

含 Sc 层的刻蚀方法、半导体器件及其制造方法及工艺设备

技术领域

本申请涉及半导体技术领域，具体而言，涉及一种含 Sc 层的刻蚀方法、半导体器件及其制造方法及工艺设备。

背景技术

现代通讯已步入 5G 时代，将来向 6G 的发展过程中，对半导体器件的工作频率提出越来越高的要求。其中，可以通过提高沟道中载流子的迁移率来提高半导体器件的工作频率，具体的，可以选择基于高迁移率二维电子气而制成的高电子迁移率半导体器件，该半导体器件中，二维电子气体体系的材料中的金属一般采用 IIIA 族元素（如 Al、Ga、In 等），或者，采用主要价态呈正三价的 IIIB 族金属元素（如 Sc 等）。

Sc 的离子半径介于 Ga 和 In 之间，具有能够很好的与 AlN、GaN 等 III-V 族化合物形成含 Sc 合金的能力，所形成的含 Sc 合金具有较高的压电系数和自发极化率，用该含 Sc 合金所制备的半导体器件中，沟道具有更高的面电荷密度和电子迁移率，但是，在对 Sc 合金的干法刻蚀过程中，由于所生成的副产物 ScCl_3 相比于其它金属卤化物而言沸点明显更高，难以从反应体系中挥发出来，因此，Sc 的含量影响了刻蚀速率，含量越高其干法刻蚀越困难，而现有技术中还没有对含 Sc 合金层行之有效的快速刻蚀方法，限制了含 Sc 合金应用于半导体器件的使用与推广。

发明内容

本申请的目的在于提供一种含 Sc 层的刻蚀方法、半导体器件及其制造方法及工艺设备，以解决刻蚀含 Sc 合金层时，刻蚀速率低的技术问题。

本申请实施例提供一种含 Sc 层的刻蚀方法，所述刻蚀方法包括循环执行的主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步；其中，

所述主刻蚀工艺步包括：向工艺腔室内通入工艺气体并激发产生等离子体，对所述含 Sc 层进行刻蚀，所述工艺气体包括含氯气体和惰性气体；

所述辅刻蚀工艺步包括：挥发步与冷却步中的至少一种；

所述挥发步包括：降低下电极功率至零功率或接近于零功率，减少工艺气体至零流量或接近零流量；

所述冷却步包括：降低下电极功率至零功率或接近于零功率，减少含氯气体至零流量或接近零流量，继续通入惰性气体。

在一些实施例中，所述主刻蚀工艺步包括第一刻蚀步和/或第二刻蚀步，所述第一刻蚀步与所述第二刻蚀步所采用的工艺气体相同，所述第一刻蚀步的下电极功率大于所述第二刻蚀步的下电极功率。

在一些实施例中，所述第一刻蚀步与所述第二刻蚀步的下电极功率比为 $(1.2\sim1.8):1$ ；

和/或，所述第一刻蚀步与所述第二刻蚀步的工艺时长比为 $1:(4\sim6)$ 。

在一些实施例中，所述第一刻蚀步的下电极功率为 $100\text{ W}\sim1000\text{ W}$ ；所述第二刻蚀步的下电极功率为 $100\text{ W}\sim1000\text{ W}$ ；

和/或，所述第一刻蚀步的工艺时长为 $1.2\text{ s}\sim3\text{ s}$ ，所述第二刻蚀步的工艺时长 $8\text{ s}\sim12\text{ s}$ 。

在一些实施例中，所述主刻蚀工艺步中，含氯气体与惰性气体流量比为 $(0.3\sim0.5):1$ ；

和/或，所述主刻蚀工艺步中，所述含氯气体流量为 $20\text{ sccm}\sim200\text{ sccm}$ ，所述惰性气体流量为 $10\text{ sccm}\sim1000\text{ sccm}$ 。

在一些实施例中，所述含氯气体包括 SiCl_4 、 BCl_3 和 Cl_2 中的至少一个，和/或，所述惰性气体包括 Ar。

在一些实施例中，所述含氯气体包括 BCl_3 和 Cl_2 ， BCl_3 与 Cl_2 的流量比为 $(0.9 \sim 1.1):1$ ；

或者，所述含氯气体包括 SiCl_4 。

在一些实施例中，所述挥发步的工艺时长为 $0.5 \text{ s} \sim 1.5 \text{ s}$ ；和/或，所述冷却步的工艺时长为 $0.5 \text{ s} \sim 1.5 \text{ s}$ 。

与现有技术相对比，采用本申请实施例所提供的含 Sc 层的刻蚀方法具有如下有益效果：

本申请实施例中，主刻蚀工艺步中，向工艺腔室内通入含氯气体、惰性气体等工艺气体并激发产生等离子体，对含 Sc 层进行有效刻蚀；辅刻蚀工艺步中，降低下电极功率至零功率或接近于零功率，当减少工艺气体至零流量或接近零流量时，便于抽真空时刻蚀副产物快速挥发，当减少含氯气体至零流量或接近零流量且继续通入惰性气体时，不仅便于抽真空时至少部分刻蚀副产物快速挥发，还能够带走含 Sc 层的热量，实现刻蚀的均匀性；如此循环执行主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步，能够及时挥发各循环步中产生的刻蚀副产物，从而减少甚至避免影响后续循环步的刻蚀深度及刻蚀质量，以保证各循环步的刻蚀深度及刻蚀质量（如，刻蚀均匀性），进而提高含 Sc 层的刻蚀速率，即，实现含 Sc 层的快速刻蚀。

本申请实施例还提供一种半导体器件的制造方法，包括步骤：

提供衬底；

在所述衬底上形成含 Sc 层；

应用上述刻蚀方法对所述含 Sc 层进行刻蚀以形成预定深度的凹槽，所述预定深度小于所述含 Sc 层的厚度；

在所述凹槽内形成栅极，并在所述凹槽的两侧形成源极和漏极。

采用本申请实施例所提供的含 Sc 层的刻蚀方法能够产生上述刻蚀方法相同的有益效果，即提高刻蚀效率，在此不再赘述。

本申请实施例还提供一种半导体工艺设备，包括工艺腔室、进气组件、上电极组件、下电极组件和控制器，所述控制器包括至少一个处理器和至少一个存储器，所述存储器中存储有计算机程序，所述计算机程序被所述处理器执行时实现上述刻蚀方法，或者，实现上述制造方法。

本申请实施例所提供的工艺设备具有上述刻蚀方法及制造方法的有益效果，在此不再赘述。

本申请实施例还提供一种半导体器件，包括：

衬底；

含 Sc 层，设置在所述衬底上，所述含 Sc 层远离所述衬底的一侧形成有凹槽，所述凹槽的深度小于所述含 Sc 层的厚度；

源极，设置在所述凹槽的第一侧；

漏极，设置在所述凹槽的第二侧，所述第二侧与所述第一侧相对，所述源极与所述凹槽的第一侧的边缘之间的间距小于所述漏极与所述凹槽的第二侧的边缘之间的间距；

栅极，设置在所述凹槽内，且所述栅极与所述源极之间的间距小于所述栅极与所述漏极之间的间距。

在一些实施例中，所述含 Sc 层包括 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ，其中，x 的取值范围小于 43%；或者，

所述凹槽的底部与所述含 Sc 层朝向所述衬底的一侧的间距范围为 $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ ；或者，

所述源极与所述凹槽的第一侧的边缘之间的间距为 $0.1\ \mu\text{m}\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ；或者，

所述漏极与所述凹槽的第二侧的边缘之间的间距 $0.5\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ ；或者，所述栅极的长度为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ ，宽度为 $0.1\ \text{mm}\sim 10\ \text{mm}$ 。

本申请实施例所提供的半导体器件中，含 Sc 层为势垒层，凹槽的形成，

能够使栅极所在的势垒层减薄，如此设置，当对栅极提供栅压进行调控时，势阱出现，从而形成二维电子气，实现了半导体器件的高电子迁移率；当不加栅压时，所形成的二维电子气的势阱消失，半导体器件处于关断状态，即该半导体器件为常关型半导体器件，实现半导体器件的安全控制性能。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据提供的附图获得其他的附图。

图1为本申请实施例所提供的含Sc层的半导体器件的剖面结构示意图；

图2a-图2n为本申请实施例所提供的含Sc半导体器件的制造方法的工艺流程示意图；

图3a为本申请实施例中，刻蚀 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 结果表征图；

图3b为图3a中，L处的局部放大示意图；

图3c-3d为图3a中，R处的局部放大示意图；

图4a-图4d为图3a中，M处的局部放大示意图，不同之处在于 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的刻蚀厚度；

图5a-图5d为对比例一的刻蚀 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 结果表征图；

图6a-图6b为对比例一的刻蚀 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 副产物EDX表征图；

图7为对比例二的刻蚀结果统计图；

图8a-图8b为对比例三的刻蚀结果表征图；

图9a-图9d为对比例四的刻蚀结果表征图；

图10为本申请实施例中，半导体工艺设备的结构示意图；

图11a-图11b为图1中半导体器件的能级示意图。

附图标记说明：

100-外延片；110-外延层；120-衬底；130-缓冲层；

200-势垒层；210-源极；220-栅极；230-漏极；240-凹槽；

310-第一光刻胶层；311-第一通槽；

320-第二光刻胶层；321-第二通槽；322-第三通槽；

330-第三光刻胶层；331-第四通槽；

400-钝化层；

500-工艺腔室；510-上电极组件；520-下电极组件；

511-射频线圈；512-上射频电源；513-上匹配器；

521-晶片承载装置；522-下射频电源；523-下匹配器。

具体实施方式

下面将结合附图对本申请的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

Sc 是一种主要价态呈现正三价的 III B 族金属元素，其离子半径介于 Ga 和 In 之间，具有能够很好的与 AlN、GaN 等 III-V 族化合物形成合金的能力，如 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 等。含 Sc 层 ($\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$) 具有较高的压电系数和自发极化率，所制备的半导体器件可以使沟道具有更高的面电荷密度（例如，采用 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 作势垒层的 HEMT 的迁移率是 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的约 5 倍），从而提高半导体器件的迁移率。而关于含 Sc 层的干法刻蚀的相关刻蚀工艺中，Sc 与 Cl 反应生成副产物 ScCl_3 ，该副产物会附着于刻蚀孔侧壁，且不易挥发，因此影响了含 Sc 层的刻蚀速率，且刻蚀含 Sc 层的角度与光刻胶的角度不能保持一致，影响了刻蚀均匀性及刻蚀质量。

