



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117955449 A

(43) 申请公布日 2024. 04. 30

(21) 申请号 202311402469.3

(22) 申请日 2023.10.26

(30) 优先权数据

63/420,829 2022.10.31 US

63/420,855 2022.10.31 US

63/435,433 2022.12.27 US

(71) 申请人 ASM IP私人控股有限公司

地址 荷兰阿尔梅勒

(72) 发明人 I·A·布塔 T·洛齐克

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

专利代理师 焦玉恒

(51) Int. Cl.

H03H 7/38 (2006.01)

H03L 7/26 (2006.01)

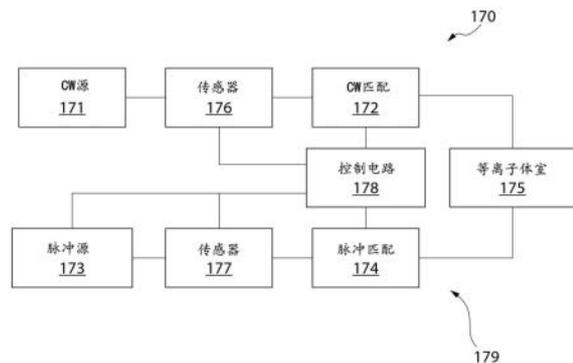
权利要求书3页 说明书24页 附图14页

(54) 发明名称

连续波和脉冲源的RF阻抗匹配

(57) 摘要

在一实施例中,一种用于半导体制造的系统包括连续波(CW)射频(RF)源和脉冲RF源。该系统还包括位于CW RF源和负载之间的匹配网络以及控制电路。控制电路接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号,并选择脉冲RF信号的一部分。控制电路然后在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数。基于至少一个参数,控制电路引起至少一个可变电抗元件的改变,这使匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。



1. 一种系统,包括:
  - 连续波 (CW) 射频 (RF) 源,其配置为向负载提供CW RF信号;和
  - 脉冲RF源,其配置为向负载提供脉冲RF信号;
  - 匹配网络,其可操作地耦合在CW RF源和负载之间,该匹配网络包括至少一个可变电抗元件;以及
  - 控制电路,其可操作地耦合到 (a) 匹配网络和 (b) 脉冲RF源或位于脉冲RF源和负载之间的传感器中的至少一个,其中控制电路配置成:
    - 接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号;
    - 选择脉冲RF信号的一部分;
    - 在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数;并且
    - 通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件,使匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。
2. 根据权利要求1所述的系统:
  - 其中,所述脉冲RF信号包括 (a) 具有第一脉冲电平持续时间的第一脉冲电平,和 (b) 具有第二脉冲电平持续时间的第二脉冲电平;并且
  - 其中,脉冲RF信号的所述一部分的选择包括基于以下来选择第一脉冲电平持续时间和第二脉冲电平持续时间中的一个: (a) 哪个持续时间更长;或者 (b) 哪个持续时间导致较少功率被反射到所述CW RF源。
3. 根据权利要求2所述的系统,其中,所述至少一个可变电抗元件的改变不基于在非选择持续时间期间采样的任何参数值。
4. 根据前述权利要求中任一项所述的系统,还包括可操作地耦合在所述脉冲RF源和所述负载之间的第二匹配网络,所述第二匹配网络包括至少一个可变电抗元件。
5. 根据前述权利要求中任一项所述的系统,其中,所述负载是等离子体室,并且所采样的至少一个参数包括所述CW RF源和匹配网络之间的电压、电流或相位。
6. 根据权利要求2-5中任一项所述的系统,其中,所述第一脉冲电平是开启状态,所述第二脉冲电平是关闭状态。
7. 根据权利要求2-6中任一项所述的系统,其中,所选择的持续时间基于哪个持续时间导致较少功率被反射到所述CW RF源,这基于:
  - 在所述第一脉冲电平持续时间期间确定反射相关值;以及
  - 在所述第二脉冲电平持续时间期间确定反射相关值。
8. 根据前述权利要求中任一项所述的系统,其中,所述至少一个可变电抗元件包括至少一个真空可变电容器。
9. 根据前述权利要求中任一项所述的系统,其中,通过改变所述CW RF信号的频率来进一步实现所述CW RF源和所述负载之间的阻抗匹配。
10. 根据权利要求1所述的系统:
  - 其中,所述脉冲RF信号包括 (a) 具有第一脉冲电平持续时间的第一脉冲电平,和 (b) 具有第二脉冲电平持续时间的第二脉冲电平;
  - 其中,所述匹配网络的至少一个可变电抗元件包括至少一个电子可变电抗元件 (EVRE);

其中,对于第一脉冲电平:

选择脉冲RF信号的一部分是选择第一脉冲电平持续时间;

采样至少一个参数发生在第一脉冲电平持续时间期间;以及

阻抗匹配包括通过基于在第一脉冲电平持续时间期间采样的至少一个参数来改变EVRE而对第一脉冲电平进行阻抗匹配;并且

其中,对于第二脉冲电平:

选择脉冲RF信号的一部分是选择第二脉冲电平持续时间;

采样至少一个参数发生在第二脉冲电平持续时间期间;以及

阻抗匹配包括通过基于在第二脉冲电平持续时间期间采样的至少一个参数来改变EVRE而对第二脉冲电平进行阻抗匹配。

11. 根据权利要求10所述的系统,其中,所述控制电路配置为当所述脉冲RF源在所述第一脉冲电平和第二脉冲电平之间交替时重复选择、采样和阻抗匹配操作。

12. 根据权利要求10-11中任一项所述的系统,其中,所述脉冲RF源的至少两个脉冲电平是非零脉冲电平。

13. 根据权利要求10-12中任一项所述的系统:

还包括可操作地耦合在所述脉冲RF源和负载之间的第二匹配网络,该第二匹配网络包括至少一个EVRE;并且

其中,所述第二匹配网络配置成通过以下在脉冲RF源和负载之间进行阻抗匹配:

对于所述第一脉冲电平,基于在所述第一脉冲电平持续时间期间采样的参数来改变第二匹配网络的至少一个EVRE;和

对于所述第二脉冲电平,基于在所述第二脉冲电平持续时间期间采样的参数来改变第二匹配网络的至少一个EVRE。

14. 根据权利要求10-13中任一项所述的系统,其中,所述匹配网络的至少一个EVRE是电子可变电容器,其包括并联耦合且配置为接入和断开的固定电容器。

15. 根据权利要求10-14中任一项所述的系统,其中,通过改变所述CW RF信号的频率,进一步实现所述CW RF源和负载之间的阻抗匹配。

16. 根据权利要求10-15中任一项所述的系统,其中,所述控制电路配置为:

当所述脉冲RF源在所述第一脉冲电平和第二脉冲电平之间交替时重复选择、采样和阻抗匹配操作;

通过使用机器学习来学习用于改变至少一个EVRE的模式;以及

基于所学习的模式改变至少一个EVRE。

17. 一种阻抗匹配的方法,包括:

从CW RF源向负载提供CW RF信号;

从脉冲RF源向负载提供脉冲RF信号;

将匹配网络可操作地耦合在CW RF源和负载之间,该匹配网络包括至少一个可变电抗元件;

将控制电路可操作地耦合到(a)匹配网络和(b)脉冲RF源或位于脉冲RF源和负载之间的传感器中的至少一个;

接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号;

选择脉冲RF信号的一部分；  
在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数；并且  
通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件，使匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。

18. 根据权利要求17所述的方法：

其中，所述脉冲RF信号包括 (a) 具有第一脉冲电平持续时间的第一脉冲电平，和 (b) 具有第二脉冲电平持续时间的第二脉冲电平；并且

其中，脉冲RF信号的所述一部分的选择包括基于以下来选择第一脉冲电平持续时间和第二脉冲电平持续时间中的一个：(a) 哪个持续时间更长；或者 (b) 哪个持续时间导致较少功率被反射到所述CW RF源。

19. 根据权利要求17所述的方法：

其中，所述脉冲RF信号包括 (a) 具有第一脉冲电平持续时间的第一脉冲电平，和 (b) 具有第二脉冲电平持续时间的第二脉冲电平；

其中，所述匹配网络的至少一个可变电抗元件包括至少一个电子可变电抗元件 (EVRE)；

其中，对于第一脉冲电平：

选择脉冲RF信号的一部分是选择第一脉冲电平持续时间；  
采样至少一个参数发生在第一脉冲电平持续时间期间；以及  
阻抗匹配包括通过基于在第一脉冲电平持续时间期间采样的至少一个参数来改变EVRE而对第一脉冲电平进行阻抗匹配；并且

其中，对于第二脉冲电平：

选择脉冲RF信号的一部分是选择第二脉冲电平持续时间；  
采样至少一个参数发生在第二脉冲电平持续时间期间；以及  
阻抗匹配包括通过基于在第二脉冲电平持续时间期间采样的至少一个参数来改变EVRE而对第二脉冲电平进行阻抗匹配。

20. 一种半导体处理工具，包括：

等离子体室，其配置为将材料沉积到衬底上或从衬底蚀刻材料；

第一阻抗匹配网络，其可操作地耦合到等离子体室，并配置为可操作地耦合到CW RF源，该CW RF源配置为向等离子体室提供CW RF信号，第一阻抗匹配网络包括至少一个可变电抗元件；

第二阻抗匹配网络，其可操作地耦合到等离子体室，并配置为可操作地耦合到脉冲RF源，该脉冲RF源配置为向负载提供脉冲RF信号；以及

控制电路，其可操作地耦合到 (a) 第一阻抗匹配网络和 (b) 脉冲RF源或位于脉冲RF源和负载之间的传感器中的至少一个，其中控制电路配置成：

接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号；

选择脉冲RF信号的一部分；

在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数；并且

通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件，使第一阻抗匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。

## 连续波和脉冲源的RF阻抗匹配

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2022年10月31日提交的美国临时专利申请第63/420829号和2022年12月27日提交的美国临时专利申请第63/435433号的权益,它们的全部内容通过引用结合于此。

### 技术领域

[0003] 本发明涉及连续波和脉冲源的RF阻抗匹配。

### 背景技术

[0004] 在制造诸如微处理器、存储芯片和其他集成电路的半导体器件时,半导体器件制造过程在制造的不同阶段使用等离子体处理。等离子体处理包括通过将RF(射频)能量引入气体混合物中而将能量传递给气体分子来激励气体混合物。这种气体混合物通常包含在真空室(也称为等离子体室)中,RF能量通过室中的电极或其他装置引入。在典型的等离子体过程中,RF发生器以期望的RF频率和功率产生功率,并且该功率通过RF电缆和网络传输到等离子体室。

[0005] 为了提供从RF发生器到等离子体室的有效功率传输,RF匹配网络位于RF发生器和等离子体室之间。RF匹配网络的目的是将等离子体阻抗转换成适合RF发生器的值。在许多情况下,特别是在半导体制造过程中,RF功率通过50欧姆同轴电缆传输,并且RF发生器的系统阻抗(输出阻抗)也是50欧姆。另一方面,由RF功率驱动的等离子体的阻抗基于等离子体室内的等离子体化学和其他条件而变化。该阻抗必须转换为无功50欧姆(即 $50 + j0$ ),以实现最大功率传输。RF匹配网络执行将等离子体阻抗连续转换为对于RF发生器的50欧姆的任务。大多数情况下,这种转换会使RF匹配网络的输入侧的阻抗变为 $50 + j0$ 欧姆,即纯阻性50欧姆。

[0006] RF匹配网络可以包括可变电容器和用于控制电容器的基于微处理器的控制电路。可变电容器的值和大小受功率处理能力、操作频率和等离子体室的阻抗范围的影响。RF匹配网络中使用的主要可变电容是真空可变电容(VVC)。VVC是一种机电设备,由两个同心金属环构成,它们相对彼此移动以改变电容。VVC的替代物是电子可变电容器(EVC)(例如参见美国专利第7251121号,其全文通过引用并入本文),其比VVC快,且因此能够减少半导体处理调整时间。基于EVC的匹配网络是一种固态匹配网络。

[0007] 在半导体制造过程中,有时使用多个RF功率源来点燃和/或控制等离子体特性。这些多个源可以是相同的频率或不同的频率。类似地,每个电源的功率水平可能不同。除了上述差异之外,其中一个源可能以连续波(CW)模式工作,而另一个源可能是脉冲式的。然而,两种类型的RF源在单个系统中的共存可能会影响匹配的执行方式。例如,脉冲RF源可以使等离子体产生脉冲。因此,CW源和等离子体之间的匹配可能需要考虑脉冲等离子体,而不是呈现更恒定阻抗的等离子体。

## 发明内容

[0008] 本公开可以涉及一种系统,该系统包括:连续波(CW)射频(RF)源,其配置为向负载提供CW RF信号;和脉冲RF源,其配置为向负载提供脉冲RF信号;匹配网络,其可操作地耦合在CW RF源和负载之间,该匹配网络包括至少一个可变电抗元件;以及控制电路,其可操作地耦合到(a)匹配网络和(b)脉冲RF源或位于脉冲RF源和负载之间的传感器中的至少一个,其中控制电路配置成:接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号;选择脉冲RF信号的一部分;在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数;并且通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件,使匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。

[0009] 另一方面,一种阻抗匹配的方法包括:从CW RF源向负载提供CW RF信号;从脉冲RF源向负载提供脉冲RF信号;将匹配网络可操作地耦合在CW RF源和负载之间,该匹配网络包括至少一个可变电抗元件;将控制电路可操作地耦合到(a)匹配网络和(b)脉冲RF源或位于脉冲RF源和负载之间的传感器中的至少一个;接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号;选择脉冲RF信号的一部分;在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数;并且通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件,使匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。

[0010] 另一方面,一种半导体处理工具包括:等离子体室,其配置为将材料沉积到衬底上或从衬底蚀刻材料;第一阻抗匹配网络,其可操作地耦合到等离子体室,并配置为可操作地耦合到CW RF源,该CW RF源配置为向等离子体室提供CW RF信号,第一阻抗匹配网络包括至少一个可变电抗元件;第二阻抗匹配网络,其可操作地耦合到等离子体室,并配置为可操作地耦合到脉冲RF源,该脉冲RF源配置为向负载提供脉冲RF信号;以及控制电路,其可操作地耦合到(a)第一阻抗匹配网络和(b)脉冲RF源或位于脉冲RF源和负载之间的传感器中的至少一个,其中控制电路配置成:接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号;选择脉冲RF信号的一部分;在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数;并且通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件,使第一阻抗匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。

[0011] 另一方面,一种制造半导体的方法包括将衬底放置在等离子体室中,该等离子体室配置为在衬底上沉积材料层或者从衬底蚀刻材料层;从CW RF源向等离子体室提供CW RF信号;从脉冲RF源向等离子体室提供脉冲RF信号;将匹配网络可操作地耦合在CW RF源和等离子体室之间,该匹配网络包括至少一个可变电抗元件;接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号;选择脉冲RF信号的一部分;在脉冲RF信号的选择部分期间采样至少一个参数;并且通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件,使匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。

## 附图说明

[0012] 根据详细描述和附图,本公开将被更全面地理解,其中:

[0013] 图1是半导体处理系统的实施例的框图。

[0014] 图2是具有L-配置匹配网络的半导体处理系统的实施例的框图。

[0015] 图3是具有pi配置匹配网络的半导体处理系统的实施例的框图。

[0016] 图4是使用电子可变电容器提供可变电容的电路的实施例的框图。

[0017] 图5是用于接通和断开电子可变电容器的分立电容器的可变电容系统的示意图。

- [0018] 图6是用于EVC的开关电路的实施例的框图。
- [0019] 图7是通过改变可变电容来匹配阻抗的示例性过程的流程图。
- [0020] 图8是使用参数矩阵改变可变电容来匹配阻抗的示例性过程的流程图。
- [0021] 图9是根据一实施例的当RF输入信号具有多级功率设定点时用于阻抗匹配的过程的实施例的流程图。
- [0022] 图10是示出根据图9的实施例的参数相关值确定的脉冲电平和定时的曲线图。
- [0023] 图11是根据一实施例的多源半导体处理系统的框图。
- [0024] 图12是示出根据一实施例的连续波模式下的RF源的连续采样方法的曲线图。
- [0025] 图13是示出根据一实施例的用于产生脉冲的RF源的采样保持方法的曲线图。
- [0026] 图14是根据一实施例的在具有CW和脉冲RF源的系统中阻抗匹配的改进的采样保持方法的流程图。
- [0027] 图15是示出根据一实施例的不同脉冲电平的采样的曲线图。
- [0028] 图16是根据一实施例的在具有CW和脉冲RF源的系统中阻抗匹配的逐级方法的流程图。

### 具体实施方式

[0029] 以下对优选实施例的描述本质上仅仅是示例性的,而决不是为了限制本发明。说明性实施例的描述旨在结合附图来阅读,附图被认为是整个书面描述的一部分。在本文公开的示例性实施例的描述中,对方向或方位的任何引用仅仅是为了描述的方便,而不是为了以任何方式限制本发明的范围。这里的讨论描述和示出了一些可能的特征的非限制性组合,这些组合可以单独存在或者以特征的其他组合形式存在。此外,如本文所用,术语“或”将被解释为每当其一个或多个操作数为真时导致真的逻辑运算符。此外,如本文所用,短语“基于”将被解释为意指“至少部分基于”,因此不限于“完全基于”的解释。

[0030] 本发明的特征可以在软件、硬件、固件或其组合中实现。本文描述的计算机程序不限于任何特定实施例,并且可以在操作系统、应用程序、前台或后台进程、驱动程序或其任何组合中实现。计算机程序可以在单个计算机或服务器处理器或多个计算机或服务器处理器上执行。

[0031] 本文描述的处理器可以是配置用于执行计算机程序指令(例如代码)的任何中央处理单元(CPU)、微处理器、微控制器、计算或可编程设备或电路。各种处理器可以体现在任何合适类型的计算机和/或服务硬件中(例如台式机、膝上型电脑、笔记本、平板电脑、蜂窝电话等),并且可以包括形成功能数据处理设备所需的所有常用辅助部件,包括但不限于总线、软件和数据存储装置,例如易失性和非易失性存储器、输入/输出设备、图形用户界面(GUI)、可移动数据存储器和包括Wi-Fi、蓝牙、LAN等的有线和/或无线通信接口设备。

