



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116547783 A

(43) 申请公布日 2023. 08. 04

(21) 申请号 202180071147.8

(22) 申请日 2021.09.17

(30) 优先权数据

2014733.6 2020.09.18 GB

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.04.18

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2021/052423 2021.09.17

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/058743 EN 2022.03.24

(71) 申请人 牛津仪器纳米技术工具有限公司

地址 英国牛津郡

(72) 发明人 萨曼莎·马扎穆托 安德鲁·牛顿

马修·洛芙迪 迈克尔·库克

(74) 专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司 11112

专利代理师 刘杰 龙涛峰

(51) Int.Cl.

H01L 21/3065 (2006.01)

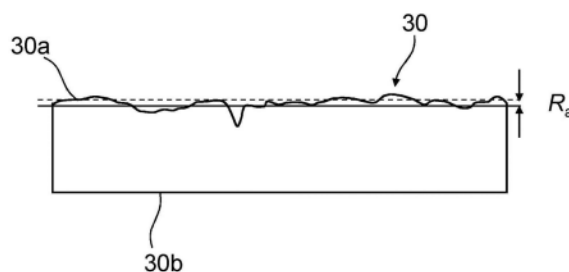
权利要求书4页 说明书13页 附图3页

(54) 发明名称

碳化硅晶片的制备方法

(57) 摘要

公开了一种用于随后在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法。该方法包括：(a) 将碳化硅晶片置于等离子体处理腔中的支撑台上，使得碳化硅晶片的远离支撑台的表面是无掩膜的；(b) 建立进入等离子体处理腔的蚀刻气体混合物流，其中，蚀刻气体混合物包括分子氢 $H_2$ ；以及(c) 从等离子体处理腔内的蚀刻气体混合物中产生等离子体，并且使用等离子体来蚀刻晶片的无掩膜表面，以便降低无掩膜表面的粗糙度。



1. 一种用于随后在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法,所述方法包括:

(a) 将所述碳化硅晶片置于等离子体处理腔中的支撑台上,使得所述碳化硅晶片的远离所述支撑台的表面是无掩膜的;

(b) 建立进入所述等离子体处理腔的蚀刻气体混合物流,其中,所述蚀刻气体混合物包括分子氢 $H_2$ ;以及

(c) 在所述等离子体处理腔内由所述蚀刻气体混合物产生等离子体,并且使用所述等离子体来蚀刻所述晶片的无掩膜表面,以降低所述无掩膜表面的粗糙度。

2. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物还包括惰性气体,其中,优选所述蚀刻气体混合物中的 $H_2$ 与所述惰性气体的比率在5:1至1.5:1的范围内,最优选在4.5:1至2:1的范围内。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,所述惰性气体具有的原子量大于28,其中,优选所述惰性气体是氩Ar。

4. 根据权利要求2或3所述的方法,其中,5%至40%、优选为10%至35%、更优选为15%至30%的所述蚀刻气体混合物由所述惰性气体组成。

5. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物还包括一种或多种含氟气体,所述一种或多种含氟气体中的每一种配置成当在所述等离子体中时释放氟自由基,其中,优选每种含氟气体是六氟化硫 $SF_6$ 、四氟化碳 $CF_4$ 、三氟化氮 $NF_3$ 和分子氟 $F_2$ 中的一种。

6. 根据权利要求5所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物中的 $H_2$ 与所述含氟气体的比率在100:1至5:1的范围内,优选在50:1至20:1的范围内。

7. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,至少20%、优选至少40%、更优选至少50%、最优选至少60%的所述蚀刻气体混合物由 $H_2$ 组成。

8. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物基本由 $SF_6$ 、 $H_2$ 和Ar组成,其中,优选 $SF_6:H_2:Ar$ 的比率为约1:40:10。

9. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)期间,将所述等离子体处理腔中的压力的值控制在1毫托(mTorr)至20mTorr的范围内,优选在4mTorr至6mTorr的范围内,更优选在约5mTorr。

10. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,以1000瓦特(W)至3000W范围内、优选以2000至3000W范围内、更优选以约2500W的等离子体功率产生所述等离子体。

11. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)中,所述蚀刻执行15分钟至25分钟,优选执行约20分钟。

12. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,步骤(c)还包括将偏置电压施加至所述基板台,其中,优选所述偏置电压具有的功率在200W至1200W的范围内,更优选在800W至1200W的范围内,最优选为约1000W。

13. 一种用于随后在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法,所述方法包括:

(a) 将所述碳化硅晶片置于等离子体处理腔中的支撑台上,使得所述碳化硅晶片的远离所述支撑台的表面是无掩膜的;

(b) 建立进入所述等离子体处理腔的蚀刻气体混合物流,其中,所述蚀刻气体混合物包括:

一种或多种含氟气体,所述一种或多种含氟气体配置成当处于等离子体中时释放氟自由基;以及

一种或多种形成聚合物的碳氟化合物和/或一种或多种形成聚合物的氢氟碳化物;以及

(c) 从所述等离子体处理腔内的所述蚀刻气体混合物中产生等离子体,并且使用所述等离子体来蚀刻所述晶片的无掩膜表面,以便降低所述无掩膜表面的粗糙度。

14. 根据权利要求13所述的方法,其中,所述一种或多种含氟气体包括六氟化硫 $\text{SF}_6$ 、四氟化碳 $\text{CF}_4$ 、三氟化氮 $\text{NF}_3$ 和分子氟 $\text{F}_2$ 中的一种或多种。

15. 根据权利要求13或14所述的方法,其中,所述一种或多种形成聚合物的氟碳化合物包括八氟环丁烷 $\text{c-C}_4\text{F}_8$ 。

16. 根据权利要求13至15中任一项所述的方法,其中,所述一种或多种形成聚合物的氢氟碳化物包括三氟甲烷 $\text{CHF}_3$ 。

17. 根据权利要求13至16中任一项所述的方法,其中,在所述蚀刻气体混合物中的所述含氟气体与所述形成聚合物的碳氟化合物和/或形成聚合物的氢氟碳化物的比率在15:1至3:1的范围内,优选在约7:1的范围内。

18. 根据权利要求13至17中任一项所述的方法,其中,至少90%的所述蚀刻气体混合物、优选至少95%的所述蚀刻气体混合物、更优选基本全部的所述蚀刻气体混合物由所述含氟气体和所述一种或多种形成聚合物的碳氟化合物和/或形成聚合物的氢氟碳化物组成。

19. 根据权利要求13至18中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)期间,将所述等离子体处理腔中的压力的值控制在1mTorr至20mTorr的范围内,优选在2mTorr至6mTorr的范围内,更优选在约3mTorr。

20. 根据权利要求13至19中任一项所述的方法,其中,以2600W至3800W范围内、更优选以约3200W的等离子体功率中产生所述等离子体。

21. 根据权利要求13至20中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)中,所述蚀刻执行5分钟至15分钟,优选执行约10分钟。

22. 根据权利要求13至21中任一项所述的方法,其中,步骤(c)还包括将偏置电压施加至所述基板台,其中,优选所述偏置电压具有的功率在100W至1200W的范围内,优选在640W至960W的范围内,更优选为约800W。

23. 一种用于随后在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法,所述方法包括:

(a) 将所述碳化硅晶片置于等离子体处理腔中的支撑台上,使得所述碳化硅晶片的远离所述支撑台的表面是无掩膜的;

(b) 建立进入所述等离子体处理腔的蚀刻气体混物流,其中,所述蚀刻气体混合物包括至少溴化氢 $\text{HBr}$ 和氧气 $\text{O}_2$ ;以及

(c) 从所述等离子体处理腔内的所述蚀刻气体混合物中产生等离子体,并且使用所述等离子体来蚀刻所述晶片的无掩膜表面,以便降低所述无掩膜表面的粗糙度。

24. 根据权利要求23所述的方法,其中,至少40%、优选至少50%、更优选至少60%的所述蚀刻气体混合物由 $\text{HBr}$ 组成。

25. 根据权利要求23或24所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物中的 $\text{HBr}:\text{O}_2$ 的比率在

3:1至1.5:1的范围内,更优选在2:1的范围内。

26. 根据权利要求23至25中任一项所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物还包括一种或多种不含溴的含卤素气体。