本申请实施例提供一种含 Sc 层的刻蚀方法、半导体器件及其制造方法及工艺设备，在刻蚀工艺过程中，能够提高刻蚀速率及刻蚀质量，能够使含 Sc 层的角度与光刻胶的角度基本保持一致，下面通过具体的实施例并结合附图对本申请做进一步的详细描述。

实施例一

本申请实施例提供一种含 Sc 层的刻蚀方法，刻蚀方法包括循环执行的主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步；其中，

主刻蚀工艺步包括：向工艺腔室内通入工艺气体并激发产生等离子体，对含 Sc 层进行刻蚀，工艺气体包括含氯气体和惰性气体；

辅刻蚀工艺步包括：挥发步与冷却步中的至少一种；

挥发步包括：降低下电极功率至零功率或接近于零功率，减少工艺气体至零流量或接近零流量；

冷却步包括：降低下电极功率至零功率或接近于零功率，减少含氯气体至零流量或接近零流量，继续通入惰性气体。

本申请实施例中，主刻蚀工艺步中，向工艺腔室内通入含氯气体、惰性气体等工艺气体并激发产生等离子体，对含 Sc 层进行刻蚀；辅刻蚀工艺步中，降低下电极功率至零功率或接近于零功率，当减少工艺气体至零流量或接近零流量时，便于抽真空时刻蚀工艺产生的副产物快速挥发（无其它进气，只能将副产物抽走），当减少含氯气体至零流量或接近零流量且继续通入惰性气体时，不仅便于抽真空时至少部分刻蚀工艺产生的副产物快速挥发，还能够带走含 Sc 层的热量，保证刻蚀的均匀性；如此循环执行主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步，能够及时挥发各循环步中产生的副产物，从而减少甚至避免影响后续循环步的刻蚀深度及刻蚀质量，以保证各循环步的刻蚀深度及刻蚀质量（如，刻蚀均匀性），提高含 Sc 层的刻蚀速率及刻蚀均匀性，即，实现含 Sc 层的快速刻蚀。

需要说明的是，上述挥发步和冷却步中，“降低”是指关闭或将下电极功率设置成较小数值或接近于零的数值；“减少”是指停止通入工艺气体和含氯气体，或者将工艺气体和含氯气体的流量设置成较小数值或接近于零的数值。

本申请实施例中，主刻蚀工艺步包括第一刻蚀步、第二刻蚀步中的至少一者，其中，第一刻蚀步与第二刻蚀步所采用的工艺气体相同，第一刻蚀步的下电极功率大于第二刻蚀步的下电极功率。如此设置，第一刻蚀步可以在工艺过程中轰开一些化学键便于后续第二刻蚀步进行刻蚀，且产生较大的热量，有利于副产物挥发。

本申请实施例中，第一刻蚀步与第二刻蚀步的下电极功率比可以选择为(1.2~1.8):1，优选为(1.3~1.7):1，进一步优选为(1.4~1.6):1，更优选为1.5:1；如此匹配下电极功率，能够确保在相应刻蚀工艺过程中的刻蚀效率及质量，有利于副产物及时挥发。

具体的，本申请实施例中，第一刻蚀步的下电极功率为100 W~1000 W，优选为300 W~800 W，进一步优选为500 W~700 W，更优选为600 W；第二刻蚀步的下电极功率为100 W~1000 W，优选为200 W~800 W，进一步优选为300 W~500 W，更优选为400 W；如此设置下电极功率，能够确保在相应刻蚀工艺过程中的刻蚀效率及质量，有利于副产物及时挥发。

本申请实施例中，第一刻蚀步与第二刻蚀步的工艺时长比为1:(4~6)，优选为1:5；如此匹配工艺时长，能够确保在相应刻蚀工艺过程中的刻蚀效率及质量。

具体的，本申请实施例中，第一刻蚀步的工艺时长为1.2 s~3 s，优选为1.5 s~2.5 s，更优选为2 s；第二刻蚀步的工艺时长8 s~12 s，优选为9 s~11 s，更优选为10 s；如此设置工艺时长，能够确保在相应刻蚀工艺过程中的刻蚀效率及质量。

本申请实施例中，主刻蚀工艺步中，含氯气体与惰性气体流量比为(0.3~0.5):1，优选为(0.35~0.45):1，更优选为 0.4:1；如此匹配含氯气体及惰性气体，在相应刻蚀工艺过程中，能够确保刻蚀效率及质量。

具体的，主刻蚀工艺步中，含氯气体流量为 20 sccm~200 sccm，优选为 25 sccm~150 sccm，进一步优选为 30 sccm~100 sccm，再进一步优选为 35 sccm~70 sccm，更优选为 40 sccm，惰性气体流量为 10 sccm~1000 sccm，优选为 30 sccm~800 sccm，进一步优选为 50 sccm~500 sccm，进一步优选为 80 sccm~200 sccm，更优选为 100 sccm。如此设置含氯气体及惰性气体的气体流量，则在相应刻蚀工艺过程中，能够确保刻蚀效率及质量。

本申请实施例中，主刻蚀工艺步中，含氯气体包括 SiCl_4 、 BCl_3 和 Cl_2 中的至少一个，例如，含氯气体包括 BCl_3 和 Cl_2 ， BCl_3 与 Cl_2 的流量比为(0.9~1.1):1，优选为(0.99~1.05):1，进一步优选为 1:1；或者，含氯气体包括 SiCl_4 。 BCl_3 和 SiCl_4 既可以起到刻蚀作用，又可以起到侧壁保护作用， Cl_2 只有纯刻蚀作用，因此，当选择具有保护侧壁性能的含氯气体（如 BCl_3 和 SiCl_4 ）时，在刻蚀工艺过程中，能够保护侧壁，从而实现各向异性刻蚀，保证刻蚀过程中含 Sc 层与光刻胶的角度一致性，选择 Cl_2 能够加快刻蚀速率，保证刻蚀速率，且减少侧壁沉积物的沉积量，便于后续清洗工艺，保证刻蚀过程中含 Sc 层与光刻胶的刻蚀角度的一致性；故，在进行工艺气体选择时，尽量选择具有保护侧壁性能的含氯气体和具有高刻蚀速率的 Cl_2 ，以同时保证刻蚀效率及刻蚀角度的一致性，进而保证刻蚀均匀性及刻蚀质量。

本申请实施例中，主刻蚀工艺步中，惰性气体包括 Ar；选择 Ar 作为惰性气体能够确保相应刻蚀工艺过程中刻蚀效率及质量。

本申请实施例中，挥发步的工艺时长为 0.5 s~1.5 s，进一步优选为 0.8 s~1.2 s，更优选为 1 s；如此设置，将挥发步的工艺时长设置成较短的时间（例如，1 s、2 s 等）的目的是：为了在不影响刻蚀质量的前提下减少总体

工艺时长，进而提高刻蚀速率。

本申请实施例中，冷却步的工艺时长为 0.5 s~1.5 s，进一步优选为 0.8 s~1.2 s，更优选为 1 s。如此设置，将冷却步的工艺时长设置成较短的时间（例如，1 s、2 s 等）的目的是：为了在不影响刻蚀质量的前提下减少总体工艺时长，提高刻蚀速率，但工艺时长也不能太短，否则起不到该步的效果，挥发步和冷却步的工艺时长长一些虽然效果更好，但会影响产能，本申请示例中将挥发步和冷却步的工艺时长设置为 1 s。

挥发步中，可以关闭下电极功率及所有工艺气体，以便于在抽真空作用下将副产物快速挥发；或者，将挥发步中的下电极功率设置成较小数值，甚至调小至接近于零，例如，1 W，将挥发步中的工艺气体设置成较小数值，甚至调小至接近于零，例如，含氯气体和 Ar 的气体流量均设置为 1 sccm，如此设置，一方面，仍然能够将副产物及时挥发，另一方面，快速切换工艺步时无需对射频进行开启/关闭，无需对气体管道阀门开启/关闭，从而避免射频的频繁开启/关闭以及气体管道阀门的频繁开启/关闭。

冷却步中，可以关闭下电极功率及含氯气体，仍通入较少流量的 Ar，以便于在抽真空作用下，使待刻蚀晶片及时冷却及至少部分副产物及时挥发；或者，使将冷却步中的下电极功率设置成较小数值，甚至调小至接近于零，例如，1 W，将冷却步中的含氯气体调小至接近于零，例如，1 sccm，并继续通入较少气体流量的 Ar，例如，10 sccm，如此设置，一方面，仍然能够使待刻蚀晶片及时冷却，并能够使至少部分副产物及时挥发，另一方面，在快速切换工艺步时无需对射频进行开启/关闭，无需对气体管道阀门开启/关闭，从而避免射频的频繁开启/关闭以及气体管道阀门的频繁开启/关闭。

本申请实施例中，在循环主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步之前还可以包括稳定步和启辉步，在循环主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步之后还可以包括解吸附步，其中，各步中的工艺参数见下述具体示例。

本申请实施例中，刻蚀方法主要包括主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步，其中，主刻蚀工艺步至少包括第一刻蚀步和第二刻蚀步中的其中一者，辅刻蚀工艺步至少包括挥发步和冷却步中的其中一者，下面以主刻蚀工艺步包括第一刻蚀步和第二刻蚀步，辅刻蚀工艺步包括挥发步和冷却步为例，对本申请做更加详细的举例说明，具体如下所述。

