



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117043397 A

(43) 申请公布日 2023. 11. 10

(21) 申请号 202280022527.7

阿恩德-迪特里希·韦伯

(22) 申请日 2022.03.17

(74) 专利代理机构 北京博雅睿泉专利代理事务
所(特殊普通合伙) 11442

(30) 优先权数据

专利代理师 张雪竹

21163801.0 2021.03.19 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

(51) Int. Cl.

2023.09.19

C30B 23/02 (2006.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2022/056911 2022.03.17

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2022/194977 DE 2022.09.22

(71) 申请人 硅晶体有限公司

地址 德国纽伦堡

(72) 发明人 伯恩哈德·埃克 拉尔夫·穆勒

马提亚斯·施托克迈尔

米哈伊尔·沃格尔

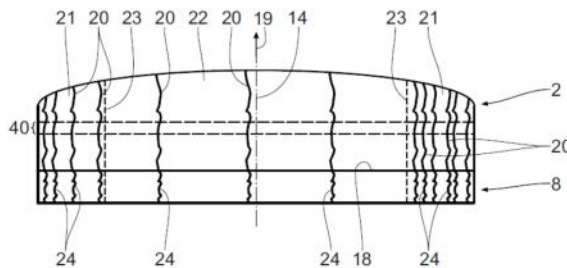
权利要求书2页 说明书10页 附图6页

(54) 发明名称

不均匀螺位错分布的碳化硅体积单晶的生产方法和碳化硅衬底

(57) 摘要

本方法旨在通过升华生长法生产至少一种SiC体积单晶(2),其中,在开始生长之前,具有生长表面的SiC籽晶(8)被放置在生长坩埚的晶体生长区中,以及将SiC源材料引入生长坩埚的SiC存储区中。在生长期间,在生长温度达到2,400°C和生长压力介于0.1mbar和100mbar之间时,通过SiC源材料的升华以及通过将升华的气体成分输送到晶体生长区内,产生SiC生长气相,其中SiC体积单晶(2)通过在SiC籽晶体上在沉积SiC生长气相而生长。在开始生长之前,在室温下向SiC籽晶(8)中引入机械应力,使得SiC籽晶(8)中存在的籽螺位错(24)在机械应力的影响下发生位错运动,以便关于各自位错运动中互相接近的籽螺位错(24)互相重组并互相抵消。



1. 一种借助于升华生长法来生产至少一种碳化硅SiC体积单晶(2)的方法,其中
a) 在开始生长之前
a1) 在生长坩埚(3)的晶体生长区(5)中布置具有生长表面(18)的SiC籽晶(8),以及
a2) 将SiC源材料(6)引入所述生长坩埚(3)的SiC存储区(4)内,以及
b) 在生长温度达到2400°C和生长压力介于0.1mbar和100mbar之间的生长期间,借助于所述SiC源材料(6)的升华并借助于将升华的气体成分输送到所述晶体生长区(5)内,在晶体生长区(5)生成SiC生长气相(9),其中所述SiC体积单晶(2)借助于SiC生长气相(9)的沉积在所述SiC籽晶(8)上生长,

其特征在于,

c) 在室温下,在开始生长之前,向所述SiC籽晶(8)中引入机械应力,从而使得所述SiC籽晶(8)中存在的籽螺位错(24)在机械应力的影响下发生位错运动,以便关于各自的位错运动互相接近的籽螺位错(24)互相重组并互相抵消。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,通过加热所述SiC籽晶(8),热激活所述籽螺位错(24)的位错运动。

3. 根据权利要求1和2中任一项所述的方法,其特征在于,所述机械应力旋转对称地引入所述SiC籽晶(8)。

4. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其特征在于,所述SiC籽晶(8)被弯曲以引入机械应力,特别是最大弯曲距离介于0.1mm至5mm之间。

5. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其特征在于,借助于至少一个冲头(28; 28a; 28b; 28c; 32)弯曲所述SiC籽晶(8),以引入机械应力。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,至少一个冲头(28)居中放置,并作用于所述SiC籽晶(8)的中心。

7. 根据权利要求5或6所述的一种方法,其特征在于,数个冲头(28; 32)作用于所述SiC籽晶(8),其中特别是这些冲头(32)的至少一部分沿着围绕所述SiC籽晶(8)中心的名义圆形线(33)放置,优选等距地放置。

8. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其特征在于,为了引入机械应力,将所述SiC籽晶(8)牢固地连接到成形籽晶夹持器(34; 35)的不平整的接触面(36; 37)上。

9. 一种具有总主表面(41; 42)的单晶SiC衬底(38; 39),其中所述总主表面(41; 42)具有由所述总主表面(41; 42)的至多20%形成的堆积子区域(48; 49),所述堆积子区域(48; 49)包括所述总主表面(41; 42)上存在的所有衬底螺位错(43)的至少80%。

