

用于产生等离子体的线圈结构及半导体工艺设备

技术领域

本发明涉及半导体加工技术领域，具体地，涉及一种半导体工艺设备中用于产生等离子体的线圈结构及半导体工艺设备。

背景技术

电感耦合等离子体（Inductive Coupled Plasma, ICP）源是半导体领域中进行干法刻蚀和薄膜沉积常用的一种等离子体源。ICP 源由高频电流通过线圈产生的高频电磁场激发气体产生等离子体，可以在较低腔室压力下工作，具有等离子体密度高、对工件损伤小等特点。随着特征尺度的日益缩小，在工艺加工过程中所面临的挑战也越来越严峻，其中一个很重要的要求是等离子体源的一致性，对于 ICP 源，线圈分布对刻蚀的形貌及其均匀性有关键性作用，需要不断优化线圈电流径向及角向分布的均匀对称性，以进一步提升等离子体加工设备制造高度集成器件工艺的能力。

图 1 为现有的一种线圈结构的示意图。图 2A 为图 1 中的线圈结构在其径向截面上的投影图。如图 1 和图 2A 所示，该线圈结构包括内线圈组 11 和外线圈组 12，二者均由两个平面线圈组成，且两个平面线圈相对于其轴向呈 180° 旋转对称分布，每个平面线圈在其径向截面上的正投影形状均为渐开线形，且线圈圈数为 1.5 匝。内线圈组 11 和外线圈组 12 各自的两个平面线圈的位于外圈的外端并联，并与匹配器 13 的输出端电连接，位于内圈的内端并联，并与匹配器 13 的输入端电连接。

如图 2A 所示，以单个平面线圈的形状为渐开线形，且该渐开线为 1.5 匝为例，该渐开线位于图 2A 中示出的虚线两侧的左、右两个部分的几何分布是不均匀的，导致电磁场左、右分布不对称，从而导致线圈左、右电流不

同，这在工艺过程中会造成等离子体中的自由基及离子密度分布不对称，即导致等离子体分布不均匀，从而导致对晶圆刻蚀不均匀，对刻蚀质量或效率产生不良影响。

发明内容

本发明旨在至少解决现有技术中存在的技术问题之一，提出了一种半导体工艺设备中用于产生等离子体的线圈结构及半导体工艺设备，其既可以补偿线圈在径向上的电流分布差异，提高在线圈下方产生的耦合能量在径向、角向上的分布均匀性，从而提高等离子体中的自由基及离子密度在径向上的分布均匀性，又可以提高线圈的整体耐压能力，从而可以实现大功率馈入。

为实现上述目的，本发明提供了一种半导体工艺设备中用于产生等离子体的线圈结构，所述线圈结构包括至少一个线圈单元，每个所述线圈单元均包括M个线圈组，M为大于等于4的整数；M个所述线圈组的结构相同，且相互并联；每个所述线圈组均包括相互平行的N层平面线圈，N为大于等于4的偶数；M个所述线圈组中的各层所述平面线圈一一对应地同层设置，并且位于同一层的M个所述平面线圈沿所述平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布；

每个所述线圈组中的N层所述平面线圈沿垂直于所述平面线圈所在平面的方向间隔设置，且依次首尾串接；每相邻两层所述平面线圈在所述平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。

可选的，所述M为大于等于4的偶数；

M个所述线圈组的输入端同层设置，且在所述平面线圈的圆周方向上划分为M/2个输入端组，每个所述输入端组均包括相邻的两个所述线圈组的输入端，且相邻的两个所述线圈组的输入端之间连接有第一延长段，用以将二者电连接；所述M/2个输入端组中的所述第一延长段之间电连接；

M个所述线圈组的输出端同层设置，且在所述平面线圈的圆周方向上划

分为 $M/2$ 个输出端组，每个所述输出端组均包括相邻的两个所述线圈组的输出端，且相邻的两个所述线圈组的输出端之间连接有第二延长段，用以将二者电连接；所述 $M/2$ 个输出端组中的所述第二延长段之间电连接。

可选的，所述第一延长段的延伸方向和其中一个所述线圈组中与所述第一延长段连接的所述平面线圈的延伸方向一致；

所述第二延长段的延伸方向和其中一个所述线圈组中与所述第二延长段连接的所述平面线圈的延伸方向一致。

可选的，所述第一延长段的中间位置设置有用与射频电源的输出端电连接的第一接线端子；所述第二延长段的中间位置设置有用与射频电源的输入端电连接的第二接线端子。

可选的， $M/2$ 个所述第一接线端子在所述平面线圈的圆周方向上划分为 $M/4$ 个第一端子组，每个所述第一端子组均包括相邻的两个所述第一接线端子，且相邻的两个所述第一接线端子之间连接有第一连接条，用以将二者电连接；所述第一连接条的中间位置设置有用与射频电源的输出端电连接的输入接线端子；

$M/2$ 个所述第二接线端子在所述平面线圈的圆周方向上划分为 $M/4$ 个第二端子组，每个所述第二端子组均包括相邻的两个所述第二接线端子，且相邻的两个所述第二接线端子之间连接有第二连接条，用以将二者电连接；所述第二连接条的中间位置设置有用与射频电源的输入端电连接的输出接线端子。

可选的， $M/4$ 个所述第一连接条在所述平面线圈的圆周方向上均匀分布， $M/4$ 个所述第二连接条在所述平面线圈的圆周方向上均匀分布，并且 $M/4$ 个所述第一连接条所在圆周与 $M/4$ 个所述第二连接条所在圆周的直径相同，且 $M/4$ 个所述第一连接条与 $M/4$ 个所述第二连接条在所述平面线圈的圆周方向上相互错开。