本申请具体示例中，刻蚀方法具体包括以下步骤：

S1100，稳定步；

稳定步的工艺过程中，腔压为 1 mTorr~30 mTorr，优选为 3 mTorr~10 mTorr，进一步优选为 5 mTorr；上电极功率为零，下电极功率为零，氩气 (Ar) 流量为 10 sccm~1000 sccm，优选为 30 sccm~800 sccm，进一步优选为 50 sccm~500 sccm，进一步优选为 80 sccm~200 sccm，更优选为 100 sccm；含氯气体流量为 20 sccm~200 sccm，优选为 25 sccm~150 sccm，进一步优选为 30 sccm~100 sccm，再进一步优选为 35 sccm~70 sccm，更优选为 40 sccm；工艺时长为 2 s~8 s，优选为 4 s~6 s，进一步优选为 5 s。

S1200，启辉步；

启辉步的工艺过程中，腔压为 1 mTorr~30 mTorr，优选为 3 mTorr~10 mTorr，进一步优选为 5 mTorr；上电极中心功率为 100 W~1000 W，优选为 300 W~800 W，进一步优选为 600 W；上电极边缘功率为 500 W~1500 W，优选为 700 W~1300 W，进一步优选为 800 W~1200 W，进一步优选为 900 W~1000 W，更优选为 1000 W；下电极功率为零，氩气 (Ar) 流量为 10 sccm~1000 sccm，优选为 30 sccm~800 sccm，进一步优选为 50 sccm~500 sccm，进一步优选为 80 sccm~200 sccm，更优选为 100 sccm；含氯气体流量为 20 sccm~200 sccm，优选为 25 sccm~150 sccm，进一步优选为 30 sccm~100 sccm，再进一步优选为 35 sccm~70 sccm，更优选为 40 sccm；工艺时长为 2 s~8 s，进一步优选为 4 s~6 s，进一步优选为 5 s。

S1310, 第一刻蚀步;

第一刻蚀步的工艺过程中, 下电极功率为 100 W~1000 W, 进一步优选为 300 W~800 W, 进一步优选为 500 W~700 W, 更优选为 600 W, 如此设置, 能够确保刻蚀效率及质量, 由于下电极功率较高, 工艺过程中能够轰开一些化学键便于后续刻蚀, 且产生较大的热量, 有利于副产物挥发;

第一刻蚀步的工艺过程中, 氩气 (Ar) 流量为 10 sccm~1000 sccm, 优选为 30 sccm~800 sccm, 进一步优选为 50 sccm~500 sccm, 进一步优选为 80 sccm~200 sccm, 更优选为 100 sccm; 含氯气体流量为 20 sccm~200 sccm, 优选为 25 sccm~150 sccm, 进一步优选为 30 sccm~100 sccm, 再进一步优选为 35 sccm~70 sccm, 更优选为 40 sccm; 如此设置含氯气体及惰性气体的流量, 能够确保刻蚀效率及质量。

第一刻蚀步的工艺过程中, 工艺时长为 1 s~5 s, 优选为 1.5 s~3 s, 进一步优选为 2 s; 如此设置, 能够确保刻蚀效率及质量。

此外, 第一刻蚀步的工艺过程中, 腔压为 1 mTorr~30 mTorr, 优选为 3 mTorr~10 mTorr, 优选为 5 mTorr; 上电极中心功率为 100 W~1000 W, 优选为 300 W~800 W, 进一步优选为 600 W; 上电极边缘功率为 500 W~3000 W, 优选为 1000 W~2000 W, 进一步优选为 1500 W。

S1320, 第二刻蚀步;

第二刻蚀步的工艺过程中, 下电极功率为 100 W~1000 W, 优选为 200 W~800 W, 进一步优选为 300 W~500 W, 更优选为 400 W; 如此设置, 能够确保刻蚀效率及质量。

第二刻蚀步的工艺过程中, 氩气 (Ar) 流量为 10 sccm~1000 sccm, 优选为 30 sccm~800 sccm, 进一步优选为 50 sccm~500 sccm, 进一步优选为 80 sccm~200 sccm, 更优选为 100 sccm; 含氯气体流量为 20 sccm~200 sccm, 优选为 25 sccm~150 sccm, 进一步优选为 30 sccm~100 sccm, 再进一步优

选为 35 sccm~70 sccm, 更优选为 40 sccm; 如此设置含氯气体及惰性气体的流量, 能够确保刻蚀效率及质量。

第二刻蚀步的工艺过程中, 工艺时长为 5 s~15 s, 优选为 8 s~12 s, 进一步优选为 10 s; 如此设置, 能够确保刻蚀效率及质量。

此外, 第二刻蚀步的工艺过程中, 腔压为 1 mTorr~30 mTorr, 优选为 5 mTorr; 上电极中心功率为 100 W~1000 W, 优选为 300 W~800 W, 进一步优选为 600 W; 上电极边缘功率为 500 W~3000 W, 优选为 1000 W~2000 W, 进一步优选为 1500 W。

S1330, 挥发步;

挥发步的工艺过程中, 下电极功率为 0.5 W~5 W, 优选为 0.8 W~2 W, 进一步优选为 1 W; 氩气 (Ar) 流量为 0.5 sccm~5 sccm, 优选为 0.8 sccm~2 sccm, 进一步优选为 1 sccm; 含氯气体流量为 0.5 sccm~5 sccm, 优选为 0.8 sccm~8 sccm, 进一步优选为 1 sccm; 如此设置, 一方面, 能够使副产物及时挥发, 另一方面, 在快速切换工艺步时无需对射频进行开启/关闭, 无需对气体管道阀门开启/关闭, 从而避免射频的频繁开启/关闭以及气体管道阀门的频繁开启/关闭。

挥发步的工艺过程中, 工艺时长为 0.5 s~1.5 s, 优选为 0.8 s~1.2 s, 进一步优选为 1 s, 如此设置, 在不影响刻蚀质量的前提下减少总体工艺时长, 进而提高刻蚀速率。

此外, 挥发步的工艺过程中, 腔压为 1 mTorr~30 mTorr, 优选为 5 mTorr; 上电极中心功率为 100 W~1000 W, 优选为 300 W~800 W, 进一步优选为 600 W; 上电极边缘功率为 500 W~3000 W, 优选为 1000 W~2000 W, 进一步优选为 1500 W。

S1340, 冷却步;

冷却步的工艺过程中, 下电极功率为 0.5 W~5 W, 进一步优选为 0.8 W~

2 W, 进一步优选为 1 W; 氩气 (Ar) 流量为 1 sccm~15 sccm, 进一步优选为 8 sccm~12 sccm, 进一步优选为 10 sccm; 含氯气体流量为 0.5 sccm~5 sccm, 进一步优选为 0.8 sccm~8 sccm, 进一步优选为 1 sccm; 一方面, 仍然能够使待刻蚀晶片及时冷却, 并能够使至少部分副产物及时挥发, 另一方面, 在快速切换工艺步时无需对射频进行开启/关闭, 无需对气体管道阀门开启/关闭, 从而避免射频的频繁开启/关闭以及气体管道阀门的频繁开启/关闭。

冷却步的工艺过程中, 工艺时长为 0.5 s~1.5 s, 进一步优选为 0.8 s~1.2 s, 更优选为 1 s, 如此设置, 在不影响刻蚀质量的前提下减少总体工艺时长, 进而提高刻蚀速率。

此外, 冷却步的工艺过程中, 腔压为 1 mTorr~30 mTorr, 优选为 3 mTorr~10 mTorr, 进一步优选为 5 mTorr; 上电极中心功率为 100 W~1000 W, 优选为 300 W~800 W, 进一步优选为 600 W; 上电极边缘功率为 500 W~3000 W, 优选为 1000 W~2000 W, 进一步优选为 1500 W。

S1400, 解吸附步;

解吸附步的工艺过程中, 腔压为 10 mTorr~100 mTorr, 优选为 30 mTorr~70 mTorr, 进一步优选为 50 mTorr; 上电极中心功率为 100 W~1000 W, 优选为 300 W~700 W, 进一步优选为 400 W~600 W, 更优选为 500 W; 上电极边缘功率为 100 W~1000 W, 优选为 300 W~700 W, 进一步优选为 400 W~600 W, 更选为 500 W; 下电极功率为零; 含氯气体包括氯气, 氯气流量为 10 sccm~1000 sccm, 进一步优选为 20 sccm~500 sccm, 进一步优选为 50 sccm~200 sccm, 进一步优选为 100 sccm, 氩气 (Ar) 流量为 10 sccm~1000 sccm, 进一步优选为 50 sccm~600 sccm, 进一步优选为 100 sccm~300 sccm, 进一步优选为 200 sccm; 工艺时长为 2 s~8 s, 优选为 4 s~6 s, 进一步优选为 5 s。

本申请示例中, 上述稳定步、启辉步、第一刻蚀步、第二刻蚀步中的含

氯气体包括 BCl₃ 和 Cl₂，其中，BCl₃ 的流量为 10 sccm~100 sccm，进一步优选为 15 sccm~50 sccm，进一步优选为 20 sccm；Cl₂ 的流量为 10 sccm~100 sccm，进一步优选为 15 sccm~50 sccm，进一步优选为 20 sccm。除此之外，还可以将含氯气体 SiCl₄ 替换上述含氯气体 BCl₃ 和 Cl₂，SiCl₄ 的流量为 10 sccm~100 sccm，进一步优选为 15 sccm~50 sccm，进一步优选为 20 sccm。

此外，本申请示例中，基座的冷却液温度为-15 °C~60 °C，优选为 0 °C~50 °C，进一步优选为 40 °C。

为将上述本申请示例中的刻蚀方法更加清楚、详细的呈现，下面用表格对各工艺步骤中的工艺参数进行说明，具体见下面的表 1 和表 2。

表 1、本申请示例中等离子体刻蚀工艺配方

工艺步	腔 压 /mTorr	上 电 极 中 心 功 率/W	上 电 极 边 缘 功 率/W	下 电 极 功 率/W	BCl ₃ 流 量 /sccm	Cl ₂ 流 量 /sccm	Ar 流 量 /sccm	工 艺 时长/s
稳定步	5	0	0	0	20	20	100	5
启辉步	5	600	1000	0	20	20	100	5
循环执行 主刻蚀工 艺步和辅 刻蚀工艺 步	见表 2	见表 2	见表 2	见表 2	见表 2	见表 2	见表 2	见表 2
解吸附步	50	500	500	0	0	100	200	5