10. 根据权利要求9所述的SiC衬底,其特征在于,所述堆积子区域(48; 49)具有所述总主表面(41; 42)上存在的所有衬底螺位错(43)的至少85%,特别是至少90%。

11. 根据权利要求9或10所述的SiC衬底,其特征在于,所述堆积子区域(48; 49)的大小是总主表面(41; 42)的至多15%。

12. 根据权利要求9至11中任一项所述的SiC衬底,其特征在于,SiC衬底(38; 39)的总螺位错密度是至多1,000/cm²,特别是至多500/cm²。

13. 根据权利要求9至12中任一项所述的SiC衬底,其特征在于,总主表面(41; 42)的衬底直径是至少150mm,特别是至少200mm。

14. 根据权利要求10至13中任一项所述的SiC衬底,其特征在于,SiC衬底(38; 39)的SiC

晶体结构只有一种单一的SiC多型体,特别是SiC多型体4H、6H、15R和3C其中之一。

15. 根据权利要求10至14中任一项所述的SiC衬底,其特征在于, SiC衬底(38;39)的电阻率是 $8\text{m}\ \Omega\ \text{cm}$ 至 $26\text{m}\ \Omega\ \text{cm}$,特别是 $10\text{m}\ \Omega\ \text{cm}$ 至 $24\text{m}\ \Omega\ \text{cm}$ 。

不均匀螺位错分布的碳化硅体积单晶的生产方法和碳化硅衬底

[0001] 本文通过引用方式并入欧洲专利申请EP 21 163 801.0的内容。

技术领域

[0002] 本发明涉及一种借助于升华生长法生产至少一种碳化硅体积单晶的方法和一种单晶碳化硅衬底。

背景技术

[0003] 由于具有出色的物理、化学、电学和光学特性,半导体材料碳化硅(SiC)还被用作(但不限于)电力电子半导体元件、高频元件和特殊发光半导体元件的起始材料。对于这些元件,要求SiC衬底(=SiC晶圆)具有尽可能大的衬底直径和尽可能高的品质。

[0004] SiC衬底的基础是高等级的碳化硅体积单晶(SiC volume monocrystal),通常借助于物理气相沉积处理(physical vapour deposition treatment;PVT)法生产,特别是借助于例如US 8,865,324 B2中描述的(升华)方法生产。在这种生长方法中,单晶碳化硅晶片(disc)作为SiC籽晶与合适的源材料一起被引入生长坩埚。在受控的温度和压力条件下,源材料升华且气态物质沉积在SiC籽晶上,使得SiC体积单晶在此生长。

[0005] 然后,例如借助线锯,从SiC体积单晶中切割出圆盘状的单晶SiC衬底,在(特别是借助多个抛光步骤)对其表面进行多级精整处理后,作为元件制造工艺的一部分,为其提供至少一个薄的单晶外延层,例如SiC或氮化镓(gallium nitride;GaN)外延层。此外延层的特性以及最终由其生产的元件的特性,决定性地取决于SiC衬底或下层SiC体积单晶的品质。

[0006] 对于外延层的生产,SiC衬底中的任何贯穿螺位错(threading screw dislocation;TSD)也很重要,因为螺位错会传播到外延层中,从而导致由此生产的电子元件的品质和/或良率降低。为了高良率,应该尽可能避免晶体生长期间因偏离理想晶体形状而产生的晶体缺陷,比如螺位错等。此外,通过PVT工艺生产SiC体积单晶非常耗费成本和时间。因此,例如由于位错导致晶体结构不完美等原因而无法进一步在元件生产中使用的材料会大大降低良率并增加成本。

[0007] 在US 9,234,297 B2中,描述了一种基于两步法生长工艺的方法,其中在低生长速率和增大压力的第一生长阶段,生长中的SiC体积单晶的边缘区域的螺位错转化为堆垛层错(stack fault),然后垂直于生长方向向外生长。在后续的第二生长阶段中,生长速率提高(压力降低),此时生长的SiC体积单晶的晶体体积在边缘区域的螺位错的数量减少。然而,所实现的螺位错密度的降低不足以在SiC衬底上经济地生产电子元件。因此,要进一步降低。