27. 根据权利要求26所述的方法,其中,所述一种或多种含卤素气体包括一种或多种含氟气体,所述一种或多种含氟气体中的每一种配置成当在所述等离子体中时释放氟自由基,其中,优选每种含氟气体是六氟化硫 $\text{SF}_6$ 、四氟化碳 $\text{CF}_4$ 、三氟化氮 $\text{NF}_3$ 和分子氟 $\text{F}_2$ 中的一种。

28. 根据权利要求27所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物中的HBr与所述含氟气体的比率在100:1至2:1的范围内,优选在约7:1至3:1的范围内。

29. 根据权利要求23至28中任一项所述的方法,其中,所述蚀刻气体混合物基本由 $\text{SF}_6$ 、 $\text{O}_2$ 和HBr组成,其中, $\text{SF}_6:\text{O}_2:\text{HBr}$ 的比率约为1:1:4或6:4:1。

30. 根据权利要求23至29中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)期间,将所述等离子体的压力的值控制在5毫托(mTorr)至20mTorr的范围内,优选在12mTorr至18mTorr的范围内,最优选在约15mTorr。

31. 根据权利要求23至30中任一项所述的方法,其中,以2400W至3600W范围内、最多约3000W的等离子体功率产生所述等离子体。

32. 根据权利要求23至31中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)中,所述蚀刻执行5分钟至15分钟,优选执行约10分钟。

33. 根据权利要求23至32中任一项所述的方法,其中,步骤(c)还包括将偏置电压施加至所述基板台,其中,优选所述偏置电压具有的功率在100W至1200W的范围内,优选在320W至480W的范围内,最优选为约400W。

34. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,在步骤(c)后还包括:

(d) 在用于所述晶片的蚀刻表面上生长材料的外延层。

35. 根据权利要求34所述的方法,其中,在步骤(c)和(d)之间,将所述晶片从所述等离子体处理腔中移除并且置于用于外延生长的腔内部,并且其中,在所述晶片处于用于外延生长的所述腔中的同时执行步骤(d)。

36. 根据权利要求35所述的方法,其中,步骤(d)包括:

(d1) 将所述等离子体从所述等离子体处理腔中排出;以及

(d2) 将所述晶片转移至外延生长腔;

(d3) 建立进入所述外延生长腔的蒸气流,以便生长所述材料的所述外延层。

37. 根据权利要求36所述的方法,其中,所述蒸气包括所述材料和/或适合于在所述碳化硅晶片的所述蚀刻表面上形成所述材料的一种或多种前体。

38. 根据权利要求34至37中任一项所述的方法,其中,所述外延生长腔和所述等离子体处理腔由单个等离子体处理工具构成。

39. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)中,控制处理以便对所述晶片的所述无掩膜表面执行毯式蚀刻。

40. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,所述晶片包括至少圆形无掩膜区域,所述圆形无掩膜区域具有的直径为至少100毫米,优选至少150毫米,更优选至少200毫米。

41. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,还包括在步骤(a)之前从SiC晶体切片所述晶片。

42. 根据权利要求41所述的方法,其中,在从所述SiC晶体切片所述晶片的步骤和步骤(a)之间,不对所述晶片进行化学机械抛光。

43. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,所述晶片取向成所述无掩膜表面是硅面。

44. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,所述碳化硅晶片包括非外延生长的碳化硅,并且在步骤(c)中蚀刻的表面是非外延生长的碳化硅的表面。

45. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,步骤(c)还包括将氦输送至所述晶片的靠近所述基板台的表面,以便冷却所述晶片,其中,优选所述氦在1Torr至10Torr范围内的压力下输送,最优选在约2Torr的压力下输送。

46. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)期间,将所述基板台的温度的值控制在5摄氏度(°C)至30°C的范围内,优选在15°C至25°C的范围内,最优选在约20°C。

47. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)中,所述等离子体由电感耦合等离子体源产生。

48. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)期间,所述无掩膜表面的所述粗糙度降低至少60%。

49. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(c)期间,所述无掩膜表面的所述粗糙度降低至1nm以下。

50. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,在步骤(a)中,所述无掩膜表面的粗糙度为至少1nm,优选在1nm至100nm的范围内,更优选在1nm至10nm的范围内。

51. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,步骤(c)包括:

(c1) 在第一时间段内以第一功率P1将偏置电压施加至所述基板台;以及

(c2) 在(c1)之后,在第二时间段内以第二功率P2将所述偏置电压施加至所述基板台,其中,P2小于P1,优选小于P1的0.5倍。

52. 根据权利要求51所述的方法,其中,P2在50W至200W的范围内。

53. 根据权利要求51或52所述的方法,其中,所述第二时间段在2分钟至10分钟的范围内。

54. 根据权利要求51至53中任一项所述的方法,其中,在步骤(c2)期间,通过所述蚀刻从所述无掩膜表面移除厚度为2nm至10nm的层。

## 碳化硅晶片的制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用于在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法。

### 背景技术

[0002] 碳化硅(SiC)晶体具有使其成为用于配置半导体器件的有吸引力的选择的各种物理特性,例如高导热性和耐腐蚀性。特别地,近年来,诸如电动汽车等绿色技术的发展导致对SiC晶片的需求增加。

[0003] 为了在SiC晶片的表面上进行外延生长,表面的粗糙度(在本文定义为算术平均粗糙度 $R_a$ )必须非常低,通常远低于3纳米(nm),优选低于1nm,并且更优选低于0.5nm。SiC晶片通常通过从较大晶锭切片来获得,该较大晶锭例如通过从熔体生长来获得。将切片研磨至所需厚度,然后机械抛光以降低切片的表面的粗糙度,这种机械抛光步骤通常将表面粗糙度从约100nm至150nm范围内的初始值降低至5nm至10nm范围内的值。为了进一步将粗糙度降低至适于外延生长的值,通常执行随后的化学机械抛光(CMP)步骤。CMP处理包括利用含有磨料和能够化学蚀刻晶片表面的一种或多种腐蚀性化合物的浆料来抛光晶片的表面。

[0004] 制造SiC晶片的传统处理的问题在于上述各个阶段较为耗时,因此限制了生产率。由于腐蚀性物质的必要参与,CMP步骤特别增加了复杂性并导致了晶片的表面和下层晶体结构的损坏风险。因此,需要一种克服这些限制的SiC晶片制造方法。

### 发明内容

[0005] 本发明的第一方面提供了一种用于随后在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法,该方法包括:(a)将碳化硅晶片置于等离子体处理腔中的支撑台上,使得碳化硅晶片的远离支撑台的表面是无掩膜的(unmasked);(b)建立进入等离子体处理腔的蚀刻气体混合物流,其中,蚀刻气体混合物包括分子氢 $H_2$ ;以及(c)从等离子体处理腔内的蚀刻气体混合物中产生等离子体,并且使用等离子体来蚀刻晶片的无掩膜表面,以便降低无掩膜表面的粗糙度。

[0006] 令人惊讶的是,发现使用从包括 $H_2$ 的蚀刻气体中产生的等离子体来蚀刻SiC晶片的表面可以将晶片的表面粗糙度从其初始值显著降低至足够低的值,以允许蚀刻表面用于外延生长而无需任何后续处理。因此,本发明消除了化学机械抛光晶片的需要,并且因此提供了用于制造适于外延生长的SiC晶片的更快和更经济的处理。

[0007] 表面轮廓在1nm至10nm尺度下的大部分变化是由于在表面处或附近存在缺陷导致的,该缺陷例如为管道、螺型位错、刃型位错和空位。发明人发现,从包括 $H_2$ 的蚀刻气体混合物产生的等离子体倾向于以相似速率蚀刻至这种缺陷和周围的均匀晶体结构中,从而允许在不放大表面轮廓的变化的情况下移除包含缺陷的材料层。在不希望受理论约束的情况下,提出了 $H_2$ 分子和/或氢自由基在晶片表面上的吸附,以取决于晶片表面和来自等离子体的离子之间的入射角的方式,改变来自等离子体的离子在离子与晶片表面碰撞时产生的溅射产率,并且所产生的蚀刻偏向作用于晶片表面的与晶片标称平面(nominal plane)非平