可选的，所述N等于4，每层所述平面线圈的匝数为0.25匝。

可选的，所述线圈单元为多个，多个所述线圈单元中的所述线圈组的尺寸各不相同，且互相嵌套设置。

可选的，所述线圈单元为两个，分别为第一线圈单元和第二线圈单元，所述第二线圈单元的外径小于所述第一线圈单元的内径；

所述第一线圈单元中的所述线圈组的所述平面线圈的层数和所述第二线圈单元中的所述线圈组的所述平面线圈的层数基于各自馈入的功率大小而设定。

作为另一个技术方案，本发明还提供一种线圈结构，包括相互嵌套的第一线圈结构和第二线圈结构，其中，所述第一线圈结构采用本发明提供的上述线圈结构；

所述第二线圈结构包括相互平行且首尾串接的两层平面线圈，两层所述平面线圈在所述平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。

可选的，每相邻两层所述平面线圈之间的间距小于等于10mm。

可选的，所述线圈组的数量大于等于4，且小于等于64。

可选的，所述平面线圈在垂直于所述平面线圈所在平面的方向上的高度大于等于2mm，且小于等于15mm。

作为另一个技术方案，本发明还提供一种半导体工艺设备，包括射频源、反应腔室和本发明提供的上述线圈结构，其中，所述反应腔室顶部设置有介质窗，所述线圈结构设置于所述介质窗上方；所述射频源用于向所述线圈结构提供射频功率。

本发明的有益效果：

本发明提供的半导体工艺设备中用于产生等离子体的线圈结构，其包括M个线圈组，M为大于等于4的整数；M个线圈组的形状相同，且相互并联，每个线圈组包括相互平行的N层平面线圈，N为大于等于4的偶数；M个线

圈组中的各层平面线圈一一对应地同层设置，并且位于同一层的 M 个平面线圈沿平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布，这使得 M 个线圈组在平面线圈的圆周方向上具有角向对称性，即，在平面线圈的圆周方向上是对称的，从而可以避免在圆周方向上的电流分布产生差异，进而可以提高等离子体密度的角向分布均匀性，提高工艺均匀性。

并且，每个线圈组中的 N 层平面线圈沿垂直于平面线圈所在平面的方向间隔设置，且依次首尾串接；每相邻两层平面线圈在该平面线圈所在平面内的正投影呈镜像对称。通过使相邻两层平面线圈呈镜像对称，可以使由其中一层平面线圈和与之相邻的另一层平面线圈产生的磁场和电场能够相互补偿，从而可以补偿线圈在径向上的电流分布差异，提高在线圈下方产生的耦合能量在径向上的分布均匀性，从而提高等离子体中的自由基及离子密度在径向上的分布均匀性，提高工艺均匀性。

同时，通过使每个线圈组中的 4 层以上的偶数个平面线圈沿垂直于平面线圈所在平面的方向间隔设置，可以增大线圈组的输入端和输出端之间的间距（即，最上层平面线圈与最下层平面线圈之间的间距），同时由于射频电源向线圈组的输入端和输出端加载的总电压是一定的，这使得每层平面线圈承受的电压只有总电压的 $1/N$ ，即可以提高线圈组的整体耐压能力，在满足工艺均匀性要求的基础上，实现大功率馈入。

本发明还提供一种线圈结构，其通过将本发明提供的上述线圈结构，与相互平行的两层平面线圈结合使用，可以应用于内圈、外圈馈入功率大小不同的情况，即，本发明提供的上述线圈结构可以应用于大功率馈入（大于 5kW ），而相互平行且串联的两层平面线圈可以应用于小功率馈入（小于等于 2kW ），从而可以满足多种不同的工艺需求。