[0032] 本文描述的计算机可执行指令或程序(例如软件或代码)和数据可被编程到并且有形地包含在非暂时性计算机可读介质中,该介质可以由本文描述的相应处理器访问和检索,配置和指导处理器通过执行介质中编码的指令来执行期望的功能和过程。包含配置成这样的非暂时性计算机可执行指令或程序的可编程处理器的设备可被称为“可编程设备”或“设备”,并且相互通信的多个可编程设备可被称为“可编程系统”。应当注意,本文所述的非暂时性“计算机可读介质”可以包括但不限于任何合适的易失性或非易失性存储器,包括

随机存取存储器 (RAM) 及其各种类型、只读存储器 (ROM) 及其各种类型、USB 闪存、磁或光数据存储设备 (例如内部/外部硬盘、软盘、磁带 CD-ROM、DVD-ROM、光盘、ZIP™ 驱动器、蓝光光盘等), 其可以由可操作地连接到介质的处理器写入和/或读取。

[0033] 在某些实施例中, 本发明可以计算机实现的过程和装置的形式来体现, 例如基于处理器的数据处理和通信系统或用于实践那些过程的计算机系统。本发明还可以包含在非暂时性计算机可读存储介质中的软件或计算机程序代码的形式来实现, 当被加载到数据处理和通信系统或计算机系统中并由它们执行时, 计算机程序代码段将处理器配置成创建配置成实现这些过程的特定逻辑电路。

[0034] 在以下示出和描述电路的描述中, 本领域技术人员将认识到, 为了清楚起见, 并非所有外围电路或部件都在附图中示出或在描述中描述。此外, 术语“耦合”和“可操作地耦合”可以指电路的两个部件的直接或间接耦合。

[0035] 以下对优选实施例的描述本质上仅仅是示例性的, 而决不是为了限制本发明。说明性实施例的描述旨在结合附图来阅读, 附图被认为是整个书面描述的一部分。在本文公开的示例性实施例的描述中, 对方向或方位的任何引用仅仅是为了描述的方便, 而不是为了以任何方式限制本发明的范围。相关术语, 例如“下部”、“上部”、“水平”、“竖直”、“上方”、“下方”、“上”、“下”、“左”、“右”、“顶部”、“底部”、“前”和“后”及其派生词 (例如“水平地”、“向下”、“向上”等) 应被解释为指的是随后描述的或者在所讨论的附图中示出的方向。这些相关术语仅是为了便于描述, 除非明确指出, 否则不要求该装置以特定的方向构造或操作。术语比如“附接”、“附着”、“连接”、“耦合”、“互连”、“固定”和其他类似术语是指这样的关系: 其中结构通过中间结构直接或间接地彼此固定或附接, 以及可移动或刚性的附接或关系, 除非另有明确描述。这里的讨论描述和示出了一些可能的非限制性特征组合, 这些组合可以单独存在或者以特征的其他组合形式存在。此外, 如本文所用, 术语“或”将被解释为每当其一个或多个操作数为真时导致真的逻辑运算符。此外, 如本文所用, 短语“基于”将被解释为意指“至少部分基于”, 因此不限于“完全基于”的解释。

[0036] 如通篇所用, 范围被用作描述该范围内的每个值的简写。范围内的任何值都可以选择为范围的终点。此外, 本文引用的所有参考文献都通过引用整体结合于此。在本公开中的定义和引用的参考文献的定义发生冲突的情况下, 以本公开为准。

[0037] 半导体处理系统

[0038] 参考图1, 示出了利用RF发生器15的半导体器件处理系统5。系统5包括RF发生器15和半导体处理工具86。半导体处理工具86包括匹配网络11和等离子体室19。在其他实施例中, 发电机15或其他电源可以形成半导体处理工具的一部分。

[0039] 半导体器件可以是微处理器、存储器芯片或其他类型的集成电路或器件。衬底27可以放置在等离子体室19中, 其中等离子体室19配置成将材料层沉积到衬底27上或者从衬底27蚀刻材料层。等离子体处理包括通过将RF能量引入气体混合物而将能量传递给气体分子来激励气体混合物。这种气体混合物通常包含在真空室 (等离子体室19) 中, 并且RF能量通常通过电极引入等离子体室19。因此, 可以通过将来自RF源15的RF功率耦合到等离子体室19中来激励等离子体, 以执行沉积或蚀刻。

[0040] 在典型的等离子体过程中, RF发生器15产生射频 (其通常在3kHz和300GHz的范围内) 功率, 并且该功率通过RF电缆和网络传输到等离子体室19。为了提供从RF发生器15到等

离子体室19的有效功率传输,使用中间电路来匹配RF发生器15的固定阻抗和等离子体室19的可变阻抗。这种中间电路通常被称为RF阻抗匹配网络,或者更简单地称为RF匹配网络。RF匹配网络11的目的是将可变等离子体阻抗转换成更接近匹配RF发生器15的固定阻抗的值。共同拥有的美国公开号2021/0183623和2021/0327684提供了这种匹配网络的示例,其公开内容通过引用整体结合于此。

#### [0041] 匹配网络

[0042] 图2是具有处理工具86的半导体处理系统85的实施例的框图,该处理工具86包括L配置RF阻抗匹配网络11。如下面将进一步详细讨论,示例性匹配网络11将电子可变电容器(EVC)用于并联可变电容器33和串联可变电容器31。注意,本发明不限于此。例如,一个EVC(例如并联EVC33)可以是机械可变VVC,或者可以用可变电感器代替。

[0043] 示例性匹配网络11具有连接到RF源15的RF输入13和连接到等离子体室19的RF输出17。RF输入传感器21可以连接在RF阻抗匹配网络11和RF源15之间。RF输出传感器49可以连接在RF阻抗匹配网络11和等离子体室19之间,从而可以监控来自阻抗匹配网络的RF输出和由等离子体室19呈现的等离子体阻抗。某些实施例可以只包括输入传感器21和输出传感器49中的一个。这些传感器21、49的功能将在下面更详细地描述。

[0044] 如上所述,通过将RF输入13处的阻抗与RF源15的固定阻抗相匹配,RF阻抗匹配网络11用于帮助最大化从RF源15传输到等离子体室19的RF功率量。匹配网络11可以由设计用于电连接到RF源15和等离子体室19的单个外壳内的单个模块构成。在其他实施例中,匹配网络11的部件可以位于不同的外壳中,一些部件可以在外壳外部,和/或一些组件可以与匹配网络外部的部件共享外壳。

[0045] 如本领域中已知,等离子体室19内的等离子体通常经历操作控制之外的某些波动,使得等离子体室19呈现的阻抗是可变阻抗。因为等离子体室19的可变阻抗不能被完全控制,阻抗匹配网络可以用于在等离子体室19和RF源15之间产生阻抗匹配。此外,通过特定RF源15的设计,RF源15的阻抗可以固定在设定值。尽管RF源15的固定阻抗在使用期间可能由于例如温度或其他环境变化而经历微小的波动,但为了阻抗匹配的目的,RF源15的阻抗仍被认为是固定阻抗,因为波动不会显著改变固定阻抗与最初设置的阻抗值。可以设计其他类型的RF源15,使得RF源15的阻抗可以在使用时或使用期间设定。这种类型的RF源15的阻抗仍被认为是固定的,因为它可以由用户控制(或者至少由可编程控制器控制),并且阻抗的设定值可以在操作期间的任何时间已知,因此使得设定值有效地成为固定阻抗。

[0046] RF源15可以是本领域公知类型的RF发生器,并且为在等离子体室19内执行的过程产生适当频率和功率的RF信号。RF源15可以使用同轴电缆电连接到RF阻抗匹配网络11的RF输入13,为了阻抗匹配的目的,同轴电缆将具有与RF源15相同的固定阻抗。

[0047] 等离子体室19包括第一电极23和第二电极25,并且在本领域公知的过程中,第一和第二电极23、25与适当的控制系统(未示出)和等离子体室中的等离子体相结合,实现将材料沉积到衬底27上和从衬底27蚀刻材料中的一种或两种。

[0048] 在示例性实施例中,RF阻抗匹配网络11包括串联可变电容器31、并联可变电容器33和串联电感器35,以形成“L”型匹配网络。并联可变电容器33被示出分流到串联可变电容器31和串联电感器35之间的参考电势,在这种情况下是地40,并且本领域技术人员将认识到RF阻抗匹配网络11可以配置为并联可变电容器33分流到RF输入13或RF输出17处的参考

电势。

[0049] 可替代地,RF阻抗匹配网络11可以其他匹配网络配置来配置,例如“T”型配置或“II”或“pi”型配置,如图3所示。在某些实施例中,下面描述的可变电容器和开关电路可被包括在适于RF阻抗匹配网络的任何配置中。

[0050] 在示例性实施例中,串联可变电容器31和并联可变电容器33中的每个可以是电子可变电容器(EVC),如美国专利第7251121号中所述,EVC被有效地形成为由多个分立电容器形成的电容器阵列。串联可变电容器31串联耦合在RF输入13和RF输出17之间(其也并联在RF源15和等离子体室19之间)。并联可变电容器33并联耦合在RF输入13和地40之间。在其他配置中,并联可变电容器33可以并联耦合在RF输出19和地40之间。在不脱离RF匹配网络的功能的情况下,也可以实现其他配置。在其他配置中,并联可变电容器33可以并联耦合在参考电势与RF输入13和RF输出19之一之间。

[0051] 串联可变电容器31连接到串联RF扼流圈和滤波器电路37以及串联驱动器电路39。类似地,并联可变电容器33连接到并联RF扼流圈和滤波器电路41以及并联驱动器电路43。串联和并联驱动器电路39、43中的每个连接到控制电路45,控制电路45配置有适当的处理器和/或信号产生电路,以提供用于控制串联和并联驱动器电路39、43的输入信号。电源47连接到RF输入传感器21、串联驱动器电路39、并联驱动器电路43和控制电路45中的每个,以在设计的电流和电压下向这些部件中的每个提供操作功率。由电源47提供的电压电平,以及由RF输入传感器21、串联驱动器电路39、并联驱动器电路43和控制电路45中的每个用来执行各自指定任务的电压电平,是设计选择的问题。在其他实施例中,可以使用各种电子部件来使控制电路45能够向可变电容器发送指令。此外,虽然驱动器电路和RF扼流圈和滤波器被示出为与控制电路45分离,但这些部件也可被认为是形成控制电路45的一部分。

[0052] 在示例性实施例中,控制电路45包括处理器。处理器可以是任何类型的适当编程的处理设备(或者一起工作的两个或更多个处理设备的集合),例如计算机或微处理器,配置用于执行计算机程序指令(例如代码)。处理器可以在任何合适类型的计算机和/或服务硬件(例如台式机、膝上型电脑、笔记本、平板电脑、蜂窝电话等)中实现,并且可以包括形成功能数据处理设备所需的所有常用辅助部件,包括但不限于总线、软件和数据存储装置,例如易失性和非易失性存储器、输入/输出设备、图形用户界面(GUI)、可移动数据存储装置以及包括Wi-Fi、蓝牙、LAN等的有线和/或无线通信接口设备。示例性实施例的处理器配置有特定算法,以使匹配网络能够执行本文描述的功能。

[0053] 通过串联可变电容器31和并联可变电容器33的组合,可以使用控制电路45、串联驱动器电路39、并联驱动器电路43来控制RF阻抗匹配网络11和等离子体室19的组合阻抗,以匹配或至少基本匹配RF源15的固定阻抗。

[0054] 控制电路45是RF阻抗匹配网络11的大脑,因为它从诸如RF输入传感器21以及串联和并联可变电容器31、33的源接收多个输入,进行必要的计算以确定串联和并联可变电容器31、33的变化,并且向串联和并联可变电容器31、33传递命令以创建阻抗匹配。控制电路45是通常在半导体制造过程中使用的控制电路类型,因此是本领域技术人员已知的。与现有技术的控制电路相比,控制电路45中的任何差异都产生于编程差异,以解决RF阻抗匹配网络11能够执行可变电容器31、33的切换和阻抗匹配的速度。

[0055] 每个串联和并联RF扼流圈和滤波器电路37、41配置成使得DC信号可以在串联和并

联驱动器电路39、43和相应的串联和并联可变电容器31、33之间通过,同时来自RF源15的RF信号被阻挡,以防止RF信号泄漏到串联和并联驱动器电路39、43的输出和控制电路45的输出中。串联和并联RF扼流圈和滤波器电路37、41是本领域技术人员已知的类型。

[0056] 图3是半导体处理系统85A的实施例的框图,其具有pi配置匹配网络11A,与图2的L配置匹配网络相反。为了便于理解,该图省略了图2的RF扼流圈和滤波器、驱动器电路和电源。在图3使用与图2相同的附图标记的情况下,应当理解,相关的部件可以具有与关于图2讨论的那些部件相似的特征。

[0057] L型和pi型配置之间最显著的区别是L型配置利用串联电容器31和并联电容器33,而pi型配置利用两个并联电容器31A、33A。然而,控制电路可以改变这些并联可变电容器31A、33A的电容,以引起阻抗匹配。如上所述,这些并联可变电容器31A、33A中的每个都可以是EVC。它们可以由扼流圈、滤波器和驱动器控制,类似于上面参照图2讨论的方法。

#### [0058] EVC电容器阵列

[0059] 图4是使用电子可变电容器151来提供可变电容的电子电路150的实施例的框图。电路150利用包括两个电容器阵列151a、151b的EVC151。示例性第一电容器阵列151a具有第一多个分立固定电容器,每个具有第一电容值。第二电容器阵列151b具有第二多个分立固定电容器,每个具有第二电容值。第一电容值不同于第二电容值,使得EVC151可以提供对EVC151产生的电容的粗略和精细控制。第一电容器阵列和第二电容器阵列并联耦合在信号输入113和信号输出130之间。

[0060] 第一和第二电容值可以是足以为EVC151提供期望的总电容值的任何值。在一实施例中,第二电容值小于或等于第一电容值的一半(1/2)。在另一实施例中,第二电容值小于或等于第一电容值的三分之一(1/3)。在又一实施例中,第二电容值小于或等于第一电容值的四分之一(1/4)。

[0061] 电子电路150还包括控制电路145,控制电路145可以具有类似于上述控制电路45的特征。控制电路145通过命令输入129可操作地耦合到第一电容器阵列151a和第二电容器阵列151b,命令输入129可操作地耦合到第一电容器阵列151a和第二电容器阵列151b。在示例性实施例中,命令输入129具有到电容器阵列151a、151b的直接电连接,尽管在其他实施例中,这种连接可以是间接的。控制电路145到电容器阵列151a、151b的耦合将在下面进一步详细讨论。

[0062] 控制电路145配置成通过控制(a)第一多个分立固定电容器中的每个分立固定电容器和(b)第二多个分立固定电容器中的每个分立固定电容器的开和关状态来改变EVC151的可变电容。如上所述,控制电路145可以具有类似于前面附图的控制电路45所描述的特征。例如,控制电路145可以接收来自电容器阵列151a、151b的输入,进行计算以确定电容器阵列151a、151b的变化,并向电容器阵列151a、151b传递命令以改变EVC151的电容。图4的EVC151可以包括多个电子开关。每个电子开关可以配置成激活和去激活一个或多个分立电容器。

[0063] 如同前面附图的控制电路45一样,控制电路145也可以连接到驱动器电路139和RF扼流圈和滤波器电路137。控制电路145、驱动器电路139以及RF扼流圈和滤波器电路137可以具有类似于关于前面附图所讨论的那些功能。在示例性实施例中,驱动器电路139可操作地耦合在控制电路145与第一和第二电容器阵列151a、151b之间。驱动器电路139配置成基

于从控制电路145接收的控制信号来改变可变电容。RF滤波器137可操作地耦合在驱动器电路139与第一和第二电容器阵列151a、151b之间。响应于由控制单元145发送的控制信号,驱动器电路139和RF滤波器137配置为向命令输入129发送命令信号。命令信号配置成通过指示至少一个电子开关激活或去激活(a)第一多个分立电容器中的至少一个分立电容器或者(b)第二多个分立电容器中的至少一个分立电容器来改变可变电容。

[0064] 在示例性实施例中,驱动器电路139配置为在小于15微秒的时间内接通或断开高压电源,该高压电源控制第一和第二电容器阵列中的每个的电子开关,以改变可变电容。然而,EVC151可以通过本申请中讨论的任何方式或速度来切换。

[0065] 控制电路145可以配置为计算将由相应电容器阵列151a、151b提供的粗略和精细电容值。在示例性实施例中,控制电路145配置为通过控制第一电容器阵列151a的开和关状态来计算要提供的粗略电容值。此外,控制电路配置为通过控制第二电容器阵列151b的开和关状态来计算要提供的精细电容值。在其他实施例中,电容器阵列151a、151b可以提供替代的电容水平。在其他实施例中,EVC可以利用额外的电容器阵列。

[0066] 图4的EVC151可以用于需要可变电容的各种系统中。例如,EVC151可以用作L匹配网络中的串联EVC和/或并联EVC,或者用作pi匹配网络中的一个或两个并联EVC。通常期望电容值之间的差异允许电路的总电容的足够精细的分辨率和大范围的电容值,以在RF匹配网络的输入处实现更好的阻抗匹配,并且EVC151允许这一点。

[0067] 接入和断开分立电容器以改变EVC电容

[0068] 如上所述,EVC是一种可变电容器,其可以使用多个开关,每个开关用于产生开路或短路,单独的串联电容器改变可变电容器的电容。开关可以是机械的(比如继电器)或固态的(比如PIN二极管、晶体管或其他开关设备)。下面讨论建立EVC或其他可变电容器以提供可变电容的方法。

[0069] 在有时被称为EVC或其他可变电容的“累积设置”中,从最小起点(所有开关都断开)开始线性增加电容值的方法是逐渐增加接入电路的微调电容器数量。一旦最大数量的微调电容器接入电路,粗调电容器接入,微调电容器断开。该过程从增加接入电路的微调电容器的数量开始,直到所有微调电容器都接入,此时另一粗调电容器接入而微调电容器断开。这个过程可以继续,直到所有的粗和细电容器都接入。