行角度取向的那些部分。因此,氢对晶片表面的处于晶片的无掩膜表面的标称平面中的部分的蚀刻具有缓和作用,并且有利于移除表面轮廓中的不规则部分。

[0008] 如上所述,SiC晶片布置成具有远离支撑台的无掩膜表面。这里的“无掩膜”是指相关表面未由图案化掩膜覆盖,诸如提供为将诸如集成电路等结构蚀刻至晶片中的图案化掩膜。换言之,在晶片的相关表面上的任何地方都没有设置掩膜,因为该处理是在基本整个表面上制备用于随后外延生长的晶片表面的处理,并且该处理本身不引入图案。应当注意的是,晶片的表面不一定完全未覆盖(例如,远离支撑台的表面部分可以由保持晶片就位的夹具覆盖),但是优选大部分或全部表面未覆盖(至少在整个步骤(c)),使得基本全部表面以均匀程度暴露于等离子体。

[0009] 在优选实施方式中,蚀刻气体混合物还包括惰性气体,优选氩Ar,其中,优选蚀刻气体混合物中的 $H_2$ 与惰性气体的比率在5:1至1.5:1的范围内,优选在4.5:1至2:1的范围内。电离的惰性气体(特别为氩)通过破坏SiC晶格中的化学键来促进等离子体中的诸如氢自由基等反应性物质与晶片表面的相互作用。惰性气体离子与晶片表面的碰撞还有助于通过从表面溅射材料来进行蚀刻。已发现该上述比率特别适合根据本发明的处理,这是因为已发现上述比率实现了晶片的蚀刻表面的粗糙度的显著降低。在诸如氩等惰性气体存在于蚀刻气体混合物中的情况下,优选5%至40%、更优选10%至35%、最优选15%至30%的蚀刻气体混合物由惰性气体组成。同样,已发现的是,包括存在这些量的诸如氩等惰性气体的蚀刻气体实现了晶片的蚀刻表面的粗糙度的显著降低。在蚀刻气体混合物中存在惰性气体的情况下,已发现当轰击的惰性气体离子的质量大于或等于原子量约为28的被溅射Si原子的质量时,溅射作用大大增强。因此,在特别优选实施方式中,惰性气体具有的原子量大于或等于28,并且最优选惰性气体是氩Ar。如上所述,已发现尽管原子量大于28的其它惰性气体(例如氦和氙)同样合适,但氩特别有效。

[0010] 在优选实施方式中,蚀刻气体混合物还包括一种或多种含氟气体,该一种或多种含氟气体中的每一种配置成当在等离子体中时释放氟自由基,其中,优选每种含氟气体是六氟化硫 $SF_6$ 、四氟化碳 $CF_4$ 、三氟化氮 $NF_3$ 和分子氟 $F_2$ 中的一种。“含氟气体”是指当存在于等离子体中时以将自由原子氟释放至等离子体中的方式解离的任何气体。尽管这些气体广泛认为适于蚀刻诸如沟槽和台面等竖直特征,但是发明人发现,令人惊讶的是,当执行上述方法时,蚀刻气体混合物中存在含氟气体可以实现SiC晶片的蚀刻表面的粗糙度的减小。如上所述,提出了在蚀刻气体混合物中存在 $H_2$ 导致溅射产率随着入射离子的轨迹和SiC晶片的表面与入射离子碰撞的部分之间的角度而变化,通过这种方式促进了对与晶片的标称平面非平行的表面的蚀刻。据信,这种效应通过蚀刻气体混合物中存在用作蚀刻剂的含氟气体来增强。特别地,已经证明包括 $SF_6$ 的蚀刻气体混合物实现蚀刻表面粗糙度的显著降低。在存在含氟气体的情况下,蚀刻气体混合物中的 $H_2$ 与含氟气体的比率优选在100:1至5:1的范围内,更优选在50:1至20:1的范围内。已发现这些组合物在降低蚀刻晶片表面的粗糙度方面特别有效。更一般地,当含氟气体存在于蚀刻气体混合物中时,优选混合物中存在的 $H_2$ 多于含氟气体。已发现的是,这些组合物通常受益于含氟气体的蚀刻效果,同时实现了蚀刻表面粗糙度的良好降低。

[0011] 有利地,至少20%、优选至少40%,更优选至少50%,最优选至少60%的蚀刻气体混合物可以由 $H_2$ 组成。已发现的是,存在这些水平的氢的蚀刻气体混合物实现了蚀刻表面

的表面粗糙度的特别大的降低。

[0012] 在特别优选实施例中,蚀刻气体混合物基本由 $\text{SF}_6$ 、 $\text{H}_2$ 和Ar组成,其中,优选 $\text{SF}_6$ : $\text{H}_2$ :Ar的比率为约1:40:10。已经证明的是,根据本发明第一方面的方法使用仅包含这些化合物的蚀刻气体混合物实现了表面粗糙度的期望降低,并且在这些实施例中,发现约1:40:10的特定组成可以实现最佳结果。当然,在不影响该方法实现期望结果的能力的情况下,其它物质可能附带地以痕量水平存在。约1:40:10是指该比率的每一部分在所述值的20%以内,优选在10%以内。

[0013] 在优选实施方式中,在步骤(c)期间,将等离子体处理腔中的压力控制在1毫托(mTorr)至20mTorr的范围内的值,优选为4mTorr至6mTorr,更优选为约5mTorr。在这些条件下观察到表面粗糙度的最大降低。已发现在这些范围的压力下执行步骤(c)是特别有益的,其中惰性气体(特别是原子量大于或等于28的气体,诸如氩)存在于气体混合物中。据信,在这些低压下,腔中的等离子体充分稀薄,使得惰性气体离子能够在基本不受等离子体中的其它物质的阻碍的情况下从晶片表面轰击和溅射材料。这确保了由混合物中的 $\text{H}_2$ 促进的角度相关蚀刻(如上所述)的有效进行,该处理在被蚀刻的无掩膜表面上产生了高水平的平滑性。

[0014] 优选以在1000瓦特(W)至3000W的范围内的等离子体功率产生等离子体,等离子体功率优选在2000W至3000W的范围内,更优选为约2500W。

[0015] 有利地,在步骤(c)中,蚀刻可以执行15分钟至25分钟,优选执行约20分钟。已发现的是,当作为根据本发明第一方面的方法的一部分执行时,通过该持续时间的蚀刻,SiC晶片的表面粗糙度可以降低至适于外延生长的值。

[0016] 优选地,步骤(c)还包括向基板台施加偏置电压,其中,优选偏置电压具有的功率在200W至1200W范围内,更优选为800W至1200W,最优选为约1000W。已发现的是,这增强了蚀刻速率(因此提高了晶片为外延生长而制备的速度),同时仍实现了无掩膜表面的粗糙度的降低。

[0017] 本发明的第二方面提供了一种用于随后在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法,该方法包括:(a)将碳化硅晶片置于等离子体处理腔中的支撑台上,使得碳化硅晶片的远离支撑台的表面是无掩膜的;(b)建立进入等离子体处理腔的蚀刻气体混物流,其中,蚀刻气体混合物包括:一种或多种含氟气体,该一种或多种含氟气体配置成当处于等离子体中时释放氟自由基;以及一种或多种形成聚合物的碳氟化合物和/或一种或多种形成聚合物的氢氟碳化物;以及(c)从等离子体处理腔内的蚀刻气体混合物中产生等离子体,并且使用等离子体来蚀刻晶片的无掩膜表面,以便降低无掩膜表面的粗糙度。

[0018] 本发明第二方面的该方法与第一方面提供的方法的不同之处在于,蚀刻气体混合物仅需要包括一种或多种含氟气体和一种或多种形成聚合物的碳氟化合物。与第一方面的方法类似,已发现本发明第二方面的方法能够将SiC晶片的表面粗糙度降低至足够低的值以在SiC晶片上执行外延生长,并且消除执行CMP处理的需要。据信,实现这些结果的机制与上文参照第一方面概述的机制相似,但是利用一种或多种形成聚合物的碳氟化合物和/或一种或多种形成聚合物的氢氟碳化物代替氢来促进对与晶片标称平面非平行的表面部分的蚀刻。“形成聚合物的(氢)碳氟化合物”是指当存在于等离子体中时能够在SiC晶片的表面上形成聚合物层的任何(氢)碳氟化合物。这些化合物与诸如 $\text{CF}_4$ 等含氟气体不同,其

中,诸如 $\text{CF}_4$ 等含氟气体在不添加其它气体的情况下不能在等离子体中形成聚合物。

[0019] 据信,在根据第二方面的方法中含氟气体的效果与上文参照本发明第一方面所述的效果相似,即含氟气体作为蚀刻剂的行为受到SiC晶片表面上聚合物层的存在的影响,通过这种方式导致含氟气体选择性侵蚀晶片表面的与晶片标称平面不平行的部分。