发明内容

[0008] 与已知方案相比,本发明的目的是提供一种改进的SiC体积单晶的生产方法以及

一种改进的单晶SiC衬底。

[0009] 为了实现与此方法有关的目的,公开了一种与权利要求1的特征对应的方法。根据本发明的方法是一种借助于升华生长法用于生成至少一种SiC体积单晶的方法,其中在开始生长之前,具有生长表面的SiC籽晶被布置在生长坩埚的晶体生长区中,以及SiC源材料,特别是粉末状或者特别是压实的SiC源材料,至少部分压实的SiC源材料较佳,或者特别是单晶或多晶固体块状形式的SiC源材料,密度为 $3.0\text{g}/\text{cm}^3$ 至 $3.21\text{g}/\text{cm}^3$ 较佳,或者特别是这些不同SiC源材料的组合。在生长期间,(特别是生长中的SiC体积单晶的生长界面处)在生长温度达到 2400°C ,以及生长压力介于 0.1mbar 和 100mbar 之间,借助于SiC源材料的升华和借助于将升华的气体成分输送到晶体生长区内,在此产生SiC生长气相,其中借助于SiC生长气相的沉积,SiC体积单晶在SiC籽晶上生长。在开始生长之前,在室温下向SiC籽晶中引入机械应力,从而使得SiC籽晶中存在的籽螺位错在机械应力的影响下错位,以便关于各自的位错运动互相接近的籽螺位错互相重组并互相抵消。

[0010] 籽螺位错的位错运动和重组较佳地在SiC籽晶内进行。此外,籽螺位错的位错运动特别是基本上沿径向或横向进行,即基本上是沿与生长中的SiC体积单晶的生长方向垂直取向的方向进行。另一方面,生长中的SiC体积单晶的生长方向也可理解为轴向。

[0011] 螺位错(screw dislocation)在这里被理解为既是纯螺位错(pure screw dislocation)又是在m-或a-晶体方向还具有至少一个分量的混合形式之一。

[0012] 已经认识到,生长中的SiC体积单晶(以及后续由此生成的圆盘状SiC衬底)中螺位错密度增加的主要原因是用于生长的SiC籽晶。因此,在生长过程期间,SiC籽晶中普遍存在的籽螺位错可沿着生长方向传播到生长中的SiC体积单晶中。为了尽可能避免这种情况,SiC籽晶在开始生长之前以及优选还是在室温下经受机械应力,从而减少SiC籽晶中初始存在的籽螺位错的数量,直到开始生长为止。

[0013] 通过籽螺位错的相互作用,相关的螺位错可以互相重组,从而互相抵消。这种有利的重组特别是发生在籽螺位错彼此靠近且它们是具有不同旋转方向的螺位错时,即各自的柏氏矢量具有不同的符号(+1c和-1c)。在SiC籽晶中,具有正柏氏矢量的螺位错数量和具有负柏氏矢量的螺位错数量之比通常接近于1,以便原则上存在籽螺位错的可重组的多种可能性。为了启动有利的重组,对SiC籽晶施加机械应变或应力。应力形成驱动力,使现有的籽螺位错开始移动并在SiC籽晶内将籽螺位错的位置改变一定距离。在这些位错移动的过程中,具有不同旋转方向的局部相邻的籽螺位错可以互相接近,特别是达到发生重组的程度。相应区域中的机械应力越大,这种效果就越明显。机械应力越大,籽螺位错的移动性就越高。此外,籽螺位错在其位错运动期间遵循机械应力的梯度移动,以及根据这个梯度的方向移动较佳。

[0014] 因此,相互重组的螺位错甚至在SiC籽晶中优选地彼此消灭,从而无法在生长的SiC体积单晶的晶体结构中继续。这降低了生长中的SiC体积单晶中的螺位错密度。剩余的螺位错特别是不均匀地分布。在横向或径向上,特别是有些区域的局部螺位错密度高于其他区域。较佳地,关于与生长中的SiC体积单晶的生长方向垂直的横截面积,以针对性地方式生产出局部螺位错密度相对低的宽区域(或仅一个宽区域),而只存在与之相比局部螺位错密度更高的相对小的区域(或仅一个相对较小的区域)。为了进一步加工,优选地确定局部螺位错密度相对低的宽区域(或者甚至仅宽区域)。如果需要,还可以只对SiC籽晶的重组

子区域(例如,只对中心区域或只对边缘区域)施加机械应力,从而特别有利于此处的籽螺位错的有利重组。

[0015] 根据本发明的方法,优选在特定区域中,例如在边缘区域中或者在中心区域中,能够降低生长中的SiC体积单晶(以及后续由其生产的圆盘状SiC衬底)中的籽螺位错密度。在这些区域中,SiC体积单晶优选地几乎,理想情况下甚至完全没有螺位错。与之前已知的方法相比,局部螺位错密度相对低的区域较大,病假优选地具有较低的局部螺位错密度。将大多数螺位错集中在明显较小的区域是有利的。由于这种有利的不均匀分布的螺位错密度,仅在较小的否定区域(reject region)中局部螺位错密度增加,从这样的SiC体积单晶中获得的SiC衬底非常适合于经济地生产高等级子元件。可实现高良率。