本发明提供的半导体工艺设备，其通过采用本发明提供的上述线圈结构，既可以补偿线圈在径向上的电流分布差异，提高在线圈在其下方产生的

耦合能量在径向上的分布均匀性，从而提高等离子体中的自由基及离子密度在径向、角向上的分布均匀性，又可以提高线圈的整体耐压能力，从而可以实现大功率馈入。

附图说明

图 1 为现有的一种线圈结构的示意图；

图 2A 为现有技术中的电磁场分布示意图；

图 2B 为图 1 中的线圈结构在其径向截面上的投影图；

图 3A 为一种双层线圈的结构示意图；

图 3B 为另一种双层线圈的结构示意图；

图 4A 为本发明实施例提供的线圈结构的示意图；

图 4B 为本发明实施例提供的线圈结构的一组线圈组的一种立体图；

图 5 为本发明实施例提供的线圈结构的一组线圈组的另一种立体图；

图 6 为本发明实施例提供的线圈结构的一组线圈组的俯视图；

图 7 为图 6 中 A1 方向的侧视图；

图 8 为图 6 中 A2 方向的侧视图；

图 9A 为两组线圈组的不同匝数的立体图；

图 9B 为本发明实施例提供的线圈结构的四组线圈组的立体图；

图 10 为本发明实施例提供的线圈结构的四组线圈组的俯视图；

图 11 为图 10 中 A1 方向的侧视图；

图 12 为图 10 中 A2 方向的侧视图；

图 13 为本发明实施例提供的线圈结构的十六组线圈组的立体图；

图 14 为本发明实施例提供的线圈结构的十六组线圈组的俯视图；

图 15 为图 13 中十六组线圈组的其中两组线圈组的立体图；

图 16 为图 13 中十六组线圈组的其中两组线圈组的俯视图；

图 17 为本发明实施例提供的线圈结构的十六组线圈组与第一连接条、

第二连接条的一种俯视图；

图 18 为本发明实施例提供的线圈结构的十六组线圈组与第一连接条、第二连接条的另一种俯视图；

图 19 为本发明实施例提供的线圈结构的第一线圈单元和第二线圈单元的一种结构示意图；

图 20 为本发明实施例提供的另一种线圈结构的一种结构示意图；

图 21 为本发明实施例提供的另一种线圈结构的又一种结构示意图；

图 22 为本发明实施例提供的半导体工艺设备的结构示意图。

具体实施方式

为使本领域的技术人员更好地理解本发明的技术方案，下面结合附图对本发明提供的半导体工艺设备中用于产生等离子体的线圈结构及半导体工艺设备进行详细描述。

本实施例提供一种半导体工艺设备中用于产生等离子体的线圈结构，上述半导体工艺设备可以用于对晶圆进行刻蚀工艺，该线圈结构作为上电极用于激发反应腔室中的工艺气体形成等离子体。

该线圈结构包括 M 个线圈组， M 为大于等于 4 的整数，每个线圈组均包括相互平行的 N 层平面线圈， N 为大于等于 4 的偶数； N 层平面线圈沿垂直于该平面线圈所在平面的方向间隔设置，且依次首尾串接；每相邻两层平面线圈在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。所谓镜像，是指相邻两层平面线圈中，其中一层平面线圈在该平面线圈所在平面上的正投影（以下简称第一投影 A）和另一层平面线圈在该平面线圈所在平面上的正投影（以下简称第二投影 B）的形状相同，而螺旋方向相反，具体来说，第一投影 A 和第二投影 B 均具有平行于该平面线圈所在平面的正、反两面，而第一投影 A 和第二投影 B 中的一者的正面形状与第一投影 A 和第二投影 B 中的另一者的反面形状相同。所谓对称，是指第一投影 A 和第二投影 B 中的一者的正

面形状与第一投影A和第二投影B中的另一者的反面形状的所有参数完全相同。

通过使每个线圈组中的相邻两层平面线圈呈镜像对称，可以使由其中一层平面线圈和与之相邻的另一层平面线圈产生的磁场和电场能够相互补偿，从而可以补偿线圈在径向上的电流分布差异，提高在线圈在其下方产生的耦合能量在径向上的分布均匀性，从而提高等离子体中的自由基及离子密度在径向上的分布均匀性，提高工艺均匀性。

作为本发明实施例的一个对比实施例，请参阅图3A，线圈结构03通过匹配器2与射频电源1电连接，射频电源1用于向线圈结构03加载射频功率。该线圈结构03包括位于外圈的第一线圈单元03a和位于内圈的第二线圈单元03b，二者的结构相同，只是尺寸不同，且相互嵌套。以第一线圈单元03a的结构为例，该第一线圈单元03a包括第一平面线圈031和第二平面线圈032，二者在竖直方向上间隔设置，且相互串联；第一平面线圈031和第二平面线圈032在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。虽然这样可以补偿线圈在径向上的电流分布差异，提高在线圈下方产生的耦合能量在径向上的分布均匀性，但是，为了避免上述第一平面线圈031和第二平面线圈032之间对电流分布差异的补偿作用失效，上述第一平面线圈031和第二平面线圈032之间的竖直间距D1不能过大（例如小于等于10mm时，工艺均匀性小于等于1%），这使得上述线圈结构03的耐压能力较低（小于等于4kV），从而导致上述线圈结构03的允许最大馈入功率为2KW，无法应用于大功率（大于5KW）馈入的工艺。

请参阅图3B，另一种线圈结构03'，其与上述线圈结构03相比，将上述第一平面线圈031和第二平面线圈032之间的竖直间距增加至D2，该竖直间距D2例如为30mm，虽然增加数值间距可以将该线圈结构03'的耐压能力提高至12KV以上，可以应用于大功率（大于5KW）馈入的工艺，但是由

于竖直间距过大会导致上述第一平面线圈 031 和第二平面线圈 032 之间对电流分布差异的补偿作用失效，工艺均匀性由 1% 恶化至 2.7%，无法满足工艺对均匀性的要求（小于等于 1.5%）。

为了解决上述问题，请参阅图 4A，本发明实施例提供的线圈结构 3，其包括至少一个线圈单元，每个线圈单元均包括 M 个线圈组，M 为大于等于 4 的整数；线圈单元在为多个时，多个线圈单元中的线圈组的尺寸各不相同，且互相嵌套设置。例如，图 4A 中示出了两个线圈单元，分别为相互嵌套的第一线圈单元 3a 和第二线圈单元 3b，第二线圈单元 3b 的外径小于第一线圈单元 3a 的内径。当然，本发明实施例并不局限于此，在实际应用中，根据具体需要，线圈单元也可以只有一个，或者还可以为三个以上。

第一线圈单元 3a 和第二线圈单元 3b 的结构相同，只是尺寸不同。以第一线圈单元 3a 为例，其包括 M 个线圈组，每个线圈组均包括相互平行的 N 层平面线圈，N 为大于等于 4 的偶数，以 N=4 为例，4 层平面线圈由上而下依次为第一平面线圈 31、第二平面线圈 32、第三平面线圈 33 和第四平面线圈 34；N 层平面线圈沿垂直于该平面线圈所在平面的方向（即图 4A 中的竖直方向）间隔设置，且依次首尾串接，即实现 N 层平面线圈相互串联；每相邻两层平面线圈在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。需要说明的是，图 4A 仅用“口”示意性地示出了平面线圈，并不代表平面线圈的具体结构。