[0070] 在该实施例中,所有微调电容器具有相同或基本相似的值,所有粗调电容器具有相同或基本相似的值。此外,一个粗调电容器的电容值约等于所有细调电容器加上电路中的附加细调电容器的组合电容值,从而实现电容的线性增加。然而,实施例不限于此。微调电容器(和粗调电容器)不需要具有相同或基本相似的值。此外,一个粗调电容器的电容值不需要等于所有微调电容器加上一个附加微调电容器的组合电容值。在一实施例中,粗略电容值和精细电容值具有基本类似于10:1的比率。在另一实施例中,第二电容值小于或等于第一电容值的一半(1/2)。在另一实施例中,第二电容值小于或等于第一电容值的三分之一(1/3)。在又一实施例中,第二电容值小于或等于第一电容值的四分之一(1/4)。

[0071] 上述实施例在理想设置下的示例是,如果微调电容等于1pF,而粗调电容等于10pF。在这种理想设置中,当所有开关都断开时,电容等于0pF。当第一开关闭合时,电路中有1pF。当第二开关闭合时,电路中有2pF,依此类推,直到九个微调开关闭合,得到9pF。然后,第一10pF电容接入电路,九个微调开关断开,总电容为10pF。然后,微调电容器被切换到

11pF至19pF的电路中。然后,可以将另一粗调电容器切换到电路中,且可以将所有微调电容器切换到电路之外,给出20pF。这个过程可以重复,直到达到所需的电容。

[0072] 这也可以更进一步。使用前面的示例,有9个1pF电容器和9个10pF电容器,可变电容器电路可以有甚至更大值100pF,以接通和断开电路。这将允许之前的电容器阵列达到99pF,然后100pF电容器可用于下一次增量。这可以使用更大增量进一步重复,也可以用于任何计数系统。根据累积设置,增加可变电容器的总电容是通过比已经接入的电容器接入更多的粗电容器或更多的细电容器来实现的,而无需断开已经接入的粗电容器。此外,当可变总电容增加并且控制电路没有接入比已经接入的更多粗电容器时,则控制电路接入比已经接入的更多的细电容器,而不切断已经接入的细电容器。关于累积设置的美国专利号10431428和11195698在此全文引入作为参考。注意,所要求保护的发明不限于累积设置的使用。例如,美国专利号10679824和10692699讨论了替代设置,例如“部分二进制”,它们的全部内容通过引用结合于此。

[0073] 图5是可变电容系统155的示意图,用于接通和断开电子可变电容器的分立固定电容器。在该图使用类似于图4的附图标记的情况下,应理解的是,相关部件可以具有类似于图4中讨论的特征。可变电容系统155包括用于提供可变电容的可变电容器151。可变电容器151具有输入113和输出130。可变电容器151包括并联耦合的多个分立固定电容器153。多个电容器153包括第一(细)电容器151a和第二(粗)电容器151b。此外,可变电容器151包括多个开关161。在开关161中,一个开关可操作地串联耦合到多个电容器中的每个,以接通和断开每个电容器,从而使得可变电容器151能够提供变化的总电容。可变电容器151具有可变的总电容,当分立电容器153接通时该总电容增加,当分立电容器153断开时该总电容减少。

[0074] 开关161可以耦合到开关驱动器电路139,用于驱动开关接通和断开。可变电容系统155还可以包括可操作地耦合到可变电容器151的控制单元145。具体地,控制单元145可以可操作地耦合到驱动器电路139,用于指示驱动器电路139切换一个或多个开关161,从而接通或断开一个或多个电容器153。在一实施例中,控制单元145可以形成控制可变电容器的控制单元的一部分,例如指示匹配网络的可变电容器改变电容以实现阻抗匹配的控制单元。驱动器电路139和控制单元145可以具有类似于上面参照图4讨论的特征,因此也可以利用上面讨论的RF扼流圈和滤波器。

[0075] 用于电子可变电容器的开关电路

[0076] 图6示出了根据一实施例的匹配网络的EVC151的开关电路140A的实施例。在示例性实施例中,EVC151是图5的EVC151,但本发明的EVC不限于此,因为它可以具有这里讨论的任何替代特征,包括不同数量的分立固定电容器153,以及与关于图5讨论的不同值的分立固定电容器。此外,EVC可以形成任何类型的匹配网络的一部分,包括这里讨论的各种类型的匹配网络。示例性匹配网络耦合在RF源和等离子体室之间,例如,如前面的图中所示。

[0077] 示例性EVC包括耦合到第一端子113的多个分立固定电容器153A、153B。每个分立电容器153A、153B具有对应的开关161A、161B,其配置为接通分立电容器并断开分立电容器,以改变EVC151的总电容。在示例性实施例中,开关161A与分立电容器153A串联,但本发明不限于此。此外,在示例性实施例中,开关161A是PIN二极管,但本发明不限于此,并且可以是其他类型的开关,例如NIP二极管。在其他实施例中,开关可以是MOSFET、JFET或其他类型的开关。此外,在示例性实施例中,PIN二极管具有公共阳极配置,使得每个PIN二极管

161A、161B的阳极耦合到地40,地40可以是任何公共节点。然而,本发明不限于此,因为在其他实施例中,EVC可以使用公共阴极配置,使得每个PIN二极管的阴极耦合到地40(并且驱动器电路的部件相应地改变)。此外,注意,可以串联使用两个或更多个开关来增加额定电压,和/或可以并联使用两个或更多个开关来增加通道的额定电流。

[0078] 每个PIN二极管开关161A、161B具有其自己的开关电路140A、140B,其连接到控制电路145。开关电路140B示出为包括开关161B、滤波器141B(其可以类似于上述滤波器电路37、41)和驱动器电路139B。滤波器141B可以是例如类似于美国专利号10340879的滤波器电路9的LC电路,或者美国专利号9844127的图6A中的输出207旁边的滤波器电路。这些专利中的每个都在此全文引入作为参考。

[0079] 示例性开关电路140A具有与开关电路140B相同的部件,但更详细地示出了驱动器电路139A。驱动器电路139A可以与PIN二极管161A(或其他类型的开关)集成,或者可以与匹配网络的EVC的分立固定电容器集成。本领域的技术人员还将认识到,驱动器电路139A的某些部件可以用执行相同基本功能的其他部件来替换,同时还更大程度地允许其他电路参数(例如电压范围、电流范围等)的可变性。

[0080] 示例性驱动器电路139A具有两个输入105A-1、105A-2,用于从控制电路接收控制信号,以控制公共输出107A上的电压,公共输出107A连接到PIN二极管161A并驱动其。公共输出107A上的电压在接通状态和断开状态之间切换PIN二极管161A,因此也切换PIN二极管161A所连接的分立电容器153A的接通和断开。在该示例性实施例中,分立电容器的状态跟随相应PIN二极管的状态,使得当PIN二极管接通时,分立电容器也接通,同样,当PIN二极管161A断开时,分立电容器也断开。因此,这里关于PIN二极管161A的状态的陈述固有地描述了EVC151的相应分立电容器153A的伴随状态。

[0081] 在优选实施例中,第一电源开关111A和第二电源开关113A中的每个都是具有体二极管的MOSFET,但在其他实施例中,任一电源开关都可以是其他类型的开关,包括任何其他类型的半导体开关。本发明可以利用各种开关电路配置。例如,本发明可以利用美国专利申请号844127公开的任何开关电路,例如图3、6A、6B中所示的那些,以及美国专利申请号10340879公开的任何开关电路,例如图18所示的开关电路。如上所述,这些专利中的每个都在此全文引入作为参考。

[0082] 在示例性实施例中,高压电源115A连接到第一电源开关111A,提供可切换地连接到公共输出107A的高压输入。低压电源117A连接到第二电源开关113A,提供低压输入,该低压输入也可切换地连接到公共输出107A。在所示的驱动器电路139A的配置中,低压电源117A可以提供约-3.3V的低压输入。这种具有负极性的低压足以提供用于开关PIN二极管161A的正向偏置。对于驱动器电路139A的其他配置,可以使用更高或更低的电压输入,并且低电压输入可以具有正极性,这取决于被控制的电子开关的配置和类型。

[0083] 在示例性开关电路140A中,第一电源开关111A和第二电源开关113A配置为异步地将高压电源115A和低压电源117A连接到公共输出107A,用于在接通状态和断开状态之间切换PIN二极管161A,从而切换相应的分立固定电容器153A接通和断开。高压电源115A为PIN二极管开关161A提供反向偏置DC电压。这可被称为“阻断电压”,因为它反向偏置PIN二极管161A,从而防止电流流动,从而切断其对应的分立电容器153A。如本文所用,术语“阻断电压”将指用于使开关断开或接通其对应的分立电容器的任何电压。还应注意,开关电路不限

于图6中所示的电路,而可以是用于接通和断开分立电容器的任何电路,包括美国专利号9844127中所示的电路,该专利通过引用整体结合于此。

[0084] 在示例性实施例中,控制电路向驱动器电路139A的单独输入105A-1、105A-2提供单独控制信号。在该实施例中,单独输入105A-1、105A-2分别耦合到第一和第二电源开关111A、113A。到单独输入的控制信号可以极性相反。在优选实施例中,第一和第二电源开关161A、113A是MOSFET,并且单独控制信号去往单独驱动器,用于为MOSFET供电。在替代实施例中,控制电路145提供公共输入信号。公共输入信号可以异步地控制第一电源开关111A和第二电源开关113A的接通和断开状态,使得当第一电源开关111A处于接通状态时,第二电源开关113A处于断开状态,类似地,当第一电源开关处于断开状态时,第二电源开关113A处于接通状态。以这种方式,公共输入信号控制第一电源开关111A和第二电源开关113A将高电压输入和低电压输入异步连接到公共输出,用于在接通状态和断开状态之间切换PIN二极管161A。然而,本发明不限于这种异步控制。

[0085] 输入105A-1、105A-2可以配置成接收针对为第一电源开关111A和第二电源开关113A选择的开关类型的任何类型的适当控制信号,例如,该控制信号可以是+15V控制信号。在优选实施例中,驱动器电路具有用于驱动第一电源开关111A和第二电源开关112A中的每个的单独驱动器。在另一实施例中,选择第一和第二电源开关111A、113A,使得它们可以接收公共输入信号。

[0086] 在示例性实施例中,电源118耦合到低压电源117A的输入。在优选实施例中,电源118提供24V DC。然而,本发明不限于此,因为可以利用其他电源。

[0087] 在示例性实施例中,当第二电源开关113A接通时,电流163A在PIN二极管161A和低压电源117A之间流动。同时,电流从电源118流到低压电源117A的输入,并流到地40。传感器可以位于开关电路140A的节点处,以测量与在低压电源117A和PIN二极管开关161A之间流动的电流163A相关的参数。在示例性实施例中,传感器164A位于低压电源117A的输入,并测量从与电流163A相关的电源118流入输入的电流167A。在其他实施例中,传感器可以在开关电路140A中的其他位置,例如在节点165A(低压电源的输出)或节点166A(PIN二极管161A的阳极),或者在驱动器电路和开关之间的滤波器141A的路径中(例如驱动器输出107A或滤波器141A的输出)。在示例性实施例中,参数是在节点处流动的电流值,但在其他实施例中,测量的参数可以是与流过一个或多个开关的电流相关的任何参数(包括电压)。在其他实施例中,该参数是与驱动器电路相关的任何参数。

[0088] 注意,这里讨论的匹配网络可以结合偏置电路,例如2022年4月5日提交的PCT/US22/23395中讨论的那些,其全部内容通过引用结合于此。例如,偏置电路的偏置电感器可以用于切换串联位置的EVC的固定分立电容器,该EVC不接地。

#### [0089] 确定电容值以实现匹配

[0090] 图7是示出根据一实施例的用于匹配阻抗的过程500A的流程图。匹配网络可以包括类似于上面讨论的部件。在一实施例中,利用了图3的匹配网络。在图7的示例性过程500A的第一步,确定RF输入13处的输入阻抗(步骤501A)。输入阻抗基于由RF输入传感器21在RF输入13处检测的RF输入参数。RF输入传感器21可以是配置成检测RF输入13处的RF输入参数的任何传感器。输入参数可以是在RF输入13处可测量的任何参数,包括RF输入13处的电压、电流或相位。在示例性实施例中,RF输入传感器21检测匹配网络11的RF输入13处的电

压、电流和相位。基于由RF输入传感器21检测的RF输入参数,控制电路45确定输入阻抗。

[0091] 接下来,控制电路45确定由等离子体室19呈现的等离子体阻抗(步骤502A)。在一实施例中,等离子体阻抗确定基于输入阻抗(在步骤501A中确定)、串联EVC31的电容和并联EVC33的电容。在其他实施例中,可以使用可操作地耦合到RF输出的输出传感器49进行等离子体阻抗确定,RF输出传感器49配置为检测RF输出参数。RF输出参数可以是在RF输出17处可测量的任何参数,包括RF输出17处的电压、电流或相位。RF输出传感器49可以检测匹配网络11的RF输出17处的输出参数。基于由RF输出传感器21检测的RF输出参数,控制电路45可以确定等离子体阻抗。在其他实施例中,等离子体阻抗的确定可以基于RF输出参数和RF输入参数。

[0092] 一旦等离子体室19的可变阻抗已知,控制电路45可以确定对串联和并联EVC31、33中的一个或两个的可变电容器进行的改变,以实现阻抗匹配。具体地,控制电路45确定串联可变电容器的第一电容值和并联可变电容器的第二电容值(步骤503A)。这些值代表串联EVC31和并联EVC33的新电容值,以实现阻抗匹配,或者至少基本阻抗匹配。在示例性实施例中,第一和第二电容值的确定基于可变等离子体阻抗(在步骤502A中确定)和固定RF源阻抗。

[0093] 一旦确定第一和第二电容值,控制电路45产生控制信号,以将串联可变电容器和并联可变电容器中的至少一个分别改变为第一电容值和第二电容值(步骤504A)。这是在约 $t = -5$ 微秒时完成的。控制信号指示开关电路改变串联和并联EVC31、33之一或两者的可变电容器。

[0094] 在示例性实施例中,当RF源继续向匹配网络的RF输入提供RF信号时,EVC被改变。在改变EVC之前,不需要停止提供RF信号。当RF信号继续被提供给匹配网络时,新电容值的确定和EVC的改变可以连续地(并且重复地)完成。

[0095] 与使用VVC的RF匹配网络的约1-2秒的时间相比,EVC31、33的改变总共花费约9-11微秒。一旦切换到不同的可变电容器,就会有一段等待时间,因为构成EVC的额外分立电容会加入电路并充电。匹配调整过程的这一部分约需要55微秒。最后,RF功率分布403示出在 $t = 56$ 微秒之前从约380mV峰峰值降低到约100mV峰峰值。RF功率分布403的这种降低表示反射功率407的降低,并且它发生在约10微秒的时间段内,此时匹配调整过程被认为完成。

[0096] 改变串联可变电容器和并联可变电容器可以包括向串联驱动器电路39和并联驱动器电路43发送控制信号,以分别控制串联可变电容器和并联可变电容器,其中串联驱动器电路39可操作地耦合到串联EVC31,而并联驱动器电路43可操作地耦合到并联EVC43。当EVC31、33被切换到它们期望的电容值时,输入阻抗可以匹配固定的RF源阻抗(例如50欧姆),从而导致阻抗匹配。如果由于等离子体阻抗的波动,没有产生足够的阻抗匹配,则可以重复500A的过程一次或多次,以实现阻抗匹配,或者至少基本阻抗匹配。

[0097] 使用如图3所示的RF匹配网络11,输入阻抗可以表示如下:

$$[0098] \quad Z_{in} = \frac{(Z_p + Z_L + Z_{series})Z_{shunt}}{Z_p + Z_L + Z_{series} + Z_{shunt}}$$

[0099] 其中, $Z_{in}$ 是输入阻抗, $Z_p$ 是等离子体阻抗, $Z_L$ 是串联电感阻抗, $Z_{series}$ 是串联EVC阻抗, $Z_{shunt}$ 是并联EVC阻抗。在示例性实施例中,使用RF输入传感器21来确定输入阻抗( $Z_{in}$ )。控制电路在任何给定时间都知道EVC阻抗( $Z_{series}$ 和 $Z_{shunt}$ ),因为控制电路用于命令每个串联和并联EVC的各种分立固定电容器接通或断开。此外,串联电感器阻抗( $Z_L$ )是固定值。因此,系统可以使用这些值来求解等离子体阻抗( $Z_p$ )。

[0100] 基于该确定的等离子体阻抗 ( $Z_p$ ) 和已知的期望输入阻抗 ( $Z'_{in}$ ) (通常为50欧姆), 以及已知的串联电感器阻抗 ( $Z_L$ ), 系统可以确定新的串联EVC阻抗 ( $Z'_{series}$ ) 和并联EVC阻抗 ( $Z'_{shunt}$ )。

$$[0101] \quad Z'_{in} = \frac{(Z_p + Z_L + Z'_{series})Z'_{shunt}}{Z_p + Z_L + Z'_{series} + Z'_{shunt}}$$

[0102] 基于新计算的串联EVC可变阻抗 ( $Z'_{series}$ ) 和并联EVC可变阻抗 ( $Z'_{shunt}$ ), 系统然后可以确定串联可变电容的新电容值 (第一电容值) 和并联可变电容的新电容值 (第二电容值)。当这些新的电容值分别用于串联EVC31和并联EVC33时, 可以实现阻抗匹配。

[0103] 计算期望的第一和第二电容值并在一步中达到这些值的示例性方法比逐步移动两个EVC以使误差信号为零或者使反射功率/反射系数最小要快得多。在需要更快调谐方案的半导体等离子体处理中, 这种方法在匹配网络调谐速度方面提供了显著的改进。注意, 这里讨论的用于确定新的EVC电容值的方法仅仅是示例。在其他实施例中, 可以使用其他参数和/或方法来确定新的EVC电容值。例如, 新电容值所基于的参数可以是与等离子体室相关的任何参数。

[0104] 使用参数矩阵确定电容值

[0105] 图8提供了使用参数矩阵来匹配阻抗的替代过程500。在示例性过程中, 控制电路45 (参见图3的匹配网络组件) 配置和/或编程为执行每个步骤。作为两个初始步骤之一, RF输入传感器21在RF输入13处测量RF参数, 并且使用测量的RF参数计算RF输入13处的输入阻抗 (步骤501)。对于该示例性过程500, 在RF输入13处测量正向电压和正向电流。在某些其他实施例中, RF输出传感器49可以在RF输出17处测量RF参数, 尽管在这样的实施例中, 可能需要与下面描述的不同的计算。在其他实施例中, 可以在RF输入13和RF输出17处测量RF参数。