[0020] 一种或多种含氟气体可以有利地包括六氟化硫 $\text{SF}_6$ 、四氟化碳 $\text{CF}_4$ 、三氟化氮 $\text{NF}_3$ 和分子氟 $\text{F}_2$ 中的一种或多种。

[0021] 八氟环丁烷 $\text{c-C}_4\text{F}_8$ 和三氟甲烷 $\text{CHF}_3$ 分别是氟碳化合物和氢氟碳化合物的示例,已发现该氟碳化合物和氢氟碳化合物适合于执行根据本发明第二方面的方法。在优选实施例中,蚀刻气体混合物包括这些化合物(以及可选其它碳氟化合物和/或氢氟碳化合物)中的一种或两种。

[0022] 有利地,在蚀刻气体混合物中含氟气体与形成聚合物的碳氟化合物和/或形成聚合物的氢氟碳化合物的比率可以在15:1至3:1的范围内,优选约7:1。这是指所有碳氟化合物和氢氟碳化合物的总和存在为这些水平,而不是各自单独存在为这些水平。已发现具有此种成分的蚀刻气体在降低SiC晶片的表面粗糙度方面特别有效。

[0023] 优选地,至少90%、优选为至少95%的蚀刻气体混合物由含氟气体和一种或多种形成聚合物的碳氟化合物和/或形成聚合物的氢氟碳化合物组成,更优选为基本全部的蚀刻气体混合物由含氟气体和一种或多种形成聚合物的碳氟化合物和/或形成聚合物的氢氟碳化合物组成。已发现的是,为了实现表面粗糙度的必要降低,蚀刻气体混合物中不需要存在其它物质,即使在基本所有蚀刻气体混合物中都包括这些物质的情况下,也可以只存在痕量水平的其它物质。

[0024] 在优选实施例中,在步骤(c)期间,将等离子体处理腔中的压力控制在1mTorr至20mTorr的范围内的值,优选为2mTorr至6mTorr的范围内,更优选为约3mTorr。在该范围内的压力值下实现表面粗糙度显著降低。

[0025] 优选地,以在2600W至3800W范围内、更优选以约3200W的等离子体功率产生等离子体。

[0026] 有利地,在步骤(c)中,蚀刻可以执行5分钟至15分钟,优选执行约10分钟。已发现的是,通过该范围中的持续时间的蚀刻,可以使SiC晶片的表面足够平滑以用于外延生长。

[0027] 优选地,步骤(c)还包括将偏置电压施加至基板台,其中,优选偏置电压具有的功率在100W至1200W的范围内,优选在640W至960W,更优选为约800W。

[0028] 本发明的第三方面提供了一种用于随后在其上进行外延生长的碳化硅晶片的制备方法,该方法包括:(a)将碳化硅晶片置于等离子体处理腔中的支撑台上,使得碳化硅晶片的远离支撑台的表面是无掩膜的;(b)建立进入等离子体处理腔的蚀刻气体混物流,其中,蚀刻气体混合物包括至少溴化氢 $\text{HBr}$ 和氧气 $\text{O}_2$ ;以及(c)从等离子体处理腔内的蚀刻气体混合物中产生等离子体,并且使用等离子体来蚀刻晶片的无掩膜表面,以便降低无掩膜表面的粗糙度。

[0029] 与本发明的第一方面和第二方面的方法类似,已发现该方法将SiC晶片的表面粗糙度从表面粗糙度的初始值降低至允许晶片执行外延生长的水平。在此种情况下,蚀刻气体混合物的基本成分是溴化氢和氧气。据信,溴化氢在蚀刻处理中的作用与上述本发明第一方面中的氢的作用类似,即缓和晶片的位于无掩膜表面的标称平面中的部分的蚀刻。已

发现的是,氧气增强了等离子体从晶片的无掩膜表面移除材料的能力,并且当氧气与溴化氢组合存在时,认为优先蚀刻位于无掩膜表面的标称平面之外的表面特征。

[0030] 已发现的是,当蚀刻气体混合物中存在大量HBr时,可以实现最佳结果,因此优选至少40%、更优选至少50%、最优选至少60%的蚀刻气体混合物由HBr组成。

[0031] 在优选实施方式中,蚀刻气体混合物中的HBr:O<sub>2</sub>比率在3:1至1.5:1的范围内,更优选约为2:1。已发现在具有这些成分的情况下,O<sub>2</sub>对等离子体从晶片表面移除材料的能力的增强效果特别强。

[0032] 蚀刻气体混合物优选还包括不含溴的一种或多种含卤素气体。如将在下文详述的,这些气体可以是含氟气体或诸如其它卤化氢(例如HCl)等其它含卤素气体。然而,在特别优选实施方式中,一种或多种含卤素气体确定地包括一种或多种含氟气体,该一种或多种含氟气体中的每一种配置成当在等离子体中时释放氟自由基,其中,优选每种含氟气体是六氟化硫SF<sub>6</sub>、四氟化碳CF<sub>4</sub>、三氟化氮NF<sub>3</sub>和分子氟F<sub>2</sub>中的一种。此处认为这些化合物的效果与上文在本发明的第一方面和第二方面的上下文中描述的效果类似,即通过有利于从表面的位于无掩膜表面的标称平面之外的部分移除材料的方式来蚀刻SiC晶片的表面。优选地,蚀刻气体混合物中HBr与含氟气体的比率在100:1至2:1的范围内,更优选在7:1至3:1的范围内。已发现这可以最有效降低蚀刻表面的粗糙度。

[0033] 在优选实施方式中,蚀刻气体混合物基本由SF<sub>6</sub>、O<sub>2</sub>和HBr组成,其中,SF<sub>6</sub>:O<sub>2</sub>:HBr约为1:1:4或1:4:6,这是因为已发现为了实现所需结果不需要存在其它物质,并且已发现这些比率特别有效。然而,应当理解的是,在不明显降低所获得结果的质量的情况下,可以存在痕量水平的其它物质。

[0034] 优选地,在步骤(c)期间,等离子体的压力的值控制在5毫托(mTorr)至20mTorr的范围内,优选为12mTorr至18mTorr,最优选为约15mTorr。已发现这些值最适合于执行根据本发明的第三方面的方法。

[0035] 优选地,以在2400W至3600W范围内、更优选约3000W的等离子体功率产生等离子体。

[0036] 在第三方面的优选实施例中,在步骤(c)中,蚀刻执行5分钟至15分钟,优选执行约10分钟。已发现该持续时间足以制备用于外延生长的表面。

[0037] 优选地,步骤(c)还包括将偏置电压施加至基板台,其中,优选偏置电压具有的功率在100W至1200W的范围内,优选在320W至480W的范围内,最优选为约400W。如上所述,偏置基板台增强了蚀刻速率,并且这些值在实现无掩膜表面的粗糙度减小的同时显示出增强蚀刻速率。

[0038] 在前述讨论中,已经介绍了三种处理以及各个处理特有的优选特征和参数。现在将阐述可以作为上述三种方法中的任何一种的一部分来实施的进一步优选特征。

[0039] 在根据本发明上述三个方面中的每个方面的方法中,在步骤(a)期间,无掩膜表面优选具有的粗糙度为至少1nm,优选至少3nm,更优选至少5nm。已发现上述方法能够制备SiC晶片的表面,该SiC晶片的表面具有在用于外延生长的这些范围内的初始粗糙度值。然而,在其它实施例中,在步骤(a)期间无掩膜表面的粗糙度可以小于1nm,这是因为对于具有在该范围内的初始粗糙度值的表面同样已经实现了粗糙度的降低。