表 2、本申请示例中，主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步的工艺配方

工艺步	腔 压	上 电	上 电	下 电	BCl ₃	Cl ₂ 流	Ar 流	工 艺
-----	-----	-----	-----	-----	------------------	-------------------	------	-----

	/mTorr	极 中 心 功 率/W	极 边 缘 功 率/W	极 功 率/W	流 量 /sccm	量 /sccm	量 /sccm	时长/s
第一刻蚀步	5	600	1500	600	20	20	100	2
第二刻蚀步	5	600	1500	400	20	20	100	10
挥发步	5	600	1500	1	1	1	1	1
冷却步	50	600	1500	1	1	1	10	1

上述循环执行主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步中，第一刻蚀步和第二刻蚀步至少选用一步，挥发步和冷却步至少选择一步，例如，可以循环第一刻蚀步+冷却步，循环第二刻蚀步+冷却步，循环第一刻蚀步+挥发步，循环第二刻蚀步+挥发步，也可以选择循环第一刻蚀步+挥发步+冷却步，循环第二刻蚀步+挥发步+冷却步，循环第一刻蚀步+第二刻蚀步+冷却步，循环第一刻蚀步+第二刻蚀步+挥发步，还可以全部都选用，即：循环第一刻蚀步+第二刻蚀步+挥发步+冷却步（如表 2 中，主刻蚀工艺步包括第一刻蚀步和第二刻蚀步，辅刻蚀工艺步包括挥发步和冷却步），而 BCl_3 和 Cl_2 也可以使用 SiCl_4 等含氯气体；其中， BCl_3 和 SiCl_4 既可以起到刻蚀作用，又可以起到侧壁保护作用， Cl_2 只有纯刻蚀作用，因此，当选择具有保护侧壁性能的含氯气体（如 BCl_3 和 SiCl_4 ）时，在刻蚀工艺过程中，能够保护侧壁，从而实现各向异性刻蚀，保证刻蚀过程中含 Sc 层与光刻胶的角度一致性，选择 Cl_2 能够加快刻蚀速率，保证刻蚀速率，且减少侧壁沉积物的沉积量，便于后续清洗工艺，保证刻蚀过程中含 Sc 层与光刻胶的刻蚀角度的一致性；故，在进行工艺气体选择时，尽量选择具有保护侧壁性能的含氯气体和具有高刻蚀速率的 Cl_2 ，以

同时保证刻蚀效率及刻蚀角度的一致性，进而保证刻蚀均匀性及刻蚀质量。

具体到本申请示例，第一刻蚀步的下电极功率要显著大于第二刻蚀步的下电极功率，而挥发步与冷却步中下电极功率尽可能低，挥发步的气体流量（含氯气体和惰性气体）尽可能小，冷却步的含氯气体流量要尽可能小，冷却步适当保留一点惰性气体流量以便于更好地对待刻蚀晶片起到冷却作用。

将挥发步的下电极功率、含氯气体流量及 Ar 气体流量参数值设置成 1 的目的是在挥发步快速切换的时候避免射频频繁开启和关闭，以及气体管道的阀门频繁开启和关闭；将冷却步的下电极功率、含氯气体流量参数值设置成 1，Ar 气体流量的参数设置成 10（即，继续通入少量 Ar 等惰性气体）的目的是在冷却步快速切换的时候避免射频频繁开启和关闭，以及气体管道的阀门频繁开启和关闭，并确保待刻蚀晶片的冷却效果；将工艺时长设置成较短的时间（例如，1 s、2 s 等）的目的是为了在不影响刻蚀质量的前提下减少工艺时间，提高刻蚀速率，但工艺时长也不能太短，否则起不到该步的效果，挥发步和冷却步的工艺时长长一些虽然效果更好，但会影响产能，本申请示例中将挥发步和冷却步的工艺时长设置为 1 s。

第一刻蚀步的下电极功率比第二刻蚀步的下电极功率大，其作用在于第一刻蚀步在工艺过程中轰开一些化学键便于后续刻蚀，且产生较大的热量，有利于副产物挥发；挥发步中关闭下电极功率以及关闭所有进气，并抽真空，在抽真空的作用下让副产物快速挥发（无其它进气，只能将副产物抽走）；冷却步中关闭下电极功率以及关闭大部分参与化学反应的进气（保留 Ar 惰性气体），并抽真空，以带走晶圆上产生的热量，保证刻蚀均匀性，在此过程中，还会将部分副产物快速挥发。

需要说明的是，本实施例中，以含 Sc 层以 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 材料为例，Sc 是一种金属元素，可以与氯发生反应生成一种具有一定挥发性但挥发性又不太好

的 ScCl_3 ，本申请实施例中所提供的刻蚀方法能够在刻蚀工艺过程中很好地挥发该副产物 ScCl_3 ，则其它含 Sc 的材料都可以采用本申请实施例所提供的方法进行刻蚀。由图 3a-图 3b 所示的刻蚀含 Sc 层的结果表征图可知，采用本申请实施例所提供的刻蚀方法，侧壁无明显的副产物，能够使各循环阶段顺利进行刻蚀工艺，且刻蚀后的含 Sc 层与光刻胶的角度（倾斜）基本一致，刻蚀比较均匀，不仅保证了刻蚀速率，还保证了刻蚀质量，图 3a-图 3b 中尺寸只是一具体示例的大致数值，仅仅是为了呈现所刻蚀的 Sc 层与光刻胶的角度关系，如图中 Sc 层与光刻胶的角度均为约 65° ，实际上除了该角度之外，两者的角度能够同时达到 75° ，即，图中尺寸对本申请不具有限定作用。

由图 3a-图 3d 可以看出， $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层的角度与光刻胶的角度保持一致，说明刻蚀过程中，未受到侧壁沉积副产物的影响。同样需要说明的是，图 3a-图 3d 仅用于说明刻蚀结果，并非真实半导体器件的结构件。

采用 IEP（Interferometry End Point）或者 LEP（Laser-Interferometry End Point）的方法指示刻蚀终点，可以得到不同厚度的 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层，如图 4a-图 4d 所示，采用本申请实施例所提供的刻蚀方法能够得到的 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层厚度分别可以约为 100nm（图 4a 中 103nm）、50nm（图 4b 中 46.3nm）、30nm（图 4c 中 26.4nm）等，其中，图 4d 中 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层的厚度约为 10nm 左右，由于太薄不便于标注，故未进行标注。由图 4a-图 4d 可知，本申请实施例所提供的刻蚀方法能够刻蚀得到含 Sc 层的厚度范围较广，刻蚀厚度容易控制，即，不仅能刻蚀得到较厚的含 Sc 层（如 100nm 的 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层），还能刻蚀得到较薄的含 Sc 层（如 10nm 以下的 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层）。在对含 Sc 层的半导体器件制造中引入凹槽栅结构，即可制成常关型的半导体器件，如常关型的含 Sc 层的晶体管。

需要说明的是，该表征图并非真实半导体器件的一部分，而是仅用于示意性呈现刻蚀结果，其可以模拟图 2a-图 2n（含 Sc 层的半导体器件的制造方

法，下面实施例二将进行详细说明)所制造的半导体器件的加工效果图，可以用 SEM 进行表征，而不需要使用 TEM(Transmission Electron Microscope，透射电子显微镜)。

需要说明的是，本申请实施例中的图 3a-图 3d、图 4a-图 4d 中，均为电镜照片，为了便于呈现衬度，实验过程中 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 下面为一层金属，该金属层较薄，约 100nm 以内，且刻蚀 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 层时不会刻蚀到底至金属层，故该金属层对 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 层不会影响刻蚀结果，也就是说， $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 层下方无论是金属层还是 GaN，都不会影响刻蚀结果，故在制造含 Sc 层半导体器件时，可以在 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 层下方设置 GaN 层。此外，图 4a-图 4d 中的尺寸只是一具体示例的大致数值，仅仅是为了呈现能够刻蚀得到不同厚度的 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层，即，图中尺寸对本申请不具有限定作用。

此外，本申请实施例中的第一刻蚀步可以包括轰击步和/或刻蚀步，第二刻蚀步可以包括轰击步和/或刻蚀步，还可以设置为，第一刻蚀步为轰击步，第二刻蚀步为刻蚀步，本申请对此不做限定。

下面结合以下对比例，对本申请实施例的刻蚀方法进一步进行对比说明。

对比例一

该对比例中， $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的 $x=20\%$ ，即含 Sc 量摩尔比 20%，使用表 3 中的工艺配方，对 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 进行刻蚀，其中，ESC 温度为 40 °C。

表 3、对比例一的等离子体刻蚀工艺配方

工艺步	腔 压 /mTorr	上 电 极 中 心 功 率/W	上 电 极 边 缘 功 率/W	下 电 极 功 率/W	BCl_3 流 量 /sccm	Cl_2 流 量 /sccm	Ar 流 量 /sccm	工 艺 时长/s
稳定步	5	0	0	0	20	20	100	5

启辉步	5	600	1000	0	20	20	100	5
主刻蚀步	5	600	1500	400	20	20	100	240
解吸附步	50	500	500	0	0	100	200	5

该对比例一中，主刻蚀步中未采用本申请实施例中的循环主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步，仅采用了刻蚀步，其工艺参数见表 3。参见图 5a-图 5d，SEM 表征结果显示该对比例中的侧壁有较重的副产物，导致角度偏斜，其中，光刻胶具有约 75° 左右的角度，而 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的角度仅有约 47°，两者的倾斜角度相差非常大。需要说明的是，图 5a-图 5d 仅用于说明刻蚀结果，并非图 2a-图 2n 所示的半导体器件。对侧壁副产物进行 X 射线能量色散 (Energy Dispersive X-Ray) 表征，显示其含有 Sc，如图 6a-图 6b 所示，说明副产物是由于 ScCl_3 不易挥发所导致，并且导致光刻胶与 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的角度的刻蚀后角度明显不一致。