[0016] 总之,本发明的生长方法能够用于生产SiC体积单晶,由此获得高品质的SiC衬底。这样在其SiC晶体结构具有高精度的SiC衬底广泛地为元件生产相关的待进行的后续工艺步骤提供了几乎理想的条件。因此,本发明生产的SiC体积单晶体能够非常有效地进一步使用,特别是用于半导体和/或高频元件的生产。

[0017] 本发明的方法可用于生产单个的SiC体积单晶,还可用于生产更多数量例如两个、三个、四个、五个或优选达到十个SiC体积单晶。其中生长两个SiC体积单晶方法是有利的,特别是两个SiC体积单晶在中心纵轴方向上布置为一上一下或一前一后,从中心纵轴的方向观看时,生长在SiC储存区的两侧。

[0018] 本发明的方法的有利实施例由从属于权利要求1的权利要求的特征产生。

[0019] 一个有利的实施方式是其中通过加热SiC籽晶来热激活籽螺位错的位错运动。特别是,将SiC籽晶加热到比生长温度略低(达到约200℃较佳)的温度,特别是活化周期为在20分钟至2,000分钟(约200分钟较佳)的内。在实际生长期间,从SiC籽晶的生长表面处普遍存在比生长温度低约200℃的温度开始,即特别是从约2,000℃至2,200℃的温度开始,位错运动较佳地在很大程度上被启动。因此,位错运动特别是由机械诱导和热激活的。加热SiC籽晶用于热激活位错运动可以优选地结合开始生长前的加热阶段进行。或者,然而,这也可以将其作为SiC籽晶的热处理的一部分进行,独立于实际生长而执行,即特别是与生长没有密切的时间联系。

[0020] 根据另一个有利的实施方式,机械应力以旋转对称的方式引入到SiC籽晶中。旋转对称的应力施加特别容易实施,同时非常有效。

[0021] 根据再一个有利的实施方式,SiC籽晶被弯曲以引入机械应力,特别是最大弯曲距离在0.1mm到5mm之间,优选是1mm。具有最大弯曲距离的最大弯曲度特别是出现在SiC籽晶的轴向中心,优选出现在以后生长到SiC籽晶上的SiC体积单晶的中心纵轴方向。然后,在SiC籽晶中发展的机械应力是用于位错运动的特别有效的驱动力。机械应力与弯曲度特别相关。

[0022] 根据又一个有利的实施方式,SiC籽晶借助于至少一个冲头被弯曲,从而(特别是在生长坩埚中)引入机械应力。特别是可以直接地或间接地实现SiC籽晶的弯曲。因此,SiC籽晶可以通过向自身直接施加至少一个冲头的力被弯曲。然而,这也可以通过间接施加的力来实现,例如,在具有籽晶夹持器和其上放置有的SiC籽晶的籽晶夹持器系统上间接施加力来实现。冲头是圆柱形较佳,冲头直径特别是在2mm到10mm之间。此外,冲头(直接或间接地)用来抵压SiC籽晶的冲头的冲头接触面可以采用不同的设计,例如平的、圆形的或尖头

的。冲头由冲头材料组成,特别是石墨、其他碳材料或耐熔金属(比如钽等)。借助于这样的冲头,可以非常容易地将SiC籽晶置于较大随机性的拉伸或应变状态,从而引发籽螺位错的定向重组。

[0023] 根据另一个有利的实施方式,至少一个冲头居中地放置,并作用于SiC籽晶的中心上。此外,还有再一个有利的实施方式,其中数个冲头作用在SiC籽晶上,其中特别是这些冲头的至少一部分沿着围绕SiC籽晶的中心沿名义的圆形线(较佳地是等距)放置。这些实施方式每一个都非常适合在SiC籽晶中引入机械应力。

[0024] 根据再一个有利的实施方式,SiC籽晶与成形籽晶夹持器的不平整的接触面牢固地连接,以引入机械应力。SiC籽晶本身特别是圆盘状,以及优选地具有至少一个平坦的主表面。成形的籽晶夹持器的不平整的接触面用于特别是与SiC籽晶邻接,以及处于邻接和/或互连状态,导致SiC籽晶的弯曲,并由此得到期望的SiC籽晶的机械张力。对于此连接,SiC籽晶接合到接触面较佳。例如,接触面凹入地或凸出地弯曲。不过,接触面也可以具有较大随机性的不平整的形状。特别是,接触面还可以仅在第一子区域不平整,而在第二子区域平整。这样,机械应力能够以非常有针对性的方式引入到SiC籽晶中,特别是还限制于特定的子区域。然后,籽螺位错的重组较佳地只发生在SiC籽晶受到机械应力的子区域(例如,只发生在中心区域或只发生在边缘区域)中。