[0040] 如上所述,本发明提供的方法能够制备用于外延层生长的SiC晶片的蚀刻表面。因

此,该方法优选在步骤(c)之后包括:(d)在用于晶片的蚀刻表面上生长材料的外延层。

[0041] 在一些优选实施方式中,在步骤(c)和(d)之间,将晶片从等离子体处理腔中移除并且置于用于外延生长的腔内部,并且在晶片在用于外延生长的腔中的同时执行步骤(d)。因此,外延生长在与执行蚀刻的腔不同的腔中执行。易于获得适于执行这些步骤中的每一个的单独装置,因此这些实施例的优点在于可以利用常规设备来执行。因此,在特别优选实施方式中,步骤(d)包括:(d1)将等离子体从等离子体处理腔中排出;(d2)将晶片转移至外延生长腔;以及(d3)建立进入外延生长腔的蒸气,以便生长材料的外延层。在这些实施例中,蒸气可以包括上述材料和/或适合于在碳化硅晶片的蚀刻表面上形成材料的一种或多种前体。可以选择材料和/或前体,使得外延层是SiC层。可以利用相同或不同的材料/前体来重复步骤(d3),以便生长适用于制造电子器件和其它这种产品的一系列外延层。在特别优选实施例中,外延生长腔和等离子体处理腔由单个等离子体处理工具构成。这可以允许晶片在等离子体处理腔和外延生长腔之间传送,而无需长距离处理或运输,这将使在运输期间对蚀刻表面的损坏的风险最小化。

[0042] 在可替代实施方式中,蚀刻步骤(c)和外延生长步骤(d)可以在单独处理工具中进行,甚至可能在不同位置处并且通过不同实体进行。例如,蚀刻步骤(c)可以由晶片制造商执行,并且随后的外延生长步骤可以由从晶片制造商获得晶片的器件制造商执行。

[0043] 在上述所有方法中,优选控制该处理以便对晶片的无掩膜表面执行毯式蚀刻。毯式蚀刻是基本所有无掩膜表面接受相同程度处理的蚀刻,在本发明中,毯式蚀刻将导致蚀刻表面的粗糙度为均匀水平。因此,执行毯式蚀刻允许制备用于外延生长的较大区域。

[0044] 在优选实施例中,晶片的无掩膜表面包括至少圆形无掩膜区域,该圆形无掩膜区域具有的直径为至少100毫米,优选至少150毫米,更优选至少200毫米。这样,能够在表面的无掩膜区域内识别具有该最小横向尺寸的直径的圆形区域,该圆形区域内不存在上述类型的掩膜。然而,应将理解的是,无掩膜区域的实际周边可能潜在地不是圆形的(尽管在蚀刻完全无掩膜圆形晶片的优选示例中也是如此)。通常,该最小尺寸与晶片的直径相对应:例如,对于圆形无掩膜表面,上文提及的直径仅为圆的直径,而对于方形表面,该直径是方形的边长。对于矩形的无掩膜表面,该直径是矩形的两个边长中较小的一个。该假想圆形区域的较大直径通常表示将通过蚀刻步骤而在晶片表面上制备用于外延生长的较大区域,并且已经证明根据本发明的方法成功制备具有在上述范围内的最小尺寸的SiC晶片的无掩膜区域。

[0045] 在一些优选实施方式中,该方法包括在步骤(a)之前从SiC晶体上切片晶片。在这些实施例中,在从SiC晶体上切片晶片的步骤和步骤(a)之间,优选不对晶片进行化学机械抛光(CMP)。如上所述,在不需要化学机械抛光的情况下,能够根据本发明第一方面、第二方面和第三方面的方法来制备用于外延生长的SiC晶片的表面,因此优选不执行这种处理。这是有利的,因为根据本发明第一方面、第二方面和第三方面的方法消除了CMP中涉及的腐蚀性物质损坏晶片的表面和/或底层的晶体结构的危险。

[0046] 有利地,晶片取向成使得无掩膜表面是硅面。这可以通过在使晶片的至少一个表面终止于硅原子(与碳相反)的取向上从较大晶体上切片SiC晶片来实现。已发现的是,当无掩膜表面是硅面时,本发明的方法特别有效。

[0047] 优选地,碳化硅晶片包括非外延生长碳化硅,并且在步骤(c)中蚀刻的表面是非外

延生长碳化硅的表面。如上所述,这可以通过从例如可以从熔体生长的较大晶锭切片晶片来实现。

[0048] 在优选实施方式中,步骤(c)还包括将氦输送至晶片的靠近基板台的表面,以便冷却晶片,其中,优选氦在1Torr至10Torr范围内的压力下输送,最优选在约2Torr的压力下输送。该特征有时称为“氦背面冷却”,并且确保晶片不受例如由等离子体的热量引起的热应力损坏。该特征还确保晶片表面处的条件在无掩膜表面上是均匀的,这再次促进了等离子体的处理程度。在许多实施例中,晶片成形为邻近基板台的表面近似平行于无掩膜表面,在这种情况下,这导致晶片的无掩膜表面的特别均匀的冷却。

[0049] 优选地,在步骤(c)期间,将基板台的温度的值控制在5摄氏度(°C)至30°C范围内,优选在15°C至25°C的范围内,最优选约20°C。这可以例如通过示例为众所周知的流体再循环或通过任何其它冷却处理来实现。同样,这防止晶片热损坏,并且确保在无掩膜表面上均匀处理。

[0050] 在步骤(c)中,等离子体可以有利地由电感耦合等离子体源产生。然而,等离子体可以由诸如电容耦合等离子体源等替代源产生。

[0051] 如上所述,已发现根据本发明第一方面、第二方面和第三方面的方法显著降低了晶片无掩膜表面的粗糙度,因此优选地,无掩膜表面的粗糙度降低至少60%。此外,无掩膜表面的粗糙度优选降低至3nm以下,更优选1nm以下,还更优选0.5nm以下,这是因为这将产生特别适合于外延生长的表面。

[0052] 在优选实施例中,在步骤(a)中,无掩膜表面具有的粗糙度 $R_a$ 在1nm至100nm的范围内,优选在1nm至10nm的范围内。此外,在一些优选实施例中,步骤(a)中的无掩膜表面的粗糙度可以为至少5nm。已发现所公开的方法能够从初始粗糙度值在这些范围内的表面制备适于外延生长的表面。

[0053] 有利地,步骤(c)还可以包括:(c1)在第一时间段内以第一功率P1将偏置电压施加至基板台;以及(c2)在(c1)之后,在第二时间段内以第二功率P2将偏置电压施加至基板台,其中,P2小于P1,优选小于P1的0.5倍。通过在蚀刻步骤结束时降低偏置功率一段时间,与表面碰撞的离子所携带的典型能量减少,并且这导致每次碰撞移除较少的材料。在步骤(c1)结束时,表面的粗糙度将从该粗糙度的初始值降低,因此步骤(c2)在降低由高能离子引起的表面损坏风险的同时,允许移除表面中剩余的通常较小的像差。步骤(c2)可以称为“软着陆”步骤。通过在步骤(c)的最后部分期间执行循环原子层蚀刻(ALE)处理,优选控制该循环原子层蚀刻处理以便从无掩膜表面移除至少1nm厚的层,同样可以实现减轻来自高能碰撞的损伤影响的“软着陆”。这可以通过执行约5个循环的原子层蚀刻处理来实现。在基板台偏置降低后,作为步骤(c2)的替代或除了步骤(c2)之外,可以执行ALE处理。

[0054] 优选地,P2在50W至200W的范围内和/或第二时间段在2分钟至10分钟的范围内。已发现这些参数在步骤(c2)中实现了表面的特别有效平滑。

[0055] 在优选实施方式中,在步骤(c2)期间,通过蚀刻从无掩膜表面移除厚度为2nm至10nm的层。这可以通过如上所述的具有2分钟至10分钟范围内的时间段的软着陆步骤来实现。

## 附图说明

[0056] 现在将参照附图描述根据本发明的各方面的方法的示例,其中:

[0057] 图1示意性描绘了适于执行根据本发明的第一方面、第二方面和第三方面的方法的示例性表面处理工具;