[0106] 耦合在RF源15和等离子体室19之间的阻抗匹配电路可以由本领域技术人员已知的多种类型的参数矩阵之一来表征, 包括双端口参数矩阵。S参数矩阵和Z参数矩阵是这种参数矩阵的两个示例。其他示例包括但不限于Y参数矩阵、G参数矩阵、H参数矩阵、T参数矩阵和ABCD参数矩阵。本领域技术人员还将认识到, 对于诸如匹配网络的电路, 这些不同的参数矩阵可以在数学上从一个转换到另一个。示例性过程500的第二初始步骤是在参数查找表中查找 (步骤502) 阻抗匹配电路的现有配置的参数矩阵。阻抗匹配电路的现有配置由阻抗匹配电路的现有操作参数定义, 特别是串联EVC31和并联EVC33的现有阵列配置。为了实现阻抗匹配, 作为示例性过程500的一部分, 阻抗匹配电路的现有配置被改变为阻抗匹配电路的新配置。

[0107] 参数查找表包括多个参数矩阵, 每个参数矩阵与串联EVC31和并联EVC33的特定配置相关。参数查找表可以包括一个或多个前述类型的参数矩阵。在示例性过程500中, 参数查找表包括至少多个S参数矩阵。在某些实施例中, 参数查找表可以包括至少多个Z参数矩阵。在参数查找表包括多种类型的参数矩阵的实施例中, 不同类型的参数矩阵在参数查找表中以这样的方式相关, 以便消除不同类型的参数矩阵之间的数学转换的需要。例如, T参数矩阵可以作为参数查找表的一部分被包括, 每个T参数矩阵与相关的S参数矩阵相关, 该相关的S参数矩阵将由两个矩阵之间的转换产生。

[0108] 输入阻抗计算 (步骤501) 和参数矩阵查找 (步骤502) 可以任何顺序执行。在计算了输入阻抗 (步骤501) 并且在参数查找表中识别了阻抗匹配电路的现有配置的参数矩阵 (步

骤502)之后,可以使用计算的输入阻抗和现有配置的参数矩阵来计算等离子体或负载阻抗(步骤503)。接下来,根据计算的等离子体阻抗,在阵列配置查找表中查找串联EVC31和并联EVC33的匹配配置,该匹配配置将实现RF源15和等离子体室19之间的阻抗匹配,或者至少基本阻抗匹配(步骤504)。来自阵列配置查找表的这些匹配配置是将导致串联EVC31和并联EVC33的新电容值的阵列配置,利用新的阵列配置和关联的新电容值实现阻抗匹配。阵列配置查找表是串联EVC31和并联EVC33的阵列配置的表,并且它包括当组合使用时串联EVC31和并联EVC33的每个可能的阵列配置。作为使用阵列配置查找表的替代,EVC31、33的实际电容值可在该过程中计算,然而,电容值的这种实时计算固有地比在阵列配置查找表中查找匹配配置慢。在阵列配置查找表中识别出串联EVC31和并联EVC33的匹配配置之后,串联阵列配置和并联阵列配置中的一个或两个被改变(步骤505)为串联EVC31和并联EVC33各自识别出的匹配配置。

[0109] 串联阵列配置和并联阵列配置的改变(步骤505)可以包括控制电路45向串联驱动器电路39和并联驱动器电路43发送控制信号,以分别控制串联阵列配置和并联阵列配置,其中串联驱动器电路39可操作地耦合到串联EVC31,并且并联驱动器电路43可操作地耦合到并联EVC43。当EVC31、33被切换到匹配配置时,输入阻抗可以匹配固定的RF源阻抗(例如50欧姆),从而导致阻抗匹配。如果由于等离子体阻抗的波动,没有产生足够的阻抗匹配,则可以重复500的过程一次或多次,以实现阻抗匹配,或者至少基本阻抗匹配。

[0110] 在结合等离子体室19使用RF匹配网络之前,编译上述过程中使用的查找表。在创建查找表时,在与等离子体室一起使用之前,测试RF匹配网络11以确定与串联EVC31和并联EVC33的每个阵列配置相关的每种类型和负载阻抗的至少一个参数矩阵。由测试产生的参数矩阵被编译到参数查找表中,使得每种类型的至少一个参数矩阵与EVC31、33的相应阵列配置相关。类似地,负载阻抗被编译到阵列配置查找表中,使得每个参数矩阵与EVC31、33的相应阵列配置相关。预编译的查找表可以考虑固定的RF源阻抗(例如50欧姆)、RF源的功率输出和RF源的工作频率,以及与RF匹配网络的操作相关的其他因素。因此,每个查找表可以具有数万个条目,或者更多,以说明EVC31、33的所有可能配置。可能配置的数量主要由构成每个EVC31、33的分立固定电容器的数量决定。在编译查找表时,可以考虑可能的安全限制,例如匹配网络内部关键位置处的最大允许电压和电流,并且这可以用于排除EVC31、33的某些配置的一个或多个查找表中的条目。

[0111] 如本领域已知,S参数矩阵由称为散射参数或简称S参数的分量构成。阻抗匹配电路的S参数矩阵具有四个S参数,即 $S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ 和 $S_{22}$ ,每个S参数表示RF输入13和RF输出17处的电压比。阻抗匹配电路的所有四个S参数都是预先确定和/或计算的,因此完整的S参数矩阵是已知的。其他类型的参数矩阵的参数可以类似地预先确定和/或计算,并合并到参数矩阵中。例如,阻抗匹配电路的Z参数矩阵具有四个Z参数,即 $Z_{11}$ , $Z_{12}$ , $Z_{21}$ 和 $Z_{22}$ 。

[0112] 通过以这种方式编译参数查找表,某些计算的全部时间成本发生在RF匹配网络的测试阶段,而不是在具有等离子体室19的RF匹配网络11的实际使用期间。此外,因为在查找表中定位一个值比实时计算相同的值花费更少的时间,所以使用查找表有助于减少实现阻抗匹配所需的总时间。在整个过程中可能包括数百或数千次阻抗匹配调整的等离子体沉积或蚀刻过程中,这种时间节约可以直接有助于整个制造过程的成本节约。

[0113] 从以控制电路确定等离子体室的可变阻抗并确定串联和并联匹配配置开始的匹

配调谐过程的开始,到匹配调谐过程的结束,当反射回RF源的RF功率降低时,使用EVC的RF阻抗匹配网络的整个匹配调谐过程具有约110微秒或约150微秒或更少的经过时间。匹配调谐过程的单次迭代所经历的这一短时间周期代表相对于VVC匹配网络的显著增加。此外,由于匹配调谐过程的单次迭代所经过的时间周期很短,使用EVC的RF阻抗匹配网络可以迭代地执行匹配调谐过程,重复两个确定步骤,并生成另一个控制信号,用于进一步改变一个或两个电子可变电容器的阵列配置。通过迭代地重复匹配调谐过程,预期在匹配调谐过程的约2-4次迭代内可以产生更好的阻抗匹配。此外,根据匹配调整过程的每次重复所花费的时间,预计可以在500微秒或更短时间内执行3-4次迭代。给定使用VVC的RF阻抗匹配网络的匹配调谐过程的单次迭代的1-2秒匹配时间,这种在一小部分时间内执行多次迭代的能力代表了使用EVC的RF阻抗匹配网络的显著优势。

[0114] 本领域技术人员将认识到,对于使用EVC的RF阻抗匹配网络,若干因素可能对阻抗匹配过程的亚毫秒经过时间有贡献。这些因素可能包括RF信号的功率、EVC的配置和设计、所使用的匹配网络类型以及所使用的驱动器电路的类型和配置。未列出的其他因素也可能影响阻抗匹配过程的总耗时。因此,预期具有EVC的RF阻抗匹配网络的整个匹配调谐过程从过程开始(即由控制电路测量并计算产生阻抗匹配所需的调整)到过程结束(耦合到等离子体室中的RF功率的效率由于阻抗匹配和反射功率的减少而增加的时间点)应该花费不超过约500微秒来完成。即使在500微秒量级的匹配调谐过程中,该处理时间仍比使用VVC的RF阻抗匹配网络有显著的改进。

[0115] 表1表示示出EVC的一个示例与VVC的一个示例的操作参数之间的比较的数据。可以看出,除了支持RF阻抗匹配网络的快速切换之外,EVC还具有多种优势:

[0116] 表1

参数	EVC	典型1000pF 真空电容器
电容	20 pF ~ 1400 pF	15 pF ~ 1000 pF
可靠性	高	低
[0117] 响应时间	~ 500 $\mu$ sec	1 s ~ 2 s
ESR	~ 13 mW	~ 20 mW
电压	7 kV	5kV
电流处理能力	216 A rms	80 A rms
体积	4.5 in <sup>3</sup>	75 n <sup>3</sup>

[0118] 可以看出,除了EVC使快速开关能力成为可能之外,EVC还引入了可靠性优势、电流处理优势和尺寸优势。使用EVC和/或用于EVC的开关电路本身的RF阻抗匹配网络的其他优点包括:

[0119] • 所公开的RF阻抗匹配网络不包括任何移动部件,因此机械故障的可能性降低到可以用作半导体制造过程的一部分的其他完全电路的可能性。例如,典型的EVC可以由粗糙的陶瓷衬底形成,该衬底具有铜金属化以形成分立电容器。移动部件的消除也增加了对由于使用过程中的热波动引起的故障的抵抗力。

[0120] • 与VVC相比,EVC具有紧凑的尺寸,因此减少的重量和体积可以节省制造设施内的宝贵空间。

[0121] • EVC的设计增加了针对特定应用的具体设计需求定制RF匹配网络的能力。EVC可以配置有定制的电容量范围,其中一个示例是非线性电容量范围。这种定制电容量范围可以为更大范围的过程提供更好的阻抗匹配。作为另一示例,定制电容量范围可以在阻抗匹配的某些领域提供更高的分辨率。定制的电容量范围还可以产生更高的点火电压,以更容易进行等离子体撞击。

[0122] • 短匹配调谐过程 (~ 500微秒或更短) 允许RF阻抗匹配网络更好地跟上制造过程中等离子体的变化,从而提高等离子体的稳定性,并为制造过程提供更可控的功率。

[0123] • 在RF阻抗匹配网络中使用EVC (数字控制的非机械设备) 为通过编程微调控制算法提供了更多机会。

[0124] • 与VVC相比,EVC表现出卓越的低频 (kHz) 性能。

[0125] 与多级功率设定点匹配

[0126] 在现代半导体过程中,存在过程需要RF源产生多电平脉冲信号的情况,使得RF信号具有不同幅度水平的循环重复脉冲间隔。在某些情况下,功率设定点幅度水平的变化可能非常频繁,并且在几十到几百微秒的数量级。多级功率设定点可以是两级或更多级。这种脉冲有时被称为电平到电平脉冲,因为功率设定点从一个电平到另一个电平,而不仅仅是在一个电平和零之间。虽然用于产生等离子体的RF能量的强度水平的这种循环调节可以提供优点,但由于不同脉冲电平引起的负载阻抗的快速变化,它也产生了阻抗匹配方面的挑战。

[0127] 基于机电部件 (例如真空可变电容器) 的典型RF匹配网络不能为电平到电平脉冲的短脉冲移动它们的位置,因此它们被设置为 (或者它们的内部自动匹配算法将它们自己设置为) 机电部件设置的平均位置。这不是最佳方法,因为机电匹配网络没有被调谐到一个电平或另一个电平,因此系统中的RF源暴露于每个电平的高反射功率。

[0128] 利用固态技术的RF匹配网络 (可能包括使用EVC) 能够显著更快地调谐,因此能够匹配每个功率设定点电平。下面描述的方法提供了当RF信号具有多级功率设定点时执行RF阻抗匹配的方法。该方法可以应用于基于固态技术的各种类型的RF匹配网络,包括上面讨论的利用一个或多个EVC的那些匹配网络。

[0129] 下面讨论图9和10,以描述用于执行电平到电平脉冲的实施例。在示例性实施例中,利用了两个非零脉冲电平334。然而,本发明不限于此,因为可以使用任何数量的两个或更多个脉冲电平。此外,示例性实施例测量RF输入处的参数电压、电流和相位,并基于这些值生成运行参数相关值 (如下所述),但本发明可以测量与负载相关的任何参数 (一个或多个),并在系统中的其他位置 (例如匹配网络的RF输出) 进行测量,并将参数相关值基于那些不同参数中的任何一个。

[0130] 图9提供了当RF输入信号具有多级功率设定点时阻抗匹配的示例性过程300的流程图。图10提供了具有第一脉冲电平L1和第二脉冲电平L2的RF信号332的曲线图330,以及用于确定参数相关值的时间338、339。在示例性实施例中,脉冲电平以脉冲电平间隔333、334周期性变化。

[0131] 回到图9,匹配网络的控制电路检测是否正在提供第一脉冲电平 (操作302)。如果是,控制电路测量与第一脉冲电平的负载相关的参数 (操作304),在该实施例中,该参数包括匹配网络的输入处的电压 (V)、电流 (I) 和相位 ( $\Phi$ ) (参见图10中的参数336)。这些值可以

独立于RF源进行测量,或者系统可以在RF源对其进行采样时同步采样。基于所测量的参数,控制电路将确定第一脉冲电平的相关值(操作306),该参数相关值将用于改变EVC(操作308),只要控制单元确定对EVC的改变是许可的。

[0132] 参数相关值可以是基于一个或多个测量参数的任何值。在其最简单的形式中,参数相关值可以是测量参数本身。然而,在示例性实施例中,参数相关值基于先前确定的参数相关值。具体地,新的参数相关值是当前测量的参数和预定数量的先前确定的参数相关值的平均值。例如,在时间338的最后时刻,参数相关值是时间338的最后时刻(当前时间)的参数值和在前三次确定的参数相关值的平均值。在其他实施例中,可以使用使用先前参数相关值的其他方法。

[0133] 在示例性实施例中,参数相关值用于计算匹配网络的RF输入处的输入阻抗( $Z_{\text{input low}}$ )。在其他实施例中,可以确定其他值,例如匹配网络的RF输入处的反射系数( $\Gamma_{\text{input low}}$ )。示例性系统使用计算的输入阻抗( $Z_{\text{input low}}$ ) (或相关值,比如 $\Gamma_{\text{input low}}$ )和匹配网络的参数矩阵(如上述的参数矩阵之一)来确定负载阻抗( $Z_{\text{output low}}$ )。接下来,系统使用确定的负载阻抗以及匹配输入处的所需输入阻抗(通常为 $50+j0$ )来确定匹配网络中EVC的最佳配置,即确定EVC的分立电容的最佳位置( $\text{EVC1}_{\text{low1}}$ 和 $\text{EVC2}_{\text{low2}}$ )。在示例性实施例中,匹配网络使用两个EVC,尽管在其他实施例中可以使用更多或更少的EVC。在另一实施例中,系统可以结合改变RF频率来改变一个或多个EVC,从而使用电容器调谐和频率调谐的组合。在该实施例中,系统将确定最佳EVC配置和最佳RF频率值(例如 $\text{EVC1}_{\text{low1}}$ 和 $\text{freq}_{\text{low1}}$ )。在示例性实施例中,匹配网络接下来将EVC改变为它们的新配置。因此,EVC1被改变到 $\text{EVC1}_{\text{low1}}$ 位置,并且EVC2被改变到 $\text{EVC2}_{\text{low2}}$ 位置。在其他实施例中,可以使用其他配置,例如改变到 $\text{EVC1}_{\text{low1}}$ 和 $\text{freq}_{\text{low1}}$ 。注意,本发明不限于上述用于确定匹配阻抗的方法。在确定参数相关值和匹配配置之间,可以省略这些步骤中的一个或多个,和/或用最终确定新匹配配置的另一步骤来代替。例如,虽然前述实施例基于输入阻抗或反射系数来执行匹配,但在其他实施例中,可以基于替代值来执行匹配,例如脉冲期间的最大传递能量或脉冲期间的最小能量损失。此外,匹配可以基于RF输入相位和/或幅度误差,基于测量的反射功率,或者基于在匹配网络的输出处直接测量的负载阻抗。

[0134] 注意,该系统可以包括限制电容器位置在给定时间可以改变的程度的某些方案。例如,可以防止执行提供匹配配置的至少一个EVC的改变,直到从至少一个EVC的先前改变起已经过去了预定时间。这种方案可以确保经过了足够的时间,以允许先前的电容器改变生效。此外,在某些情况下,保护方案可以允许一个EVC改变到新确定的位置,但不允许另一个(或多个EVC)移动到新确定的位置。在其他实施例中,保护方案可以防止电容器位置或频率的任何数量的改变。在示例性实施例中,将进行保护方案所允许的改变,而其他电容器位置(或RF频率)将保持在其当前位置(或频率)。

[0135] 如图10所示,在第一脉冲间隔333期间,控制电路将在若干次338测量参数,并在每次338重复步骤302-308,定期更新参数相关值。在示例性实施例中,用于计算新的参数相关值的时间338(和时间339)被4微秒的时间间隔340分开。在其他实施例中,时间间隔340可以是不同的持续时间。

[0136] 在第一脉冲间隔333期间,在执行第一级过程301A的同时,执行独立的第二级过程301B。当检测到第一脉冲电平时(操作302),没有检测到第二脉冲电平(操作312)。在该第一

脉冲间隔333期间,当第一级过程301A正在测量参数以确定参数相关值并相应地改变EVC时,第二级过程301B正在确定第二脉冲电平的参数相关值(操作320)而不测量参数。这可以通过多种方法来实现。在示例性实施例中,假设当第二脉冲电平L2开启时存在先前的参数测量,参数相关值将基于预定数量的先前确定的参数相关值。例如,当前参数相关值可以基于预定数量的先前确定的参数相关值的平均值。例如,当脉冲开启时,参数相关值是当前测量的参数值和三个先前确定的参数相关值的平均值,而当脉冲关闭时,参数相关值是四个先前确定的参数相关值的平均值。因此,即使当给定的脉冲电平关闭时,也可以在每个时间间隔340定期产生新的参数相关值。参数相关值不仅仅是在脉冲电平重新开启之前保存在存储器中的先前测量的参数值,而是(对于每个脉冲电平)即使在给定脉冲电平关闭时也以规则的间隔重新确定的值,以创建值的数据总线。