[0025] 根据又一个有利的实施方式,在引入机械应力之前,例如借助于X射线形貌检查方法,检查SiC籽晶的生长表面是否存在籽螺位错。这可以有针对性地对之前的检查期间检测到特别大量籽螺位错的SiC籽晶施加机械应力。这样,能够有针对性地以及在籽螺位错数量特别多的子区域显著地减少异常(或高于平均)高数量的籽螺位错。

[0026] 为了实现有关SiC衬底的目的,公开了一种根据权利要求9的特征的SiC衬底。根据本发明的一种SiC单晶衬底具有总主表面,其中总主表面包括由总主表面的至多20%形成的堆积子区域,堆积子区域包括总主表面上存在的所有衬底螺位错的至少80%。

[0027] 由总主表面的至多20%形成的堆积子区域可以特别是连续的,以及例如包含中心区域或边缘区域。不过,堆积子区域也可以是非连续的。大部分的衬底螺位错都集中在这个堆积子区域内。因此,衬底螺位错特别不均匀地分布在总主表面上。这样的优点在于,已知衬底螺位错的累积之处,反之,有利地已知只有少量衬底螺位错之处。在进一步使用SiC衬底(例如用于生产电子元件)时,可以考虑这一点,例如将包括堆积子区域的SiC衬底的子区域视为否定,拒绝将其用于元件生产。

[0028] 在SiC衬底的外延涂层情况下,因为衬底螺位错能够传播到外延层内,所以SiC衬底的外延涂层部分中的衬底螺位错数量少对于以高良率生产高等级的元件至关重要。例如,过多数量的衬底螺位错可导致局部电荷载流子使用寿命缩短,并降低由此生产的电子元件的击穿电压。与已知的解决方案相比,SiC衬底中明显更高浓度的衬底螺位错存在于另外更小的子区域上,因此根据本发明的SiC衬底具有更大的其他子区域,此子区域实际上甚至在理想情况下完全没有衬底螺位错,由此理想地适合在所有可以想象的情况下进一步使用。所谓的衬底螺位错的分布不均匀的缺点结果是本发明的SiC衬底的优点。此SiC衬底特别适用于生产高良率的高等级电子元件。

[0029] 根据本发明的SiC衬底,特别是由升华-生长的SiC体积单晶生成的SiC衬底,符合半导体元件的生产应用的工业要求。垂直于总主表面测量的这样的SiC衬底的衬底厚度特

别是在约100 μm 和约1,000 μm 之间的范围内,在约200 μm 和约500 μm 之间的范围内较佳,其中衬底厚度考虑在整个的总主表面上具有优选至多20 μm 的全局厚度变化。SiC衬底具有一定的机械稳定性,以及特别是自承性(self-supporting)。SiC衬底具有大致圆形的圆盘状较佳,即总主表面实际上是圆形的。适用的话,由于周边边缘处提供了至少一个识别标记,可能会与精确的圆形几何形状略有偏差。这个识别标记可以是平面部分(flat)或凹槽。特别地,SiC衬底由升华-生长的SiC体积单晶制成,例如由根据上述本发明的生产方法生长的SiC体积单晶制成,这是因为SiC体积单晶被切割为垂直于SiC体积单晶的中心纵轴的切片。

[0030] 除此之外,根据本发明的SiC衬底及其有利的变体提供的优点与已经结合本发明的生产工艺及其有利的变体描述的的优点基本相同。

[0031] 根据本发明SiC衬底的其他有利的实施例由从属于权利要求9的权利要求的特征产生。

[0032] 一个有利的实施方式是,其中堆积子区域具有总主表面上存在的所有衬底螺位错的至少85%,特别是至少90%。这使得衬底螺位错甚至更加有利的集中,结果是SiC衬底的剩余子区域甚至更好地适用于进一步使用,特别是用于生产高等级的元件。

[0033] 根据另一个有利的实施方式,堆积子区域的大小是总主表面的最多15%。这导致甚至更小的堆积子区域,大部分的衬底螺位错位于此堆积子区域内。这也使得SiC衬底的剩余子区域甚至更好地适合进一步使用,特别是用于生产高等级的元件。

[0034] 根据另一个有利的实施方式,SiC衬底的总螺位错密度至多1,000/ cm^2 ,特别是至多500/ cm^2 。总螺位错密度可通过特别是将SiC衬底的整个总主表面上存在和/或可检测到的所有衬底螺位错的数量与这个总主表面的表面值相关联来确定。或者,总的螺位错密度也可以被确定为,特别是局部螺位错段密度的算术平均值。局部螺旋错位段密度分别适用于名义上将总主表面划分为数段其中之一。在这方面,总螺位错密度也可称为整体和/或平均螺位错衬底密度。上述总螺位错密度的值非常低,以便SiC衬底也非常适用于生产高等级元件。

