它形状。

[0030] 主偏压电极111被设置在衬底支撑表面103下方的衬底支撑结构101内。在一些实施方案中,衬底支撑结构101由介电材料(例如,陶瓷材料或其它类型的介电材料)形成,主偏压电极111由导电材料形成。边缘环电极113被设置在边缘环109内。在一些实施方案中,边缘环109由介电材料形成,边缘环电极113由导电材料形成。主偏压电极111电连接至偏压供应系统115,如连接件117所示。边缘环电极113还电连接至偏压供应系统115,如连接件119所示。偏压供应系统115被配置成控制主偏压电极111上的电压和边缘环电极113上的电压。当衬底105存在于衬底支撑表面103上时,主偏压电极111被配置成控制在衬底105的顶表面105T上的电压。施加至主偏压电极111的电压可能不同于在衬底105的顶表面105T上的对应电压,这是由于在主偏压电极111与衬底105的顶表面105T之间存在各种材料,例如,在主偏压电极111上方的衬底支撑结构101的介电材料与衬底105本身的一或更多种材料的组合。在一些实施方案中,存在于主偏压电极111与衬底105的顶表面105T之间的一或更多种材料可在电气上表示为基本上恒定的电容。边缘环电极113被配置成控制在边缘环109的顶表面109T上的电压。施加至边缘环电极113的电压可能不同于在边缘环109的顶表面109T上的对应电压,这是由于在边缘环电极113上方的边缘环109的材料所致。在一些实施方案中,在边缘环电极113上方的边缘环109的一或更多种材料可在电气上表示为基本上恒定的电容。

[0031] 图2A根据一些实施方案示出了紧邻衬底支撑结构101的边缘环109的放大竖直横剖面图,其中衬底105位于衬底支撑表面103上。在此示例中,边缘环109的顶表面109T高于衬底105的顶表面105T。在衬底105的顶表面105T上方的竖直高度1D、2D、3D、4D、5D和6D分别由线201、202、203、204、205和206所描绘。竖直高度1D、2D、3D、4D、5D和6D中的连续高度以固定距离增量1D分开,其中D为任意距离。在边缘环109的顶表面109T上方的竖直高度1D、2D、3D和4D分别由线207、208、209和210所描绘。在边缘环109上方的竖直高度1D、2D、3D和4D中的连续高度以固定距离增量1D分开。

[0032] 在衬底105上方的等离子体鞘厚度是从衬底105的顶表面105T到等离子体107的主体的距离。类似地,在边缘环109上方的等离子体鞘厚度是从边缘环109的顶表面109T到等离子体107的主体的距离。通过主偏压电极11以在衬底105的顶表面105T上施加负电压,会在衬底105上方形成等离子体鞘。在衬底105的顶表面105T上的电压控制在衬底105上方的等离子体鞘的厚度。通过边缘环电极113以在边缘环109的顶表面109T上施加负电压,会在边缘环109上方形成等离子体鞘。在边缘环109的顶表面109T上的电压控制在边缘环109上方的等离子体鞘的厚度。在衬底105上方的等离子体鞘的厚度部分取决于在衬底105的顶表面105T上的电压。类似地,在边缘环109上方的等离子体鞘的厚度部分取决于在边缘环109的顶表面109T上的电压。在图2A的示例中,在衬底105的顶表面105T上的-100V的电压电位使等离子体鞘边界远离衬底105的顶表面105T而移动1D的距离增量。类似地,在图2A的示例

中,在边缘环109的顶表面109T上的-100V的电压电位使等离子体鞘边界远离边缘环109的顶表面109T而移动1D的距离增量。

[0033] 当来自等离子体107的轰击离子行进通过等离子体鞘时,离子获得朝向垂直于限定等离子体鞘的等电位线的方向的动能。此外,当限定等离子体鞘的等电位线在行进的离子的整个路径上为平的时,离子角分布函数(IADF)被最小化(接近于0度)。理想地,横跨衬底105和边缘环109的等离子体鞘边界是平的,使得在整个衬底105的外周边缘,IADF垂直于衬底105的顶表面105T(与该顶表面105T呈90度)。例如,在图2A中,当在衬底105的顶表面105T上的电压为-600V且在边缘环109的顶表面109T上的电压为-400V时,在衬底105与边缘环109之间的过渡区上方的等离子体鞘边界是平的,如线206、212和210所示,使得在等离子体鞘内的离子将不会获得基本上水平的能量,即,离子将在基本上垂直于衬底105的顶表面105T的方向上朝向衬底105行进。

[0034] 图2B根据一些实施方案示出了施加至衬底105的顶表面105T的RF偏压的波形220、以及施加至边缘环109的顶表面109T的RF偏压的波形222。波形220和222具有相同的频率并且在相位上是同步的。波形220具有-600V的峰值负电压,且波形222具有-400V的峰值负电压,对应于-200V的电位差(ΔV1)。因此,当波形220和222处于它们各自的峰值负电压时,横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区的等离子体鞘边界是平的,如图2A中的线206、212和210所示。然而,在波形220和222的其它相位,在衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T上的电压不提供横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区的平的等离子体鞘边界。例如,当在衬底105的顶表面105T上的电压为-300V,且在边缘环109的顶表面109T上的电压为-200V,对应于-100V的电位差(ΔV2),这不提供横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区的平的等离子体鞘边界,如图2A中的线203、211和208所示。当RF偏压波形220和222在相位上循环时,等离子体鞘边界在衬底105的顶表面105T与边缘环109的顶表面109T之间的过渡区处上下弯曲。等离子体鞘边界的这种弯曲会造成轰击离子(例如用于反应性离子蚀刻)以不垂直于衬底105的顶表面105T的角度而入射在衬底105上。在衬底105的边缘处的轰击离子的IADF的增加会造成在衬底105边缘处的处理结果(例如,蚀刻速率、蚀刻轮廓等)的不均匀,其通常需要实验上的评估,例如通过对不同的施加正弦RF偏压波形的衬底105蚀刻轮廓结果的成像。

[0035] 当使用正弦RF偏压以对衬底105施加偏压时,衬底105、主偏压电极111、以及在衬底105的边缘附近的边缘环109结构的不连续性经常造成在衬底105上的不均匀处理结果。此外,图2A和图2B的示例显示,除非衬底105的顶表面105T与边缘环109的顶表面109T处于相同高度(处于相同的水平面),否则正弦波形不能在轰击离子通过等离子体鞘的时间期间内提供横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区的理想的、平的等离子体鞘边界。

[0036] 在一些实施方案中,在边缘环109下方增加独立的RF偏压,以便控制在衬底105的外周边缘附近的衬底105上的处理结果均匀性。然而,衬底105和边缘环109的RF偏压具有相当宽的离子能量分布(IED),并且缺乏对于在衬底105和/或边缘环109上方的IED的半峰全宽(FWHM)和离子能量水平的控制。此外,反应性离子蚀刻对边缘环109的腐蚀是与供应正弦RF偏压至边缘环电极113相关的另一问题。由于更频繁地更换边缘环109,所以边缘环109腐蚀可能增加制造的操作成本,这可能降低通过使用边缘环109而提供的制造良率的好处。

[0037] 相较于在各种应用(例如,反应性离子蚀刻(RIE)、原子层沉积(ALD)、原子层蚀刻

(ALE)等)中的宽IED,窄IED提供了在衬底105上实现期望的等离子体处理结果的优点。可利用在处理中的衬底105(例如,在用于等离子体蚀刻和/或沉积的硅晶片上)的表面105T上的恒定负电压以获得窄IED。此外,具有许多由介电材料所制成的衬底支撑结构101和衬底105。除非控制主偏压电极111的电压,否则带正电的离子将通过等离子体鞘,因而减少在衬底105的顶表面105T上的负表面电荷,且对应地降低鞘电位。在一些实施方案中,假设基本上恒定的离子通量通过等离子体鞘,主偏压电极111电压的线性斜率用于在衬底105的顶表面105T上保持恒定的负电压。然而,在一些实施方案中,当通过等离子体的离子通量随着时间而改变时,主偏压电极111电压的非线性斜率用于在衬底105的顶表面105T上保持恒定的负电压。

[0038] 在一些情况下,如果等离子体鞘在即使与处理时间(>>1秒)相比而相对短的时间期间(>1毫秒)内也维持而不崩塌,则在主偏压电极111上将需要过高的电压幅度。在主偏压电极111上供应过高的电压幅度的高压产生器的实现方案是昂贵且效率低的。而且,电荷累积是与衬底105的顶表面105T上存在负电压的相对长的时间期间相关的另一问题。周期性地切换在主偏压电极111上的电压的极性解决了与过高的电压幅度需求和电荷累积有关的这些问题。为了获得窄IED,必须避免碰撞的鞘,如果离子的鞘行进时间(t_ion)大于在衬底105的顶表面105T上的恒定负电压(t_Vneg)的持续时间,则发生碰撞的鞘。由于短的t_Vneg,快速的切换频率会导致这样的状况(t_ion>t_Vneg)。因此,在主偏压电极111上,可能需要微秒数量级的电压的线性斜率。在一些实施方案中,切换频率介于10千赫至1兆赫之间。

[0039] 在非正弦电压源中有两个参数要控制:Vstep和dV/dT。在一些实施方案中,施加至主偏压电极111的电压在一时间期间内保持基本上不变,以便使被正离子所充电的衬底105放电。等离子体鞘在此时间期间内崩塌。接着,将Vstep施加至主偏压电极111,以在衬底105的顶表面105T上实现目标负电压。接着,在通过Vstep而在衬底105的顶表面105T上实现目标负电压之后,将电压斜率dV/dT施加至主偏压电极111直到切换周期结束,以便在衬底105的顶表面105T上维持目标负电压。电压Vstep设定期望的离子能量,且电压dV/dT设定IED的半峰全宽(FWHM)。电压dV/dT=I_ion/C_substrate,其中I_ion为入射在衬底105上的离子电流,C_substrate为在衬底105的顶表面105T与被直接或间接地施加受控的偏压的主偏压电极111之间的电容。通过主偏压电极111以施加Vstep和dV/dT而实现并维持在衬底105的顶表面105T上的目标负电压的上述处理也可用于通过边缘环电极113而实现并维持在边缘环109的顶表面109T上的目标电压。

[0040] 在衬底表面上的均匀IED对于制造良率而言是重要的。然而,由于衬底、底板电极和边缘环结构的不连续性,所以IED在衬底边缘附近经常是不均匀的。根据本文中所公开的多种实施方案,在边缘环109上的独立的非正弦电压控制提供了对在衬底105的边缘上的IED均匀性的控制。独立的电压源用于提供在边缘环109上的独立的非正弦电压控制。独立的电压源以在整个衬底105上提供基本上均匀的处理结果的方式而与主偏压电极111上的电压切换相匹配。

[0041] 在一些实施方案中,边缘环电极113用于提供在边缘环109的顶表面109T上的独立IED控制。在边缘环109的顶表面109T下方插入边缘环电极113可以各种方式实现。在一示例性实施方案中,边缘环电极113与主偏压电极111电气分离。在此实施方案中,独立的电压源

被实现用于边缘环电极113。在另一示例性实施方案中,边缘环电极113是从主偏压电极111分支出来的。在一些实施方案中,边缘环电极113是从主偏压电极111分支出来的附加电极。在一些实施方案中,边缘环电极113形成为主偏压电极111的扩展。边缘环电极113从主偏压电极111分支的实施方案不需要用于边缘环电极113的独立的电压源。而是,在边缘环电极113是从主偏压电极111分支出来的的实施方案中,利用边缘环109电容优化而控制在边缘环电极113上的电压,以基本上匹配衬底105的电容。在多种实施方案中,各种技术(例如,可变电容器和温控电容)被使用于边缘环109电容优化。本文中所公开的用于在边缘环109上施加独立的非正弦电压和IED控制的多种实施方案提供了在衬底105的边缘附近的改善的处理均匀性。在通过边缘环109电容和非正弦电压源所控制的IED的方面,本文中所公开的多种实施方案还提供了用于改善处理均匀性的新工具。

[0042] 在一些实施方案中,单独的任意(非正弦)偏压波形分别施加至衬底105和边缘环109中的每一者,以便维持横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区的基本上平的等离子体鞘边界。根据一些实施方案,图3示出了示例性任意(非正弦)偏压波形,可分别通过主偏压电极111和边缘环电极113而施加至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T中的每一者。应当理解,图3的偏压波形被显示作为示例。在其它实施方案中,可根据需要而施加基本上任何任意(非正弦)偏压波形至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T,以实现并维持横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区的基本上平的等离子体鞘边界。图3示出了脉冲电压波形301,其被定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期对应于波形周期,并且包括开启持续时间(on-duration)(在其中,脉冲电压波形301具有负电压)和关断持续时间(off-duration)(在其中,脉冲电压波形301具有正电压)。在波形301中的脉冲周期的开始处,响应于偏压幅度的阶跃变化(增加),发生了快速鞘形成。在波形301中的脉冲周期的开启持续时间内,使负偏压维持基本上恒定,以便维持一致的等离子体鞘边界厚度。在波形301中的脉冲周期的关断持续时间内,响应于在衬底105的顶表面105T或边缘环109的顶表面109T上从负偏压至正电压的阶跃变化,发生了快速等离子体鞘崩塌。

[0043] 图3还示出了脉冲电压波形303,其被定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期对应于波形周期,并且包括开启持续时间(在其中,脉冲电压波形303具有负电压)以及关断持续时间(在其中,脉冲电压波形303具有正电压)。在波形303中的脉冲周期的开始处,响应于偏压幅度的阶跃变化(增加),发生了快速鞘形成。在波形303中的脉冲周期的开启持续时间内,偏压幅度作为时间的函数而线性地减少,以便实现作为时间的函数的减少的等离子体鞘边界厚度。在波形303中的脉冲周期的关断持续时间内,响应于在衬底105的顶表面105T或边缘环109的顶表面109T上从负偏压至正电压的阶跃变化,发生了快速等离子体鞘崩塌。

[0044] 图3还示出了脉冲电压波形305,其被定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期对应于波形周期,并且包括开启持续时间(在其中,脉冲电压波形305具有负电压)以及关断持续时间(在其中,脉冲电压波形305具有正电压)。在波形305中的脉冲周期的开始处,响应于偏压幅度的阶跃变化(增加),发生了快速鞘形成。在波形305中的脉冲周期的开启持续时间内,偏压幅度作为时间的函数而线性地增加,以便实现作为时间的函数的增加的等离子体鞘边界厚度。在波形305中的脉冲周期的关断持续时间内,响应于在衬底105的顶表面105T或边缘环109的顶表面109T上从负偏压至正电压的阶跃变化,发生了快速等离子体

鞘崩塌。

[0045] 在图3中,波形周期(脉冲周期)表示形成和去除等离子体鞘的总时间。在一些实施方案中,在脉冲周期的开启持续时间期间的负电压幅度被设定为引发用于反应性离子蚀刻的离子轰击。通过调整对应于开启持续时间的波形周期(脉冲周期)的百分比,以控制波形301、303、305的工作周期。示例性的波形301、303和305可施加至主偏压电极111和边缘环电极113两者。