通过使线圈组中包括相互平行的 N 层平面线圈，N 为大于等于 4 的偶数，即，线圈组中有 4 层以上的偶数个平面线圈，这相对于上述图 3A 中示出的线圈结构 03，可以增大线圈组的输入端和输出端之间的竖直间距 D5，即，最上层的第一平面线圈 31 与最下层的第四平面线圈 34 之间的间距，该间距 D5 例如大于等于 30mm，这样可以使最上层的第一平面线圈 31 与最下层的第四平面线圈 34 之间的耐压能力提高至 12KV 以上，可以应用于大功率（大于 5KW）馈入的工艺。同时，由于在最上层的第一平面线圈 31 的下方设置

有与之相邻的第二平面线圈 32, 该第二平面线圈 32 与第一平面线圈 31 在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称, 即, 形状相同, 而螺旋方向相反, 这样可以使二者产生的磁场和电场能够相互补偿, 即, 第二平面线圈 32 产生的磁场和电场分别与第一平面线圈 31 产生的磁场和电场相互叠加形成的总磁场及总电场的分布是镜像对称的, 从而可以补偿各层平面线圈在径向上的电流分布差异; 同样的, 在最下层的第四平面线圈 34 的上方设置有与之相邻的第三平面线圈 33, 该第三平面线圈 33 与第四平面线圈 34 在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称, 可以使得二者产生的磁场和电场能够相互补偿。另外, 相邻的第二平面线圈 32 与第三平面线圈 33 在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称, 可以使得二者产生的磁场和电场能够相互补偿。由此, 可以实现补偿各层平面线圈在径向上的电流分布差异, 提高在线圈在其下方产生的耦合能量在径向上的分布均匀性, 从而提高等离子体中的自由基及离子密度在径向上的分布均匀性, 提高工艺均匀性。

在此基础上, 使 4 层以上的偶数个平面线圈沿垂直于平面线圈所在平面的方向间隔设置, 这与图 3A 中的线圈结构 03 相比, 可以增大线圈组的输入端和输出端之间的间距 (即, 最上层平面线圈与最下层平面线圈之间的间距) D5, 该间距 D5 例如增大至 30mm 以上, 同时最上层的第一平面线圈 31 和与之相邻的第二平面线圈 32 之间的间距, 以及最下层的第四平面线圈 34 和与之相邻的第三平面线圈 33 之间的间距均为 D3, 相邻的第二平面线圈 32 与第三平面线圈 33 之间的间距为 D4, 该间距 D3 和 D4 例如均小于等于 10mm, 这样可以保证各相邻的两层平面线圈彼此对电流分布差异的补偿作用不会失效, 以保证工艺均匀性满足要求。同时, 由于射频电源 1 通过匹配器 2 向线圈组的输入端和输出端加载的总电压是一定的, 这使得每层平面线圈承受的电压只有总电压的 $1/N$, 从而可以提高线圈组的整体耐压能力, 进而在满足工艺均匀性要求的基础上, 实现大功率馈入。

需要说明的是,在实际应用中,可以根据具体需要设定平面线圈的层数,即N的数值,要求馈入的功率越大,线圈组的输入端和输出端之间的间距(即,最上层平面线圈与最下层平面线圈之间的间距)越大,则N的数值也越大。

还需要说明的是,每相邻两层平面线圈之间的间距不宜过大,以保证每相邻两层平面线圈彼此对电流分布差异的补偿作用不会失效,也不宜过小,以避免各相邻的两层平面线圈之间因距离过近而产生打火现象。可选的,每相邻两层平面线圈之间的间距小于等于10mm,例如为5mm、7mm等。

在一些可选的实施例中,各层平面线圈的形状均为螺旋形的渐开线。

在一些可选的的实施例中,各层平面线圈在垂直于平面线圈所在平面的方向上的高度大于等于2mm,且小于等于15mm。

在一些可选的的实施例中,各层平面线圈的匝数可以根据所需的电感量而设定,所需的电感量越大,则匝数越多,具体地,电感量与匝数的平方成正比。不同层的平面线圈的匝数相同。另外,每层平面线圈的匝数也不宜过多,否则会因在圆周方向上占据空间较多而限制线圈组的数量(即,M的数值),优选的,N=4,且各层平面线圈的匝数均为0.25匝,这样,4层平面线圈的总匝数为1匝,即,在圆周方向上环绕一圈。

在一个具体的实施例中,请参阅图4B,以第一线圈单元3a为例,N=4,且各层平面线圈的匝数均为2匝。4层平面线圈由上而下依次为第一平面线圈31、第二平面线圈32、第三平面线圈33和第四平面线圈34;4层平面线圈沿垂直于该平面线圈所在平面的方向间隔设置,且依次首尾串接,具体地,每相邻的两层平面线圈通过连接柱4串接,且电导通,该连接柱4例如沿垂直于该平面线圈所在平面的方向设置。线圈组的输入端31a和输出端31b分别为最上层的第一平面线圈31和最下层的第四平面线圈34的外圈一端。4层平面线圈中的每一者均为螺旋状的渐开线,且参数相同,并且相邻的两层平面线圈的螺旋方向相反。具体来说,在垂直于该平面线圈所在平面上,从