[0137] 在第二脉冲间隔335,第一脉冲电平L1关闭,第二脉冲电平L2开启。当这发生时,第一脉冲电平L1和第二脉冲电平L2交换角色。对于第一脉冲电平(关闭),在时间339确定参数相关值,而不使用新测量的参数(操作310),类似于关于第二电平过程的操作320描述的过程。对于第二脉冲电平(开启),在时间339使用新的参数测量值(314)确定参数相关值(操作316),并且相应地改变至少一个EVC(操作318)。用于确定参数、参数相关值和匹配配置的不同选项适用于第一级过程301A和第二级过程301B。

[0138] 上面公开的用于在电平到电平脉冲期间阻抗匹配的过程提供了多个优点。在收集与参数相关的数据时没有中断,并且为每个功率水平收集的数据集实际上是连续的。结果,控制回路可以在任何时候访问该数据,以确定新的EVC和/或频率设置。因为在优选实施例中,该数据也依赖于最后几个测量值的平均,所以所公开的方法减少了与停止和开始测量过程相关的噪声和突然的测量变化。此外,所公开的确定每个电平的参数值的方法,不管该电平是开启还是关闭,都允许控制系统将每个电平视为它自己的匹配网络,因此增加了控制系统对多电平脉冲的灵活性和可扩展性。

[0139] 上述过程可以作为制造半导体的方法的一部分来执行。这种制造方法可以包括将衬底放置在等离子体室中,该等离子体室配置成将材料层沉积到衬底上或者从衬底蚀刻材料层;以及通过将来自RF源的RF功率耦合到等离子体室内来激励等离子体室内的等离子体,以执行沉积或蚀刻。此外,上述匹配网络可以形成半导体处理工具(例如图3中的工具86)的一部分,该工具包括等离子体室19和匹配网络11A。

[0140] 与CW源和脉冲源匹配

[0141] 如上所述,在半导体制造过程中,有时使用多个RF功率源来点燃和/或控制等离子体特性。例如,多个RF源可以用来提供不同频率的RF信号。在一些系统中,更高频率的RF源(例如13MHz)可用于产生更高密度的等离子体。但因为如果频率高,等离子体中的离子可能不会快速移动,所以系统也可以使用较低频率的RF源(例如2MHz或400kHz)来移动离子。

[0142] 这种多源系统170的示例在图11中示出,其中该系统包括连续波(CW)源(“CW源”)171和脉冲源173。术语“连续波”在这里被理解是指振幅和频率基本恒定的电磁波,或者正弦波。多个源171、173可以是相同的频率或不同的频率。类似地,每个的功率水平可能不同。RF源171、173可以具有上面关于RF源或RF发生器讨论的任何特征。如将在下面更详细解释,单个系统中CW源和脉冲源的共存会影响匹配的执行方式。

[0143] 用于向等离子体室提供RF功率的典型设置包括至少一个RF源(例如RF发生器)

171、173,其向至少一个RF匹配网络172、174提供功率,该网络将功率传送到等离子体室175。匹配网络172、174由一个或多个控制电路178控制。(关于匹配网络、控制电路和等离子体室如何操作的更多细节,参见上面的讨论。)这种设置可以有多种变型,其中RF源和RF匹配网络在单独的外壳中,功率通过合适的RF同轴电缆在它们之间传输。在其他变型中,RF源和RF匹配网络可以在同一外壳中,其间的RF同轴电缆由短同轴电缆或带代替。RF匹配网络中的电抗元件可以是机电的,例如可变电感器或可变电容器,或者它们可以是电子可变类型的,例如这里讨论的固态电子可变电容器(EVC)。

[0144] 如上面更详细描述,半导体制造系统170可以具有传感器来采样信号。这种传感器176、177分别示出在CW匹配172和脉冲匹配174的输入处。它们与图2的传感器21相当。类似于图2,传感器也可以位于其他位置,例如在匹配输出处,如图2中传感器49所示。由传感器176、177采样的信号可被处理以控制RF匹配网络。例如,传感器可以是匹配网络的输入或输出处的定向耦合器或电压-电流(VI)和相位传感器。匹配网络的自动控制改变内部电抗元件(例如图2的可变电容器31、33),以将变化的等离子体负载阻抗转换成与RF源(例如RF源和RF源与匹配网络之间的同轴电缆)的输出阻抗匹配的输入阻抗。

[0145] 然而,在CW和脉冲条件下调谐负载阻抗的方法可能不同。图12是示出CW模式下RF源171的连续采样方法的图190。该图示出了在CW匹配172的RF输入处由传感器176采样(或从传感器采样的值导出)的电压(由波形191表示)随时间的变化。每个指示的时间( $T_1, T_2, T_3$ 等)可以指示采样发生的时间。还要注意,图12、13和15没有示出原始的AC信号,在CW信号的情况下,该信号将表现为连续的正弦波。相反,波形191(以及图13的波形196和图15的波形212)可被理解为描绘原始AC信号的包络,或者从原始AC信号导出的DC信号。此外,虽然图12和图13示出了电压参数的采样,如以上关于图10讨论,但也可以采样其他参数,例如电流和/或相位。注意,参数可以随着等离子体室中条件的改变而改变。

[0146] 根据连续采样方法,匹配网络172可以连续采样参数,并将匹配网络172的电抗元件(例如可变电容器)调整到最佳位置,以在匹配网络的输入处提供最小反射功率。因此,采样发生在时间 $T_1, T_2, T_3$ 等。

[0147] 相比之下,图13是示出了用于脉冲的RF源173的“采样保持”方法的图195。该图类似于图10中所示的那些图,其中以规则的时间间隔对多级信号进行采样。该图示出了传感器177在脉冲匹配174的RF输入处随时间采样的电压(由波形196表示)。(在其他实施例中,可以采样其他参数,例如电流或相位。)脉冲由波形196的部分196A和196B示出。根据该方法,匹配网络174仅在RF脉冲开启的时间(时间197A、197B)采样传感器信号(或仅使用从采样传感器信号获得的值),因此不在RF脉冲关闭的时间(时间198A、198B)采样(或不使用从采样传感器信号获得的值),而是在存储器中“保持”在前一RF脉冲开启周期期间采样的信号或参数值。因此,例如,采样发生在时间 $T_1$ 到 $T_4$ ,不发生在时间 $T_5$ 到 $T_{10}$ ,从时间 $T_{11}$ 恢复等。这样,当RF源脉冲时,匹配网络仅使用在RF脉冲开启197A、197B期间采样的信号和参数值进行调谐。

[0148] 在同一系统中使用CW和脉冲源的挑战

[0149] 当一个RF源是CW,而另一个是脉冲时,可能会出现这个问题。当脉冲RF功率被传送到等离子体室时,等离子体负载阻抗以脉冲频率变化。回到图11,这使得CW源171看到脉冲等离子体,其负载阻抗以脉冲频率变化。但如果CW匹配172处于CW模式,因为它自己的源171是

CW,所以它将如图12所示连续采样传感器信号。使用诸如真空可变电容器(VVC)的机电元件的典型RF匹配网络不能调谐到这种快速变化的等离子体负载,因此一些入射功率被反射回RF发生器。在半导体处理中,输送到等离子体室的功率和处理本身受到非常严格的控制,这种反射回RF发生器的功率增加了等离子体处理的变化,并最终增加了处理产量。

[0150] 如下文将更详细描述,公开了用于系统中的阻抗匹配的系统和方法,该系统包括CW RF源(配置为向负载提供CW RF信号)和脉冲RF源(配置为向负载提供脉冲RF信号,其中脉冲RF信号可以具有持续时间不同的多个脉冲电平)。匹配网络可操作地耦合在CW RF源和负载之间,该匹配网络包括至少一个可变电抗元件(其可以是机械可变的或电子可变的)。控制电路可以可操作地耦合到(a)匹配网络和(b)脉冲RF源或位于脉冲RF源和负载之间的传感器中的至少一个,如图11所示。在高电平,控制电路可被理解为执行以下操作:接收指示脉冲RF信号的一个或多个信号;选择脉冲RF信号的一部分(例如在不同脉冲电平持续时间之间选择,如下面更详细讨论);在脉冲RF信号的选择部分期间(例如在选择脉冲电平持续时间期间)采样至少一个参数;以及通过基于采样的至少一个参数改变至少一个可变电抗元件,使匹配网络在CW RF源和负载之间阻抗匹配。注意,引起阻抗匹配将减少相关RF源的反射功率,但不需要完全消除任何这种反射功率。

[0151] 下面更详细讨论的第一种方法被称为“改进的采样保持”方法。在这种方法中,脉冲RF信号的一部分的选择可以在不同的脉冲电平持续时间之间选择。例如,控制电路可以确定哪个脉冲电平持续时间更长,然后基于在更长的脉冲持续时间期间发生的采样,使CW源的匹配网络匹配。下面更详细讨论的第二种方法专用于固态匹配,在这里称为“电平到电平”方法。在该方法中,对于第一脉冲电平,控制电路识别脉冲RF信号的第一电平持续时间部分,并在该时间期间采样与CW源相关的参数,以引起第一脉冲电平的阻抗匹配。此外,对于第二脉冲电平,控制电路识别作为第二时间电平持续时间的脉冲RF信号部分,并在该时间期间采样与CW源相关的参数,以引起第二脉冲电平的阻抗匹配。控制电路可以在匹配每个脉冲电平之间交替,具有用于每个脉冲电平的独立参数数据。

#### [0152] 与CW源和脉冲源的改进的采样保持匹配

[0153] 下面提供了当在同一系统中使用CW源和脉冲源时匹配的第一解决方案。如下面将更详细解释,CW源使用改进的采样保持方法来解决脉冲等离子体的存在。该方法可以使用来自脉冲RF源的脉冲信息来控制CW如何匹配,并且源控制匹配操作。

[0154] 图14是根据一实施例的使用改进的采样保持方法的阻抗匹配方法的流程图。下面的描述将参考图11-14。在操作201中,CW RF源171向负载(等离子体室175)提供CW RF信号191。CW信号可以类似于图12所示的信号。在操作202中,脉冲RF源173向负载(等离子体室175)提供脉冲RF信号,例如图13的脉冲RF信号196。注意,这里讨论的脉冲RF源可以包括例如能够提供脉冲信号的RF发生器。脉冲RF源可替代地包括RF发生器和单独的脉冲控制器,其调制由RF发生器输出的RF信号,从而产生脉冲RF信号。这些示例是非限制性的。示例性脉冲RF信号196具有第一脉冲电平L1,其具有第一脉冲电平持续时间197A,以及第二脉冲电平L2,其具有第二脉冲电平持续时间198A。注意,在该实施例中,第一脉冲电平L1是开启状态,第二脉冲电平是关闭状态。然而,本发明不限于此。例如,第一和第二脉冲电平可以都是非零电平。此外,RF信号可以具有两个以上的非零脉冲电平。

[0155] CW匹配172可操作地耦合在CW RF源171和等离子体室175之间。匹配网络包括至少

一个可变电抗元件。这个可变电抗元件可被调节以引起或帮助引起阻抗匹配。它可以是机械可变电容器或电感器,例如真空可变电容器,或者电子可变(固态)电容器或电感器,其中部件电抗元件是固定电容器或固定电感器(例如如上所述的电子可变电容器)。在某些实施例中,可以通过改变CW RF信号的频率来进一步实现阻抗匹配。

[0156] 控制电路178耦合到CW匹配172和脉冲匹配174。示例性控制电路可操作地耦合到两个匹配,而在其他实施例中,控制电路可以包括不止一个控制电路,例如每个匹配具有控制电路。在步骤203,控制电路178接收指示脉冲RF源173的第一脉冲电平持续时间197A和第二脉冲电平持续时间198A的一个或多个信号。这些指示脉冲电平持续时间的信号可以例如从脉冲源173、从传感器177或从脉冲匹配174接收。在步骤204,控制电路基于(a)哪个持续时间更长,和/或(b)哪个持续时间导致反射到CW RF源的功率更少,来选择第一脉冲电平持续时间和第二脉冲电平持续时间之一。注意,传感器177和脉冲匹配174对于这里公开的实施例都不是必需的。

[0157] 关于方法(b)(选择哪个持续时间导致较少的功率被反射到CW RF源),该确定可以基于(i)在第一脉冲电平持续时间期间确定反射相关值,以及(ii)在第二脉冲电平持续时间期间确定反射相关值。例如,反射相关值可以是反射系数,其表示反射波的振幅与入射波的比率,并且有时被称为伽马。该值可由传感器176在RF源输出和匹配输入处(或在匹配输出处)测量。在其他实施例中,反射相关值可以是反射功率,其可以在类似位置测量。系统可以在每个持续时间期间确定反射相关值,以确定哪个持续时间导致较小的反射功率(例如较低伽马),然后选择该持续时间。

[0158] 在步骤205,控制电路178然后将匹配网络172的至少一个可变电抗元件改变到新的位置,使得匹配网络172执行CW RF源171和负载175之间的阻抗匹配。注意,这里使用的术语“位置”泛指可变电抗元件的任何位置、配置或值。例如,VVC的新位置可以是部件的新物理位置,或者是通过改变VVC而产生的新电容值。此外,EVC的新位置可以指部件固定电容器的一组新的开启/关闭状态(配置),或者通过改变部件固定电容器的开启/关闭状态而产生的新电容值。

[0159] 新位置基于在所选持续时间期间采样的至少一个参数值。因此,例如,如果持续时间基于哪个持续时间更长,则将选择比开启持续时间197A更长的关闭持续时间198A。因此,新位置将基于在时间 $T_5$ 至 $T_{10}$ 中的一个或多个时间采样的参数,而不是基于在非选择(开启)持续时间(时间 $T_1$ 至 $T_4$ )期间采样的参数。在该实施例中,随后将基于在时间 $T_{11}$ 至 $T_{14}$ 期间采样的至少一个参数来执行匹配,而不是在时间 $T_{15}$ 至 $T_{20}$ 期间。这个过程可以随着每个新脉冲继续重复。如上所述,在其他实施例中,所选择的持续时间可以基于哪个电平和相关的持续时间导致较少的功率被反射。在又一实施例中,系统可以基于哪个持续时间更长来选择持续时间,但当持续时间相同时,系统选择导致较少功率被反射的持续时间。在其他实施例中,可以使用其他因素来选择用于匹配的持续时间。

[0160] 在另一实施例中,对于每个持续时间,控制电路可以确定在该持续时间引起最小反射功率的匹配VRE位置,然后确定在那些匹配VRE位置之间的新VRE位置,使得新VRE位置提供对于第一和第二脉冲电平的整个持续时间最小的总反射功率。

[0161] 在又一实施例中,控制电路可以对传感器信号进行采样,并且在多个脉冲持续时间内的脉冲持续时间内确定反射功率,然后使用算法来最小化反射功率随时间的积分(即

总和),而不仅仅是在一个点处。该算法可被设计成在脉冲电平持续时间中的特定时间向室输送最大功率,而不一定是最小反射功率。

[0162] 上述过程可以作为制造半导体的方法的一部分来执行。这种制造方法可以包括将衬底放置在配置为将材料层沉积到衬底上或从衬底蚀刻材料层的等离子体室中,以及通过将来自RF源171、173的RF功率耦合到等离子体室175中来激励等离子体室内的等离子体,以执行沉积或蚀刻。此外,上述匹配网络可以形成半导体处理工具(例如图11的工具179)的一部分,该工具包括等离子体室175、匹配网络172和控制电路178。

#### [0163] 与CW源和脉冲源的电平到电平固态匹配

[0164] 上述修改的采样保持方法可以用于各种匹配网络,包括那些非固态的匹配网络。以下替代方法专用于固态匹配网络,例如那些使用电子可变电容器或电感器和/或频率调谐来执行阻抗匹配的网络(与使用例如机械可变电抗元件的匹配网络相反)。上述实施例使用电子可变电容器(EVC)作为其可变电抗元件,但本发明不限于此。

[0165] 如上所述,固态匹配网络足够快以在多电平脉冲信号的每个电平进行调谐(电平到电平脉冲)。回到图11,半导体制造系统170可以包括两个RF源—脉冲源173和连续波(CW)源171。在如图15的图210所示的以下实施例中,脉冲源173提供包括两个非零脉冲电平L1、L2的多电平脉冲信号212,尽管本发明不限于此。上述电平到电平方法利用了固态匹配网络的速度,使系统能够在每个电平进行调谐,而不是选择一个电平或使用共享值。下面描述的电平到电平方法将每个电平的调谐应用于CW源的匹配。

[0166] 如上所述,当系统同时具有脉冲和CW RF源时,脉冲RF源使等离子体产生脉冲,从而对CW RF源和匹配产生挑战,即连续采样并期望一致的等离子体阻抗。虽然改进的采样保持方法为CW端提供了一种解决这种脉冲等离子体的方法,但以下电平到电平方法利用固态匹配网络的速度解决了这一问题。

[0167] 根据这种方法,控制电路使用脉冲信息来控制CW侧的匹配。下面的描述将参考图11的框图、图15的曲线图210和图16的流程图215。CW RF源171向等离子体室175提供CW RF信号(操作216)。脉冲RF源173向等离子体室175提供脉冲RF信号212(操作217),脉冲RF信号212包括具有第一脉冲电平持续时间213A的第一脉冲电平L1和具有第二脉冲电平持续时间213B的第二脉冲电平L2。注意,其他实施例可以使用任何数量的脉冲电平。CW匹配网络172可操作地耦合在CW RF源171和等离子体室175之间。示例性CW匹配网络包括至少一个电子可变电抗元件(EVRE)(例如参见图2和EVC31、33)。控制电路可以从例如脉冲源173、传感器177或脉冲匹配174接收关于脉冲电平持续时间的信息。

[0168] 控制电路178配置成接收指示在第一脉冲电平持续时间197A期间由传感器176采样的参数的信号(操作218)。对于第一脉冲电平,控制电路还配置为通过基于在第一脉冲电平持续时间期间采样的参数值改变至少一个EVRE,使得阻抗匹配网络能够实现CW RF源和等离子体室之间的阻抗匹配(操作219)。

[0169] 控制电路也可以对第二脉冲电平执行类似的操作。也就是说,控制电路178接收指示在第二脉冲电平持续时间期间采样的参数值的信号(操作220)。然后,对于第二脉冲电平,控制电路通过基于在第二脉冲电平持续时间期间采样的参数值改变至少一个EVRE,使得阻抗匹配网络能够实现CW RF源和负载之间的阻抗匹配(操作221)。因此,第一电平匹配基于第一电平的采样数据,第二电平匹配基于第二电平的采样数据。