[0046] 图4根据一些实施方案示出了将脉冲电压波形301施加至主偏压电极111和边缘环电极113两者,以产生在图2A的示例中的平的等离子体鞘边界。具体而言,脉冲电压波形401表示在衬底105的顶表面105T上的电压,其对应于将脉冲电压波形301施加至主偏压电极111。脉冲电压波形403表示在边缘环109的顶表面109T上的电压,其对应于将脉冲电压波形301施加至边缘环电极113。波形401具有脉冲周期401A,其包括开启持续时间401B和关断持续时间401C。波形403具有脉冲周期403A,其包括开启持续时间403B和关断持续时间403C。脉冲电压波形401和403在相位和工作周期方面是同步的。脉冲周期401A的开启持续时间401B经由主偏压电极111而施加-600V的偏压至衬底105的顶表面105T。同时,脉冲周期403A的开启持续时间403B经由边缘环电极113而施加-400V的偏压至边缘环109的顶表面109T。因此,在图2A的示例中,在脉冲电压波形401和403的各自的脉冲周期401A和403A的各自的开启持续时间401B和403B内,横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区的等离子体鞘边界是平的,如线206、212和210所示。而且,在脉冲电压波形401和403的各自的脉冲周期401A和403A的各自的关断持续时间401C和403C期间,等离子体鞘崩塌。在图2A的示例中,在负偏压周期期间,脉冲电压波形401和403产生平的等离子体鞘边界,该负偏压周期比通过等离子体鞘的离子行进时间长得多。而且,衬底105和边缘环109的偏压以相同的相位和工作周期对准,使得等离子体鞘边界的形状在负偏压周期期间为不变的,并且使得轰击IADF可被最小化(接近于0度)。

[0047] 根据一些实施方案,图5示出了伴随着将较短工作周期的脉冲电压波形501施加至边缘环电极113,将图4的脉冲电压波形401施加至主偏压电极111。脉冲电压波形501具有脉冲周期501A,其包括开启持续时间501B和关断持续时间501C。相较于脉冲电压波形401,脉冲电压波形501具有更短的工作周期,因为脉冲周期501A的对应于开启持续时间501B的百分比小于脉冲周期401A的对应于开启持续时间401B的百分比。在边缘环109的顶表面109T上的电压幅度被设定为弄平在衬底105的边缘上方的等离子体鞘边界的情况下,在施加至边缘环109的顶表面109T的脉冲电压波形501的脉冲周期501A的开启持续时间501B期间,轰击离子的行进角度大约为0度(相对于从衬底105的顶表面105T而延伸的法线向量)。开启持续时间401B和开启持续时间501B可分别设定为比通过等离子体鞘的离子行进时间更长和更短。在这种情况下,在脉冲电压波形501的脉冲周期501A的关断持续时间501C期间,大多数的轰击离子将处于等离子体鞘的中间,其中离子主要受到在衬底105的顶表面105T上的电压的影响,因为越靠近衬底105的顶表面105T的电压梯度变得越小。因此,在脉冲电压波形501的脉冲周期501A的关断持续时间501C期间,最初在边缘环109的顶表面109T上方垂直移动的离子将会损失其能量,并且获得朝向衬底105的相当小的动能。对应地,施加至边缘环109的顶表面109T的脉冲电压波形501的较短工作周期将用于在反应性离子蚀刻处理期间减少边缘环109的腐蚀。

[0048] 根据一些实施方案,图6示出了施加至衬底105的顶表面105T的脉冲电压波形401、以及施加至边缘环109的顶表面109T的脉冲电压波形403,其中脉冲电压波形403相对于脉冲电压波形401是相位偏移的。具体而言,脉冲电压波形403被相位偏移而具有相位偏移量601,使得脉冲电压波形403的脉冲周期403A在脉冲电压波形401的脉冲周期401A之前开始。在一些实施方案中,相位偏移量601被设定为使得衬底105的边缘的蚀刻速率被降低,这是通过在衬底105的顶表面105T上的脉冲电压波形401的脉冲周期401A的开启持续时间401B(负电压)开始之前、在相位偏移量期间,将轰击离子吸引朝向边缘环109。以此方式,相位偏移量601用于通过将最初位于衬底105的边缘上方的离子移动朝向边缘环109,以减少轰击离子入射在衬底105的边缘上的数量。此外,在一些实施方案中,相位偏移量601使得离子在脉冲电压波形403的相位周期403A开始时最初行进朝向边缘环109,接着在脉冲电压波形401的相位周期401A开始时转向而垂直于衬底105。在一些实施方案中,当在衬底105的边缘附近的离子密度较大(由于衬底105的周缘附近的结构、时间、和/或电气不连续性)时,图6的相位偏移的脉冲电压波形403降低在衬底105的外周边缘处的蚀刻速率。而且,应当理解,在一些实施方案中,脉冲电压波形403为在另一方向上相位偏移,使得脉冲电压波形403的脉冲周期403A在脉冲电压波形401的脉冲周期401A开始之后开始一些相位偏移量。

[0049] 图7根据一些实施方案示出了将图3的脉冲电压波形305施加至主偏压电极111、以及将图3的脉冲电压波形303施加至边缘环电极113。具体而言,脉冲电压波形701表示在衬底105的顶表面105T上的电压,对应于将脉冲电压波形305施加至主偏压电极111。脉冲电压波形703表示在边缘环109的顶表面109T上的电压,对应于将脉冲电压波形303施加至边缘环电极113。波形701具有脉冲周期701A,其包括开启持续时间701B和关断持续时间701C。波形703具有脉冲周期703A,其包括开启持续时间703B和关断持续时间703C。脉冲电压波形701和703在相位和工作周期方面是同步的。脉冲周期701A的开启持续时间701B施加偏压至衬底105的顶表面105T,该偏压的幅度从初始阶跃电压幅度开始以时间为函数而线性地增加至-600V的电压。同时,脉冲周期703A的开启持续时间703B施加偏压至边缘环109的顶表面109T,该偏压的幅度从-400V的初始阶跃电压开始以时间为函数而线性地减少。

[0050] 在一些实施方案中,在开启持续时间701B期间的脉冲电压波形701的电压斜率、以及在开启持续时间703B期间的脉冲电压波形703的电压斜率被共同地调整,以通过操控在衬底105的边缘附近的离子移动而改善等离子体处理结果。图7的特定示例用于降低在衬底105的边缘处的蚀刻速率,不改变在衬底105的顶表面105T上的脉冲电压波形701与在边缘环109的顶表面109T上的脉冲电压波形703之间的工作周期或相位对准。在一些实施方案中,在脉冲电压波形701和703的各自的脉冲周期701A和703A的各自的开启持续时间701B和703B期间,在衬底105与边缘环109之间的等离子体鞘边界中的弯曲会反转。然而,应当理解,在多种实施方案中,脉冲电压波形701和703可以在脉冲周期701A和703A的各自的开启持续时间701B和703B期间所需的基本上任何方式,分别地配置成作为时间的函数而改变。

[0051] 图8根据一些实施方案示出了将脉冲电压波形801施加至主偏压电极111,同时将脉冲电压波形803施加至边缘环电极113,其中脉冲电压波形803包括电平到电平脉冲状态。脉冲电压波形801包括连续的系列脉冲周期801A。脉冲电压波形803包括连续的系列脉冲周期803A。脉冲电压波形801和803在相位方面是同步的。换句话说,脉冲电压波形803的相同脉冲周期803A出现在脉冲电压波形801的每个脉冲周期801A的时间过程内。脉冲电压波形

801表示在衬底105的顶表面105T上的电压,对应于将类似的脉冲电压波形施加至主偏压电极111。脉冲电压波形803表示在边缘环109的顶表面109T上的电压,对应于将类似的脉冲电压波形施加至边缘环电极113。

[0052] 波形801具有包括第一状态801B的脉冲周期801A,在第一状态801B中在衬底105的顶表面105T上的电压为零或正。波形801的脉冲周期801A还具有第二状态801C,在第二状态801C中在衬底105的顶表面105T上的电压根据一系列次脉冲周期802A而被次脉冲化,其中各次脉冲周期802A包括开启持续时间802B和关断持续时间802C。具有开启持续时间802B的次脉冲周期802A的百分比定义了次脉冲周期802A的工作周期,其中可根据需要而调整工作周期以实现衬底105上方的带电成分的期望效果。

[0053] 波形803具有包括第一状态803B和第二状态803C的脉冲周期803A。在第一状态803B中,在边缘环109的顶表面109T上的电压根据一系列次脉冲周期804A而被次脉冲化,其中各次脉冲周期804A包括开启持续时间804B和关断持续时间804C。具有开启持续时间804B的次脉冲周期804A的百分比定义了次脉冲周期804A的工作周期。类似地,在第二状态803C中,在边缘环109的顶表面109T上的电压根据一系列次脉冲周期805A而被次脉冲化,其中各次脉冲周期805A包括开启持续时间805B和关断持续时间805C。具有开启持续时间805B的次脉冲周期805A的百分比定义了次脉冲周期805A的工作周期。可根据需要而调整次脉冲周期804A和805A的工作周期,以实现衬底105的边缘上方/附近以及边缘环109上方的带电成分的期望效果。

[0054] 在图8的示例性实施方案中,施加至边缘环109的顶表面109T的偏压的幅度在第一状态803B中低于在第二状态803C中,其被称为在边缘环109上的电平到电平偏压脉冲。应当理解,在多种实施方案中,可将电平到电平偏压脉冲施加至边缘环109、衬底105、或边缘环109和衬底105两者。此外,在多种实施方案中,可根据需要而控制在电平到电平偏压脉冲中所施加的偏压幅度。此外,在多种实施方案中,可根据需要而控制在电平到电平偏压脉冲中所施加的工作周期。此外,在多种实施方案中,可根据需要而定义在脉冲周期801A内的不同状态801B和801C的时间长度。并且,可根据需要而定义在脉冲周期803A内的不同状态803B和803C的时间长度。此外,虽然图8的示例将脉冲周期801A显示为具有两种状态801B和801C,并且将脉冲周期803A显示为具有两种状态803B和803C,但是应当理解,在多种实施方案中,脉冲周期801A和803A中的任一者或两者可被定义为包括多于两种的状态,其中各状态由偏压幅度、次脉冲工作周期、次脉冲时间长度、和状态时间长度的特定组合来表征。

[0055] 图8中所示的电平到电平偏压脉冲的特定示例用于,在组合施加脉冲周期801A的第一状态801B至衬底105的顶表面105T以及脉冲周期803A的第一状态803B至边缘环109的顶表面109T的期间,使衬底105的边缘上方的离子密度减少。此外,图8的电平到电平偏压脉冲示例用于,在组合施加脉冲周期801A的第二状态801C至衬底105的顶表面105T以及脉冲周期803A的第二状态803C至边缘环109的顶表面109T的期间,使衬底105的边缘上方的IADF最小化。以此方式,图8的电平到电平偏压脉冲示例用于,使离子移动朝向边缘环109并且远离衬底105的边缘,其可用于减少在衬底105的边缘附近的等离子体密度,以便提供在衬底105边缘处的蚀刻控制,例如,以便降低在衬底105边缘处的蚀刻速率。在一些实施方案中,例如图8所示,电平到电平偏压脉冲包括在衬底105的顶表面105T上相对于边缘环109的顶表面109T的脉冲电压波形同步和脉冲状态同步两者。

[0056] 如关于图3至图8的示例所讨论的,可将各种偏压波形施加至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T,以控制在衬底105的边缘附近的等离子体鞘边界轮廓。根据由存在于衬底105的顶表面105T上的电压所产生的等离子体鞘电位,离子行进穿过在衬底105上方的等离子体鞘。当衬底105上的电压在正与负之间振荡时,等离子体鞘电位反映在衬底105上的电压振荡,且行进通过等离子体鞘的离子对应地受到变化的等离子体鞘电位的影响。在相当低的RF频率下,轰击离子在等离子体鞘内的行进时间(等离子体鞘厚度/平均离子速度)可能短于单一RF偏压波形的周期。与RF偏压频率相对应的等离子体鞘电位的变化会立即影响在等离子体鞘内行进的离子的移动。本文中所公开的用于将受控的任意(非正弦)脉冲偏压波形施加至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T的多种实施方案使得在等离子体鞘中的某一或某些位置处以及在各脉冲偏压波形周期内的某一或某些时间能够控制在等离子体鞘内行进的离子,以便改善在衬底105的边缘附近的蚀刻均匀性。本文中所公开的用于将受控的任意(非正弦)脉冲偏压波形施加至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T的多种实施方案明显地优于各种现有技术,这些现有技术试图控制离子的平均移动,而不管在等离子体鞘内的离子的时间和位置。此外,本文中所公开的用于将受控的任意(非正弦)脉冲偏压波形施加至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T的多种实施方案提供了在整个衬底105上的处理均匀性结果的改善,同时减轻了与在各种等离子体蚀刻应用中具有通电的边缘环109相关的问题。

[0057] 图9A根据一些实施方案示出了用于实施关于图3至图8所述的各种方法的图1A的偏压供应系统115的示例性实现方案,其中将各种偏压波形施加至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T,以控制在衬底105的外周边缘附近的等离子体鞘边界轮廓。主偏压电极111和边缘环电极113以及其分别相关的电连接件117和119可被视为偏压供应系统115的构件。偏压供应系统115包括电压供应系统901,其具有通过滤波器903而电连接(如连接件907和909所指示)至偏压供应节点905的输出。电压供应系统901被配置成在偏压供应节点905上产生指定的电压波形902(作为时间的函数)。在一些实施方案中,指定的电压波形902包括偏压阶跃部分(Vstep)902A、以及随时间变化的(temporally varying)偏压部分(dV/dT)902B。在一些实施方案中,指定的电压波形902定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期包括开启持续时间和关断持续时间,例如先前关于图3至图8的脉冲电压波形所述。电压供应系统901以双向数据/信号传输方式与控制器911连接,控制器911可编程以指示电压供应系统901的操作,以产生对在衬底105上进行特定等离子体处理操作所需的基本上任何形式的指定的电压波形902。

[0058] 图9B根据一些实施方案示出了电压供应系统901的示例性实现方案。电压供应系统901包括彼此串联电连接的第一电压供应源901A和第二电压供应源901B,使得它们的输出电压以相加形式组合。在一些实施方案中,第一电压供应源901A和第二电压供应源901B中的每一者为直流电压供应源。第一电压供应源901A被配置成根据与指定的电压波形902相对应的指定的脉冲时间表而产生随时间恒定的(temporally constant)电压幅度。例如,图9B示出了由第一电压供应源901A所产生和输出的示例性脉冲电压波形904,其最终将变成指定的电压波形902的偏压阶跃部分(Vstep)902A。第一电压供应源901A的输出电连接(如电连接件906所指示)至第二电压供应源901B的输入。第二电压供应源901B的输出电连接(如电连接件907所指示)至电压供应系统901的输出。第二电压供应源901B被配置成产生