俯视方向来看,第一平面线圈 31 的螺旋方向为顺时针,而与之相邻的第二平面线圈 32 的螺旋方向为逆时针,二者镜像对称;与第二平面线圈 32 相邻的第三平面线圈 33 的螺旋方向为顺时针,即第三平面线圈 33 与第二平面线圈 32 镜像对称,同时与第一平面线圈 31 重合;与第三平面线圈 33 相邻的第四平面线圈 34 的螺旋方向为逆时针,即第四平面线圈 34 与第三平面线圈 33 镜像对称,同时与第二平面线圈 32 重合。

在另一个具体的实施例中,请一并参阅图 5 至图 8,以第一线圈单元 3a 为例, $N=4$,且各层平面线圈的匝数均为 0.25 匝。4 层平面线圈由上而下依次为第一平面线圈 31、第二平面线圈 32、第三平面线圈 33 和第四平面线圈 34;4 层平面线圈沿垂直于该平面线圈所在平面的方向(即图 7 中的 Z 方向)间隔设置,且依次首尾串接,具体地,每相邻的两层平面线圈通过连接柱 4 串接,且电导通,该连接柱 4 例如沿垂直于该平面线圈所在平面的方向设置。线圈组的输入端 31a 和输出端 31b 分别为最上层的第一平面线圈 31 和最下层的第四平面线圈 34 彼此靠近的两端。4 层平面线圈中的每一者均为螺旋状的渐开线,且参数相同,并且相邻的两层平面线圈的螺旋方向相反,具体地,如图 6 所示,第一平面线圈 31 与第二平面线圈 32 相对于在平行于平面线圈所在平面上的第二轴线 O2 对称(螺旋方向相反);第二平面线圈 32 与第三平面线圈 33 相对于平行于平面线圈所在平面上的第一轴线 O1 对称(螺旋方向相反);第三平面线圈 33 与第四平面线圈 34 相对于在平行于平面线圈所在平面上的第二轴线 O2 对称(螺旋方向相反)。

如图 8 所示,线圈组的输入端 31a 和输出端 31b 之间的竖直间距 D5 等于间距 D3 的 2 倍、间距 D4 以及第二平面线圈 32 的高度 H1 和第三平面线圈 33 的高度 H2 的和,即, $D5=2 \times D3+D4+H1+H2$ 。以间距 D3 和间距 D4 均等于 7mm,高度 H1 和高度 H2 均等于 5mm 为例,间距 D5 为 31mm,可以满足工艺对线圈结构的耐压能力的要求。

对于如图 1 所示的线圈结构，在其径向截面上的正投影形状在圆周方向（即，角向）上具有不对称性，具体来说，如图 2B 所示，将该径向截面划分为四个象限区域（I，II，III，IV），由于每个平面线圈的渐开线在由内端向外端延伸的过程中，其半径逐渐增大，导致线圈结构在第一象限区域 I 和第三象限区域 III 中的部分与在第二象限区域 II 和第四象限区域 IV 中的部分存在明显差异，这会导致上述线圈结构在圆周方向（即，角向）上的电流分布产生差异，从而造成电磁场分布不均匀，在工艺处理过程中，会引起等离子体中的自由基及离子密度分布的不对称，进而造成等离子体密度的角向分布不均匀，最终影响工艺均匀性。

为了解决上述技术问题，通过将线圈组设计为 M 个，且 M 为大于等于 4 的整数；M 个线圈组的结构相同，且相互并联；M 个线圈组中的各层平面线圈一一对应地同层设置，并且位于同一层的 M 个平面线圈沿平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布，也就是说，位于同一层的 M 个平面线圈在圆周方向上按不同的旋转角度排列。具体来说，以 M=4 为例，请一并参阅图 9B 至图 12，4 个线圈组分别为第一线圈组 3a1、第二线圈组 3a2、第三线圈组 3a3 和第四线圈组 3a4，4 个线圈组中的每一者均包括相互平行的 N 层平面线圈（例如 N=4），以图 5 示出的 4 层平面线圈为例，M 个线圈组中，M 个第一平面线圈 31 同层设置，并沿平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布；M 个第二平面线圈 32 同层设置，并沿平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布；M 个第三平面线圈 33 同层设置，并沿平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布；M 个第四平面线圈 34 同层设置，并沿平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布。换句话说，任意一个线圈组在沿平面线圈的圆周方向顺时针或逆时针旋转一定的角度之后，会与相邻的另一个线圈组重合，例如，图 9B 中示出了 4 个线圈组，在这种情况下，以第一线圈组 3a1 为例，在沿平面线圈的圆周方向顺时针或逆时针旋转 90° 之后，会与相邻的

另一个线圈组（例如第二线圈组 3a2 或者第四线圈组 3a4）重合。容易理解，M 个线圈组中，由于同层设置的 M 个平面线圈分布在同一圆周上，这使得 M 个平面线圈的第一端和第二端分别位于两个同心的圆周上。

由于 M 个线圈组的形状相同，且能够沿平面线圈的圆周方向均匀分布，M 个线圈组的各层对应的 M 个平面线圈，能够在平面线圈的圆周方向上共同构成一个近似的圆形，这使得 M 个线圈组在平面线圈的圆周方向上具有角向对称性，即，在平面线圈的圆周方向上是对称的，从而可以避免在圆周方向上的电流分布产生差异，进而可以提高等离子体密度的角向分布均匀性，提高工艺均匀性。