[0170] 控制电路(可以是用于CW匹配和脉冲匹配中的每个的单个控制电路或电路组合)可以分别存储每个脉冲电平的采样信号。例如,如果传感器176是电压、电流和相位传感器,则传感器176可以在第一脉冲电平持续时间内采样(并且控制电路可以存储其参数值)电压、电流和相位(以及来自其他传感器的其他相关的RF信号),并且在第二脉冲电平持续时间内单独存储这些值。因此,对于每个电平,控制电路可以存储相应的一组采样值,这些采样值用于确定匹配网络输入处的最小反射功率的最佳匹配设置(例如最佳EVC位置)。CW匹配网络然后可以与变化的RF脉冲同步地在这两个匹配设置(例如EVC位置)之间切换,使得每个脉冲电平被最佳地调谐以在匹配的输入处提供最小的反射功率。因此,当脉冲RF源在第一脉冲电平和第二脉冲电平之间交替时,控制电路可以重复前述操作。如果传感器176基于定向耦合器技术,可以应用类似的控制算法,对于每个脉冲电平持续时间采样正向和反射功率信号。

[0171] 上述系统170可以包括可操作地耦合在脉冲RF源173和等离子体室175之间的第二匹配网络(脉冲匹配174)。脉冲匹配174也可以包括至少一个EVRE。脉冲匹配可以通过类似于上述CW匹配172的方法实现脉冲RF源和等离子体室之间的阻抗匹配。也就是说,对于第一脉冲电平,可以基于在第一脉冲电平持续时间期间采样的参数值来改变脉冲匹配的至少一个EVRE。对于第二水平,脉冲匹配174的至少一个EVRE可以基于在第二脉冲电平持续时间期间采样的参数值而改变。

[0172] 注意,这里讨论的EVRE可以是任何类型的电子可变电抗元件,包括电子可变电容器,例如上面讨论的包括并联耦合的固定电容器和电子可变电感器的EVC。也可以通过改变CW RF信号的频率(频率调谐)来实现匹配。

[0173] 此外,控制算法可被设计成通过不断计算最佳匹配位置来“学习”最佳匹配(例如EVC)位置,并且当发现功率水平和匹配位置以可预测的模式变化时,不再计算新的EVC位置,而是移动到由机器学习算法确定的新位置。

[0174] 上述过程可以作为制造半导体的方法的一部分来执行。这种制造方法可以包括将衬底放置在配置为将材料层沉积到衬底上或从衬底蚀刻材料层的等离子体室中,以及通过将来自RF源171、173的RF功率耦合到等离子体室175中来激励等离子体室内的等离子体,以执行沉积或蚀刻。此外,上述匹配网络可以形成半导体处理工具(例如图11的工具179)的一部分,该工具包括等离子体室175、匹配网络172和控制电路178。

[0175] 还应注意,上文关于图9和图10所讨论的电平到电平匹配所讨论的附加考虑可被结合到上述多源匹配方法中。

[0176] 虽然这里讨论的匹配网络的实施例已经使用了L或pi型配置,但应当注意,所要求保护的匹配网络可以其他匹配网络配置来配置,例如“T”型配置。除非另有说明,否则本文讨论的可变电容器、开关电路和方法可以与适于RF阻抗匹配网络的任何配置一起使用。

[0177] 虽然这里讨论的实施例使用匹配网络中的一个或多个可变电容器来实现阻抗匹配,但应当注意,可以使用任何可变电抗元件。可变电抗元件可以包括一个或多个分立电抗元件,其中电抗元件是电容器或电感器或类似的电抗设备。

[0178] 本申请通过引用将其全部共同拥有的美国专利号10460912、美国公开号US2021/0327684、美国公开号2021/0327684和美国专利号10984985并入。

[0179] 虽然已经针对包括实现本发明的当前优选模式的具体示例描述了本发明,但本领域

域技术人员将理解,存在上述系统和技术的许多变化和置换。应当理解,在不脱离本发明的范围的情况下,可以利用其他实施例,并且可以进行结构和功能上的修改。因此,本发明的精神和范围应当如所附权利要求中阐述的那样被宽泛地解释。