随时间变化的脉冲电压波形908,其最终将变成指定的电压波形902的随时间变化的偏压部分(dV/dT)902B。在一些实施方案中,在每个脉冲周期的开启持续时间期间,随时间变化的脉冲电压波形908作为时间的函数而基本上线性地变化。此外,在一些实施方案中,在每个脉冲周期的开启持续时间期间,随时间变化的脉冲电压波形908的幅度作为时间的函数而以基本上线性的方式增加。在第二电压供应源901B的输出处,脉冲电压波形904与随时间变化的脉冲电压波形908组合,以产生指定的电压波形902。以此方式,由电压供应系统901所提供至偏压供应节点905的输出电压是由第一电压供应源901A所产生的脉冲电压波形904与由第二电压供应源901B所产生的脉冲电压波形908的组合。第一电压供应源901A和第二电压供应源901B中的每一者以双向数据/信号传输方式与控制器911连接,控制器911指示第一电压供应源901A和第二电压供应源901B的操作,以使脉冲电压波形904和908的相位和工作周期同步,以便产生指定的电压波形902。

[0059] 偏压供应系统115包括分流电路913,其被配置为以受控的方式将存在于偏压供应节点905上的电压施加至主偏压电极111和边缘环电极113中的每一者。分流电路913包括第一分支电路915和第二分支电路917。第一分支电路915电连接在偏压供应节点905与主偏压电极111之间。第一分支电路915包括串联电容器919和并联电容器921。在一些实施方案中,串联电容器919和并联电容器921中的每一者为各自的可变电容器,其可具有通过控制器911而远程控制的电容设定,控制器911与分流电路913是双向数据/信号传输。在一些实施方案中,第一分支电路915包括被实现以允许串联电容器919的旁路的切换设备920,使得偏压供应节点905可切换地电连接至串联电容器919的输入端、或经由电连接件117直接电连接至主偏压电极111。以此方式,切换设备920被控制,以使串联电容器919串联地电连接在偏压供应节点905与主偏压电极111之间、或有效地使串联电容器919在电气上移除而不设置在偏压供应节点905与主偏压电极111之间。此外,在一些实施方案中,第一分支电路915包括切换设备922,其被实现以使得并联电容器921可电连接至电连接件117或从电连接件117断开,电连接件117从第一分支电路915的输出延伸至主偏压电极111。以此方式,切换设备922被控制,以使并联电容器921电连接在主偏压电极111与参考接地电位927之间、或有效地使并联电容器921在电气上从第一分支电路915移除。

[0060] 第二分支电路917电连接在偏压供应节点905与边缘环电极113之间。第二分支电路917包括串联电容器923和并联电容器925。在一些实施方案中,串联电容器923和并联电容器925中的每一者为各自的可变电容器,其可具有通过控制器911而远程控制的电容设定,控制器911与分流电路913是双向数据/信号传输。在一些实施方案中,第二分支电路917包括被实现以允许串联电容器923的旁路的切换设备929,使得偏压供应节点905可切换地电连接至串联电容器923的输入端、或经由电连接件119直接电连接至边缘环电极113。以此方式,控制切换设备929,以使串联电容器923串联地电连接在偏压供应节点905与边缘环电极113之间、或有效地使串联电容器923在电气上移除而不设置在偏压供应节点905与边缘环电极113之间。此外,在一些实施方案中,第二分支电路917包括切换设备931,其被实现以使得并联电容器925可电连接至电连接件119或从电连接件119断开,电连接件119从第二分支电路917的输出延伸至边缘环电极113。以此方式,控制切换设备931,以使并联电容器925电连接在边缘环电极113与参考接地电位927之间、或有效地使并联电容器925在电气上从第二分支电路917移除。

[0061] 在一些实施方案中,第一分支电路915被配置为使得串联电容器919和并联电容器921不接合,且第二分支电路917被配置为使得串联电容器923和并联电容器925接合。具体而言,在这些实施方案中,切换设备920和922被设定为使得偏压供应节点905直接电连接至主偏压电极111,且切换设备929和931被设定为使得从偏压供应节点905传送到边缘环电极113的偏压由串联电容器923和并联电容器925控制。因此,在这些实施方案中,由电压供应系统901所输出的偏压脉冲波形902被供应至主偏压电极111,且由电压供应系统901所输出的偏压脉冲波形902的修改变体被供应至边缘环电极113。

[0062] 在一些实施方案中,第一分支电路915被配置为使得串联电容器919和并联电容器921接合,且第二分支电路917被配置为使得串联电容器923和并联电容器925接合。具体而言,在这些实施方案中,切换设备920和922被设定为使得从偏压供应节点905传送至主偏压电极111的偏压由串联电容器919和并联电容器921控制,且切换设备929和931被设定为使得从偏压供应节点905传送到边缘环电极113的偏压由串联电容器923和并联电容器925控制。因此,在这些实施方案中,由电压供应系统901所输出的偏压脉冲波形902的第一修改变体被供应至主偏压电极111,且由电压供应系统901所输出的偏压脉冲波形902的第二修改变体被供应至边缘环电极113。

[0063] 此外,在一些实施方案中,在第一分支电路915中,串联电容器919可接合,并联电容器921不接合。在一些实施方案中,在第一分支电路915中,并联电容器921可接合,串联电容器919不接合。此外,在一些实施方案中,在第二分支电路917中,串联电容器923可接合,并联电容器925不接合。在一些实施方案中,在第二分支电路917中,并联电容器925可接合,串联电容器923不接合。

[0064] 在一些实施方案中,电压传感器933(例如,电压/电流传感器(VI传感器))被连接以测量在偏压供应节点905上的实时电压,并将所测得的电压传送至控制器911。在一些实施方案中,电压传感器935(例如,电压/电流传感器(VI传感器))被连接以测量在第一分支电路915的输出处的实时电压,并将所测得的电压传送至控制器911。在一些实施方案中,电压传感器937(例如,电压/电流传感器(VI传感器))被连接以测量在第二分支电路917的输出处的实时电压,并将所测得的电压传送至控制器911。在多种实施方案中,控制器911被配置成使用由电压传感器933、935和937中的一或多者所测量的电压作为反馈信号,以用于控制电压供应系统901以及串联电容器919、并联电容器921、串联电容器923和并联电容器925中的一或多者的操作。

[0065] 此外,在一些实施方案中,偏压供应系统115包括若干(N)个RF产生器939-1至939-N,其中N大于或等于1,其经由各自的阻抗匹配网络941-1至941-N而连接以供应RF偏压至偏压供应节点905。RF产生器939-1至939-N中的每一者以双向数据/信号传输方式与控制器911连接。在偏压供应节点905处,由RF产生器939-1至939-N所输出的一或更多个RF电压信号与由电压供应系统901所输出的偏压脉冲波形902组合。RF产生器939-1至939-N以及对应的阻抗匹配网络941-1至941-N在偏压供应系统115的一些实施方案中实现。然而,在偏压供应系统115的其它实施方案中,RF产生器939-1至939-N以及对应的阻抗匹配网络941-1至941-N没有被实现。

[0066] 图10根据一些实施方案示出了由电压供应系统901所产生的示例性偏压脉冲波形902、和在衬底105的顶表面105T上的对应的偏压波形1001、以及在边缘环109的顶表面109T

上的对应的偏压波形1003。偏压脉冲波形902包括偏压阶跃部分(Vstep)902A、以及随时间变化的偏压部分(dV/dT)902B。偏压波形902在偏压供应节点905上产生。因此,在衬底105的顶表面105T上的偏压波形1001基于被第一分支电路915所修改的偏压波形902。类似地,在边缘环109的顶表面109T上的偏压波形1003基于被第二分支电路917所修改的偏压波形902。偏压波形1001包括阶跃部分1001A和斜率部分1001B。偏压波形1003包括阶跃部分1003A和斜率部分1003B。

[0067] 在第一分支电路915中的并联电容器921控制在衬底105的顶表面105T上的偏压波形1001的阶跃部分1001A的幅度。具体而言,可控制并联电容器921的电容设定,以将阶跃部分1001A的幅度设定为偏压阶跃部分(Vstep)902A的幅度的百分比(0至100%)。如果并联电容器921在第一分支电路915中不接合(或不存在),则阶跃部分1001A的大小为偏压阶跃部分(Vstep)902A的幅度的固定百分比,具体取决于存在于主偏压电极111与衬底105的顶表面105T之间的衬底支撑结构101和衬底105的材料的固有电容效应。偏压阶跃部分(Vstep)902A的幅度的上述固定百分比取决于在电压供应系统901的输出与衬底105的顶表面105T之间的结构。例如,在结构(例如,滤波器903、阻抗匹配网络941-1至941-N、以和电连接件907、909、905和117)中可能具有杂散分路电容。此外,当偏压阶跃部分(Vstep)902A的上升时间相较于通过等离子体鞘的离子行进时间为相对长时,在电压供应系统901的输出与衬底105的顶表面105T之间的串联电容可减小Vstep902A的幅度的上述固定百分比(由于在Vstep902A的上升时间期间的离子通量)。例如,在一些实施方案中,为了某些目的,可在滤波器903、衬底支撑结构101、衬底105、和/或电连接件907、909、905和117中插入各种串联电容。由于串联电容所导致的Vstep902A的幅度的上述固定百分比的减小可通过具有相对短的Vstep902A的上升时间来大部分消除,例如,Vstep＜＜1微秒。

[0068] 在第一分支电路915中的串联电容器919控制在衬底105的顶表面105T上的偏压波形1001的斜率部分1001B的斜率(电压相对于时间的变化)。当电压被施加至主偏压电极111时,具有从等离子体107朝向衬底105的顶表面105T的离子电流,其释放在衬底105的顶表面105T上的负电荷,并且对应地导致在衬底105的顶表面105T上的负电压的幅度随时间而减小。为了补偿这种由离子引起的在衬底105的顶表面105T上的负电压的幅度的减小,偏压脉冲波形902的随时间变化的偏压部分(dV/dT)902B提供偏压随时间的增加。控制串联电容器919的电容设定,以调整在衬底105的顶表面105T上作为时间的函数的偏压的变化,以补偿在衬底105的顶表面105T上的由离子引起的负电荷释放。在一些实施方案中,控制串联电容器919的电容设定,以在偏压脉冲波形902的开启持续时间期间在衬底105的顶表面105T上维持基本上恒定的电压。然而,在其它实施方案中,控制串联电容器919的电容设定,以在偏压脉冲波形902的开启持续时间期间在衬底105的顶表面105T上实现作为时间的函数的电压的期望变化(正dV/dT和/或负dV/dT)。如果串联电容器919在第一分支电路915中不接合/旁路(或不存在),则在偏压脉冲波形902的开启持续时间期间在衬底105的顶表面105T上的作为时间的函数的电压的变化(dV/dT)将遵循偏压脉冲波形902的随时间变化的偏压部分(dV/dT)902B,其具有基于存在于主偏压电极111与衬底105的顶表面105T之间的衬底支撑结构101和衬底105的材料的固有电容效应的固定电压幅度偏移。在一些实施方案中,上述固定电压幅度偏移也可基于在电压供应系统901的输出与衬底105的顶表面105T之间的固有串联电容。在一些实施方案中,上述固有串联电容对应于为了某些目的而插入在滤波器

903、衬底支撑结构101、衬底105、和/或电连接件907、909、905和117中的各种串联电容。

[0069] 在第二分支电路917中的并联电容器925控制在边缘环109的顶表面109T上的偏压波形1003的阶跃部分1003A的幅度。具体而言,可控制并联电容器925的电容设定,以将阶跃部分1003A的幅度设定为偏压阶跃部分(Vstep)902A的幅度的百分比(0至100%)。如果并联电容器925在第二分支电路917中不接合(或不存在),则阶跃部分1003A的幅度为偏压阶跃部分(Vstep)902A的幅度的固定百分比,具体取决于存在于边缘环电极113与边缘环109的顶表面109T之间的边缘环109材料的固有电容效应。在一些实施方案中,阶跃部分1003A的幅度也可基于在电压供应系统901的输出与边缘环109的顶表面109T之间的固有串联电容。在一些实施方案中,上述固有串联电容对应于为了某些目的而插入在滤波器903、边缘环109、和/或电连接件907、909、905和119中的各种串联电容。

[0070] 在第二分支电路917中的串联电容器923控制在边缘环109的顶表面109T上的偏压波形1003的斜率部分1003B的斜率(电压相对于时间的变化)。当电压被施加至边缘环电极113时,具有从等离子体107朝向边缘环109的顶表面109T的离子电流,其释放在边缘环109的顶表面109T上的负电荷,并且对应地导致在边缘环109的顶表面109T上的负电压的幅度随着时间而减小。为了补偿这种由离子引起的在边缘环109的顶表面109T上的负电压的幅度的减小,偏压脉冲波形902的随时间变化的偏压部分(dV/dT)902B提供偏压随时间的增加。控制串联电容器923的电容设定,以调整在边缘环109的顶表面109T上作为时间的函数的偏压的变化,以补偿在边缘环109的顶表面109T上的由离子引起的负电荷释放。在一些实施方案中,控制串联电容器923的电容设定,以在偏压脉冲波形902的开启持续时间期间在边缘环109的顶表面109T上维持基本上恒定的电压。然而,在其它实施方案中,控制串联电容器923的电容设定,以在偏压脉冲波形902的开启持续时间期间在边缘环109的顶表面109T上实现作为时间的函数的电压的期望变化(正dV/dT和/或负dV/dT)。如果串联电容器923在第二分支电路917中不接合/旁路(或不存在),则在偏压脉冲波形902的开启持续时间期间在边缘环109的顶表面109T上作为时间的函数的电压的变化(dV/dT)将遵循偏压脉冲波形902的随时间变化的偏压部分(dV/dT)902B,其具有基于存在于边缘环电极113与边缘环109的顶表面109T之间的边缘环109材料的固有电容效应的固定电压幅度偏移。在一些实施方案中,上述固定电压幅度偏移也可基于在电压供应系统901的输出与边缘环109的顶表面109T之间的固有串联电容。在一些实施方案中,为了某些目的,上述固有串联电容对应于插入在滤波器903、边缘环109、和/或电连接件907、909、905和119中的各种串联电容。

[0071] 根据多种实施方案,图11A示出了可配置分流电路913的各种方式的图表。分流电路913的给定配置对应于串联电容器919、并联电容器921、串联电容器923和并联电容器925的特定接合/不接合的组合。根据一些实施方案,图11B示出了图表,描绘出串联电容器919、并联电容器921、串联电容器923和并联电容器925的可能的接合/不接合的设置。对于串联电容器919、并联电容器921、串联电容器923和并联电容器925中的每一者,如图11B中所标记的接合标记“是”、以及不接合标记“否”在图11A的图表中使用,以描述分流电路913的各种可能的配置。

[0072] 当串联电容器919被接合时(串联电容器919=“是”),串联电容器919的输入端电连接至偏压供应节点905,且串联电容器919的输出端经由电连接件117而电连接至主偏压电极111。当串联电容器919不接合时(串联电容器919=“否”),串联电容器919不是在电气

上被绕过、就是不存在于第一分支电路915中,使得偏压供应节点905经由电连接件117而直接电连接至主偏压电极111。当并联电容器921被接合时(并联电容器921＝“是”),并联电容器921的输入端经由电连接件117而电连接至主偏压电极111,且并联电容器921的输出端电连接至参考接地电位927。当并联电容器921不接合时(并联电容器921＝“否”),并联电容器921不是与主偏压电极111在电气上断开、就是不存在于第一分支电路915中。