需要说明的是，如果线圈组少于 4 组，例如图 9A 中的图 (a) 示出了一个线圈组，该线圈组具有两层的平面线圈结构，图 9A 中的图 (b) 示出了两个线圈组，每个线圈组均具有两层的平面线圈结构，从图 (a) 中可以看出，线圈组中每层只有一个平面线圈，该线圈结构在平面线圈的圆周方向（即，角向）上是不对称的，仍然会存在电流分布差异；从图 (b) 中可以看出，每组线圈组中每层有两个平面线圈，虽然平面线圈的数量有所增加，但是由于同一层的两个平面线圈是镜像对称的，这使得图 (b) 示出的线圈结构在平面线圈的圆周方向（即，角向）上仍然是不对称的。发明人发现，只有 4 组以上（即， $M \geq 4$ ）的线圈组，且位于同一层的 M 个平面线圈在圆周方向上按不同的旋转角度排列，才能够构成一个近似的圆形，以满足工艺对角向均匀性的要求，另外，上述线圈组的组数越多，即 M 的数值越大，角向均匀性越好，优选的，M=4 或者 8 或者 16。

在另一些可选的实施例中，请一并参阅图 13 和图 14，M=16，16 个线圈组分别为第一线圈组 3a1 至第十六线圈组 3a16。需要说明的是，线圈组的数量越多，即 M 数值越大，则由 M 个线圈组构成的线圈结构的角向对称性越好，越有利于提高等离子体密度的角向分布对称性。在一些优选的实施例

中，线圈组的数量（即， M 数值）大于等于 2，且小于等于 64。

在一些可选的实施例中， M 个线圈组相互并联的方式具体可以为：每个线圈组的输入端和输出端（即，最上层平面线圈与最下层平面线圈彼此靠近的两端）分别通过匹配器 2 与射频电源 1 的输入端和输出端电连接。可选的，为了减少射频电源 1 的接线端子数量， M 为大于等于 2 的偶数； M 个线圈组的输入端同层设置（均位于最上层或者最下层），且在平面线圈的圆周方向上划分为 $M/2$ 个输入端组（两两一对），每个输入端组均包括相邻的两个线圈组的输入端，且相邻的两个线圈组的输入端之间连接有第一延长段，用以将二者电连接； $M/2$ 个输入端组中的第一延长段之间电连接；同样的， M 个线圈组的输出端同层设置（均位于最下层或者最上层），且在平面线圈的圆周方向上划分为 $M/2$ 个输出端组（两两一对），每个输出端组均包括相邻的两个线圈组的输出端，且相邻的两个线圈组的输出端之间连接有第二延长段，用以将二者电连接； $M/2$ 个输出端组中的所述第二延长段之间电连接。

以 $M=16$ 为例，16 个线圈组的输入端同层设置，且在平面线圈的圆周方向上划分为 8 个输入端组，每个输入端组均包括相邻的两个线圈组的输入端，图 15 和图 16 示出了十六组线圈组的相邻的其中两组线圈组（3a1,3a2）的输入端 31a，相邻的两个线圈组（3a1,3a2）的输入端 31a 之间连接有第一延长段 5a，用以将二者电连接；并且，该第一延长段 5a 与相邻的另一相邻的第一延长段 5a 之间电连接。同样的，图 15 和图 16 示出了十六组线圈组的相邻的其中两组线圈组（3a1,3a2）的输出端 31b，相邻的两个线圈组（3a1,3a2）的输出端 31b 之间连接有第二延长段 5b，用以将二者电连接；并且，该第二延长段 5b 与相邻的另一相邻的第二延长段 5b 之间电连接。由此，可以实现 16 个线圈组相互并联。

在一些可选的实施例中，如图 15 所示，第一延长段 5a 的延伸方向和其中一个线圈组中与第一延长段 5a 连接的平面线圈的延伸方向一致，例如，图

15 中，第一延长段 5a 与第一线圈组 3a1 的与之连接的平面线圈（例如最上层的平面线圈）的延伸方向一致；第二延长段 5b 的延伸方向和其中一个线圈组中与第二延长段 5b 连接的平面线圈的延伸方向一致，例如，图 15 中，第二延长段 5b 与第二线圈组 3a2 的与之连接的平面线圈（例如最下层的平面线圈）的延伸方向一致。

在一些可选的实施例中，如图 15 所示，第一延长段 5a 的中间位置设置有用于与射频电源 1 的输出端电连接的第一接线端子 51a；第二延长段 5b 的中间位置设置有用于与射频电源 1 的输入端电连接的第二接线端子 51b，这样，可以保证相邻的两个线圈组的总长度相同，从而可以使电流流经两个线圈组的路径相同。

需要说明的是，M 个线圈组相互并联的方式还可以采用其他任意方式，例如，M 个线圈组的输入端直接电连接，且 M 个线圈组的输出端直接电连接。

在一些可选的实施例中，为了进一步减少射频电源 1 的接线端子数量，M/2 个第一接线端子 51a 在平面线圈的圆周方向上划分为 M/4 个第一端子组（两两一对），如图 17 所示，每个第一端子组均包括相邻的两个第一接线端子 51a，且相邻的两个第一接线端子 51a 之间连接有第一连接条 6a，用以将二者电连接；第一连接条 6a 的中间位置设置有用于与射频电源 1 的输出端电连接的输入接线端子 61a；同样的，M/2 个第二接线端子 51b 在平面线圈的圆周方向上划分为 M/4 个第二端子组（两两一对），每个第二端子组均包括相邻的两个第二接线端子 51b，且相邻的两个第二接线端子 51b 之间连接有第二连接条 6b，用以将二者电连接；第二连接条 6b 的中间位置设置有用于与射频电源 1 的输入端电连接的输出接线端子 61b。以 M=16 为例，8 个第一接线端子 51a 在平面线圈的圆周方向上划分为 4 个第一端子组；8 个第二接线端子 51b 在平面线圈的圆周方向上划分为 4 个第二端子组。