[0035] 根据另一个有利的实施方式,总主表面(以及由此特别是还有SiC衬底作为整体)的衬底直径为至少150mm,特别是至少200mm。较佳地,衬底直径为约200mm。由于生产原因,目前衬底直径的上限特别是250mm,其中原则上,可以想到甚至更大的衬底直径。衬底直径越大,单晶SiC衬底的进一步使用就可以更高效,例如,用于半导体和/或高频元件的生产。这降低了元件的生产成本。具有这样大直径的SiC衬底还能够有利地用于生产相对大的半导体和/或高频元件,例如,其具有约1 cm^2 的占地面积。

[0036] 根据再一个有利的实施方式,SiC衬底具有SiC晶体结构,SiC晶体结构只有一种单个的SiC多型体,特别是具有SiC多型体4H、6H、15R和3C中的一种。较佳地,呈现高改性稳定性,其特征特别表现为最广泛的多型体变化的缺失。如果SiC衬底只有一种SiC多型体,则优势在于也只有一种非常低的缺陷密度。这产生非常高品质的SiC衬底。特别是优选多型体4H。

[0037] 根据又一个有利的实施方式,SiC衬底具有相对于总主表面的表面法线略微倾斜取向(=偏离取向)的晶体结构,其中倾斜角在0°和8°之间的范围内,较佳为约4°。特别是,总主表面的表面法线至少基本上对应于SiC体积单晶的生长方向,SiC衬底由此SiC体积单晶生成。特别是,在偏离取向中,SiC衬底的总主表面相对于晶体结构的(0001)的平面在[-

1-120]晶体方向的方向上倾斜 0° 和 8° 之间范围内的角度。

[0038] 根据另一个有利的实施方式,SiC衬底的电阻率为 $8\text{m}\Omega\text{cm}$ 至 $26\text{m}\Omega\text{cm}$,特别是 $10\text{m}\Omega\text{cm}$ 至 $24\text{m}\Omega\text{cm}$ 。

[0039] 根据再一个有利的实施方式,SiC衬底的弯曲度(bow)小于 $25\mu\text{m}$,特别是小于 $15\mu\text{m}$ 。

[0040] 根据又一个有利的实施方式,SiC衬底的翘曲度小于 $40\mu\text{m}$,特别是小于 $30\mu\text{m}$ 。

附图说明

[0041] 从基于附图的实施例的以下描述中将显然可知本发明的更多特点、优点和细节,其中:

[0042] 图1表示用于SiC体积单晶的升华生长的生长布置的一个实施例,

[0043] 图2表示借助于图1的生长布置在SiC籽晶上生长出的SiC体积单晶的一个实施例,此SiC体积单晶在生长方向的纵向剖面具有不均匀分布的螺位错,

[0044] 图3表示图1的生长布置中使用的籽晶夹持器(seed holder)的一个实施例,籽晶夹持器可借助于冲头(punch)被弯曲,

[0045] 图4至图6表示图3的可弯曲籽晶夹持器中使用的冲头的实施例,

[0046] 图7表示根据图3的可借助于单个冲头进行弯曲的籽晶夹持器的平面示意图,

[0047] 图8为平面示意图,表示图1的生长布置中使用的籽晶夹持器的另一实施例,此籽晶夹持器可借助于数个冲头被弯曲,

[0048] 图9和图10表示在根据图1的生长布置中使用的成形籽晶夹持器的实施例,每个籽晶夹持器具有用于与SiC籽晶邻接的不平整的接触面,

[0049] 图11在平面图中表示由与图2所示类似的SiC体积单晶制成的SiC衬底的实施例;以及

[0050] 图12在平面图中表示由SiC体积单晶制成的SiC衬底,其中心区域集中了不均匀分布的螺位错。

具体实施方式

[0051] 在图1至图12中,彼此对应的部件用相同的参考符号标记。下文更详细描述的实施例的细节本身也可构成发明或形成发明主题的一部分。

[0052] 图1表示借助于升华生长法生产SiC体积单晶2的生长布置(growth arrangement)1的实施例。生长布置1包括生长坩埚3,生长坩埚包括SiC储存区4和晶体生长区5。例如,SiC储存区4容纳粉状的SiC源材料6。在生长过程开始之前,SiC源材料6被填充到生长坩埚3的SiC储存区4内作为预制的起始材料。