[0073] 当串联电容器923被接合时(串联电容器923＝“是”),串联电容器923的输入端电连接至偏压供应节点905,且串联电容器923的输出端经由电连接件119而电连接至边缘环电极113。当串联电容器923不接合时(串联电容器923＝“否”),串联电容器923不是在电气上被绕过、就是不存在于第二分支电路917中,使得偏压供应节点905经由电连接件119而直接电连接至边缘环电极113。当并联电容器925被接合时(并联电容器925＝“是”),并联电容器925的输入端经由电连接件119而电连接至边缘环电极113,且并联电容器925的输出端电连接至参考接地电位927。当并联电容器925不接合时(并联电容器925＝“否”),并联电容器925不是与边缘环电极113在电气上断开、就是不存在于第二分支电路917中。

[0074] 根据一些实施方案,图12示出了伴随着偏压脉冲波形902而产生的示例性RF偏压波形1201。RF偏压波形1201由RF产生器939-1至939-N中的一或多者产生,并且与由电压供应系统901所产生的偏压脉冲波形902结合而供应至偏压供应节点905。滤波器903被配置成防止RF偏压波形1201行进到电压供应系统901中。在一些实施方案中,滤波器903被配置成阻挡RF频率信号的低通滤波器或陷波滤波器。在一些实施方案中,偏压脉冲波形902建立基线电压波形,之后是RF偏压波形1201。由于分流电路913,RF偏压的第一部分被施加至主偏压电极111,且RF偏压的第二部分被施加至边缘环电极113。RF偏压的第一部分在衬底105的顶表面105T上产生RF偏压波形1203。RF偏压的第二部分在边缘环109的顶表面109T上产生RF偏压波形1205。在第一分支电路915中的并联电容器921控制RF偏压波形1203的幅度。类似地,在第二分支电路917中的并联电容器925控制RF偏压波形1205的幅度。因此,在衬底105的顶表面105T上的RF偏压的幅度与在边缘环109的顶表面109T上的RF偏压的幅度的比率和在衬底105的顶表面105T上的偏压波形1001的幅度与在边缘环109的顶表面109T上的偏压波形1003的幅度的比率成比例。如先前所述,RF偏压波形1201伴随着偏压脉冲波形902而产生是任选的。

[0075] 图13根据一些实施方案示出了用于实现关于图3至图8所述的各种方法的另一偏压供应系统1301,其中各种偏压波形被施加至衬底105的顶表面105T和边缘环109的顶表面109T,以控制在衬底105的外周边缘附近的等离子体鞘边界轮廓。偏压供应系统1301包括第一电压供应系统1302和第二电压供应系统1310。第一电压供应系统1302包括脉冲电压产生器1303,脉冲电压产生器1303具有经由滤波器1305和电连接件117而连接至主偏压电极111的输出。脉冲电压产生器1303以与电压供应系统901相同的方式而配置。因此,脉冲电压产生器1303产生和供应指定的电压波形902-1至主偏压电极111。指定的电压波形902-1包括阶跃部分902A1和斜率部分902B1。滤波器1305被配置成防止RF信号进入脉冲电压产生器1303。在多种实施方案中,滤波器1305为低通滤波器或陷波滤波器。

[0076] 第一电压供应系统1302还任选地包括若干(N)个RF产生器1307-1至1307-N,其中N大于或等于1,其经由各自的阻抗匹配网络1309-1至1309-N而连接以供应RF偏压至主偏压电极111。RF产生器1307-1至1307-N中的每一者以双向数据/信号传输方式与控制器911连

接。控制器911操作以使由脉冲电压产生器1303和RF产生器1307-1至1307-N中的每一者所输出的偏压波形同步。由RF产生器1307-1至1307-N所输出的一或更多个RF电压信号在电连接件117上与由脉冲电压产生器1303所输出的偏压脉冲波形902-1进行组合。RF产生器1307-1至1307-N以及对应的阻抗匹配网络1309-1至1309-N在第一电压供应系统1302的一些实施方案中实现。然而,在一些实施方案中,RF产生器1307-1至1307-N以及对应的阻抗匹配网络1309-1至1309-N没有在第一电压供应系统1302中实现。

[0077] 第二电压供应系统1310包括脉冲电压产生器1311,脉冲电压产生器1311具有经由滤波器1313和电连接件119而连接至边缘环电极113的输出。脉冲电压产生器1311以与电压供应系统901相同的方式配置。因此,脉冲电压产生器1311产生和供应指定的电压波形902-2至边缘环电极113。指定的电压波形902-2包括阶跃部分902A2和斜率部分902B2。滤波器1313被配置成防止RF信号进入脉冲电压产生器1311。在多种实施方案中,滤波器1313为低通滤波器或陷波滤波器。

[0078] 第二电压供应系统1310也可选地包括若干(N)个RF产生器1315-1至1315-N,其中N大于或等于1,其经由各自的阻抗匹配网络1317-1至1317-N而连接以供应RF偏压至边缘环电极113。RF产生器1315-1至1315-N中的每一者以双向数据/信号传输方式与控制器911连接。控制器911操作以使由脉冲电压产生器1311和RF产生器1315-1至1315-N中的每一者所输出的偏压波形同步。由RF产生器1315-1至1315-N所输出的一或更多个RF电压信号在电连接件119上与由脉冲电压产生器1311所输出的偏压脉冲波形902-2进行组合。RF产生器1315-1至1315-N以及对应的阻抗匹配网络1317-1至1317-N在第二电压供应系统1310的一些实施方案中实现。然而,在一些实施方案中,RF产生器1315-1至1315-N以及对应的阻抗匹配网络1317-1至1317-N没有在第二电压供应系统1310中实现。

[0079] 在一些实施方案中,产生偏压脉冲波形902-1,以在偏压脉冲波形902-1内的每个脉冲周期的开启持续时间期间在衬底105的顶表面105T上维持基本上恒定的电压,并且产生偏压脉冲波形902-2,以在偏压脉冲波形902-2内的每个脉冲周期的开启持续时间期间在边缘环109的顶表面109T上维持基本上恒定的电压,使得在偏压脉冲波形902-1和902-2中的脉冲周期的同时发生的开启持续时间期间维持基本上恒定的电压差,其中基本上恒定的电压差定义为维持基本上平的等离子体鞘边界横跨在衬底105与边缘环109之间的过渡区。在一些实施方案中,同步地控制偏压脉冲波形902-1的阶跃部分902A1和偏压脉冲波形902-2的阶跃部分902A2,以实现在衬底105的顶表面105T与边缘环109的顶表面109T之间的指定的电压差。此外,在一些实施方案中,控制偏压脉冲波形902-1的斜率部分902B1,以补偿在偏压脉冲波形902-1的每个脉冲周期的开启持续时间内在衬底105的顶表面105T上的由离子引起的负电荷释放,使得在偏压脉冲波形902-1的每个脉冲周期的开启持续时间内在衬底105的顶表面105T上的电压维持基本上恒定。另外,在一些实施方案中,控制偏压脉冲波形902-2的斜率部分902B2,以补偿在偏压脉冲波形902-2的每个脉冲周期的开启持续时间内在边缘环109的顶表面109T上的由离子引起的负电荷释放,使得在偏压脉冲波形902-2的每个脉冲周期的开启持续时间内在边缘环109的顶表面109T上的电压维持基本上恒定。

[0080] 可根据需要而分别产生偏压脉冲波形902-1和902-2,以实现关于图3至图8所述的各种方法。在一些实施方案中,控制器911操作以使偏压脉冲波形902-1和902-2的相位同步。在一些实施方案中,控制器911操作以使偏压脉冲波形902-1和902-2的相位和工作周期

两者同步。在一些实施方案中,控制器911操作以实现在偏压脉冲波形902-1与902-2之间的指定的相位偏移。在一些实施方案中,偏压脉冲波形902-1和902-2定义为具有彼此不同的相位和/或不同的工作周期。此外,在一些实施方案中,偏压脉冲波形902-1和902-2中的一或两者定义为实现指定的电平到电平脉冲方案。应当理解,偏压脉冲波形902-1和902-2相对于彼此为分别地且独立地可控的。

[0081] 另外,在多种实施方案中,任何数量的电压传感器(例如电压/电流传感器(VI传感器))可与偏压供应系统1301连接,以测量在特定位置处的实时电压,并且将所测得的实时电压传送至控制器911。在一些实施方案中,控制器911被配置成使用在第一电压供应系统1302和/或第二电压供应系统1310内的实时电压测量结果,以控制脉冲电压产生器1303、RF产生器1307-1至1307-N、脉冲电压产生器1311、以及RF产生器1315-1至1315-N中的任何一或多者的操作。

[0082] 图14根据一些实施方案示出了控制器911的示例图。在一些实施方案中,控制器911包含处理器1409、储存硬件单元(HU)1411(例如存储器)、输入HU1401、输出HU1405、输入/输出(I/O)接口1403、I/O接口1407、网络接口控制器(NIC)1415以及数据通信总线1413。处理器1409、储存HU1411、输入HU1401、输出HU1405、I/O接口1403、I/O接口1407以及NIC1415通过数据通信总线1413相互进行数据通信。输入HU1401的示例包含鼠标、键盘、手写笔、数据采集系统、数据采集卡等。输出HU1405的示例包含显示器、扬声器、设备控制器等。NIC1415的示例包含网络接口卡、网络适配器等。在各个实施方案中,NIC1415被配置为按照一或多个通信协议以及相关的物理层(例如以太网和/或EtherCAT等)运行。每一I/O接口1403和1407被定义为提供与I/O接口耦合的不同硬件单元之间的兼容性。例如,I/O接口1403可被定义为将从输入HU1401所接收的信号转换为与数据通信总线1413兼容的形式、振幅和/或速度。此外,I/O接口1407可被定义为将从数据通信总线1413所接收的信号转换为与输出HU1405兼容的形式、振幅和/或速度。虽然本文所述的各个操作由控制器911的处理器1409执行,但应当理解的是,在一些实施方案中,各个操作可由控制器911的多个处理器和/或连接至控制器911的多个计算系统的多个处理器执行。

[0083] 在各个实施方案中,衬底等离子体处理系统100与电子设备整合在一起,以用于在衬底105处理之前、期间以及之后控制其操作,其中电子设备在控制器911中实现,控制器911被配置并且被连接以控制包含偏压供应系统115和1301的衬底等离子体处理系统100的各个部件和/或子部件。根据衬底105的处理要求和/或衬底等离子体处理系统100的特定配置,控制器911可进行编程,以控制本文所公开的任何处理和/或部件,包含处理气体的输送、温度设定(例如加热和/或冷却)、压力设定、真空设定、功率设定、RF电源系统设定、电信号频率设定、气体流速设定、流体输送设定、位置和操作设定、偏压供应系统115/1301设定、衬底105移入以及移出衬底等离子体处理系统100和/或移入和移出与衬底等离子体处理系统100连接或对接的装载锁等。

[0084] 在各个实施方案中,控制器911被定义为具有各个集成电路、逻辑、存储器和/或软件的电子设备,该电子设备用于管理以及控制各个任务/操作,例如接收指令、发出指令、控制设备操作、实现清洁操作、实现端点测量、实现计量测量(光学的、热学的、电学的等)以及其它任务/操作。在一些实施方案中,控制器911内的集成电路包含储存程序指令的固件、数字信号处理器DSP)、专用集成电路(ASIC)芯片、可编程逻辑设备(PLD)、一或多个微处理器

和/或一或多个执行程序指令(例如软件)的微控制器等计算设备中的一或多个。在一些实施方案中,程序指令以各个单独设定(或程序文件)的形式传送至控制器911,所述设定(或程序文件)定义在衬底等离子体处理系统100内对衬底105执行处理的指令参数。在一些实施方案中,指令参数包含在工艺工程师所定义的配方中,以在衬底105上制造一或多个(种)层、材料、金属、氧化物、硅、二氧化硅、表面、电路和/或管芯期间完成一或多个处理步骤。

[0085] 在一些实施方案中,控制器911为与衬底等离子体处理系统100整合或连接的计算机的一部分,或以其它方式与衬底等离子体处理系统100网络连接,或以上的组合。例如,在一些实施方案中,控制器911在“云端(cloud)”中实现,或在晶片厂主计算机系统的全部或部分中实现,从而允许远程访问以控制衬底等离子体处理系统100对衬底105的处理。控制器911允许远程访问衬底等离子体处理系统100,以监控制造操作的当前进度,检查过去制造操作的历史、检查来自多个制造操作的趋势或性能指标、变更处理参数、设定后续处理步骤、指定RF电源系统指令的操作参数,指定偏压供应系统115/1301的操作参数和/或启动新的衬底制造流程。

[0086] 在一些实施方案中,远程计算机(例如服务器计算机系统)经由计算机网络(包含局域网络和/或因特网)向控制器911提供处理配方。远程计算机包含用户接口,其可对参数和/或设定进行输入或编程,然后从远程计算机将参数和/或设定传送至控制器911。在一些示例中,控制器911接收设定形式的指令,以用于在衬底等离子体处理系统100中处理衬底105。应当理解的是,这些设定为针对要在衬底105上执行的处理类型以及控制器911对接或控制的工具/设备/部件类型。在一些实施方案中,控制器911为分布式的,例如包含一或多个独立的控制器911,这些控制器911经由网络连接且为共同目的同步工作,例如操作衬底等离子体处理系统100以在衬底105上执行规定的处理。用于这种目的的分布式控制器911的示例包含室上的一或多个集成电路,其与位于远程(例如平台级别或作为远程计算机的一部分)的一或多个集成电路通信,这些集成电路共同控制室中的处理。

[0087] 图15根据一些实施方案示出了用于在衬底105的等离子体处理期间供应偏压的方法的流程图。该方法包括操作1501,其用于在偏压供应节点905上产生作为时间的函数的指定的电压波形。该方法还包括操作1503,其用于将指定的电压波形的第一变体从偏压供应节点905传输至设置在衬底支撑表面103下方的主偏压电极111,以控制存在于衬底支撑表面103上的衬底105的顶表面105T上的电压。该方法还包括操作1505,其用于将指定的电压波形的第二变体传输至设置在围绕衬底支撑表面103的边缘环109内的边缘环电极113,以控制在边缘环109的顶表面109T上的电压。

[0088] 在一些实施方案中,在操作1501中产生指定的电压波形包括,产生随时间恒定的电压幅度、产生随时间变化的电压、以及将随时间恒定的电压幅度与随时间变化的电压组合,以在偏压供应节点905上形成指定的电压波形。在一些实施方案中,随时间变化的电压作为时间的函数而基本上线性地变化。在一些实施方案中,在操作1501中所产生的指定的电压波形是脉冲电压波形,其被定义为连续的系列脉冲周期,其中每个脉冲周期包括开启持续时间(在其中,脉冲电压波形具有负电压)以及关断持续时间(在其中,脉冲电压波形具有正电压)。在一些实施方案中,该方法包括,在操作1501中,伴随着在偏压供应节点905上产生指定的电压波形,供应射频信号至偏压供应节点905。