对比例二

该对比例二中，M.T. Hardy 等发表的名称为 A Novel Barrier Material for High Power GaN-Based RF Transistors 的文章中，使用 200 W 的上电极功率和 30 W~70 W 的下电极功率对 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 进行刻蚀，根据如图 7 所示的结果统计图，说明其刻蚀速率较低。

对比例三

该对比例三中，P.M. Mayrhofer 等发表的名称为 FABRICATION AND CHARACTERISATION OF SCALN-BASED PIEZOELECTRIC MEMS CANTILEVERS 的文章中，使用含 SiCl_4 的刻蚀气体、15 mTorr 的腔室压力、150 W 的上电极功率和 225 W 的下电极功率对 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 进行刻蚀，根据如图 8a-图 8b 所示的刻蚀结果表征图可知，其刻蚀速率较低，仅有 10nm/min。

对比例四

该对比例四中，Konsta Airola 等发表的名称为 High-fidelity patterning of AlN and ScAlN thin films with wet chemical etching 的文章中，使用不同的湿法刻蚀条件下获得了 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的刻蚀形貌图，如图 9a-图 9d 所示，由图可知，虽然其刻蚀速率可以达到 100nm/min 以上，但是当半导体器件的尺寸较小时溶液难以进入刻蚀面，以及刻蚀所使用的酸性或者碱性溶液同时也会影响器件中的其它结构。

由上述对比例的对比分析可知，本申请实施例所提供的含 Sc 层的刻蚀方法，由于采用了循环执行的主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步，能够实现较高的刻蚀速率和刻蚀均匀性，进而保证刻蚀效率及质量；且能够实现含 Sc 层和光刻胶的角度一致性，能够刻蚀获得不同厚度的含 Sc 层，能够实现含 Sc 层的减薄化设计，为制得常关型半导体器件起到了提供了技术支持。

实施例二

本申请实施例提供一种半导体器件的制造方法，包括步骤：

S210，提供衬底；

S220，在衬底上形成含 Sc 层；其中，含 Sc 层能够作为势垒层，以 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层为例；

S230，应用上述实施例一中的刻蚀方法对含 Sc 层进行刻蚀以形成预定深度的凹槽，预定深度小于含 Sc 层的厚度；

S240，在凹槽内形成栅极，并在凹槽的两侧形成源极和漏极。

采用本申请实施例所提供的含 Sc 层的刻蚀方法能够产生上述刻蚀方法相同的有益效果，即提高刻蚀效率，在此不再赘述。

本申请实施例中，步骤 S220 包括以下子步骤：

S2202，采用电子束蒸发方式获得 Sc 前驱体；

S2204，通过丝状渗出室获得 Al 前驱体；

S2206, 采用分子束外延方法在衬底上沉积生长得到 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层; 其中, 分子束外延方法的工艺参数中, 温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 氮气流量为 $0.1\text{ sccm}\sim 10\text{ sccm}$ 。

本申请实施例中, 步骤 S210 包括以下子步骤:

S2102, 取已经清洗干净的衬底;

S2104, 于衬底沉积缓冲层;

S2106, 于缓冲层沉积外延层。

其中, 步骤 2104 中, 缓冲层包括第一缓冲层和第二缓冲层, 包括以下子步骤:

(1) 向反应腔室通入三甲基铝和氮气, 于衬底沉积形成第一缓冲层; 第一缓冲层的厚度为 $4\text{ nm}\sim 6\text{ nm}$, 优选为 5 nm , 温度为 $680\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 720\text{ }^{\circ}\text{C}$, 优选为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 沉积生长速度为 $0.8\text{ nm/min}\sim 1.2\text{ nm/min}$, 优选为 1 nm/min ;

(2) 继续向反应腔室通入三甲基铝和氮气, 于第一缓冲层形成第二缓冲层; 第二缓冲层的厚度为 $4\text{ nm}\sim 96\text{ nm}$, 温度为 $780\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 820\text{ }^{\circ}\text{C}$, 优选为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 沉积生长速度为 $4.5\text{ nm/min}\sim 5.5\text{ nm/min}$, 优选为 5 nm/min 。

步骤 2106 包括以步骤: 向反应腔室通入三甲基镓和氮气, 于第二缓冲层沉积形成外延层; 该工艺步骤中, 温度为 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 优选为 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

上述步骤 S2102 包括以下子步骤:

(1) 选择衬底, 衬底为蓝宝石衬底、碳化硅衬底或硅衬底;

(2) 选择清洗溶剂, 清洗溶剂为浓度为 98% 浓硫酸和浓度为 30% 双氧水的混合溶液, 其中, 98% 浓硫酸与 30% 双氧水的体积比为 $6/4\sim 8/2$, 优选为 $7/3$;

(3) 将衬底置于清洗溶剂中, 加热至预设清洗温度, 加热至少 30 分钟以上或直至气泡消失; 其中, 预设清洗温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 115\text{ }^{\circ}\text{C}$, 优选为 110

°C;

(4) 将衬底自清洗溶剂中取出, 并用超纯水清洗干净。

本申请实施例中, 步骤 230 以下子步骤:

S2302, 于势垒层旋涂第一光刻胶, 并对第一光刻胶进行曝光、显影、定影, 得到具有第一通槽的第一掩模板, 第一通槽所裸露的势垒层的部位为凹槽的位置;

其中, 第一光刻胶的厚度为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$, 优选为 $3\ \mu\text{m}$; 曝光时长为 $3\ \text{s}\sim 20\ \text{s}$, 优选为 $6\ \text{s}$; 显影时长为 $45\ \text{s}\sim 120\ \text{s}$, 优选为 $75\ \text{s}$; 定影时长为 $60\ \text{s}\sim 300\ \text{s}$, 优选为 $120\ \text{s}$;

S2304, 对第一掩模板和势垒层进行刻蚀, 其中, 刻蚀第一通槽正对的区域形成凹槽;

该刻蚀工艺步骤采用上述实施例一的刻蚀方法中所提供的步骤, 包括: 稳定步、启辉步、主刻蚀工艺步、辅刻蚀工艺步和解吸附步, 其中, 循环执行主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步, 主刻蚀工艺步包括第一刻蚀步和第二刻蚀步中的至少一者, 辅刻蚀工艺步包括挥发步和冷却步中的至少一者, 各工艺步骤及其工艺参数见上述实施例一种所陈述的内容, 在此不再赘述;

S2306, 去除第一光刻胶及副产物。该步骤包括以下子步骤:

(1) 若第一光刻胶仍有残留, 则采用有机药液对第一光刻胶进行浸泡和冲洗, 直至第一光刻胶完全脱落;

(2) 去除第一光刻胶的副产物和步骤 S2304 中刻蚀工艺所产生的副产物。

本申请实施例中, 步骤 S240 包括以下子步骤:

S2402, 于具有凹槽的势垒层旋涂第二光刻胶, 并对第二光刻胶进行曝光、显影、定影, 得到具有第二通槽和第三通槽的第二掩模板, 第二通槽所裸露的势垒层的部位为源极位置, 第三通槽所裸露的势垒层的部位为漏极位

置；

其中，第二光刻胶的厚度为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $1\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $3\ \mu\text{m}$ ；第二通槽的宽度为 $5\ \mu\text{m}\sim 500\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $6\ \mu\text{m}\sim 200\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $7\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $8\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $10\ \mu\text{m}$ ；第三通槽的宽度为 $5\ \mu\text{m}\sim 500\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $6\ \mu\text{m}\sim 200\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $7\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $8\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $10\ \mu\text{m}$ ；曝光时长为 $3\ \text{s}\sim 20\ \text{s}$ ，进一步优选为 $5\ \text{s}\sim 10\ \text{s}$ ，进一步优选为 $6\ \text{s}$ ；显影时长为 $45\ \text{s}\sim 120\ \text{s}$ ，进一步优选为 $60\ \text{s}\sim 100\ \text{s}$ ，进一步优选为 $75\ \text{s}$ ；定影时长为 $60\ \text{s}\sim 300\ \text{s}$ ，进一步优选为 $80\ \text{s}\sim 200\ \text{s}$ ，进一步优选为 $120\ \text{s}$ ；

S2404，对第二光刻胶、势垒层的源极位置和漏极位置进行金属离子沉积形成源极和漏极；或者，于势垒层热蒸镀形成源极和漏极；

其中，采用物理气相沉积过程中，依次沉积 Ti 离子和 Al 离子得到 Ti 层和 Al 层；反应腔室的腔压为 $10\ \text{mTorr}\sim 100\ \text{mTorr}$ ；上电极功率为 $750\ \text{W}\sim 3000\ \text{W}$ ，下电极功率为 $5\ \text{W}\sim 500\ \text{W}$ ，工艺气体包括氩气，氩气流量为 $50\ \text{sccm}\sim 500\ \text{sccm}$ ；或者，热蒸镀工艺过程中，反应腔室的腔压为 $5\times 10^{-5}\ \text{Pa}\sim 5\times 10^{-4}\ \text{Pa}$ ，优选为 $1\times 10^{-4}\ \text{Pa}$ ，电流为 $1\ \text{mA}\sim 20\ \text{mA}$ ，优选为 $5\ \text{mA}$ 。

S2406，去除第二光刻胶及副产物。其中，该步骤包括以下子步骤：

(1) 若第二光刻胶仍有残留，则采用有机药液对第二光刻胶进行浸泡和冲洗，直至第二光刻胶完全脱落；

(2) 去除第二光刻胶的副产物和步骤 S2404 沉积工艺所产生的副产物，或者，去除第二光刻胶的副产物和步骤 S2404 热蒸镀工艺所产生的副产物；

S2408，于具有凹槽、源极和漏极的势垒层旋涂第三光刻胶，并对第三光刻胶进行曝光、显影、定影，得到具有第四通槽的第三掩模板，第四通槽所裸露的势垒层的部位为栅极位置，栅极位置位于凹槽内；