[0053] 在生长坩埚3的与SiC储存区4相对的坩埚端壁7的区域中,附接有轴向延伸至晶体生长区5内的SiC籽晶8。以下将详细描述SiC籽晶8的附接方式。SiC籽晶8特别是单晶。在所示的实施例中,坩埚端壁7形成为生长坩埚3的坩埚盖。然而,这并非是强制的。待生长的SiC体积单晶2借助于晶体生长区5中形成的SiC生长气相9的沉积作用在SiC籽晶8上生长。生长中的SiC体积单晶2和SiC籽晶8的直径大致相同。如果有差别的话,SiC籽晶8的籽直径小于SiC体积单晶2的单晶直径的偏差最多为10%。然而,坩埚侧壁13的内侧与正在生长的SiC体积单晶2和SiC籽晶8之间可能存在图1中未示出的间隙。

[0054] 在图1的实施例中,包括坩埚盖7的生长坩埚3由导电和导热石墨坩埚材料构成,此材料具有例如至少为 $1.75\text{g}/\text{cm}^3$ 的密度。隔热层10布置在坩埚3周围。例如,隔热层10由泡沫状石墨隔热材料构成,其孔隙率特别是明显高于石墨坩埚材料的孔隙率。

[0055] 隔热的生长坩埚3放置在管状容器11内部。在本实施例中,管状容器11被设计为石英玻璃管,并形成高压灭菌器 (autoclave) 或反应器。为了加热生长坩埚3,在容器11周围布置有加热线圈12形式的感应加热装置。借助于加热线圈12将生长坩埚3加热到生长所需的温度。在所示的实施例中,这些生长温度为至少 2250°C 。加热线圈12感应式地将电流耦合到生长坩埚3的导电坩埚侧壁13中。此电流在圆形和中空的圆柱形坩埚侧壁13内基本上沿圆周方向作为环形电流流动,从而加热生长坩埚3。如果需要,加热线圈12和生长坩埚3之间的相对位置可以沿轴向改变,即沿生长的SiC体积单晶2的中心纵轴14的方向改变,特别是从而调节以及必要时还改变生长坩埚3内的温度或温度曲线。在图1中双箭头15表示加热线圈12在生长过程中的轴向可变位置。特别是,加热线圈12依照生长中的SiC体积单晶2的生长进度 (growth progress) 而移位。这种位移向下即沿着SiC源材料6的方向较佳,位移的长度与SiC体积单晶2生长的长度相同较佳,例如总共大约20毫米。为此,生长布置1包括相应设计的监测、控制和调节器件,更多细节未示出。

[0056] 晶体生长区5中的SiC生长气相9由SiC源材料6提供。SiC生长气相9包含至少Si、 Si_2C 和 SiC_2 (=SiC气体种类) 形式的气体成分。沿着轴向温度梯度从SiC源材料6向SiC体积单晶2处的生长界面16进行材料输送 (material transport)。在用于SiC晶体生长的升华法 (=PVT法) 中,通过生长坩埚3中普遍存在的温度,调节和控制包括材料输送的生长条件。在生长界面16处,生长温度相对较高,至少为 2250°C ,特别是甚至至少 2350°C 或 2400°C 。此外,特别是在生长界面16处,沿中心纵轴14的方向测量的轴向温度梯度被设置成至少 $5\text{K}/\text{cm}$,至少 $15\text{K}/\text{cm}$ 较佳。生长坩埚3内的温度向生长中的SiC体积单晶2的方向降低。最高温度约为 2450°C 至 2550°C ,普遍集中在SiC储存区4区域。这种在SiC储存区4和生长界面16之间温差特别为 100°C 至 150°C 的温度曲线可以通过各种测量方法获得。例如,可以通过将加热线圈12划分为两个或多个轴向区段来提供轴向变化的加热,更多细节未示出。此外,例如通过加热线圈12的对应的轴向定位,可以在生长坩埚3的下段设置比生长坩埚3的上段更强的加热效果。另外,还可以在两个轴向的坩埚端壁处设计不同的隔热层。如图1所示,隔热层10在下坩埚端壁处的厚度大于上坩埚端壁处的厚度。此外,隔热层10可以具有围绕中心纵轴14布置的中心冷却口17,邻接上坩埚端壁7。通过冷却口17散热。图1中的虚线表示这个中心冷却口17。

[0057] 此外,在实际的晶体生长期间,生长坩埚3中的生长压力普遍特别是 0.1hPa (=mbar) 至 10hPa (=mbar)。

[0058] SiC体积单晶2在SiC籽晶8的生长表面18上生长。在生长方向19上进行该生长,在图1所示的实施例中,生长方向19的取向自上而下,即从坩埚盖7朝向SiC储存区4的方向。生长方向19平行于居中布置的中心纵轴14延伸。由于在所示的实施例中,生长中的SiC体积单晶2在生长布置1中同心地布置,因此居中布置的中心纵轴14也可以作为整体分配给生长布置1。