[0089] 在一些实施方案中,该方法包括,使用在从偏压供应节点905延伸至边缘环电极

113的电路917内的串联电容器923和并联电容器925,以产生传输至边缘环电极113的指定的电压波形的第二变体。在一些实施方案中,该方法包括,控制并联电容器925,以在与操作1501中所产生的指定的电压波形相对应的脉冲电压波形的每个脉冲周期的开启持续时间期间,在衬底105的顶表面105T与边缘环109的顶表面109T之间建立指定的电压差。在一些实施方案中,该方法包括,控制串联电容器923,以在与操作1501中所产生的指定的电压波形相对应的脉冲电压波形的每个脉冲周期的开启持续时间内,将在衬底105的顶表面105T与边缘环109的顶表面109T之间的指定的电压差维持在基本上恒定的电平。在一些实施方案中,该方法包括,控制串联电容器923,以改变作为时间的函数的在边缘环109的顶表面109T上的电压,以补偿作为时间的函数的在边缘环109的顶表面上的电释放。

[0090] 在某些实施方案中,该方法包括,使用在从偏压供应节点905延伸至主偏压电极111的第一电路915内的第一串联电容器919和第一并联电容器921,以产生指定的电压波形的第一变体(其传送至主偏压电极111)。在某些实施方案中,该方法还包括,使用在从偏压供应节点905延伸至边缘环电极113的第二电路917内的第二串联电容器923和第二并联电容器925,以产生指定的电压波形的第二变体(其传送至边缘环电极113)。在某些实施方案中,该方法包括,控制第一并联电容器921和第二并联电容器925,以在与操作1501中所产生的指定的电压波形相对应的脉冲电压波形的每个脉冲周期的开启持续时间期间,在衬底105的顶表面105T与边缘环109的顶表面109T之间建立指定的电压差。在某些实施方案中,该方法包括,控制第一串联电容器919和第二串联电容器923,以在与操作1501中所产生的指定的电压波形相对应的脉冲电压波形的每个脉冲周期的开启持续时间内,将在衬底105的顶表面105T与边缘环109的顶表面109T之间的指定的电压差维持在基本上恒定的电平。

[0091] 本文所述的各个实施方案可与各个计算机系统配置结合使用,所述计算机系统配置包含手持硬件单元、微处理器系统、基于微处理器或可编程的消费电子设备、微型计算机、大型计算机等。本文所述的各个实施方案也可结合分布式计算环境来实施,在分布式计算环境中,任务是由经由计算机网络连接的远程处理硬件单元来执行。还应当理解的是,本文所公开的各个实施方案包含执行涉及计算机系统中所储存的数据的各个计算机执行操作。这些计算机执行的操作是操纵物理量的操作。在各个实施方案中,计算机执行的操作是由通用计算机或专用计算机执行。在一些实施方案中,计算机执行的操作是由选择性启动的计算机执行,和/或是由储存在计算机存储器中或经由计算机网络所获取的一或多个计算机程序管理。当经由计算机网络获取计算机程序和/或数字数据时,数字数据可由计算机网络上的其它计算机(如计算资源云)处理。计算机程序和数字数据作为计算机可读取的代码储存在非瞬时计算机可读取介质上。非瞬时计算机可读取介质为储存数据的任何数据储存硬件单元,例如存储器设备等,此后可由计算机系统读取。非瞬时计算机可读取介质的示例包含硬盘、网络附加储存设备(NAS)、ROM、RAM、光盘-ROM(CD-ROM)、可记录CD(CD-R)、可重写CD(CD-RW)、数字视频/多功能光盘(DVD)、磁带以及其他光学和非光学数据存储硬件单元。在一些实施方案中,计算机程序和/或数字数据分布在耦合计算机系统的网络内的不同计算机系统中的多个计算机可读取介质中,从而以分布式方式执行和/或储存计算机程序和/或数字数据。

[0092] 尽管为了明确理解的目的,上述公开内容包含了一些细节,但显而易见的是,在所附权利要求的范围内可进行某些改变以及修改。例如,应当理解的是,本文所公开的任何实

施方案的一或多个特征可与本文所公开的任何其它实施方案的一或多个特征相结合。因此,本实施方案应被视为说明性的而非限制性的,且所请求的保护范围不限于本文所给出的细节,而是可在所述实施方案的范围以及等同方案内进行修改。

[0093] 所请求的保护范围为。

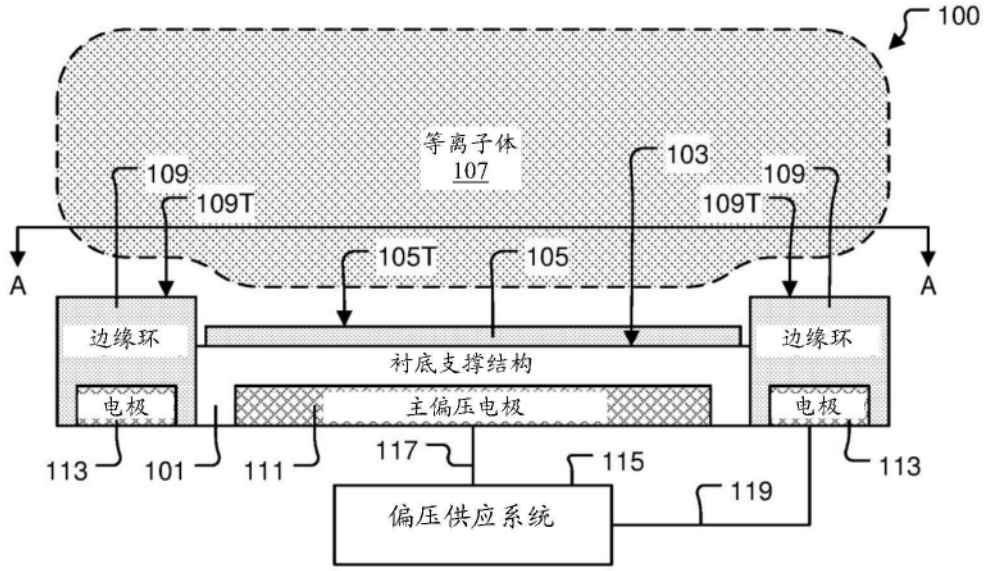

100
等离子体
107
109
109T
103
109
109T
105T
105
A
A
边缘环
衬底支撑结构
边缘环
电极
主偏压电极
电极
113
101
111
117
115
113
119
偏压供应系统

图1A

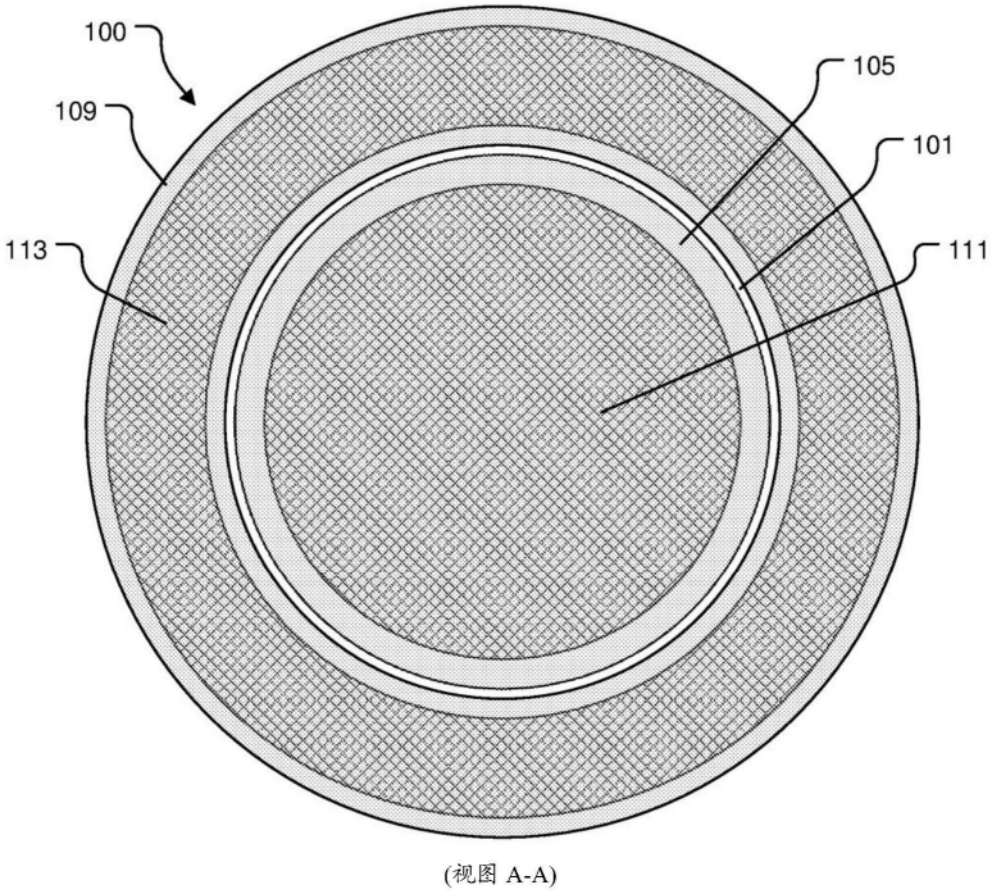

100
109
105
101
113
111
(视图 A-A)

图1B

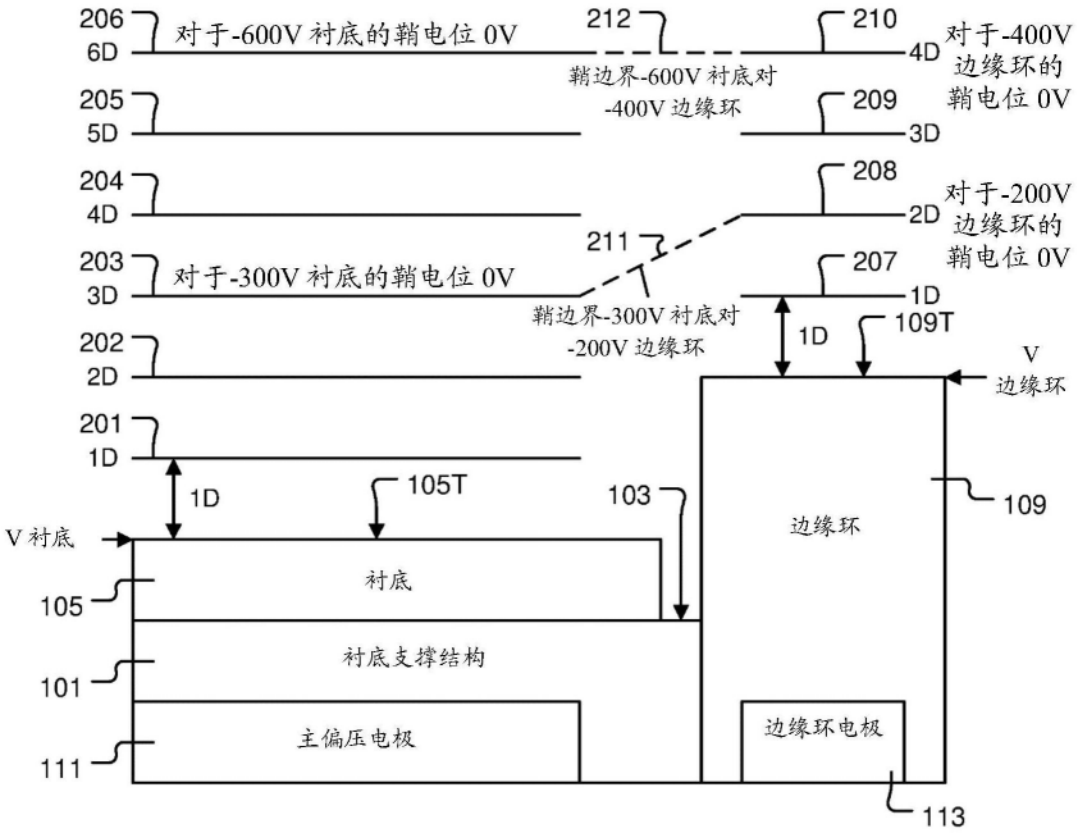

206
6D
对于-600V 衬底的鞘电位 0V
212
210
4D
对于-400V
边缘环的
鞘电位 0V
鞘边界-600V 衬底对
-400V 边缘环
205
5D
209
3D
204
4D
208
2D
对于-200V
边缘环的
鞘电位 0V
211
203
3D
对于-300V 衬底的鞘电位 0V
207
1D
鞘边界-300V 衬底对
-200V 边缘环
1D
109T
202
2D
V
边缘环
201
1D
1D
105T
103
109
V 衬底
边缘环
衬底
105
衬底支撑结构
101
主偏压电极
边缘环电极
111
113

图2A

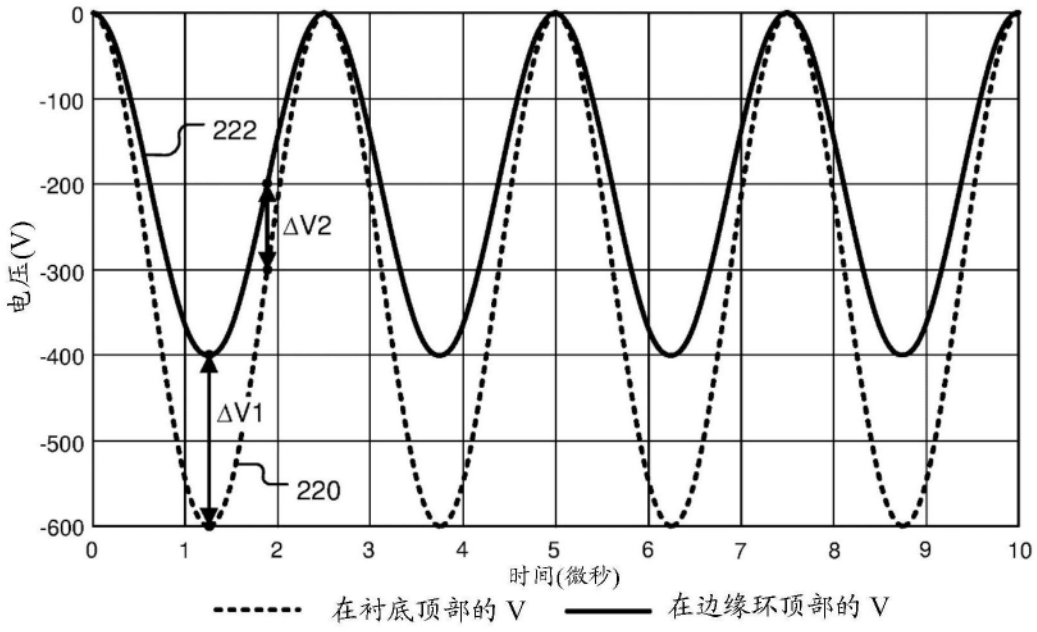

0
-100
-200
-300
-400
-500
-600
电压(V)
222
ΔV2
ΔV1
220
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
时间(微秒)
在衬底顶部的 V
在边缘环顶部的 V