其中,第三光刻胶的厚度为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$,进一步优选为 $1\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$,进一步优选为 $3\ \mu\text{m}$;曝光时长为 $3\ \text{s}\sim 20\ \text{s}$,进一步优选为 $5\ \text{s}\sim 10\ \text{s}$,进一步优选为 $6\ \text{s}$;显影时长为 $45\ \text{s}\sim 120\ \text{s}$,进一步优选为 $60\ \text{s}\sim 100\ \text{s}$,进一步优选为 $75\ \text{s}$;定影时长为 $60\ \text{s}\sim 300\ \text{s}$,进一步优选为 $80\ \text{s}\sim 200\ \text{s}$,进一步优选为 $120\ \text{s}$;

S2410,对第三光刻胶、凹槽内的栅极位置进行金属离子沉积形成栅极;或者,该步骤为,于凹槽的栅极位置热蒸镀形成栅极;

其中,采用物理气相沉积,依次沉积 Ni 离子和 Au 离子得到 Ni 层和 Au 层;反应腔室的腔压为 $10\ \text{mTorr}\sim 100\ \text{mTorr}$;上电极功率为 $750\ \text{W}\sim 3000\ \text{W}$,下电极功率为 $5\ \text{W}\sim 500\ \text{W}$,工艺气体包括氩气,氩气流量为 $50\ \text{sccm}\sim 500\ \text{sccm}$;或者,热蒸镀工艺过程中,反应腔室的腔压为 $5\times 10^{-5}\ \text{Pa}\sim 5\times 10^{-4}\ \text{Pa}$,优选为 $1\times 10^{-4}\ \text{Pa}$,电流为 $1\sim 20\ \text{mA}$,优选为 $5\ \text{mA}$ 。

S2412,去除第三光刻胶及副产物。其中,该步骤包括以下子步骤:

(1)若第三光刻胶仍有残留,则采用有机药液对第二光刻胶进行浸泡和冲洗,直至第三光刻胶完全脱落;

(2)去除第三光刻胶的副产物和步骤 S2410 的沉积工艺所产生的副产物;或者,去除第三光刻胶的副产物和步骤 S2410 热蒸镀工艺所产生的副产物。

本申请实施例中,步骤 S240 之后还包括以下步骤:

S250,对具有源极、栅极、漏极和凹槽的势垒层进行沉积形成钝化层。

具体的,该步骤的沉积工艺过程中,采用等离子体增强化学气相沉积或高密度等离子体化学气相沉积形成钝化层;其中,钝化层包括 SiN 层和 SiO_2 层;反应腔室的腔压为 $1\ \text{mTorr}\sim 1000\ \text{mTorr}$,若采用高密度等离子体化学气相沉积,则腔压优选为 $5\ \text{mTorr}$,若采用等离子体增强化学气相沉积,则腔压优选为 $500\ \text{mTorr}$;上电极功率为 $500\ \text{W}\sim 15000\ \text{W}$,优选为 $5000\ \text{W}$;下电

极功率为 0~15000 W, 优选为 5000 W; 工艺气体包括 SiH_4 和 O_2 , SiH_4 的流量为 10 sccm~1000 sccm, 优选为 50 sccm, O_2 流量为 10 sccm~1000 sccm, 优选为 500 sccm, 基座的冷却液温度为 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $100\text{ }^\circ\text{C}$, 优选为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

本申请实施例中, 步骤 S250 之后, 还包括以下步骤:

S260, 封装切割, 得到含 Sc 层的半导体器件, 例如, 得到含 Sc 层晶体管等。

为进一步解释说明本申请实施例所提供的半导体器件的制造方法, 下面列举一具体示例, 具体如下所述:

S301, 衬底的清洁, 得到满足洁净度要求的衬底, 如图 2a 所示, 其中, 衬底 120 可以选用蓝宝石、碳化硅、硅等, 以硅为例, 采用 RCA 标准清洗法, 市售 98% 浓硫酸: 市售 30% 双氧水以体积比 7:3 混合, 放入硅片后加热至 $110\text{ }^\circ\text{C}$, 直至气泡消失 (至少三十分钟以上), 取出硅片并用超纯水清洗干净;

S302, 采用金属有机物化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 生长 AlN 缓冲层, AlN 缓冲层的厚度为 10nm~100nm, 优选为 40nm, 如图 2b 所示, 具体地, 向反应腔室中通入三甲基铝和氨气, 升温到 $700\text{ }^\circ\text{C}$, 控制生长速率在 1nm/min, 在衬底 120 上沉积一层厚度为 5nm 的 AlN 成核层; 接着, 继续保持三甲基铝和氨气的通入, 提高腔室内的温度至 $800\text{ }^\circ\text{C}$, 提高生长速率至 5nm/min, 形成 AlN 缓冲层 130;

S303, 在步骤 S302 的基础上停止通入三甲基铝, 继续向反应腔室内通入三甲基镓和氨气, 升温至 $1100\text{ }^\circ\text{C}$, 在 AlN 缓冲层 130 上继续进行 GaN 外延层 110 的沉积, 如图 2c 所示。GaN 外延层 110 厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ ~ $10\text{ }\mu\text{m}$, 优选为 $3\text{ }\mu\text{m}$;

S304, 采用分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 方法进行 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的生长得到外延层 200, 如图 2d 所示, 其中, 外延层 200 的厚度为 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ ~ $1\text{ }\mu\text{m}$, 温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $900\text{ }^\circ\text{C}$, 氨气流量为 0.1 sccm~10 sccm, Sc 前驱体

可以由电子束蒸发方式获得，Al 前驱体可以由丝状渗出室（Filament effusion cell）获得；

S305，旋涂光刻胶，如图 2e 所示，得到第一光刻胶层 310，其具有第一通槽 311，其中，第一光刻胶层 310 的厚度为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ ，优选为 $3\ \mu\text{m}$ ，曝光，显影，掩模板提前进行设计和加工，使得第一通槽 311，即凹槽部分（从凹槽的两端分别开始计算）距离源极和漏极的距离分别是 $0.3\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ ，曝光时长为 $3\ \text{s}\sim 20\ \text{s}$ ，优选为 $6\ \text{s}$ ，显影时长为 $45\ \text{s}\sim 120\ \text{s}$ ，优选为 $75\ \text{s}$ ，定影时长为 $60\ \text{s}\sim 300\ \text{s}$ ，优选为 $120\ \text{s}$ ，使光刻胶图案化；

需要说明的是，对于耐压器件而言，栅极距离漏极的距离可以影响器件所能耐受的电压，而对于射频器件而言，栅极距离源极的距离可以影响器件的电流密度、导通电阻和跨导峰值，减小栅极距离源极的距离可以改善上述参数，因此，栅极与漏极之间的距离设置为是栅极与源极之间的距离的 $1\sim 5$ 倍，即，栅极与漏极之间的距离:栅极与源极之间的距离的比值为 $(1\sim 5):1$ 。

S306，等离子体刻蚀 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ，如图 2f 所示，形成凹槽 240，腔压为 $1\ \text{mTorr}\sim 30\ \text{mTorr}$ ，优选为 $5\ \text{mTorr}$ ，上电极功率为 $500\ \text{W}\sim 3000\ \text{W}$ ，上电极中心功率优选为 $600\ \text{W}$ ，上电极边缘功率优选为 $1500\ \text{W}$ ；主刻蚀工艺步的下电极功率为 $100\ \text{W}\sim 1000\ \text{W}$ ，第一刻蚀步的下电极功率优选为 $600\ \text{W}$ ，第二刻蚀步的下电极功率优选为 $400\ \text{W}$ ；辅刻蚀工艺步的下电极功率接近于零，优选为 $1\ \text{W}$ ；主刻蚀工艺步的氩气（Ar）流量为 $10\ \text{sccm}\sim 1000\ \text{sccm}$ ，优选为 $100\ \text{sccm}$ ， BCl_3 流量为 $10\ \text{sccm}\sim 100\ \text{sccm}$ （也可以用 SiCl_4 等其它含氯气体），优选为 $20\ \text{sccm}$ ， Cl_2 流量为 $10\ \text{sccm}\sim 100\ \text{sccm}$ （也可以用 SiCl_4 等其它含氯气体）；辅刻蚀工艺步的工艺气体流量接近于零，其中，挥发步的含氯气体和 Ar 流量均优选为 $1\ \text{sccm}$ ，冷却步的含氯气体流量优选为 $1\ \text{sccm}$ ，Ar 流量优选为 $10\ \text{sccm}$ ；基座冷却液温度为 $-15\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$ ，优选为 $40\ ^\circ\text{C}$ 。

具体的，该刻蚀工艺步骤采用上述实施例一的刻蚀方法中所提供的步

骤, 包括: 稳定步、启辉步、主刻蚀工艺步、辅刻蚀工艺步和解吸附步, 其中, 循环执行主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步, 主刻蚀工艺步包括第一刻蚀步和第二刻蚀步中的至少一者, 辅刻蚀工艺步包括挥发步和冷却步中的至少一者, 各工艺步骤及其工艺参数参考上述实施例一种所陈述的内容, 在此不再赘述。

S307, 湿法去胶, 如图 2g 所示, 去除第一光刻胶层 310, 其中, 使用有机药液, 例如丙酮等, 时间不做限定, 以光刻胶大部分脱落含 Sc 层表面时结束浸泡, 再用流动的有机药液冲洗, 直至光刻胶完全脱落含 Sc 层表面, 去除光刻胶和刻蚀工艺副产物的残留;

S308, 旋涂光刻胶, 如图 2h 所示, 得到第二光刻胶层 320, 其具有第二通槽 321 和第三通槽 322, 第二光刻胶层 320 的厚度为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$, 优选为 $3\ \mu\text{m}$, 曝光, 显影, 掩模板提前进行设计和加工, 并使得源极和漏极的电极宽度约 $5\ \mu\text{m}\sim 500\ \mu\text{m}$, 优选为 $10\ \mu\text{m}$, 曝光时长为 $3\ \text{s}\sim 20\ \text{s}$, 优选为 $6\ \text{s}$, 显影时长为 $45\ \text{s}\sim 120\ \text{s}$, 优选为 $75\ \text{s}$, 定影时长为 $60\ \text{s}\sim 300\ \text{s}$, 优选为 $120\ \text{s}$, 使光刻胶图案化;