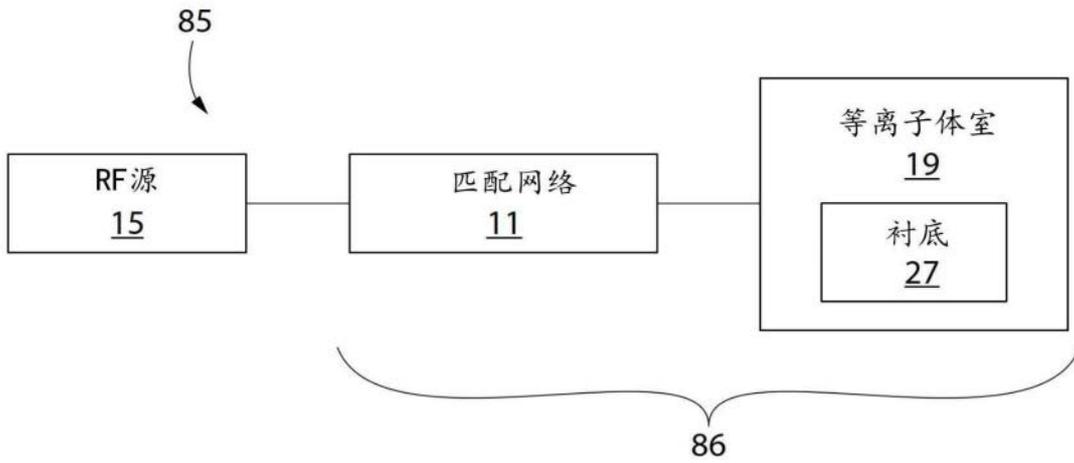


图1

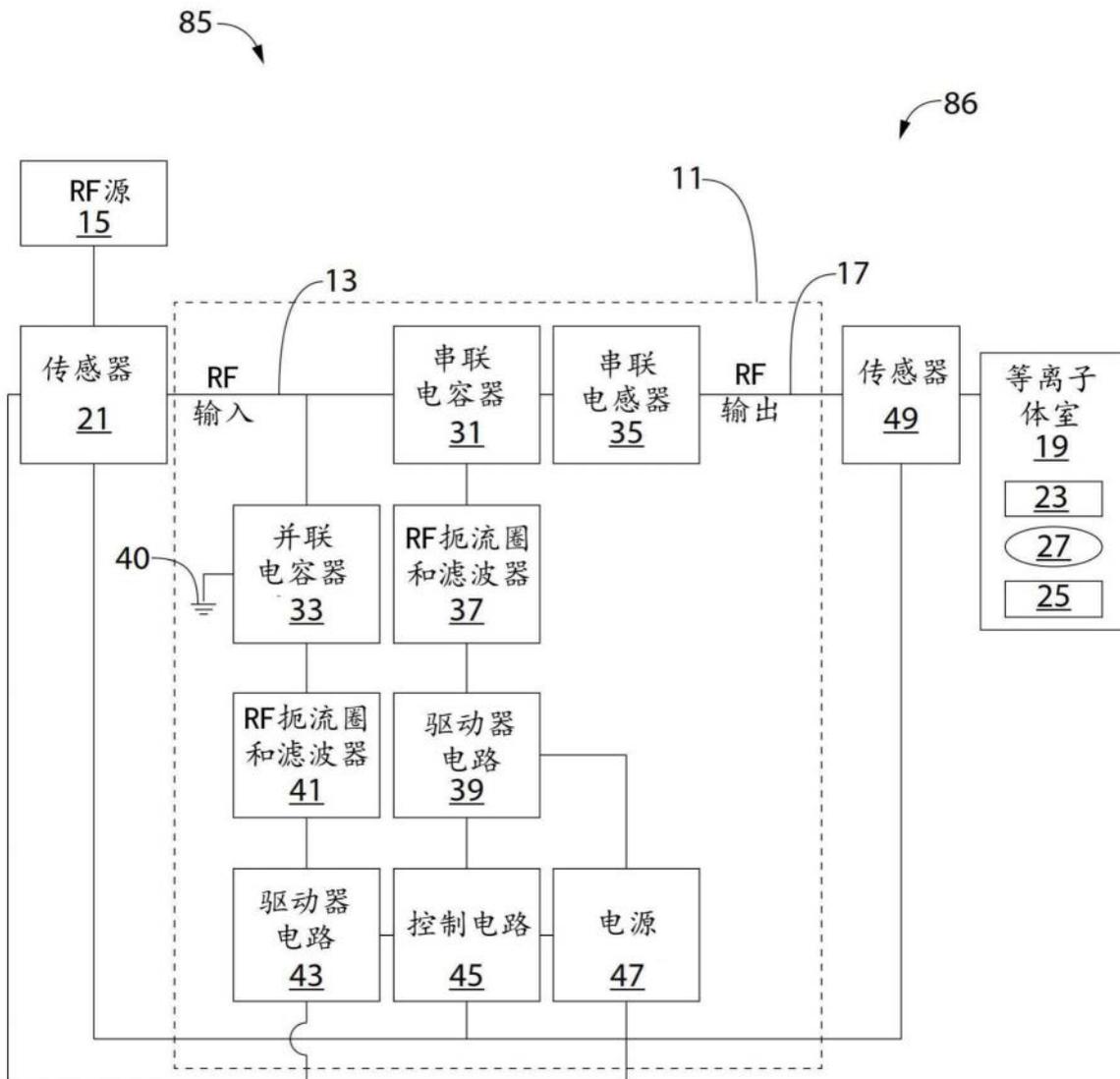


图2

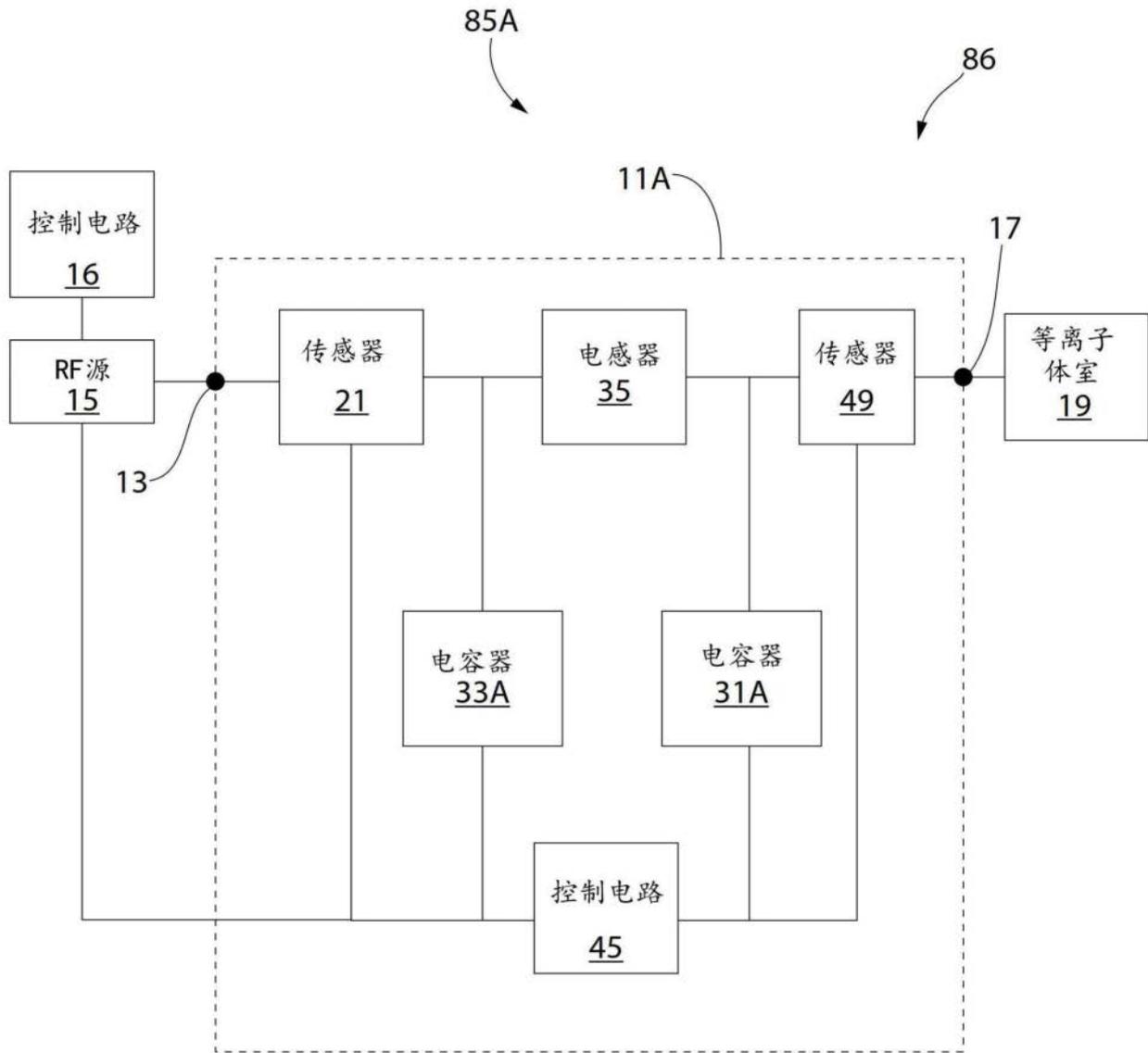


图3

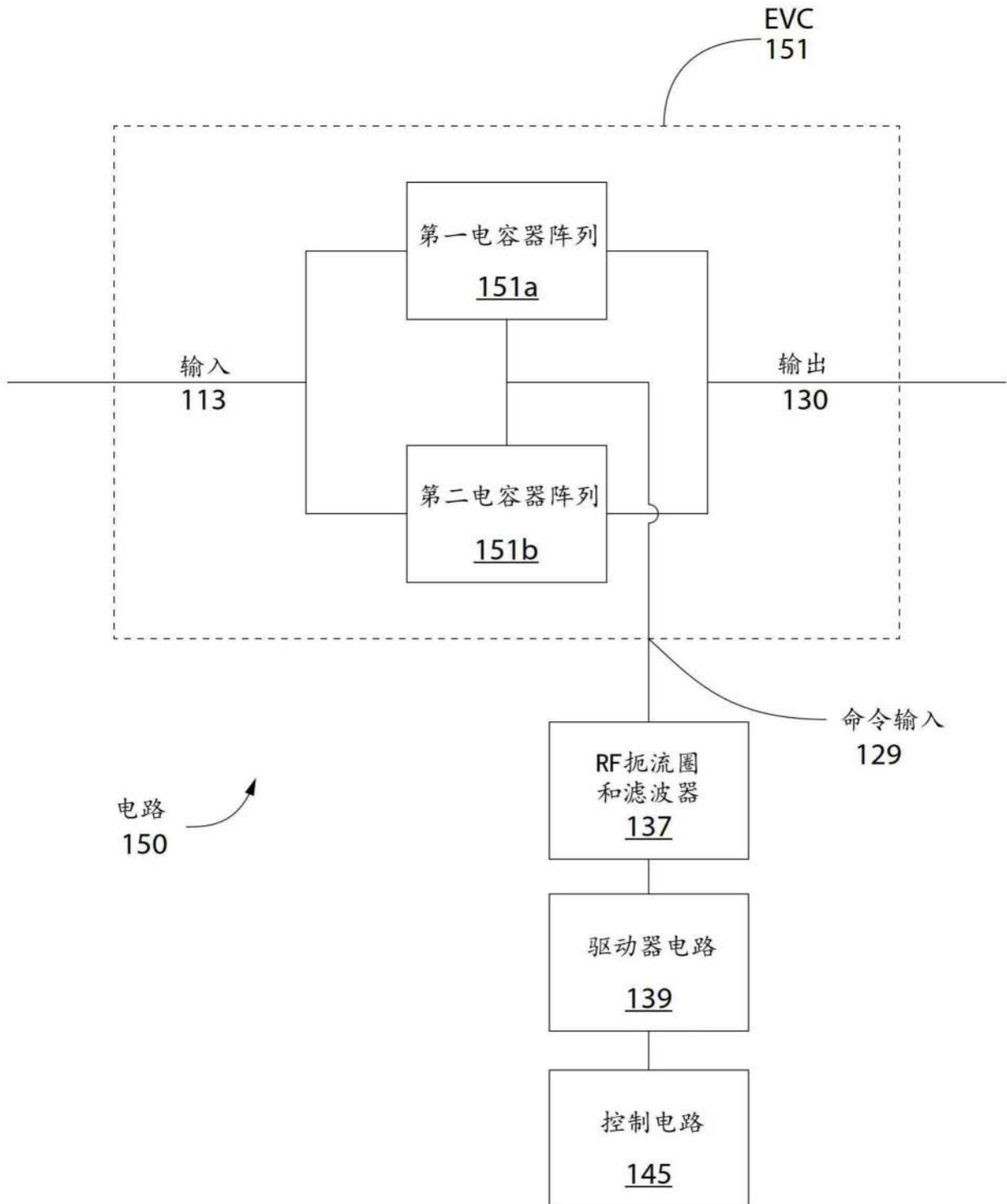


图4

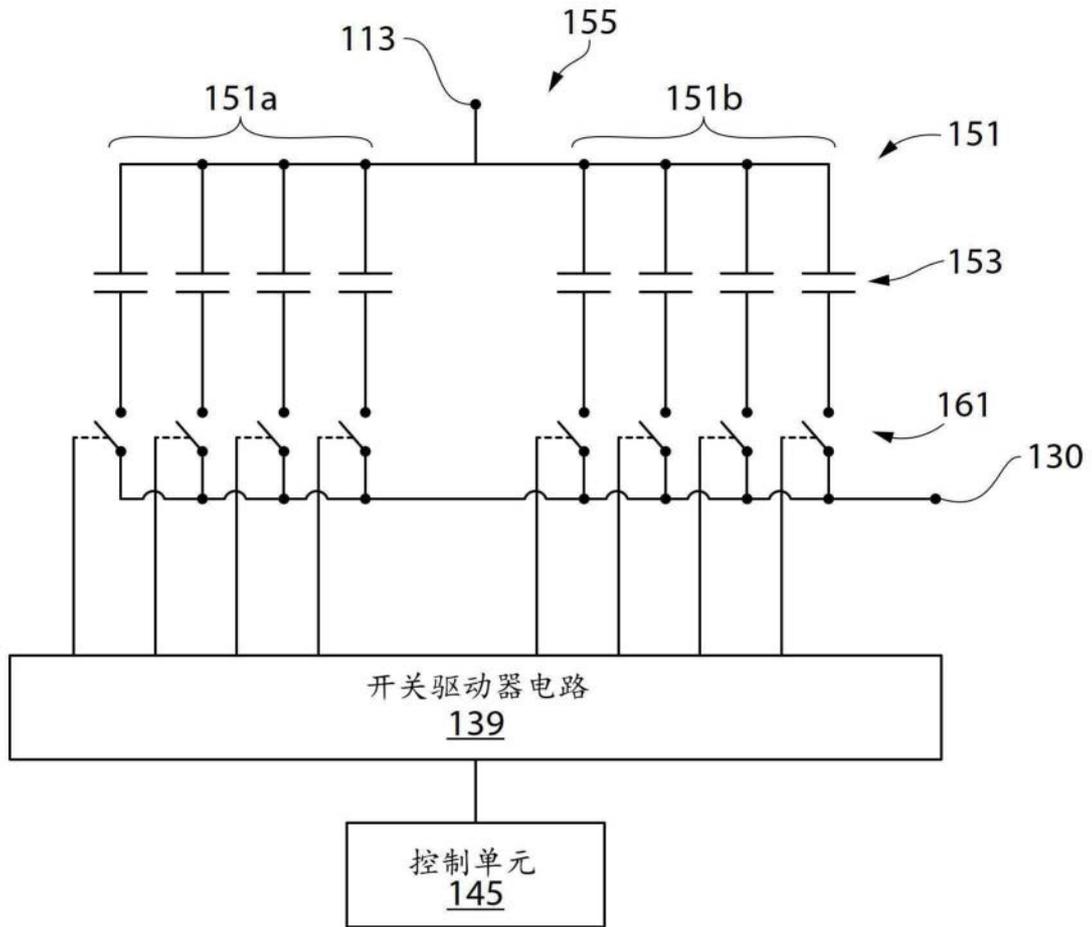


图5

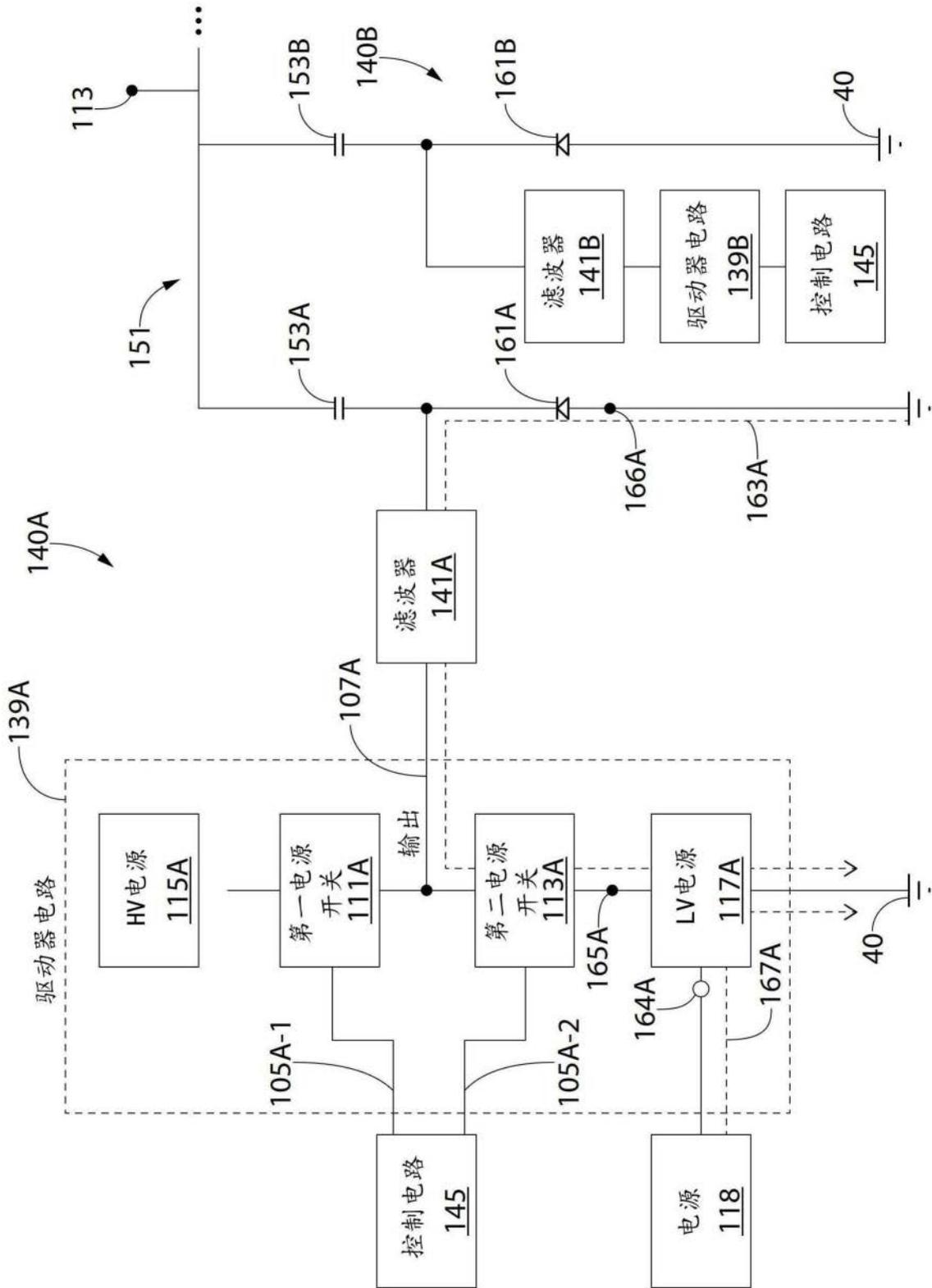


图6

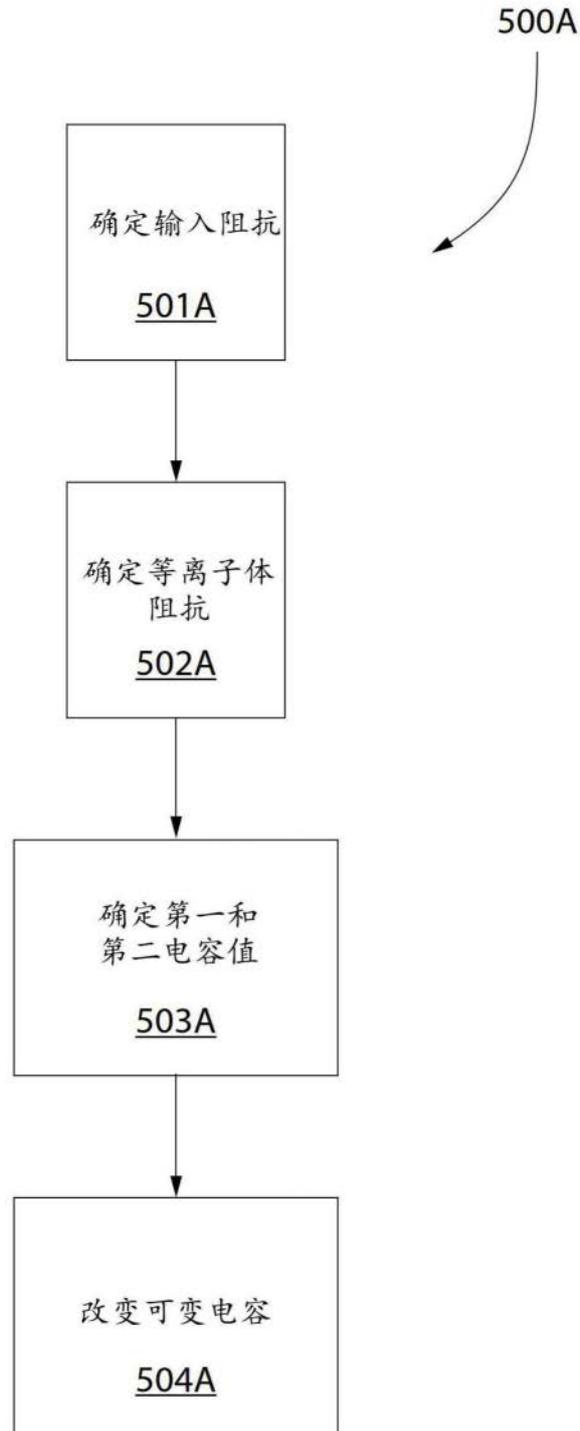


图7

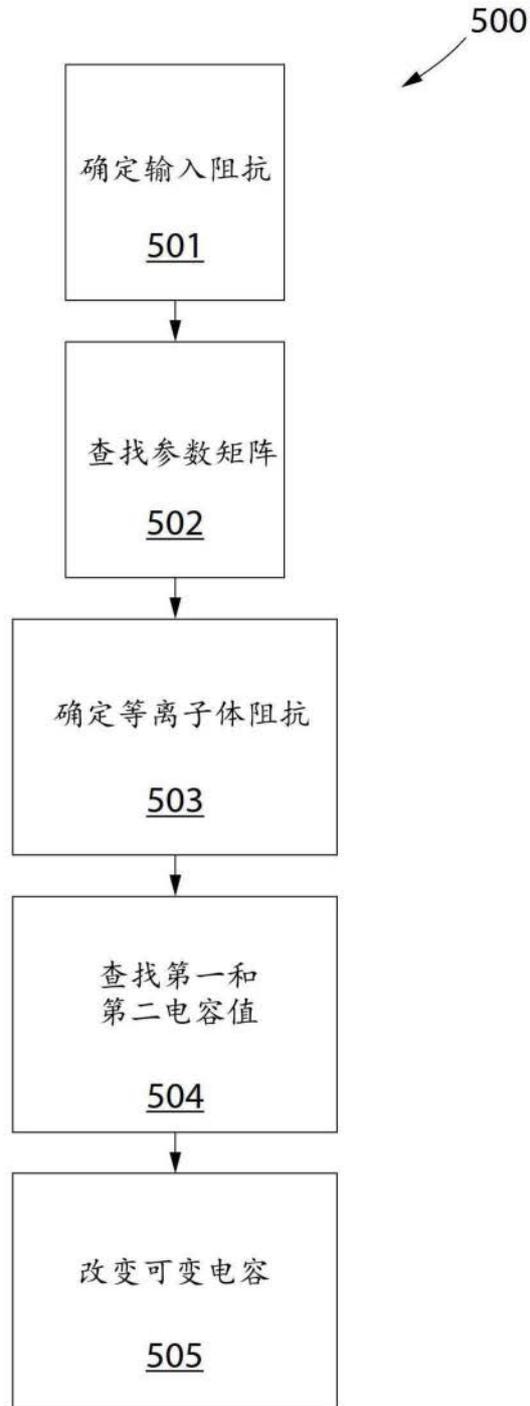


图8