图2B

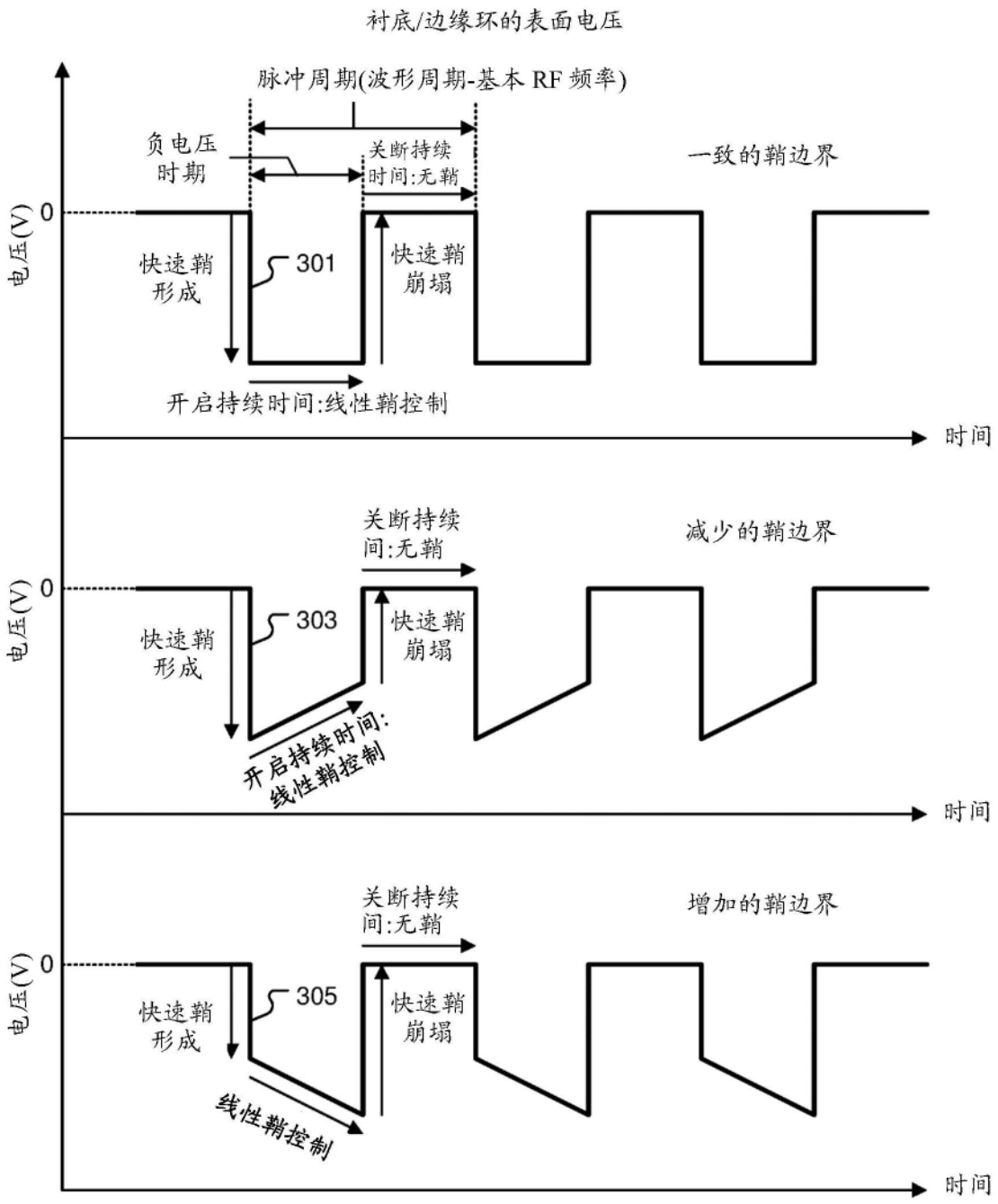

衬底/边缘环的表面电压
脉冲周期(波形周期-基本 RF 频率)
负电压时期
关断持续时间:无鞘
一致的鞘边界
电压(V)
0
快速鞘形成
301
快速鞘崩塌
开启持续时间:线性鞘控制
时间
关断持续间:无鞘
减少的鞘边界
303
开启持续时间:线性鞘控制
增加的鞘边界
305
线性鞘控制

图3

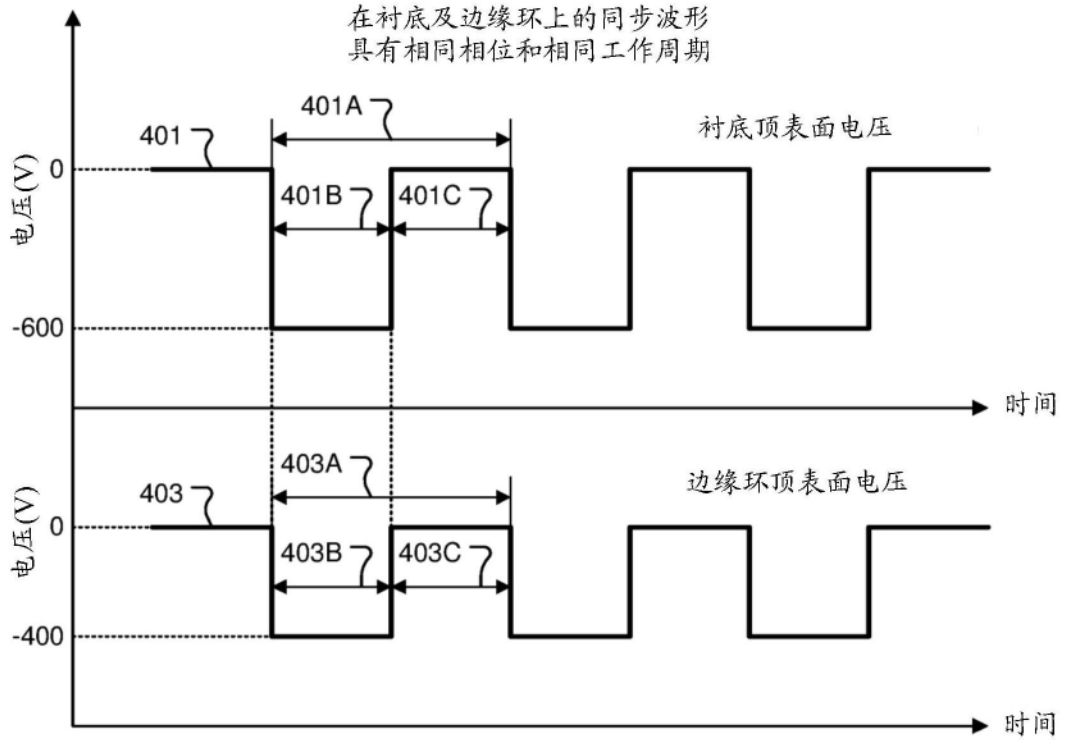

在衬底及边缘环上的同步波形
具有相同相位和相同工作周期
401
401A
401B
401C
衬底顶表面电压
电压(V)
0
-600
时间
403
403A
403B
403C
边缘环顶表面电压
电压(V)
0
-400
时间

图4

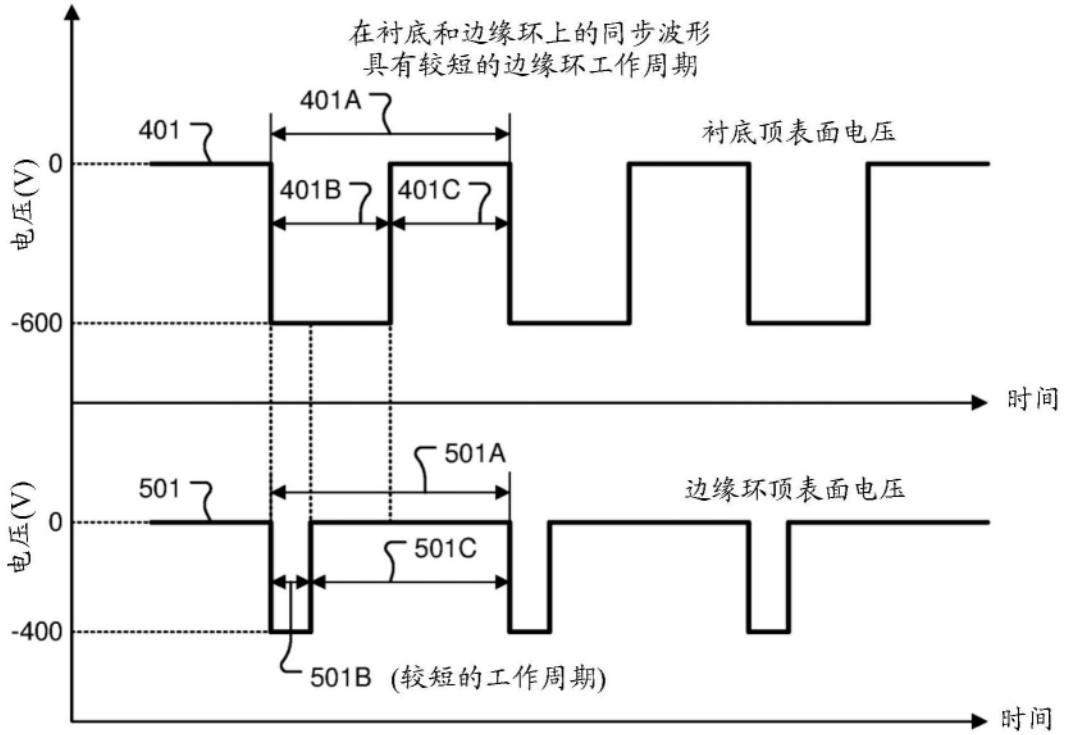

在衬底和边缘环上的同步波形
具有较短的边缘环工作周期
401
401A
401B
401C
衬底顶表面电压
电压(V)
0
-600
时间
501
501A
501C
501B (较短的工作周期)
边缘环顶表面电压
电压(V)
0
-400
时间

图5

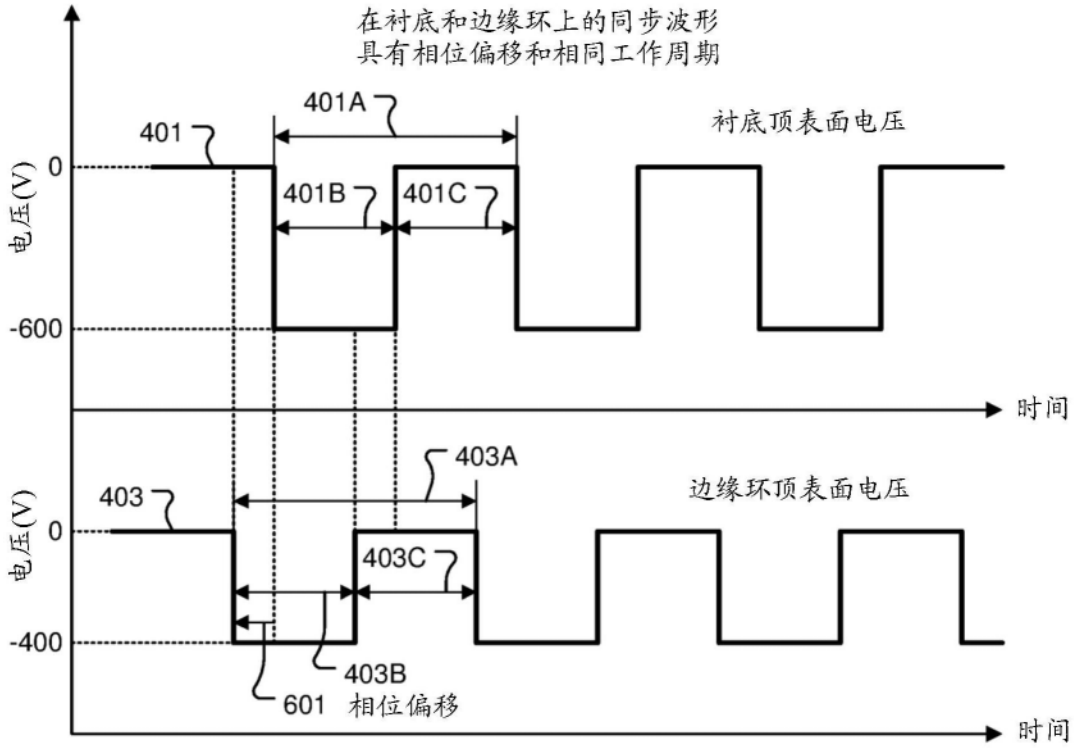

在衬底和边缘环上的同步波形
具有相位偏移和相同工作周期
401
401A
401B
401C
衬底顶表面电压
电压(V)
0
-600
时间
403
403A
403C
403B
601 相位偏移
边缘环顶表面电压
电压(V)
0
-400
时间

图6

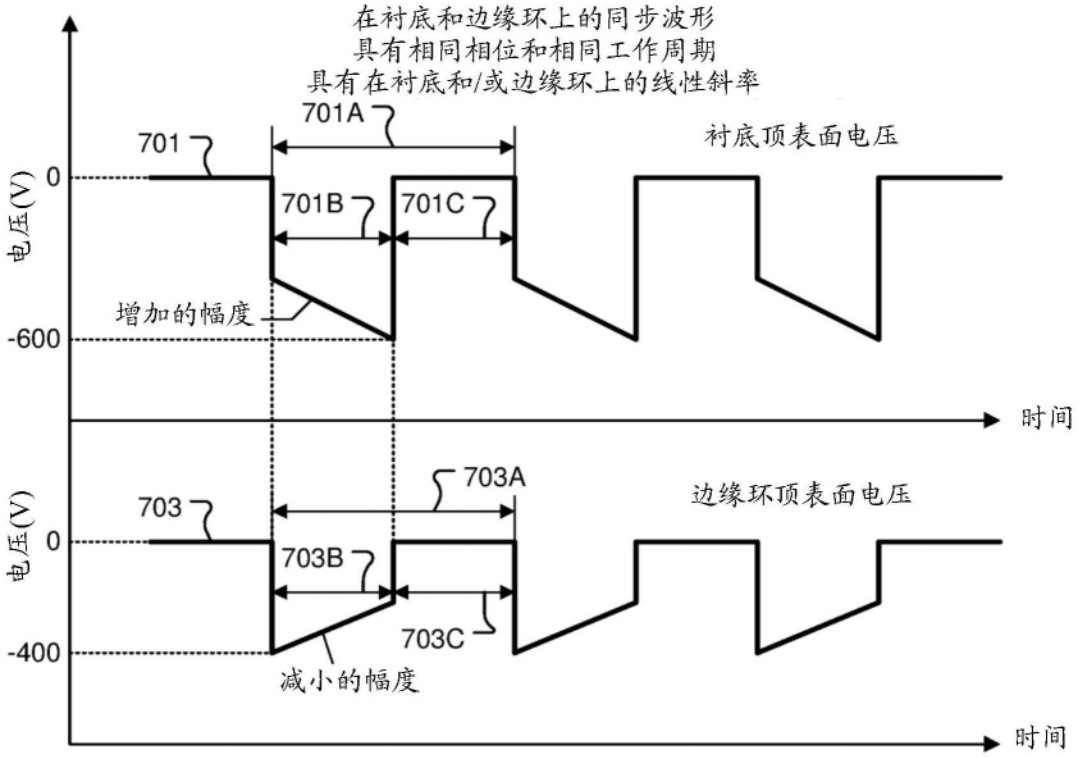

在衬底和边缘环上的同步波形
具有相同相位和相同工作周期
具有在衬底和/或边缘环上的线性斜率
701
701A
701B
701C
衬底顶表面电压
电压(V)
0
增加的幅度
-600
时间
703
703A
703B
703C
边缘环顶表面电压
电压(V)
0
-400
减小的幅度
时间