[0058] 图2示出了根据本发明的实施例的处理的示例;并且

[0059] 图3(a)至图(c)示出了根据本发明的实施例的碳化硅晶片在不同制备阶段和随后的外延生长的图示。

## 具体实施方式

[0060] 图1示出了适于实施本公开方法的等离子体处理工具的示例。等离子体处理工具1包括等离子体处理腔2,在使用期间碳化硅(SiC)晶片30置于该等离子体处理腔2内。为了执行蚀刻,将包括一种或多种气体的蚀刻气体混合物引入等离子体处理腔2,并且控制条件以便影响所需的蚀刻机制。腔内的处理参数由一组至少一个(但更通常为多个)设备控制并且调节,该设备的示例在图1中示意性示出。在本示例中,该工具1配备有两个输入气体供应部4(a)和4(b),以用于将第一输入气体G1和第二输入气体G2分别供应至等离子体处理腔2。本发明的一些实施例采用包括多于两种气体的蚀刻气体混合物,并且应当理解的是,等离子体处理工具1可以具有任意数量的气体供应部,该气体供应部中的每一个配置成供应蚀刻气体混合物的成分气体中的相应一种。通过阀6(a)和6(b)以及相应质量流量控制器(未示出)来控制每种气体进入腔2。同样,在蚀刻气体混合物包括多于两种气体的情况下,可以提供额外的质量流量控制器。经由管道7和一个或多个相关联泵8将包括未反应的输入气体和任何反应产物的废气从等离子体处理腔2中移除,该一个或多个泵8通常能够将腔内的压力降低至接近真空的条件。腔压力主要由排气泵系统确定,并且特别是由泵送速度和从腔到泵的泵送管线的“传导性”(这是与泵送管线的几何形状相关的因素)确定。然而,在处理期间,当产生等离子体时和/或当蚀刻(或如稍后所述,实际为沉积)发生时,气态物质可能在腔内部损失或产生,从而对压力有影响。为了调节这种变化,优选提供如本领域已知的自动压力控制阀8a。阀8a改变泵送线路的传导性,从而在等离子体被撞击和材料被蚀刻时,使腔压力能够基本恒定维持在期望水平。

[0061] 等离子体处理工具1配备有等离子体源,以用于通过放电在等离子体处理腔内产生等离子体。这里,等离子体源被描述为电感耦合等离子体源,该电感耦合等离子体源包括围绕等离子体处理腔2的线圈9,该线圈9经由RF匹配单元11从电源10供应RF功率。RF匹配单元11配置成使等离子体阻抗与RF电源10的阻抗匹配,以便使从电源到等离子体的功率传输效率最大化。合适的匹配单元的示例在W0-A-2010/073006中被公开。可以使用诸如电容耦合等离子体(CCP)或微波等离子体源等其它类型等离子体源来代替。

[0062] 晶片30在使用中安装在基板台14上。如下所述,偏置电压在使用中施加至基板30,并且这通过将电压源12连接至基板台14来实现。如果使用RF电源12,则可以优选提供自动阻抗匹配单元(AMU)以确保从电源12到基板台14的功率的良好耦合。工具1还可以包括诸如加热器和/或冷却系统等温度控制单元16,以用于调节基板的处理温度(可以提供用于加热和/或冷却等离子体处理腔和等离子体源的额外设备,以协助处理控制和/或维持硬件稳定性)。例如,在主要进行蚀刻的情况下,可以向晶片30供应冷却剂,以防止在离子轰击期间

和/或在放热化学反应期间有大量能量传递至基板,从而导致基板温度出现不期望升高。例如,冷却剂可以是氦,该氦可以供应至晶片30的靠近基板台14的表面30b。优选地,氦以约2Torr的压力供应至表面30b。

[0063] 如上所述,本发明的一些实施例包括在蚀刻步骤之后在晶片30的表面30a上生长外延层。可以使用等离子体处理工具1来执行该步骤,该等离子体处理工具1中的气体供应部4(a)、4(b)配置成供应材料和/或适于在晶片表面上形成外延层的前体。当然,在这些实施例中还可以采用生长外延层的其它方法。

[0064] 这些设备根据来自诸如可编程逻辑控制器(PLC)或类似设备等控制器20的指令进行操作。在一些情况下,可以提供多于一个控制器,其中每个控制器控制一个设备或设备的子集。控制器还与诸如计算机工作站25等使用者接口设备连接,以用于接收来自使用者的输入和/或返回输出。

[0065] 在图1中,各种设备和控制器20之间的数据连接由虚线指示。实际上,这可以实现为诸如CANbus桥等网络,该网络具有到每个设备以及使用者接口25的连接部。总线通常包括多个网络通道,该多个网络通道包括诸如串行数据通道(例如RS485)等一个或多个数据通道,以及可选地,一个或多个功率通道。控制器20通过总线发出命令,每个命令寻址到一个或多个设备,并且包括关于所述设备待实施的一个或多个处理参数的指令。在WO-A-2010/100425中给出了可以用于发出用于控制设备的命令的网络协议的示例。当然,如本领域技术人员所理解的,能够存在许多其它网络实施方式。

[0066] 图2示出了根据本发明的第一方面、第二方面和第三方面的制备SiC晶片并且在晶片上执行后续外延生长的方法。将参照图1的示例性等离子体处理工具1来描述该方法,但是应理解的是,可以利用其它装置来实践相同方法。

[0067] 在步骤201中,如图1所示,将SiC晶片30置于等离子体处理腔2内部的基板台14上。SiC晶片30优选仅由SiC构成,尽管可能存在一些杂质,例如掺杂剂。晶片30中的SiC优选为非外延生长,并且例如可以从熔体生长。SiC晶片30定位在基板台14上,使得远离基板台14的表面30a是无掩膜的(即未由诸如图案化光致抗蚀剂层等掩膜覆盖),使得当等离子体在等离子体处理腔2中产生时,基本所有的表面30a都暴露于等离子体。通常,晶片30将是薄盘形状,通过从较大柱形晶锭切片来获得该薄盘形状的晶片30。通常,通过这种方式生产的晶片的直径在100毫米(mm)至200mm的范围内并且厚度在200微米( $\mu\text{m}$ )至700 $\mu\text{m}$ 的范围内。在步骤201期间,无掩膜表面30a的算术平均粗糙度优选至少为1nm,并且还优选小于100nm,更优选小于10nm。在此范围内的粗糙度值是如上所述已经机械抛光(但未化学机械抛光)的典型晶片。

[0068] 一旦晶片30已经置于基板台14上,在步骤203中建立从气体源4(a)、4(b)进入腔的蚀刻气体混合物流,然后在步骤205中通过向电感耦合等离子体源供电而从该混合物产生等离子体。在步骤203中供应的气体取决于执行本发明的第一方面、第二方面和第三方面中的哪一个方面,并且适于实施本发明的每个方面的蚀刻气体混合物的详细示例将在下文与其它相关处理参数一起描述。为了通过简单示例来说明这一点,根据本发明第二方面的方法的实施例可以包括在步骤203中从一个气体供应部4(a)供应诸如 $\text{SF}_6$ 等含氟气体,并且从第二气体供应部4(b)供应诸如 $\text{CHF}_3$ 等形成聚合物的氢氟碳化物。

[0069] 只要通过等离子体源来维持等离子体,则该等离子体就蚀刻晶片30的无掩膜表面

30a。由于表面30a无掩膜,所以蚀刻通过基本均匀的方式发生在无掩膜表面30a上,因此可以描述为毯式蚀刻。可以通过等离子体源来维持等离子体预定的时间段,通常在约10分钟至20分钟的范围内。在此时间段期间,上述等离子体处理工具的特征可以用于控制参数,诸如基板台偏置功率、由线圈9提供的等离子体功率、等离子体处理腔2内部的压力以及晶片30的温度。可选地,在等离子体存在于腔中的同时,可以利用电压来偏置基板台14。因此,在步骤207(该步骤为可选,如虚线所示)中,在等离子体源继续对等离子体供电的同时,以第一功率P1将偏置施加至基板台14。可以在蚀刻的持续时间内维持相同的功率P1,但是在一些优选实施方式中,如上所述,在蚀刻的最后部分降低偏置功率。因此,该方法可以可选地包括在可选步骤209期间将偏置功率降低至低于P1的值,优选低于P1的一半。例如,通常P1在400W至1000W的范围内,并且P2在50W至200W的范围内。如上所述,降低的偏置功率P2优选维持在1分钟至5分钟的范围内的时间段,而蚀刻的总持续时间在10分钟至20分钟的范围内。

[0070] 一旦已经执行所需时间量的蚀刻,则可以在步骤211中熄灭等离子体。这可以通过从等离子体处理腔2中排空蚀刻气体混合物和/或关闭等离子体源的线圈9的电源来实现。可选地,然后在步骤213中,外延层213可以在蚀刻表面上生长。如上所述,这可以通过将制备的晶片30转移至用于外延生长的腔中来执行,该腔可以是提供为执行蚀刻的同一等离子体处理工具1的一部分的单独腔,或者完全是单独设备的一部分。应当注意的是,该步骤不必由与前述步骤相同的实体和/或在相同装置、设施或地点执行。例如,晶片30可以由晶片制造商根据步骤201至步骤211来制备,然后运送给执行外延生长步骤213的客户。由于根据本发明的方法能够将SiC晶片30的表面粗糙度降低至适于执行外延生长的值,因此不需要在步骤211和步骤213之间(或者实际上在任何其它时间)执行化学机械抛光步骤。外延层是SiC或可以在SiC表面上形成外延层的任何其它材料的层。该处理可以包括形成相同和/或不同材料的额外外延层,然后可以蚀刻该额外外延层以制造诸如晶体管和二极管等设备。