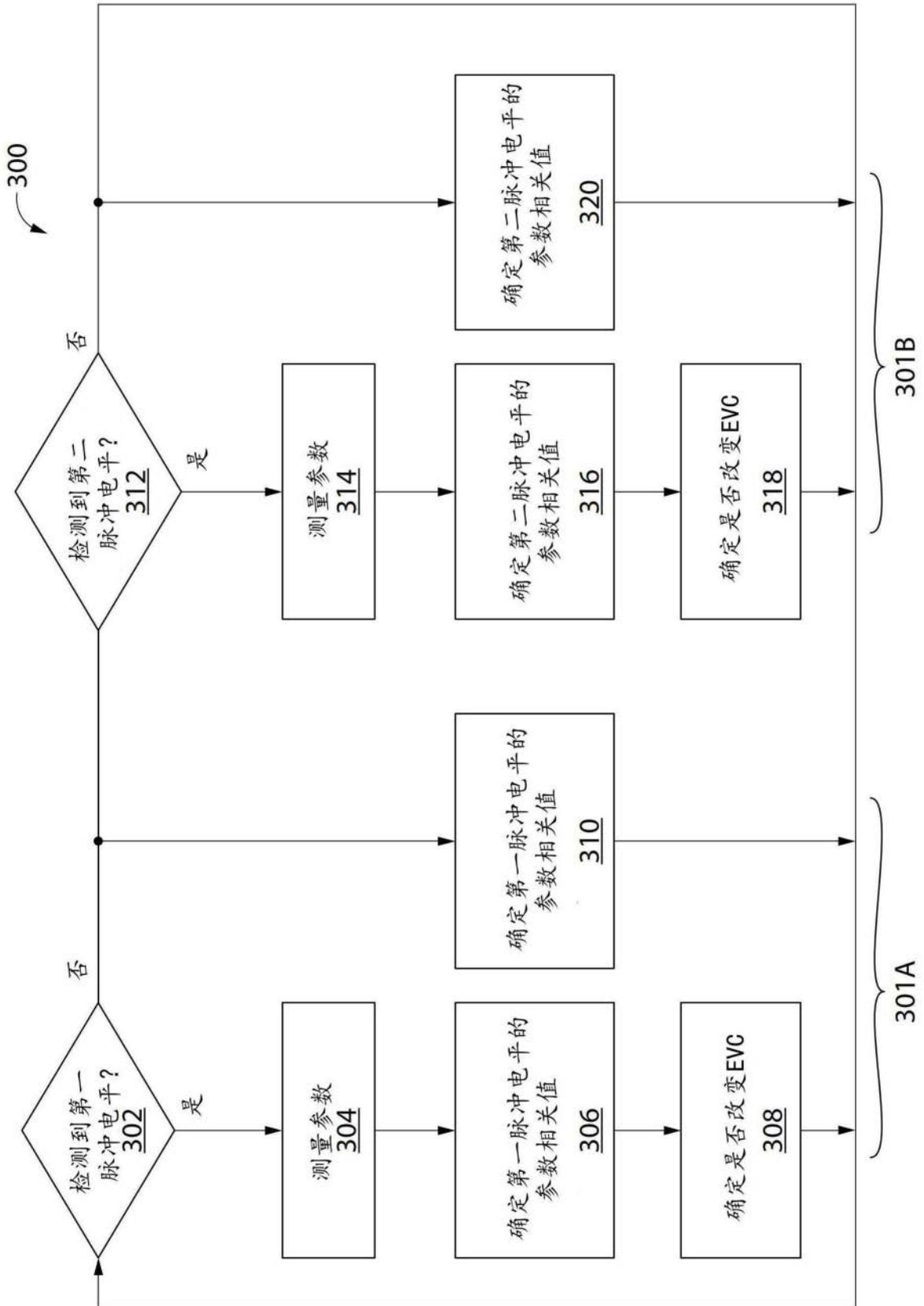


图9

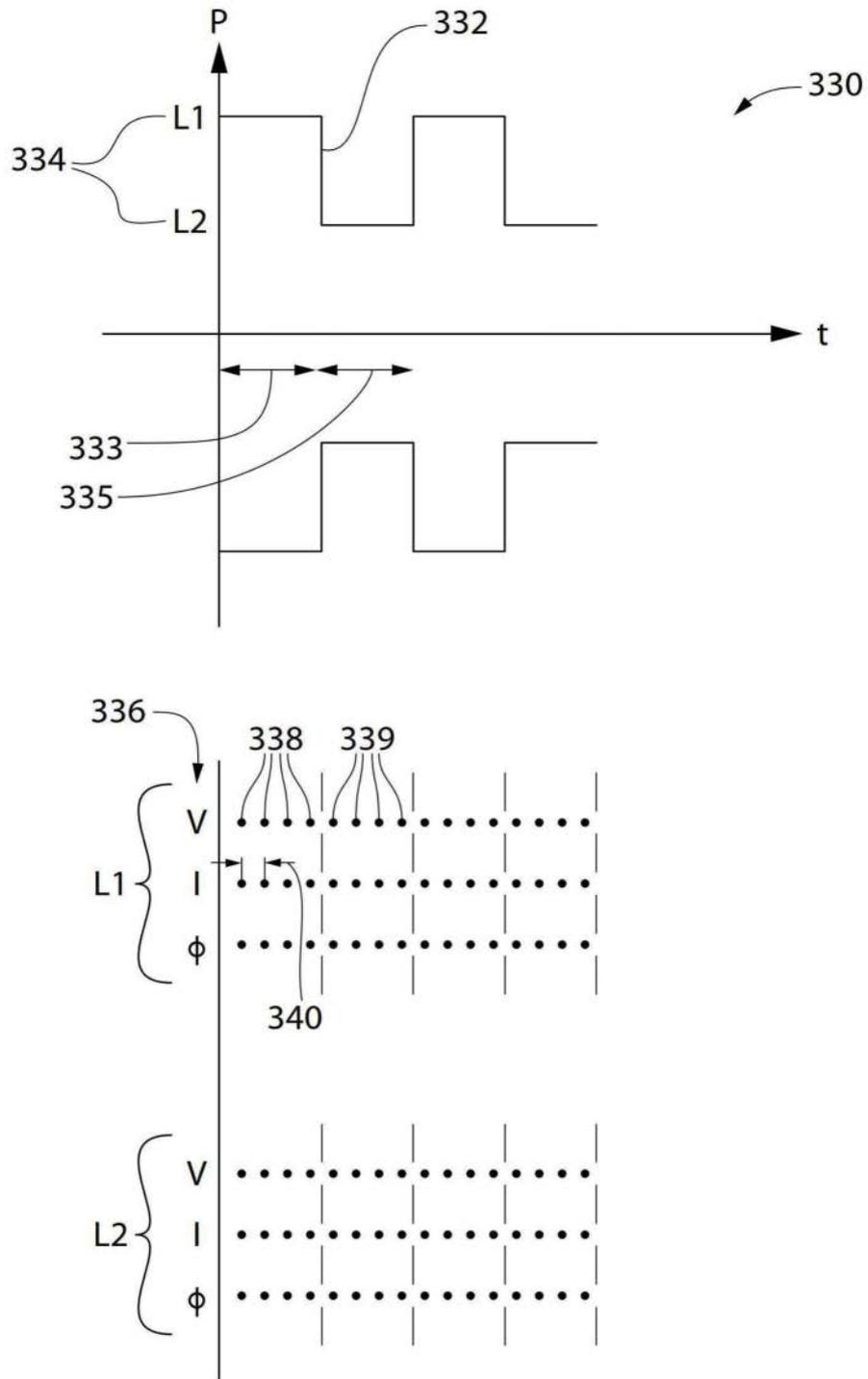


图10

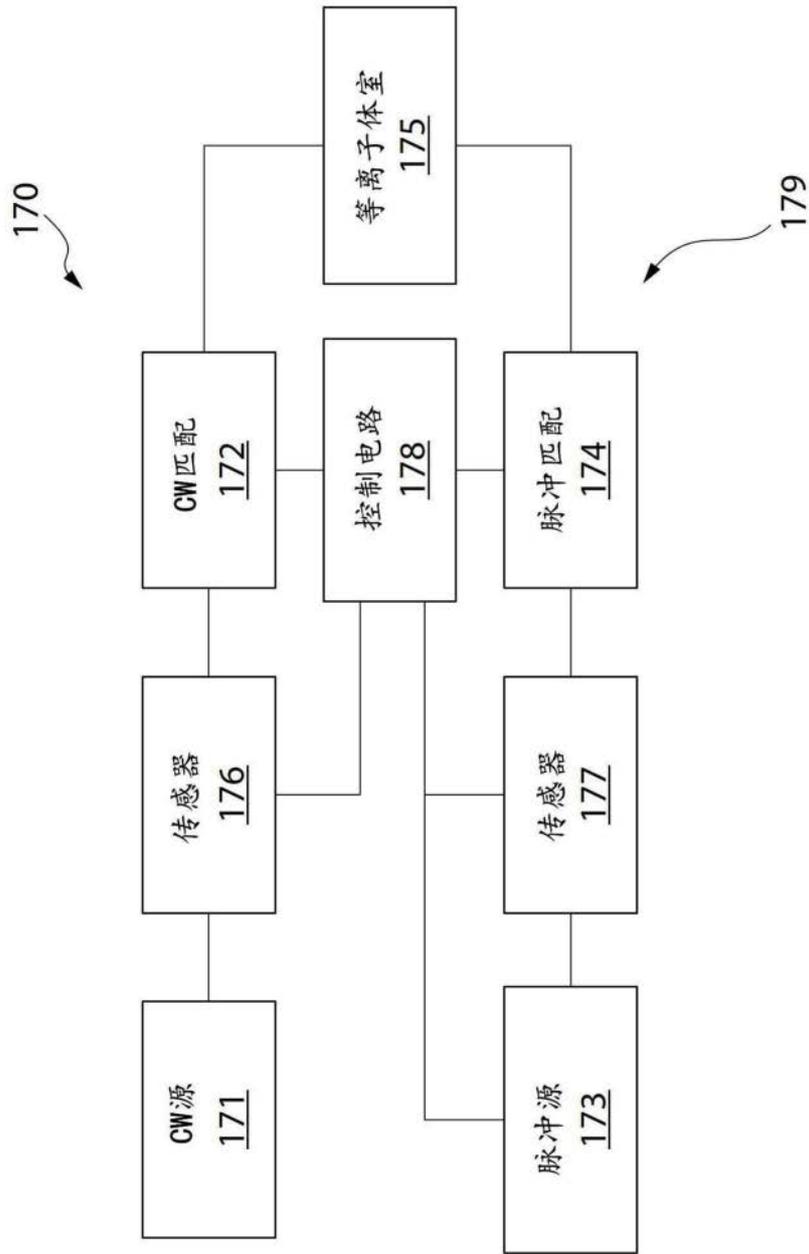


图11

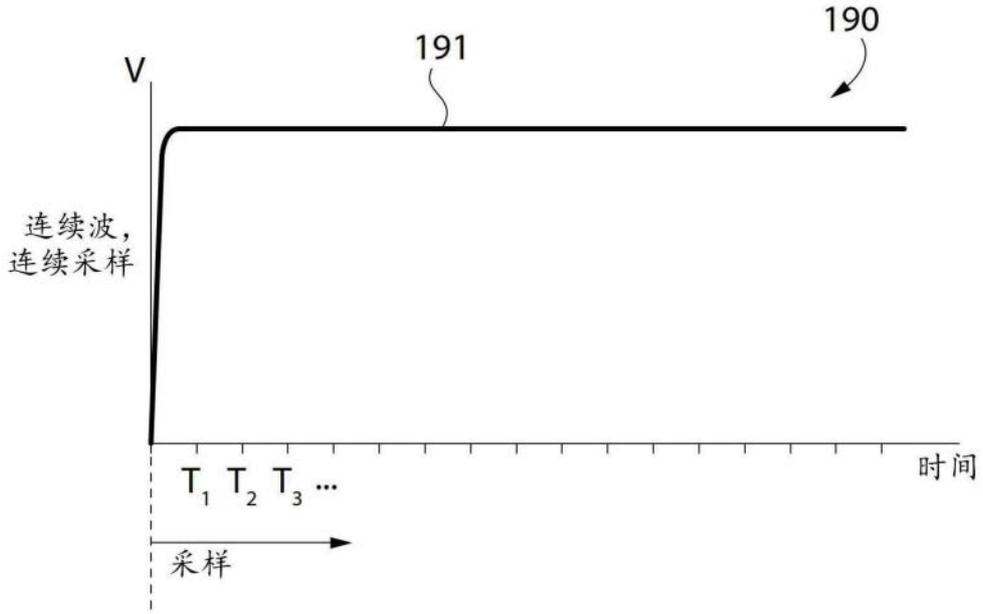


图12

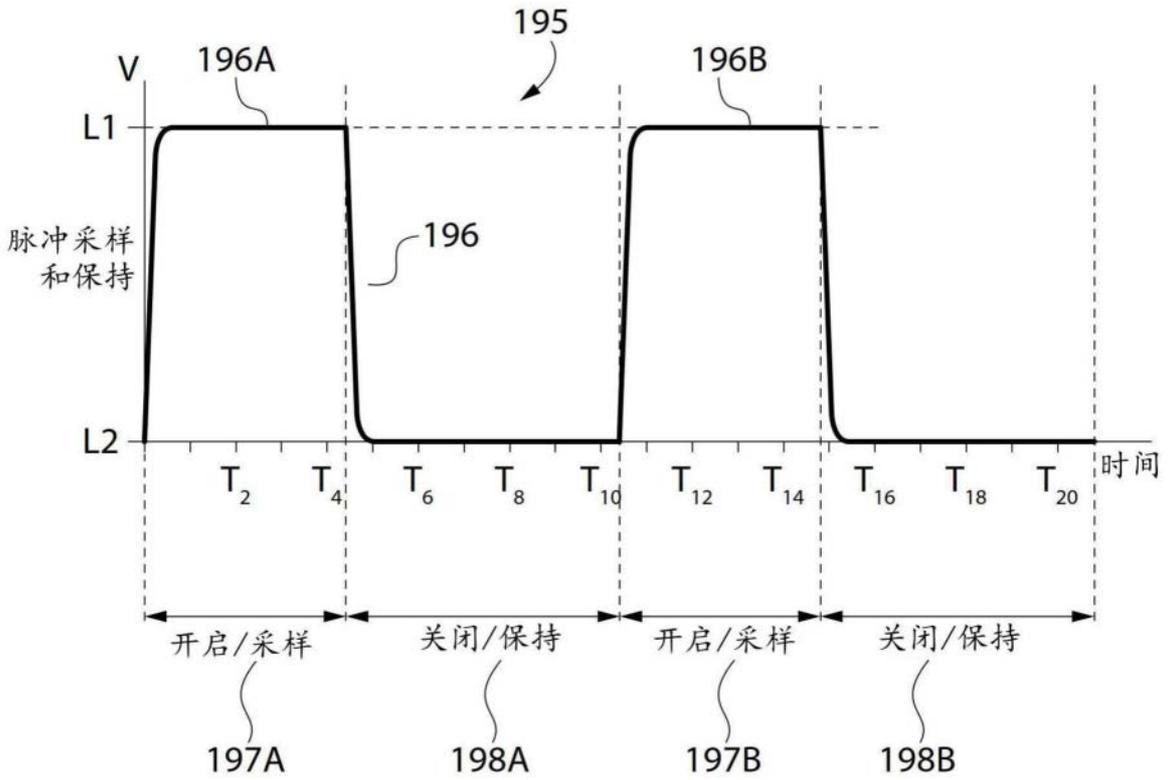


图13

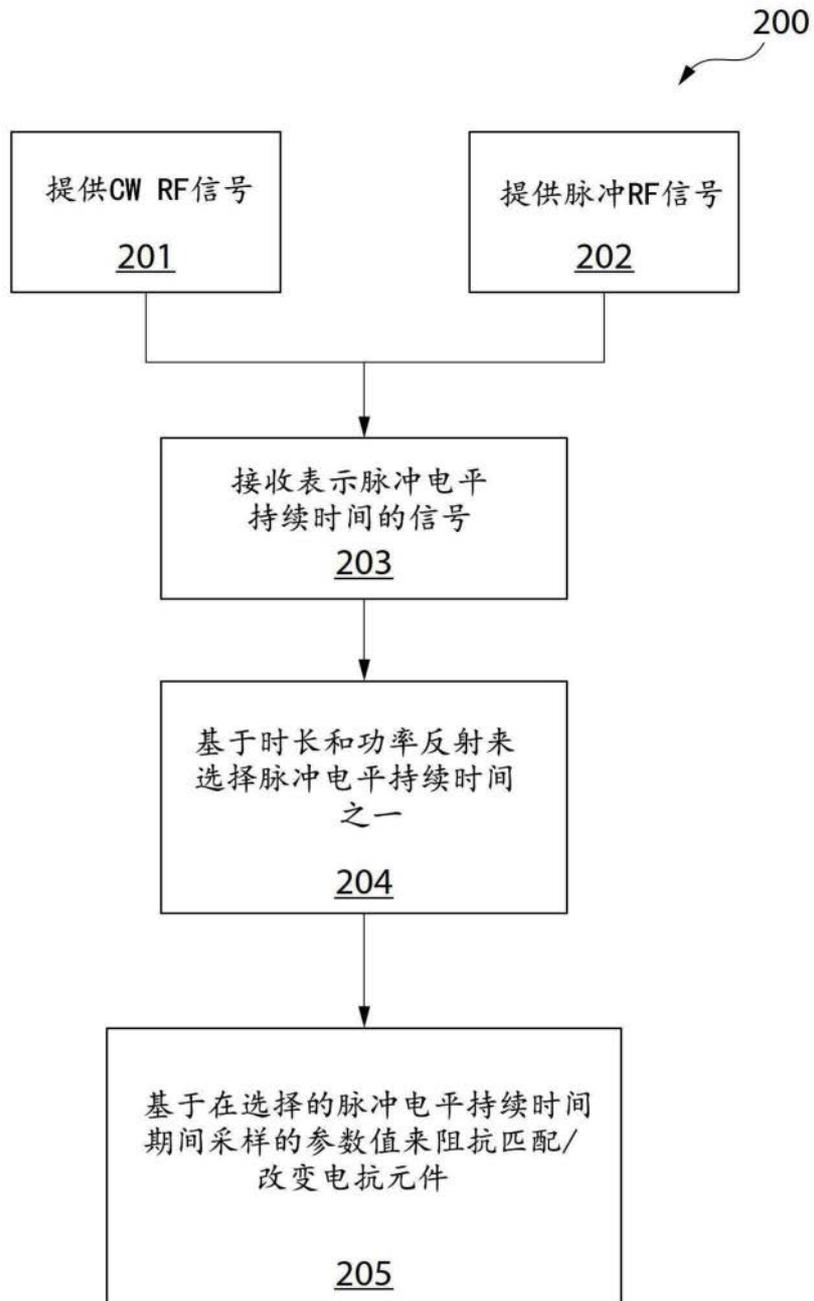


图14

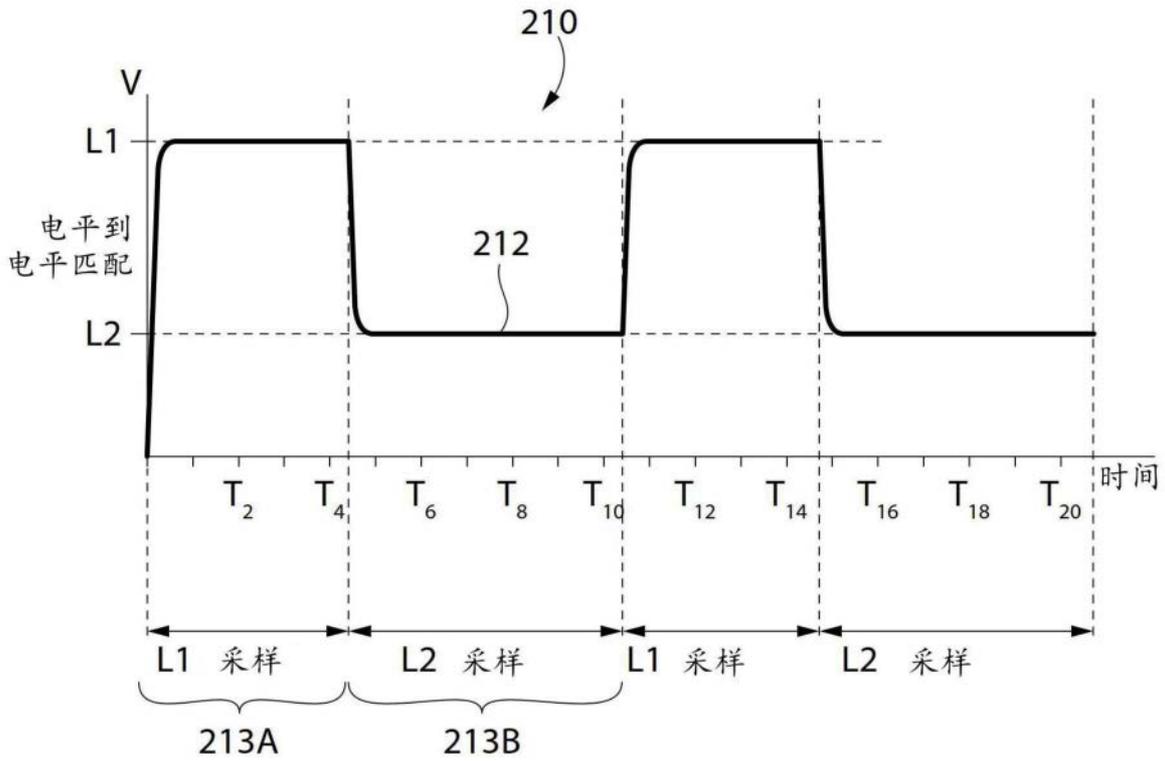


图15

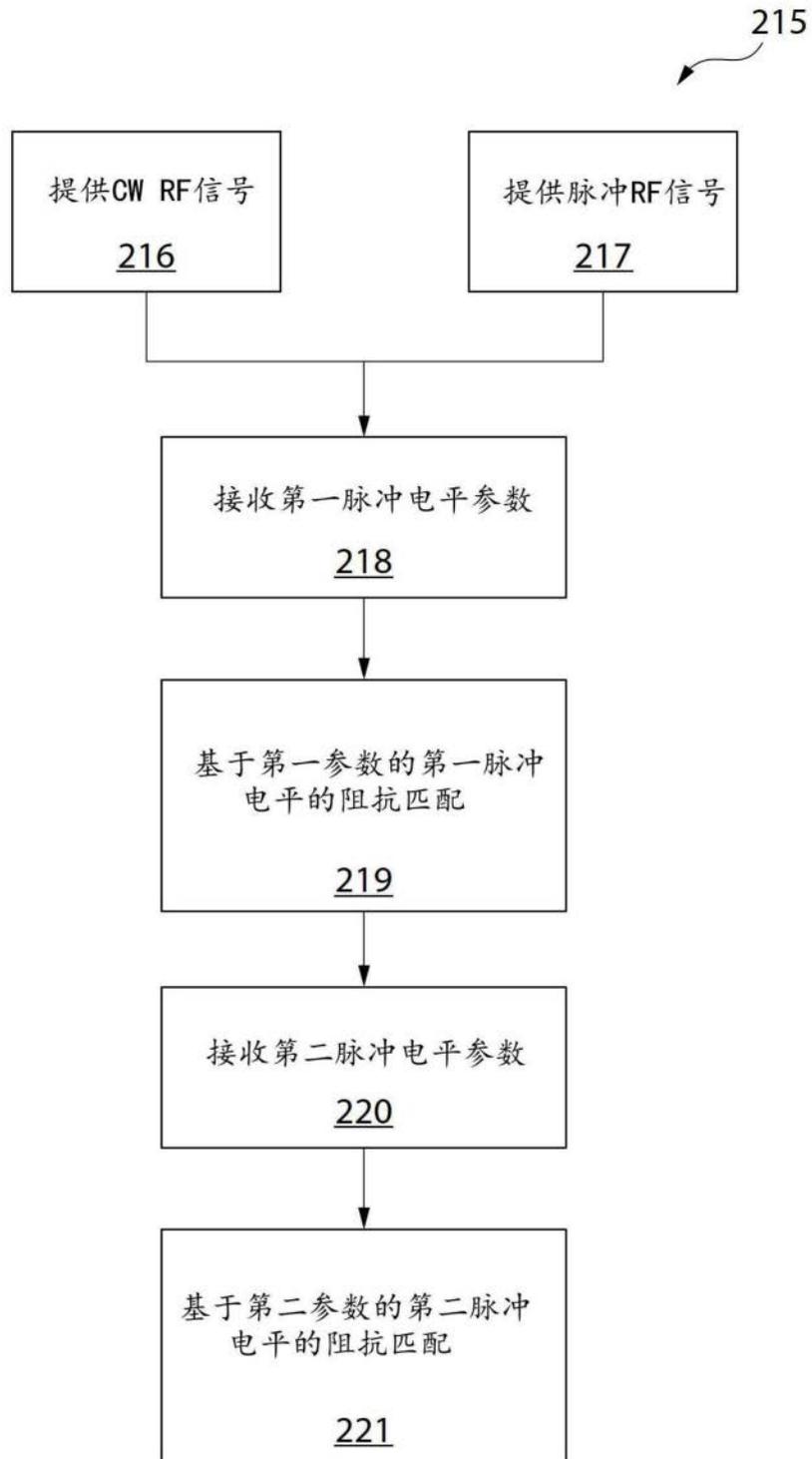


图16