图7

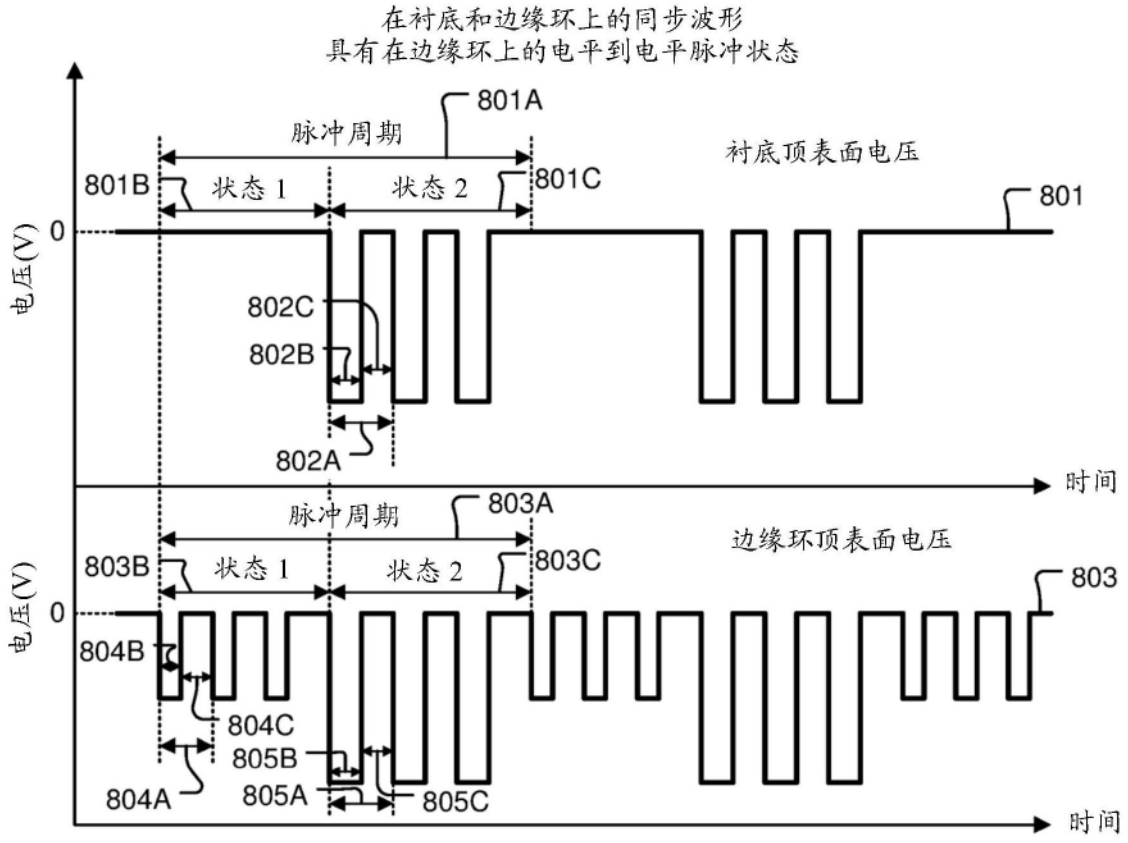

在衬底和边缘环上的同步波形
具有在边缘环上的电平到电平脉冲状态
801A
脉冲周期
衬底顶表面电压
801B
状态 1
状态 2
801C
801
电压(V)
0
802C
802B
802A
时间
脉冲周期
803A
边缘环顶表面电压
803B
状态 1
状态 2
803C
803
电压(V)
0
804B
804C
805B
804A
805A
805C
时间

图8

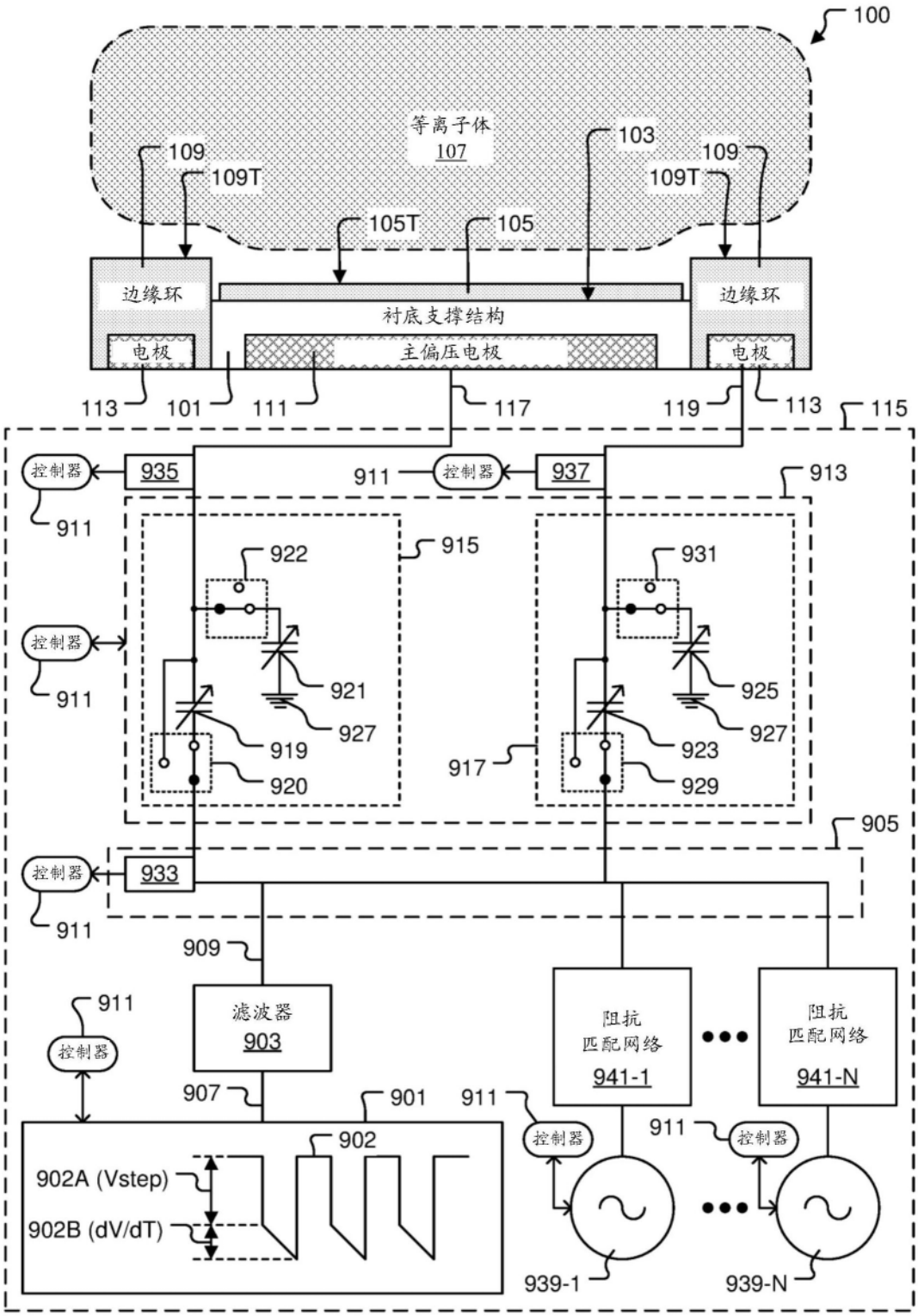

100
等离子体
107
109
109T
103
109
109T
105T
105
边缘环
衬底支撑结构
边缘环
电极
主偏压电极
电极
113
101
111
117
119
113
115
控制器
935
911
控制器
937
913
911
915
922
931
控制器
921
925
911
927
927
919
923
917
920
929
905
控制器
933
911
909
911
控制器
滤波器
903
阻抗
匹配网络
941-1
阻抗
匹配网络
941-N
907
901
911
911
902
控制器
控制器
902A (Vstep)
902B (dV/dT)
939-1
939-N

图9A

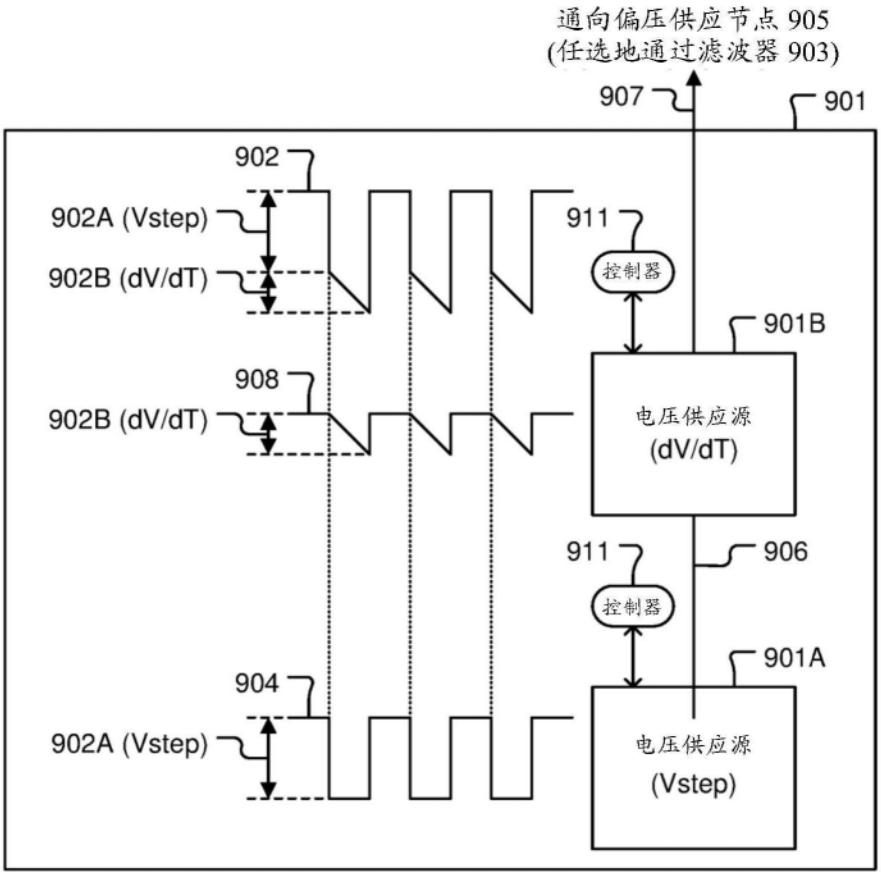

通向偏压供应节点 905
(任选地通过滤波器 903)
907
901
902
902A (Vstep)
902B (dV/dT)
911
控制器
901B
908
902B (dV/dT)
电压供应源
(dV/dT)
911
906
控制器
901A
904
902A (Vstep)
电压供应源
(Vstep)

图9B

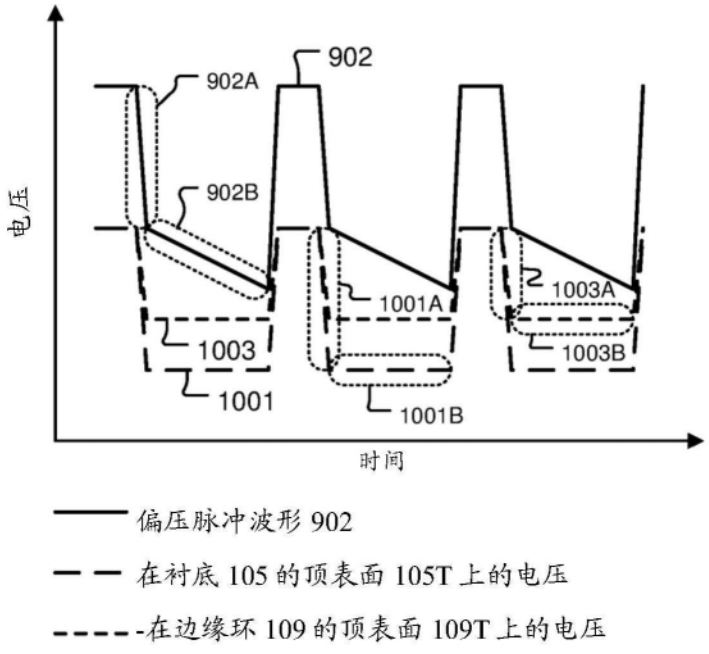

902
902A
902B
电压
1001A
1003A
1003
1003B
1001
1001B
时间
偏压脉冲波形 902
在衬底 105 的顶表面 105T 上的电压
-在边缘环 109 的顶表面 109T 上的电压

图10

分流电流913配置	第一分支电路915		第二分支电路917	
	串联电容器919	并联电容器921	串联电容器923	并联电容器925
1	否	否	是	是
2	是	是	否	否
3	是	是	是	是
4	否	否	否	是
5	否	是	否	是
6	否	是	否	否
7	是	是	是	否
8	是	是	否	是
9	是	否	是	是
10	否	是	是	是
11	是	否	是	否
12	否	是	是	否
13	是	否	否	是
14	是	否	否	否
15	否	否	是	否
16	否	否	否	否

图11A

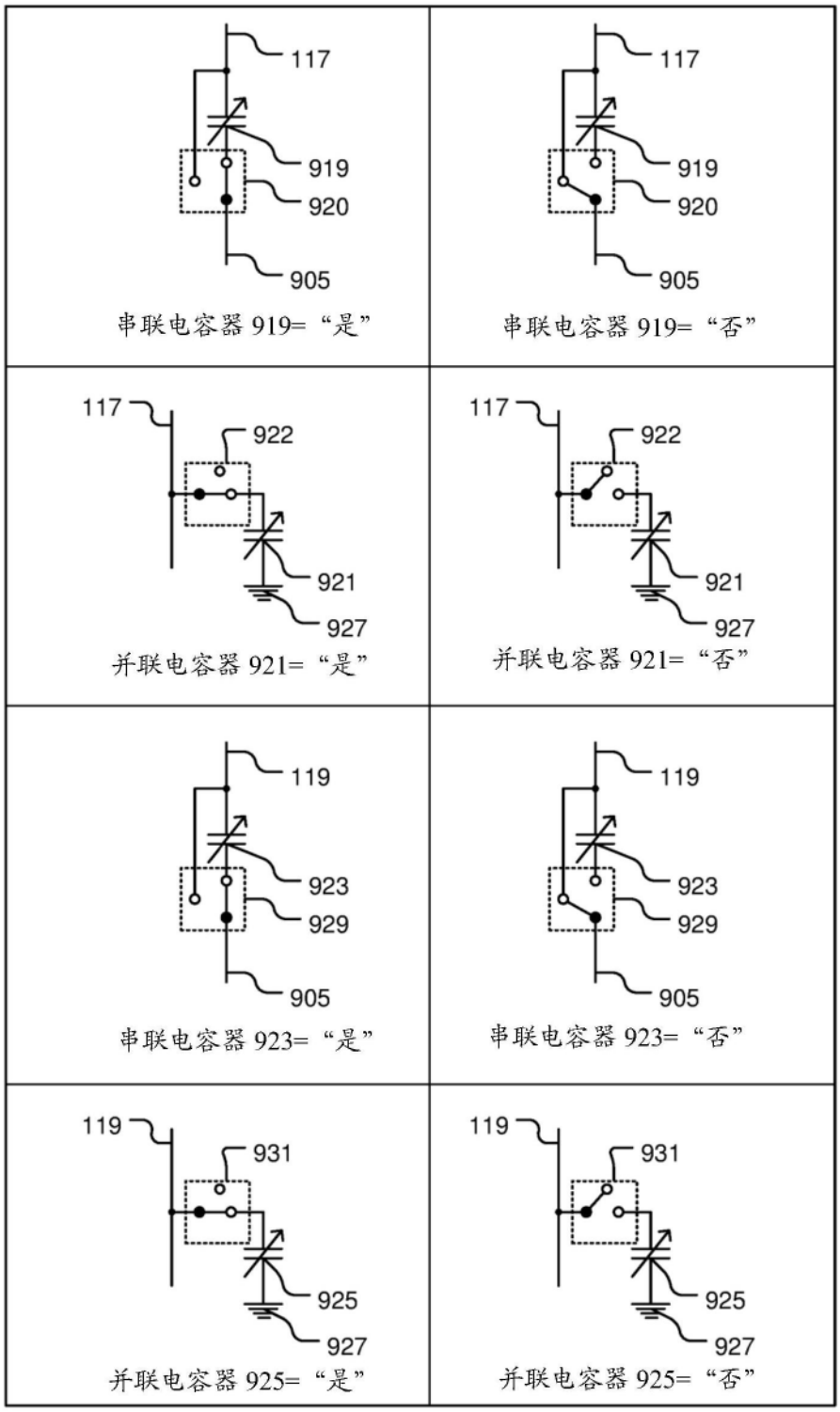

117
919
920
905
串联电容器 919=“是”
117
919
920
905
串联电容器 919=“否”
117
922
921
927
并联电容器 921=“是”
117
922
921
927
并联电容器 921=“否”
119
923
929
905
串联电容器 923=“是”
119
923
929
905
串联电容器 923=“否”
119
931
925
927
并联电容器 925=“是”
119
931
925
927
并联电容器 925=“否”