[0071] 图3(a)至图3(c)示出了根据本发明的SiC晶片30的制备的各个阶段的截面图。图3(a)示出了蚀刻之前的晶片30,例如在图2的方法的步骤201期间。可以看出,要准备外延生长的表面30a具有带有凸起和凹入的起伏轮廓(尽管这些凸起和凹入被夸大并且不与晶片30的厚度成比例),这可能是由晶片30的切片、研磨和抛光引起的损坏和/或在表面30a处存在缺陷的结果。本图中的虚线示出了表面30a的算术平均粗糙度 $R_a$ ,该算术平均粗糙度 $R_a$ 是由实线表示的实际表面轮廓与表面的标称平面的平均偏差。在根据本发明对晶片进行蚀刻之前, $R_a$ 通常在1nm至100nm的范围内,优选在1nm至10nm的范围内。此外,在一些实施例中,在执行蚀刻之前 $R_a$ 可以至少为5nm。为了简单起见,这里未示出表面30b的轮廓,但是应当理解的是,只要该表面经历了与表面30a相同的处理,该表面通常将具有类似的粗糙度。优选地,待蚀刻的表面30a是Si面,即终止于Si原子层的面。这可以通过确保晶片30的平面相对于在制造晶体时的晶格的晶轴适当取向来简单实现。

[0072] 图3(b)示出了在根据本发明的方法期间被蚀刻后的晶片30,例如在图2的示例性方法的步骤211期间或之后。可以看出,蚀刻表面30a'的表面粗糙度 $R_a'$ 明显小于初始值 $R_a$ 。如上所述, $R_a'$ 优选小于3nm,更优选小于1nm,并且还更优选小于0.5nm。

[0073] 图3(c)示出了在蚀刻表面30a'上生长外延层31之后的晶片30,该在蚀刻表面30a'上生长外延层31这一处理如在本发明的一些实施例中执行的那样,例如在图2的处理中的

步骤213期间那样。

[0074] 现在将呈现实验结果,该实验结果示出了通过根据本发明第一方面、第二方面和第三方面的每一个的实施例的方法实现的SiC晶片的表面粗糙度的减小,以及实现这些结果的处理参数。我们将这些实施例的方法分别称为处理1、处理2和处理3。在每个处理中,使用蚀刻前后对无掩膜表面30a的算术平均粗糙度进行测量的SiC晶片30来执行图2的处理的步骤201、203和205。通过物理气相传输来制造所使用的SiC晶片30,并且SiC晶片30具有100nm至150nm范围内的直径,并且被蚀刻的表面30a包括Si面和C面(即,分别终止于Si和C原子的面)。

[0075] 所获得的实验参数和结果显示在成对的表1(a)和表1(b)、表2(a)和表2(b)、以及表3(a)和表3(b)中。每个表列出了以标准立方厘米/分钟(sccm)为单位的蚀刻气体混合物中的气体引入至等离子体处理腔2的流量、等离子体处理腔2内部的等离子体压力、供应至等离子体源的线圈9的功率、施加至基板台14的偏置功率和每个处理的蚀刻持续时间,以及在步骤201中的蚀刻之前的无掩膜表面30a的算术平均粗糙度的测量值 $R_a$ 和在步骤211中的蚀刻之后的相同表面的算术平均粗糙度的测量值 $R_a'$ 。在处理1、处理2和处理3的每一个中,在2Torr的压力下,氦供应至晶片30的靠近基板台(在背面冷却构造中)的表面30b,以便确保晶片30和基板台14在蚀刻期间不会加热至不期望高温。对于示例性处理1、处理2和处理3,已发现等离子体处理腔2内的压力值、供应至线圈9的功率、施加至基板台的偏置功率和氦的压力可以各自改变这里所述的值的至少 $\pm 20\%$ ,同时仍然成功制备用于外延生长的SiC晶片30的表面30a。

[0076] 表1(a)和表1(b)示出了上文列出的实验参数和分别根据本发明第一方面的实施例执行的两次实验(实验编号1和2)获得的结果。在这些处理的一个中,使用仅由 $H_2$ 和Ar组成的蚀刻气体混合物,而在另外两个处理中,蚀刻气体混合物由 $H_2$ 、 $SF_6$ 和Ar组成。如上所述,尽管诸如 $SF_6$ 等含氟气体和诸如Ar等惰性气体都是优选添加剂,但本发明的第一方面仅要求在蚀刻气体混合物中存在 $H_2$ 。

[0077] 表1(a)

| [0078] | 实验编号 | $H_2$ 流量<br>(sccm) | $SF_6$ 流量<br>(sccm) | Ar 流量<br>(sccm) | 等离子体压<br>力 (mTorr) |
|--------|------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|
|        | 1    | 150                | 0                   | 50              | 20                 |
|        | 2    | 200                | 5                   | 50              | 5                  |

[0079] 表1(b)

| [0080] | 实 验<br>编 号 | 等 离 子 体<br>源 功 率<br>(W) | 基 板 台 偏<br>置 功 率<br>(W) | 蚀 刻 持 续<br>时 间 (分<br>钟) | $R_a$ (nm) | $R_a'$ (nm) |
|--------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|-------------|
|        | 1          | 3000                    | 400                     | 20                      | 1.13       | 0.70        |
|        | 2          | 2500                    | 1000                    | 20                      | 1.1        | 0.41        |

[0081] 表2(a)和表2(b)示出了上文列出的实验参数和根据本发明第二方面的实施例执行的两次实验(实验编号3和4)获得的结果。在这些处理中使用的蚀刻气体混合物由 $\text{CHF}_3$ 和 $\text{SF}_6$ 组成。在这些示例性处理中,在蚀刻气体混合物中仅存在一种氢氟碳化物和一种含氟气体。然而,可以提供任何数量的其它碳氟化合物和/或氢氟碳化合物作为替代,或者除选择用于该实施的 $\text{CHF}_3$ 之外可以提供任何数量的其它碳氟化合物和/或氢氟碳化合物。还可以利用除 $\text{SF}_6$ 之外的其它含氟气体。

[0082] 表2(a)

| 实验编号 | $\text{CHF}_3$ 流量 (sccm) | $\text{SF}_6$ 流量 (sccm) | 等离子体压力 (mTorr) |
|------|--------------------------|-------------------------|----------------|
| 3    | 10                       | 70                      | 3              |
| 4    | 10                       | 70                      | 3              |

[0084] 表2(b)

| 实验编号 | 等离子体源功率 (W) | 基板台偏置功率 (W) | 蚀刻持续时间 (分钟) | $R_a$ (nm) | $R_a'$ (nm) |
|------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| 3    | 3200        | 800         | 10          | 6.22       | 2.44        |
| 4    | 3200        | 1000        | 10          | 1.3        | 0.8         |

[0086] 表3(a)和表3(b)示出了上文列出的实验参数和根据本发明第三方面的实施例执行的三个实验(实验5和6)获得的结果。在这些处理中使用的蚀刻气体混合物由 $\text{HBr}$ 、 $\text{O}_2$ 和 $\text{SF}_6$ 组成。如上所述,尽管存在诸如 $\text{SF}_6$ 等含氟气体为优选,但执行本发明的第三方面的蚀刻气体混合物中的唯一必要组分是 $\text{HBr}$ 和 $\text{O}_2$ 。

[0087] 表3(a)

| 实验编号 | $\text{HBr}$ 流量 (sccm) | $\text{O}_2$ 流量 (sccm) | $\text{SF}_6$ 流量 (sccm) | 等离子体压力 (mTorr) |
|------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| 5    | 60                     | 40                     | 10                      | 15             |
| 6    | 80                     | 20                     | 20                      | 20             |

[0089] 表3(b)

| 实验编号 | 等离子体源功率 (W) | 基板台偏置功率 (W) | 蚀刻持续时间 (分钟) | $R_a$ (nm) | $R_a'$ (nm) |
|------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
|------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|

|        |   |      |     |    |      |      |
|--------|---|------|-----|----|------|------|
| [0091] | 5 | 3000 | 400 | 10 | 8.50 | 1.54 |
|        | 6 | 2500 | 200 | 10 | 4.76 | 0.76 |