在一些可选的实施例中，为了保证线圈结构在其圆周方向上的对称性，如图 17 所示， $M/4$ 个第一连接条 6a 在平面线圈的圆周方向上均匀分布， $M/4$ 个第二连接条 6b 在平面线圈的圆周方向上均匀分布，并且 $M/4$ 个第一连接条 6a 所在圆周与 $M/4$ 个第二连接条 6b 所在圆周的直径相同，且 $M/4$ 个第一连接条 6a 与 $M/4$ 个第二连接条 6b 在平面线圈的圆周方向上相互错开，即，在平面线圈的圆周方向上相间设置。通过使 $M/4$ 个第一连接条 6a 与 $M/4$ 个第二连接条 6b 在平面线圈的圆周方向上相互错开，可以更方便地设计射频电源与连接条之间的线路连接布局。当然，本发明实施例并不局限于此，例如，如图 18 所示， $M/4$ 个第一连接条 6a 与 $M/4$ 个第二连接条 6b 也可以在垂直于平面线圈所在平面的方向上一一对应地相互重合。

在一些可选的实施例中，线圈结构 3 包括多个线圈单元，多个线圈单元中的线圈组的尺寸各不相同，且互相嵌套设置。例如，图 19 中示出了两个线圈单元，分别为第一线圈单元 3a 和第二线圈单元 3b，第二线圈单元 3b 的外径小于第一线圈单元 3a 的内径，且二者相互嵌套。

可选的，第一线圈单元 3a 中的线圈组的平面线圈的层数与第二线圈单元 3b 中的线圈组的平面线圈的层数相同，例如均为 4 层。但是，本发明实施例并不局限于此，根据第一线圈单元 3a 和第二线圈单元 3b 的功率配比，第一线圈单元 3a 中的线圈组的平面线圈的层数与第二线圈单元 3b 中的线圈组的平面线圈的层数也可以不同。具体地，馈入的功率越大，层数越多；反之，馈入的功率越小，层数越少。

作为另一个技术方案，本实施例还提供一种线圈结构，其包括相互嵌套的第一线圈结构和第二线圈结构，具体地，如图 20 所示，第一线圈结构 201 和第二线圈结构 201 均呈环状，且尺寸不同，第一线圈结构 201 位于外圈，第二线圈结构 202 位于内圈；或者，如图 21 所示，第二线圈结构 202 位于外圈，第一线圈结构 201 位于内圈。

其中，第一线圈结构 201 采用本实施例提供的上述线圈结构，该第一线圈结构 201 具有一个线圈单元，该线圈单元包括 M 个线圈组，M 为大于等于 4 的整数，每个线圈组均包括相互平行的 N 层平面线圈，N 为大于等于 4 的偶数，每相邻两层平面线圈在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。图 20 和图 21 中示意性地示出了 4 层平面线圈。通过使线圈组中包括相互平行的 N 层平面线圈，N 为大于等于 4 的偶数，即，线圈组中有 4 层以上的偶数个平面线圈，这样可以使最上层的平面线圈与最下层的平面线圈之间的耐压能力提高至 12KV 以上，可以应用于内圈或外圈的大功率（大于 5KW）馈入的工艺。

上述第二线圈结构 202 包括相互平行且首尾串接的两层平面线圈，两层平面线圈在平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。该第二线圈结构 202 中的两层平面线圈例如采用图 3A 中示出的第一平面线圈 031 和第二平面线圈 032。上述第二线圈结构 202 可以应用于外圈或内圈馈入的功率较小（小于等于 2kW）的情况。

本发明实施例提供的线圈结构，其通过将本发明实施例提供的上述线圈结构，与相互平行且首尾串接的两层平面线圈结合使用，可以应用于内圈、外圈馈入功率大小不同的情况，即，第一线圈结构 201 可以应用于大功率馈入（大于 5kW），而第二线圈结构 202 可以应用于小功率馈入（小于等于 2kW），从而可以满足多种不同的工艺需求。

作为另一个技术方案，本实施例还提供一种半导体工艺设备，例如，如图 22 所示，该半导体工艺设备包括上电极的射频电源 1、匹配器 2、反应腔室 100、线圈结构 3，其中，在反应腔室 100 顶部设置有介质窗 101，该线圈结构 3 设置于介质窗 101 上方，且线圈结构 3 采用本发明上述各个实施例提供的线圈结构，例如采用图 4A 所示的线圈结构 3。

射频电源 1 用于通过匹配器 2 向线圈结构 3 提供射频功率，以激发反应

腔室 100 中的工艺气体形成等离子体 (Plasma)。此外，在反应腔室 100 中还设置有基座 102，用于承载晶圆，该基座 102 与下电极的射频源 103 电连接。该射频源 103 用于向基座 102 加载射频偏压，以吸引等离子体朝晶圆表面运动。

本发明提供的半导体工艺设备，其通过采用本发明提供的上述线圈结构，既可以补偿线圈在径向上的电流分布差异，提高在线圈在其下方产生的耦合能量在径向上的分布均匀性，从而提高等离子体中的自由基及离子密度在径向上的分布均匀性，又可以提高线圈的整体耐压能力，从而可以实现大功率馈入。