S309, 制作源极 210 和漏极 230 的金属 Ti/Al 形成与导电沟道的欧姆接触, 如图 2i 所示, 具体的, 采用物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 方法, 其中, Ti 厚度为 $0.05\ \mu\text{m}\sim 0.2\ \mu\text{m}$, 优选为 $0.1\ \mu\text{m}$, Al 厚度为 $0.1\ \mu\text{m}\sim 0.5\ \mu\text{m}$, 优选为 $0.3\ \mu\text{m}$, 工艺条件方面, 腔压为 $10\ \text{mTorr}\sim 100\ \text{mTorr}$, 上电极功率为 $750\ \text{W}\sim 3000\ \text{W}$, 下电极功率为 $5\ \text{W}\sim 500\ \text{W}$, Ar 流量为 $50\ \text{sccm}\sim 500\ \text{sccm}$; 在一些实施例中, 该步也可以使用热蒸镀制备, 腔压为 $5\times 10^{-5}\ \text{Pa}\sim 5\times 10^{-4}\ \text{Pa}$, 优选为 $1\times 10^{-4}\ \text{Pa}$, 电流为 $1\ \text{mA}\sim 20\ \text{mA}$, 优选为 $5\ \text{mA}$;

S310, 湿法去胶, 如图 2j 所示, 去除第二光刻胶层 320, 具体的, 该步骤与步骤 S307 基本一致;

S311, 旋涂光刻胶, 如图 2k 所示, 得到第三光刻胶 330, 其具有第四通槽 331, 其厚度为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$, 优选为 $3\ \mu\text{m}$, 曝光、显影、掩模板提前进行设计和加工, 使得器件的栅极的金属与漏极 230 的金属之间的距离约 $1\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$, 优选为 $5\ \mu\text{m}$, 栅极的金属与源极 210 的金属之间的距离约 $0.5\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$, 优选为 $1\ \mu\text{m}$, 栅极长度约 $0.5\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$, 优选为 $1\ \mu\text{m}$, 栅极宽度约 $0.1\ \text{mm}\sim 10\ \text{mm}$, 优选为 $3\ \text{mm}$, 半导体器件的有效区域约 $(1\sim 10)\times 10^{-4}\ \text{cm}^2$ (包含源极和漏极的区域), 曝光时长为 $3\ \text{s}\sim 20\ \text{s}$, 优选为 $6\ \text{s}$, 显影时长为 $45\ \text{s}\sim 120\ \text{s}$, 优选为 $75\ \text{s}$, 定影时长 $60\ \text{s}\sim 300\ \text{s}$, 优选为 $120\ \text{s}$, 使光刻胶图案化;

S312, 制作栅极 220 的金属 Ni/Au, 如图 2l 所示, 具体的, Ni 厚度为 $1\ \text{nm}\sim 10\ \text{nm}$, 优选为 $5\ \text{nm}$, Au 厚度为 $10\ \text{nm}\sim 100\ \text{nm}$, 优选为 $50\ \text{nm}$, 可以采用 PVD 或者热蒸镀实现, 与步骤 S309 类似;

S313, 湿法去胶, 如图 2m 所示, 去除第三光刻胶 330, 该步骤与步骤 S307 基本一致;

S314, 采用等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 或者高密度等离子体化学气相沉积 (High Density Plasma Chemical Vapor Deposition, HDPCVD) 在半导体器件表面沉积钝化层 400, 以保护半导体器件, 如图 2n 所示, 具体的, 以厚度为 $300\ \text{nm}$ 的 SiN 加上厚度为 $600\ \text{nm}$ 的 SiO₂ 为例, 其中, 该步骤的工艺参数为, 腔压为 $1\ \text{mTorr}\sim 1000\ \text{mTorr}$, 采用 HDPCVD 时腔压优选为 $5\ \text{mTorr}$, 采用 PECVD 时腔压优选为 $500\ \text{mTorr}$, 上电极功率为 $500\ \text{W}\sim 15000\ \text{W}$, 优选为 $5000\ \text{W}$, 下电极功率为 $0\sim 15000\ \text{W}$, 优选为 $5000\ \text{W}$, SiH₄ 流量为 $10\ \text{sccm}\sim 1000\ \text{sccm}$, 优选为 $50\ \text{sccm}$, O₂ 流量为 $10\ \text{sccm}\sim 1000\ \text{sccm}$, 优选为 $500\ \text{sccm}$, 基座冷却液温度为 $-15\ ^\circ\text{C}\sim 100\ ^\circ\text{C}$, 优选为 $40\ ^\circ\text{C}$;

S315、封装切割。

本申请实施例还提供了一种半导体器件，该半导体器件包括：衬底、含 Sc 层、源极、漏极和栅极；其中，含 Sc 层设置在衬底上，含 Sc 层远离衬底的一侧形成有凹槽，凹槽的深度小于含 Sc 层的厚度；源极设置在凹槽的第一侧；漏极设置在凹槽的第二侧，第二侧与第一侧相对，源极与凹槽的第一侧的边缘之间的间距小于漏极与凹槽的第二侧的边缘之间的间距；栅极设置在凹槽内，且栅极与源极之间的间距小于栅极与漏极之间的间距。在本实施例中，凹槽例如可以采用上文所述的含 Sc 层的刻蚀方法来形成。容易理解的是，上述源极和漏极均设置于含 Sc 层远离衬底的一侧，且位于凹槽之外；并且，凹槽的第一侧和第二侧分别是指位于凹槽的两个槽侧面的外侧。

该半导体器件具有含 Sc 层，含 Sc 层为势垒层，应用上述刻蚀方法对含 Sc 层刻蚀形成预定深度的凹槽，凹槽的形成，以及凹槽内的栅极形成凹槽栅结构，与相关技术相对比，该凹槽栅结构能够使栅极所在的势垒层减薄，如此设置，当对栅极提供栅压进行调控时，势阱出现，从而形成二维电子气，实现了半导体器件的高电子迁移率；当不加栅压时，所形成的二维电子气的势阱消失，半导体器件处于关断状态，即该半导体器件为常关型半导体器件，实现半导体器件的安全控制性能。

本申请实施例中，含 Sc 层包括 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ，其中， x 的取值范围小于 43%，优选的 20%~40%，进一步优选的 22%~38%，进一步优选的 25%~35%，进一步优选的 28%~32%，更优选的 30%；凹槽的底部与含 Sc 层朝向衬底的一侧的间距为 1nm~100nm，优选的 2nm~20nm，进一步优选的 3nm~10nm，更优选的 5nm；源极与凹槽的第一侧的边缘之间的间距为 0.1 μm ~0.5 μm ；漏极与凹槽的第二侧的边缘之间的间距 0.5 μm ~5 μm ；栅极的长度为 0.5 μm ~5 μm ，进一步优选为 0.6 μm ~2 μm ，进一步优选为 1 μm ，宽度为 0.1 mm~10 mm，进一步优选为 1 mm~5 mm，进一步优选为 3 mm。

下面以制造出含 Sc 层的半导体器件（例如为晶体管）为例，如图 1 所

示,该半导体器件包括衬底120、含Sc层(即,势垒层200)、源极210、漏极230和栅极220;其中,含Sc层设置在衬底120的上方;含Sc层远离衬底120的一侧形成有凹槽240,凹槽240的深度小于含Sc层的厚度;源极210设置在凹槽240的第一侧;漏极230设置在凹槽240的第二侧,第二侧与第一侧相对,源极210与凹槽240的第一侧的边缘之间的间距小于漏极230与凹槽240的第二侧的边缘之间的间距;栅极220设置在凹槽240内,且栅极220与源极210之间的间距小于栅极220与漏极230之间的间距。

具体的,本实施例中,衬底120与含Sc层之间还具有缓冲层130和外延层110,其中,外延层110、缓冲层130和衬底120自上而下依次设置形成了外延片100,请继续参见图1,外延片100的外延层110沉积有势垒层200,势垒层200远离衬底120的一侧形成有凹槽240,源极210设置在凹槽240的第一侧;漏极230设置在凹槽240的第二侧,栅极220设置在凹槽240内,源极210、栅极220、漏极230和凹槽240间隔设置,凹槽240的开口背向于外延层110,且凹槽240的底部未通到外延层110,即,凹槽240的深度小于势垒层200的厚度,栅极220位于凹槽240内;势垒层200为含Sc层。本实施例,势垒层200仍然以 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 势垒层为例。

凹槽240的底部与含Sc层朝向衬底的一侧的间距 h 为 $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$,优选的 $2\text{nm}\sim 20\text{nm}$,进一步优选的 $3\text{nm}\sim 10\text{nm}$,更优选的 5nm ;凹槽240具有相对设置的第一边缘(即,第一侧的边缘)和第二边缘(即,第二侧的边缘),其中,第一边缘位于栅极220与源极210之间,第二边缘位于栅极220和漏极230之间;第一边缘距离源极210的距离 M 为 $0.1\mu\text{m}\sim 0.5\mu\text{m}$,第二边缘距离漏极230的距离 N 为 $0.5\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$;栅极220的长度 G 为 $0.5\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$,进一步优选为 $0.6\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$,进一步优选为 $1\mu\text{m}$;栅极220的宽度为 $0.1\text{mm}\sim 10\text{mm}$,进一步优选为 $1\text{mm}\sim 5\text{mm}$,进一步优选为 3mm 。如此设置,如图11a所示,当对栅极提供栅压进行调控时,势阱出现,从而

形成二维电子气，实现了半导体器件的高电子迁移率；如图 11b 所示，当不加栅压时，所形成的二维电子气的势阱消失，半导体器件处于关断状态，即该半导体器件为常关型半导体器件，实现半导体器件的安全控制性能。

势垒层 200 的厚度 H 为 $0.01\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$ ，优选为 $0.01\ \mu\text{m}\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $0.01\ \mu\text{m}\sim 0.1\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $0.01\ \mu\text{m}\sim 0.05\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $0.03\ \mu\text{m}$ 。外延层 110 以 GaN 外延层为例，厚度为 $1\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ ，优选为 $2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $3\ \mu\text{m}$ 。