[0092] 可以看出的是,用于进行实验1至6的每个示例性处理将蚀刻表面30a的表面粗糙度降低至适于外延生长的值,并且因此成功制备表面30a以用于随后在表面30a上外延生长。



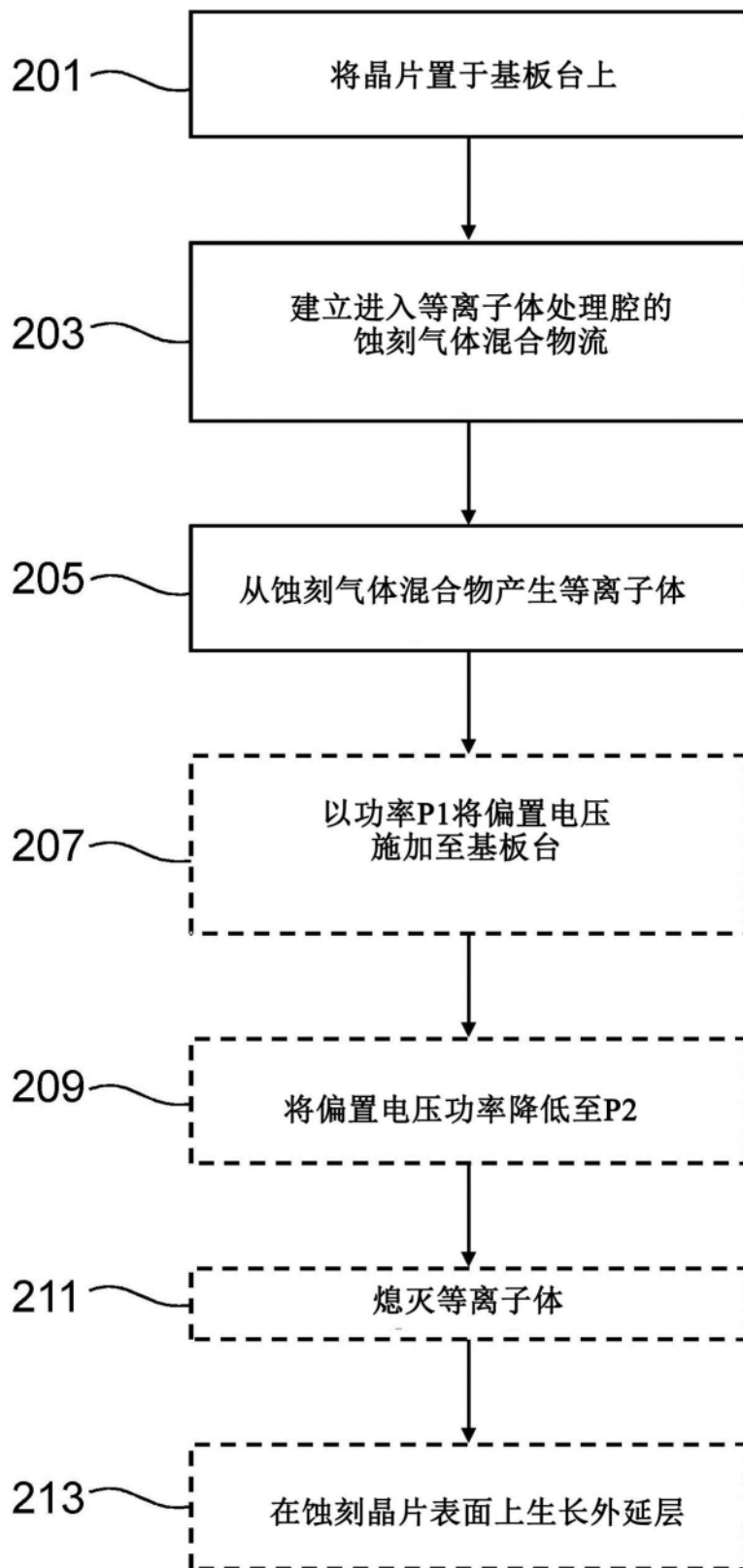


图2

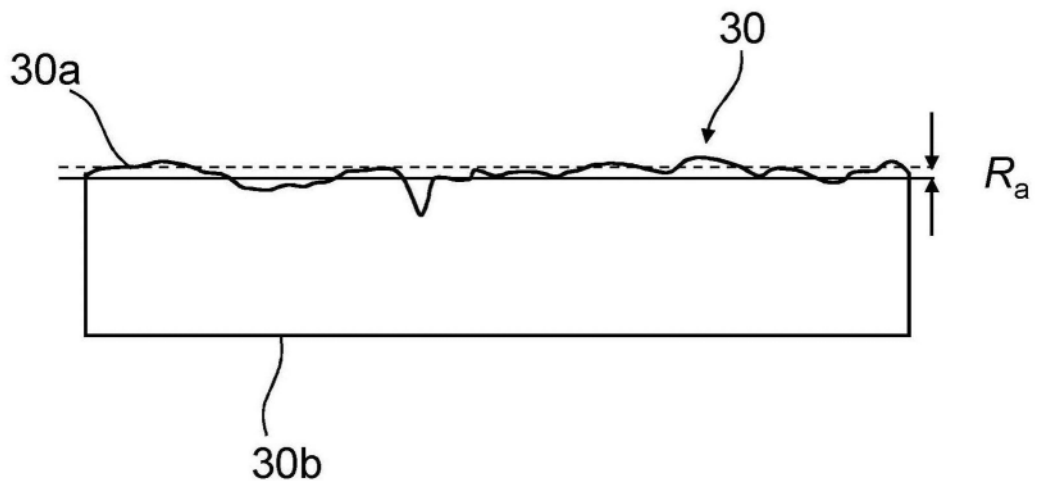


图3(a)

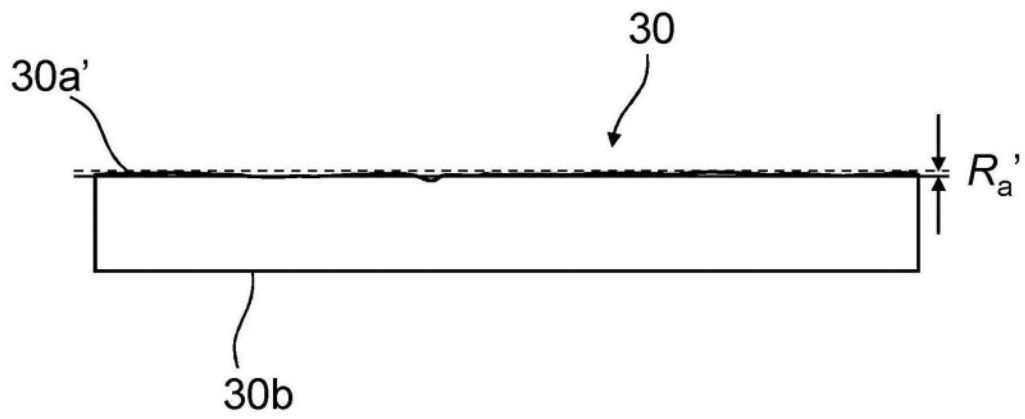


图3(b)

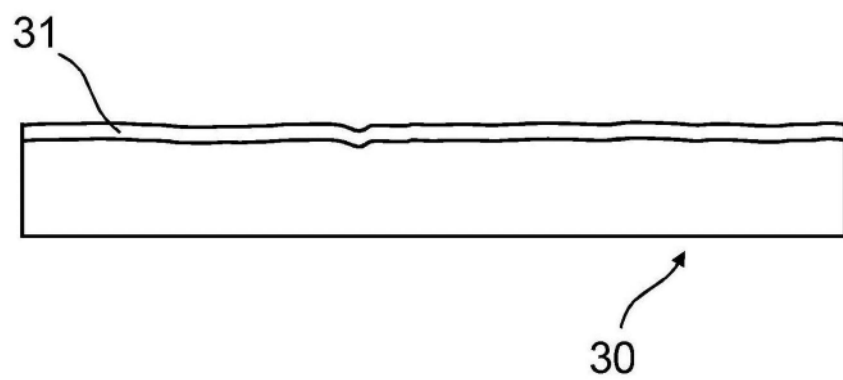


图3(c)