可以理解的是，以上实施方式仅仅是为了说明本发明的原理而采用的示例性实施方式，然而本发明并不局限于此。对于本领域内的普通技术人员而言，在不脱离本发明的精神和实质的情况下，可以做出各种变型和改进，这些变型和改进也视为本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种半导体工艺设备中用于产生等离子体的线圈结构，其特征在于，所述线圈结构包括至少一个线圈单元，每个所述线圈单元均包括 M 个线圈组，M 为大于等于 4 的整数；M 个所述线圈组的结构相同，且相互并联；每个所述线圈组均包括相互平行的 N 层平面线圈，N 为大于等于 4 的偶数；M 个所述线圈组中的各层所述平面线圈一一对应地同层设置，并且位于同一层的 M 个所述平面线圈沿所述平面线圈的圆周方向相互间隔，且均匀分布；

每个所述线圈组中的 N 层所述平面线圈沿垂直于所述平面线圈所在平面的方向间隔设置，且依次首尾串接；每相邻两层所述平面线圈在所述平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。

2. 根据权利要求 1 所述的线圈结构，其特征在于，所述 M 为大于等于 4 的偶数；

M 个所述线圈组的输入端同层设置，且在所述平面线圈的圆周方向上划分为 M/2 个输入端组，每个所述输入端组均包括相邻的两个所述线圈组的输入端，且相邻的两个所述线圈组的输入端之间连接有第一延长段，用以将二者电连接；所述 M/2 个输入端组中的所述第一延长段之间电连接；

M 个所述线圈组的输出端同层设置，且在所述平面线圈的圆周方向上划分为 M/2 个输出端组，每个所述输出端组均包括相邻的两个所述线圈组的输出端，且相邻的两个所述线圈组的输出端之间连接有第二延长段，用以将二者电连接；所述 M/2 个输出端组中的所述第二延长段之间电连接。

3. 根据权利要求 2 所述的线圈结构，其特征在于，所述第一延长段的延伸方向和其中一个所述线圈组中与所述第一延长段连接的所述平面线圈的延伸方向一致；

所述第二延长段的延伸方向和其中一个所述线圈组中与所述第二延长

段连接的所述平面线圈的延伸方向一致。

4. 根据权利要求 2 所述的线圈结构，其特征在于，所述第一延长段的中间位置设置有利于与射频电源的输出端电连接的第一接线端子；所述第二
5 延长段的中间位置设置有利于与所述射频电源的输入端电连接的第二接线端子。

5. 根据权利要求 4 所述的线圈结构，其特征在于， $M/2$ 个所述第一接线端子在所述平面线圈的圆周方向上划分为 $M/4$ 个第一端子组，每个所述第一端子组均包括相邻的两个所述第一接线端子，且相邻的两个所述第一接线端子之间连接有第一连接条，用以将二者电连接；所述第一连接条的中间位置设置有利于与射频电源的输出端电连接的输入接线端子；
10

$M/2$ 个所述第二接线端子在所述平面线圈的圆周方向上划分为 $M/4$ 个第二端子组，每个所述第二端子组均包括相邻的两个所述第二接线端子，且
15 相邻的两个所述第二接线端子之间连接有第二连接条，用以将二者电连接；所述第二连接条的中间位置设置有利于与射频电源的输入端电连接的输出接线端子。

6. 根据权利要求 5 所述的线圈结构，其特征在于， $M/4$ 个所述第一连接条在所述平面线圈的圆周方向上均匀分布， $M/4$ 个所述第二连接条在所述平面线圈的圆周方向上均匀分布，并且 $M/4$ 个所述第一连接条所在圆周与 $M/4$ 个所述第二连接条所在圆周的直径相同，且 $M/4$ 个所述第一连接条与 $M/4$ 个所述第二连接条在所述平面线圈的圆周方向上相互错开。
20

7. 根据权利要求 1-6 任意一项所述的线圈结构，其特征在于，所述 N 等于 4，每层所述平面线圈的匝数为 0.25 匝。
25

8. 根据权利要求 1-6 任意一项所述的线圈结构，其特征在于，所述线圈单元为多个，多个所述线圈单元中的所述线圈组的尺寸各不相同，且互相嵌套设置。

- 5 9. 根据权利要求 8 所述的线圈结构，其特征在于，所述线圈单元为两个，分别为第一线圈单元和第二线圈单元，所述第二线圈单元的外径小于所述第一线圈单元的内径；

 所述第一线圈单元中的所述线圈组的所述平面线圈的层数和所述第二线圈单元中的所述线圈组的所述平面线圈的层数基于各自馈入的功率大小
10 而设定。

10. 根据权利要求 1-6 任意一项所述的线圈结构，其特征在于，每相邻两层所述平面线圈之间的间距小于等于 10mm。

- 15 11. 根据权利要求 1-6 任意一项所述的线圈结构，其特征在于，所述线圈组的数量大于等于 4，且小于等于 64。

 12. 根据权利要求 1-6 任意一项所述的线圈结构，其特征在于，所述平面线圈在垂直于所述平面线圈所在平面的方向上的高度大于等于 2mm，且
20 小于等于 15mm。

13. 一种线圈结构，其特征在于，包括相互嵌套的第一线圈结构和第二线圈结构，其中，所述第一线圈结构采用权利要求 1-12 中任意一项所述的线圈结构；

- 25 所述第二线圈结构包括相互平行且首尾串接的两层平面线圈，两层所述平面线圈在所述平面线圈所在平面上的正投影呈镜像对称。

14. 一种半导体工艺设备，其特征在于，包括射频源、反应腔室和权利要求 1-12 任意一项所述的线圈结构，或者权利要求 13 所述的线圈结构，其中，所述反应腔室顶部设置有介质窗，所述线圈结构设置于所述介质窗上方；所述射频源用于向所述线圈结构提供射频功率。