源极 210 的长度 Y 为 $5\ \mu\text{m}\sim 500\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $6\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $7\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $10\ \mu\text{m}$ 。源极 210 包括 Ti 层和 Al 层，Ti 层位于势垒层 200 与 Al 层之间；Ti 层的厚度为 $0.05\ \mu\text{m}\sim 0.2\ \mu\text{m}$ ，优选为 $0.1\ \mu\text{m}$ ；Al 层的厚度为 $0.1\ \mu\text{m}\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ，优选为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。

漏极 230 的长度 D 为 $5\ \mu\text{m}\sim 500\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $6\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $7\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $10\ \mu\text{m}$ 。漏极 230 与源极 210 的尺寸可以相同。具体的，漏极 230 包括 Ti 层和 Al 层，Ti 层位于势垒层 200 与 Al 层之间；Ti 层的厚度为 $0.05\ \mu\text{m}\sim 0.2\ \mu\text{m}$ ，优选为 $0.1\ \mu\text{m}$ ；Al 层的厚度为 $0.1\ \mu\text{m}\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ，优选为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。

栅极 220 包括 Ni 层和 Au 层，Ni 层位于势垒层 200 与 Au 层之间，Ni 层的厚度为 $1\text{nm}\sim 10\text{nm}$ ，优选为 5nm ；Au 层的厚度为 $10\text{nm}\sim 100\text{nm}$ ，优选为 50nm 。

栅极 220 与源极 210 之间的距离 y 为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ ，优选为 $1\ \mu\text{m}$ ；栅极 220 与漏极 230 之间的距离 d 为 $1\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ ，优选为 $5\ \mu\text{m}$ ；将栅极 220 与漏极 230 之间的距离 d 设为第一距离，栅极 220 与源极 210 之间的距离 y 为第二距离，第一距离与第二距离的比值 d/y 为 $1\sim 5$ 。

凹槽 240 的第一边缘与栅极 220 的距离 m 为 $0.1\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $0.2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $0.3\ \mu\text{m}$ ；凹槽 240 的第二边缘与栅极 220

的距离 n 为 $0.3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 3\ \mu\text{m}$ ，进一步优选为 $1\ \mu\text{m}$ 。

本申请实施例中，缓冲层 130 为 AlN 缓冲层，缓冲层 130 的厚度为 $10\text{nm}\sim 100\text{nm}$ ，进一步优选为 $20\text{nm}\sim 60\text{nm}$ ，进一步优选为 40nm 。

在本申请实施例中，在半导体器件表面还沉积有钝化层 400，以保护半导体器件。该钝化层 400 覆盖于势垒层 200 远离衬底 120 的除了源极 210、漏极 230 和栅极 220 所在区域之外的表面（包含凹槽 240 内的表面）。钝化层 400 例如包括厚度为 300nm 的 SiN，和厚度为 600nm 的 SiO_2 。

本申请实施例所提供的含 Sc 层的半导体器件，例如为晶体管，既能实现高电子迁移率又能实现常关型。

实施例三

本申请实施例提供一种工艺设备，实际为半导体工艺设备，如图 10 所示，该半导体工艺设备包括工艺腔室 500、进气组件（图中未示出）、上电极组件 510 和下电极组件 520 和控制器（图中未示出）。该控制器包括至少一个处理器和至少一个存储器，存储器中存储有计算机程序，计算机程序被处理器执行时实现上述任一种实施方式的刻蚀方法及制造方法。

示例性地，控制器可以是上位机，也可以是下位机。其中，控制器可以通过控制进气组件的阀门开启，以向工艺腔室 500 的内部通入相应的工艺气体；控制器还可以控制进气组件的阀门的开合度来控制工艺气体的流量。控制器还可以通过控制抽气组件对工艺腔室 500 的内部进行抽气，实现控制工艺腔室 500 内部的压强，排出反应副产物等。

上电极组件 510 包括射频线圈 511、上射频电源 512 和上匹配器 513。控制器还用于控制上射频电源 512 通过上匹配器 513 向射频线圈 511 提供上电极功率，以使射频线圈 511 激发工艺腔室 500 内部的工艺气体产生等离子体。

下电极组件 520 包括晶片承载装置 521、下射频电源 522 和下匹配器 523。控制器还用于控制下射频电源 522 通过下匹配器 523 向晶片承载装置 523 的下电极提供下电极功率，使晶片承载装置 523 的下电极提供射频偏压，以吸附待刻蚀对象（图中未示出）上方的等离子体轰击待刻蚀对象。

本申请实施例的半导体工艺设备可以是电感耦合等离子体（Inductive Coupled Plasma，简称 ICP）刻蚀设备，也可以是电容耦合等离子体（Capacitively Coupled Plasma，简称 CCP）刻蚀设备。本申请实施例对半导体工艺设备的类型不作限制。

本申请实施例所提供的工艺设备具有上述刻蚀方法及制造方法的有益效果，在此不再赘述。

在本申请的描述中，需要说明的是，术语“上”、“下”、“前”、“水平”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本申请和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本申请的限制。

在本申请的描述中，需要说明的是，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或一体地连接；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

最后应说明的是：以上各实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述各实施例对本申请进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的范围。

权 利 要 求 书

- 1.一种含 Sc 层的刻蚀方法，其特征在于，所述刻蚀方法包括循环执行的主刻蚀工艺步和辅刻蚀工艺步；其中，
5 所述主刻蚀工艺步包括：向工艺腔室内通入工艺气体并激发产生等离子体，对所述含 Sc 层进行刻蚀，所述工艺气体包括含氯气体和惰性气体；
 所述辅刻蚀工艺步包括：挥发步与冷却步中的至少一种；
 所述挥发步包括：降低下电极功率至零功率或接近于零功率，减少工艺气体至零流量或接近零流量；
10 所述冷却步包括：降低下电极功率至零功率或接近于零功率，减少含氯气体至零流量或接近零流量，继续通入惰性气体。

2.根据权利要求 1 所述的刻蚀方法，其特征在于，所述主刻蚀工艺步包括第一刻蚀步和/或第二刻蚀步，所述第一刻蚀步与所述第二刻蚀步所采用的
15 工艺气体相同，所述第一刻蚀步的下电极功率大于所述第二刻蚀步的下电极功率。

3.根据权利要求 2 所述的刻蚀方法，其特征在于，所述第一刻蚀步与所述第二刻蚀步的下电极功率比为(1.2~1.8):1；
20 和/或，所述第一刻蚀步与所述第二刻蚀步的工艺时长比为 1:(4~6)。

4.根据权利要求 3 所述的刻蚀方法，其特征在于，所述第一刻蚀步的下电极功率为 100 W~1000 W；所述第二刻蚀步的下电极功率为 100 W~1000 W；
25 和/或，所述第一刻蚀步的工艺时长为 1.2 s~3 s，所述第二刻蚀步的工艺时长 8 s~12 s。

5.根据权利要求 1-4 任一项所述的刻蚀方法，其特征在于，所述主刻蚀工艺步中，含氯气体与惰性气体流量比为 $(0.3\sim 0.5):1$ ；

和/或，所述主刻蚀工艺步中，所述含氯气体流量为 $20\text{ sccm}\sim 200\text{ sccm}$ ，所述惰性气体流量为 $10\text{ sccm}\sim 1000\text{ sccm}$ 。

5

6.根据权利要求 5 所述的刻蚀方法，其特征在于，所述含氯气体包括 SiCl_4 、 BCl_3 和 Cl_2 中的至少一个，和/或，所述惰性气体包括 Ar。

7.根据权利要求 6 所述的刻蚀方法，其特征在于，所述含氯气体包括 BCl_3 和 Cl_2 ， BCl_3 与 Cl_2 的流量比为 $(0.9\sim 1.1):1$ ；

或者，所述含氯气体包括 SiCl_4 。

15

8.根据权利要求 1-4 任一项所述的刻蚀方法，其特征在于，所述挥发步的工艺时长为 $0.5\text{ s}\sim 1.5\text{ s}$ ；和/或，所述冷却步的工艺时长为 $0.5\text{ s}\sim 1.5\text{ s}$ 。

9.一种半导体器件的制造方法，其特征在于，包括步骤：

提供衬底；

在所述衬底上形成含 Sc 层；

应用权利要求 1-8 任一项所述的刻蚀方法对所述含 Sc 层进行刻蚀以形成预定深度的凹槽，所述预定深度小于所述含 Sc 层的厚度；

在所述凹槽内形成栅极，并在所述凹槽的两侧形成源极和漏极。

10.一种半导体工艺设备，包括工艺腔室、进气组件、上电极组件、下电极组件和控制器，其特征在于，所述控制器包括至少一个处理器和至少一个存储器，所述存储器中存储有计算机程序，所述计算机程序被所述处理器执行时实现权利要求 1-8 任一项所述的刻蚀方法，或者，实现权利要求 9 所述的制造方法。

11.一种半导体器件，其特征在于，包括：

衬底；

含 Sc 层，设置在所述衬底上，所述含 Sc 层远离所述衬底的一侧形成有

5 凹槽，所述凹槽的深度小于所述含 Sc 层的厚度；

源极，设置在所述凹槽的第一侧；

漏极，设置在所述凹槽的第二侧，所述第二侧与所述第一侧相对，所述源极与所述凹槽的第一侧的边缘之间的间距小于所述漏极与所述凹槽的第二侧的边缘之间的间距；

10 栅极，设置在所述凹槽内，且所述栅极与所述源极之间的间距小于所述栅极与所述漏极之间的间距。

12.根据权利要求 11 所述的半导体器件，其特征在于，所述含 Sc 层包括 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ，其中 x 的范围小于 43%；或者，

15 所述凹槽的底部与所述含 Sc 层朝向所述衬底的一侧的间距范围为 1 nm~100 nm；或者，

所述源极与所述凹槽的第一侧的边缘之间的间距为 0.1 μm ~0.5 μm ；或者，

20 所述漏极与所述凹槽的第二侧的边缘之间的间距 0.5 μm ~5 μm ；或者，

所述栅极的长度为 0.5 μm ~5 μm ，宽度为 0.1 mm~10 mm。