图11B

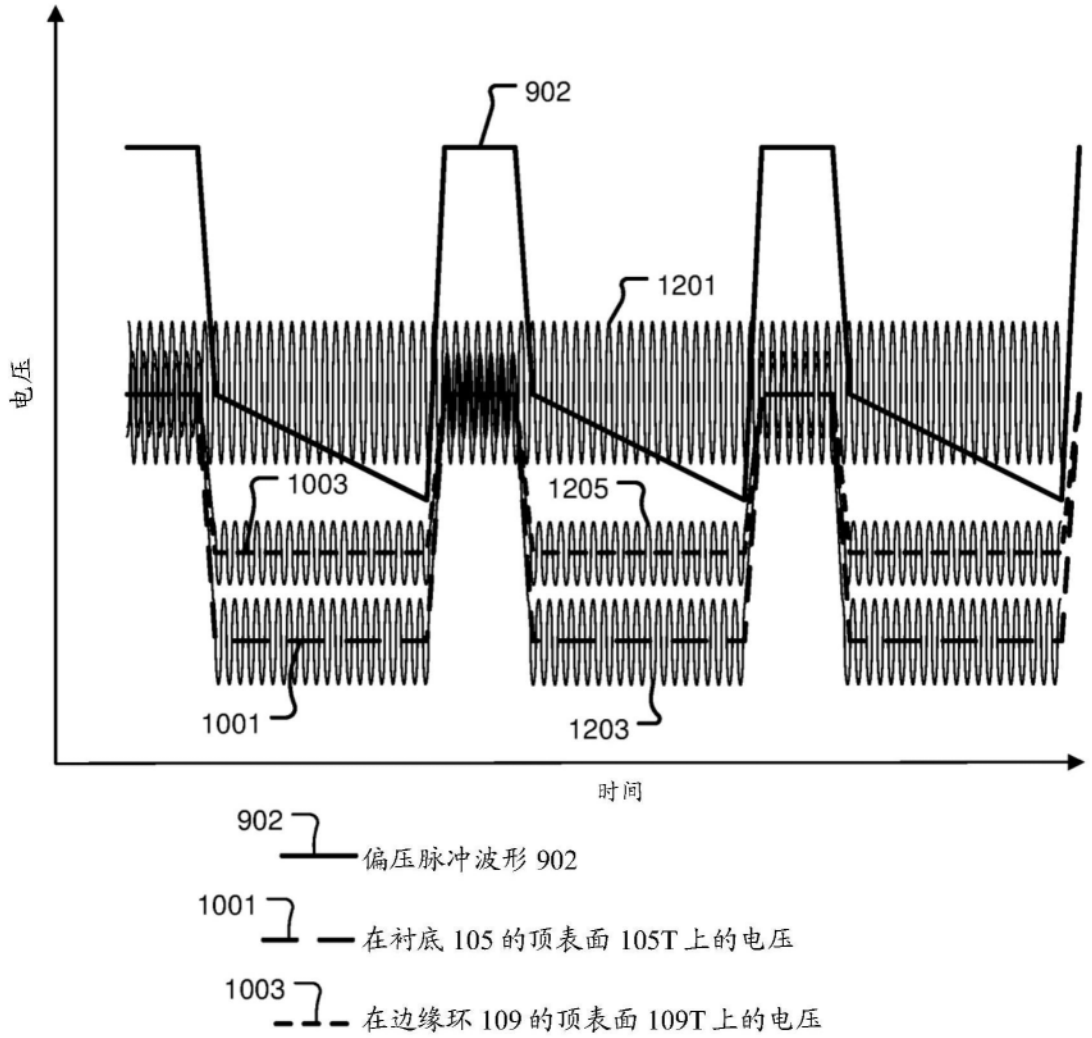

902
1201
1003
1205
1001
1203
电压
时间
902
偏压脉冲波形 902
1001
在衬底 105 的顶表面 105T 上的电压
1003
在边缘环 109 的顶表面 109T 上的电压

图12

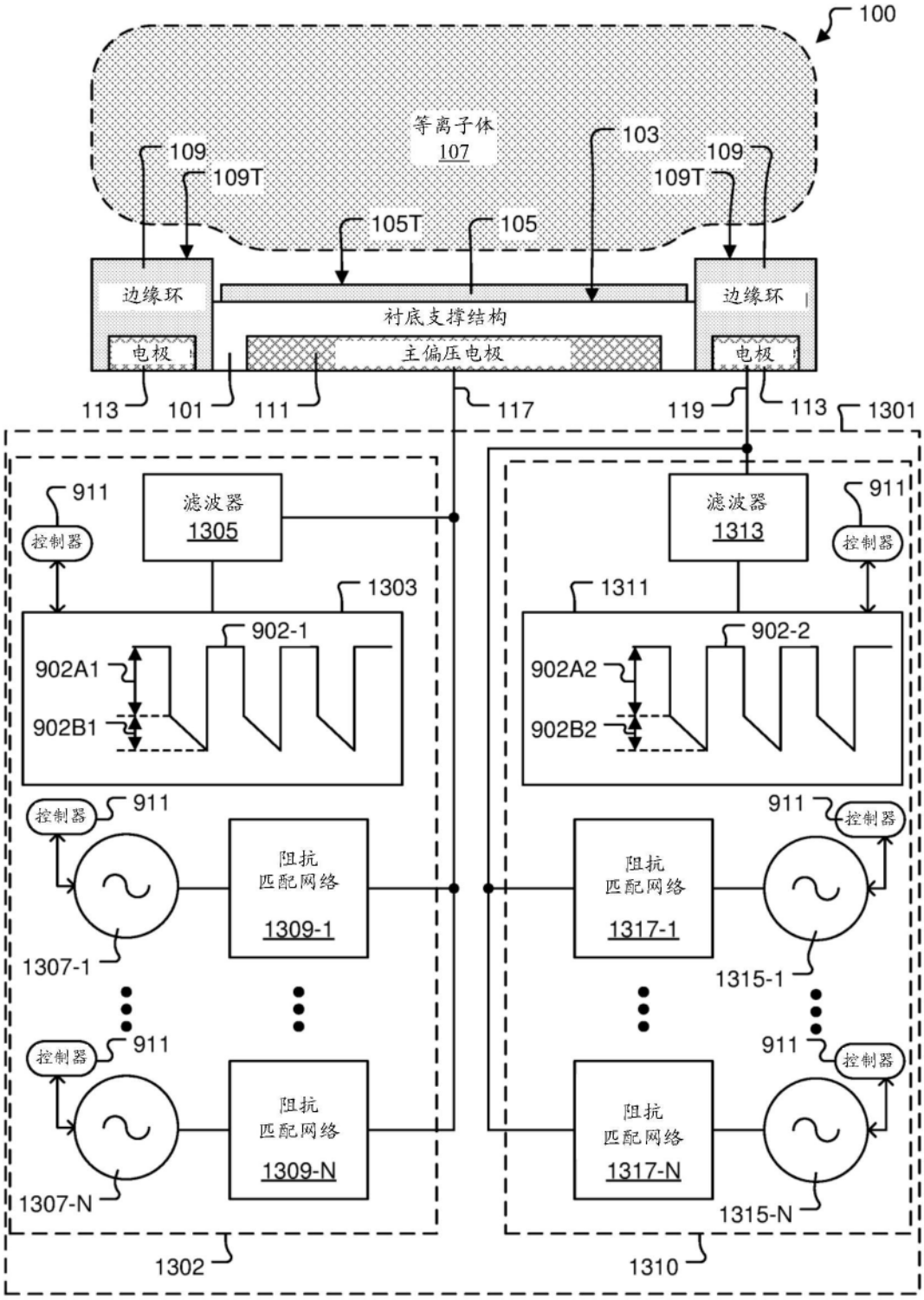

100
等离子体
107
109
109T
103
109
109T
105T
105
边缘环
衬底支撑结构
边缘环
电极
主偏压电极
电极
113
101
111
117
119
113
1301
911
控制器
滤波器
1305
1303
902-1
902A1
902B1
滤波器
1313
911
控制器
1311
902-2
902A2
902B2
控制器
911
阻抗
匹配网络
1309-1
1307-1
911
控制器
阻抗
匹配网络
1317-1
1315-1
911
控制器
阻抗
匹配网络
1309-N
1307-N
911
控制器
阻抗
匹配网络
1317-N
1315-N
1302
1310

图13

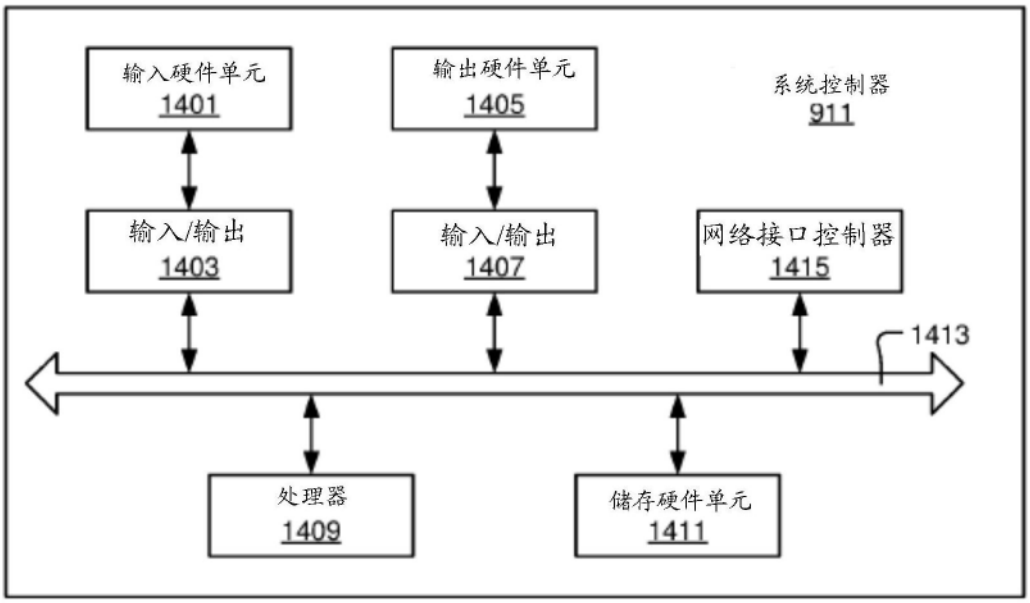

输入硬件单元
1401
输出硬件单元
1405
系统控制器
911
输入/输出
1403
输入/输出
1407
网络接口控制器
1415
1413
处理器
1409
储存硬件单元
1411

图14

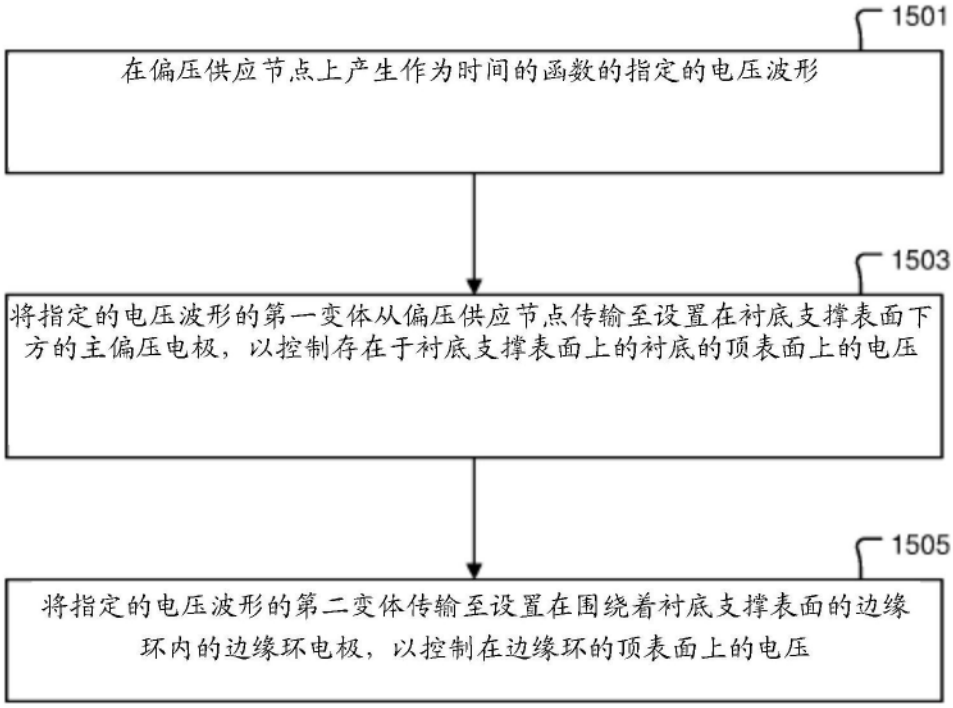

1501
在偏压供应节点上产生作为时间的函数的指定的电压波形
1503
将指定的电压波形的第一变体从偏压供应节点传输至设置在衬底支撑表面下方的主偏压电极，以控制存在于衬底支撑表面上的衬底的顶表面上的电压
1505
将指定的电压波形的第二变体传输至设置在围绕着衬底支撑表面的边缘环内的边缘环电极，以控制在边缘环的顶表面上的电压

图15