[0059] 生长中的SiC体积单晶2具有4H多型体 (poly type) 的SiC晶体结构。但原则上,也可以是另一种多型体 (=另一晶体改性),比如6H-SiC、3C-SiC或15R-SiC等。有利的是,SiC

体积单晶2只有一种SiC多型体,在本实施例中为4H-SiC。SiC体积单晶2生长时具有较高的改性稳定性,在这方面基本上只有一种单一的多型体。单一的多型体有利于实现极低缺陷和高晶体品质。

[0060] 借助于生长布置1生产SiC体积单晶2的生长方法在其他方面的特征在于实现高晶体品质。例如,在垂直于生长方向19的任何截面区域内,生长中的SiC体积单晶2具有不均匀分布的体积单晶螺位错20(参见图2)。这种不均匀分布较佳地包括划分为(单个或多个部分)的堆积子区域21和(单个或多个部分)利用子区域22,堆积子区域21中集中了体积单晶螺位错20的最大部分,与堆积子区域21相比,利用子区域22包含的体积单晶螺位错20明显较少,但同时面积较大。在图2所示的示例中,堆积子区域21是单部分的,以及由SiC体积单晶2的径向边缘区域形成。相应地,利用子区域22也是单部分的,由围绕居中布置的中心纵轴14布置的SiC体积单晶2的中心区域形成。图2中的(名义上的)边界线23表示积聚子区域21和利用子区域22之间的边界。较大的利用子区域22只包含极少的体积单晶螺位错20,因此品质非常高。

[0061] SiC体积单晶2的这种高品质还得益于下层的SiC籽晶8,在后续的生长过程期间,随着SiC体积单晶2在SiC籽晶8上生长,SiC籽晶8的籽螺位错24具有类似的有利的不均匀分布。特别是,SiC籽晶8中存在的籽螺位错24沿着生长中的SiC体积单晶2的生长方向19继续,如图2所示。籽螺位错23导致在生长中的SiC体积单晶2中SiC籽晶8的生长表面18上形成体积单晶螺位错20。

[0062] 在这方面,如果SiC籽晶8具有(特别是最迟在SiC体积单晶2开始实际生长时)与其生长表面18相关的籽螺位错24的分布和/或总籽螺位错密度,则是非常有利的,这种分布和密度应当并能够至少大致地以这种形式在SiC体积单晶2中得到继承。

[0063] 为了实现这一点,SiC籽晶8在用于生长SiC体积单晶2之前要经过处理,这导致在这个初始阶段SiC籽晶8中可能仍存在的大量籽螺位错24的至少部分重组和相互抵消。为此,SiC籽晶8较佳地在室温承受机械应力,然后特别地被加热。这导致最初存在的籽螺位错24的位错运动。在这个位错运动的过程中,具有相反柏氏矢量(Burgers vector)的籽螺位错24可彼此靠近,以至于相应的一对螺位错24出现重组和相互抵消。因此,籽螺位错24的这种有利的选择性减少是机械诱导的(通过引入到SiC籽晶8中的机械应力)和热激活的(通过随后进行的热处理)。在启动有利的位错运动的热处理期间,机械应变的SiC籽晶8的温度达到比生长温度低200°C,生长温度以后在实际生长期间在SiC籽晶8上普遍存在。例如,处理温度约2100°C。这种热处理持续约200分钟较佳。完成这种上游处理后,SiC籽晶8具有图2中示例所示的籽螺位错24的有利的不均匀分布,在中心区域只有极少的籽螺位错24。

[0064] 下面将描述将有利的机械应力引入籽晶8中的示例。

[0065] 图3表示生长布置1中使用的籽晶夹持器25的实施例。籽晶夹持器25具有搁置在坩埚侧壁13的壁突出部26上的保持板27和在中心纵轴14方向上可调节的冲头28。SiC籽晶8被附接到(特别是用胶粘到)保持板27面向晶体生长区5的前侧。冲头28在背离保持板27的后侧上与保持板27接触。借助于冲头28沿晶体生长区5方向的进给运动,由保持板27和接合的SiC籽晶8组成的单元发生弯曲。弯曲度在中心处最大。在此处,SiC籽晶8被弯曲大约1mm的弯曲距离29。SiC籽晶8的弯曲度(bow)与引入的机械应力 σ 相关。在图3中,SiC籽晶8中引入的机械应力 σ 的峰形图(profile)示意性地示出。这个应力的最大值也位于SiC籽晶8的中

心,此处籽螺位错24的移动性最高,因为这种移动性取决于相应位置的机械应力的强度。因此,在退火处理期间的加热期间,SiC籽晶8中心区域存在的籽螺位错24将特别地由此开始移动,并以极高的概率彼此重组。

[0066] 可调冲头28为圆柱形。冲头28的冲头端头压靠保持板27的背面,可以具有不同的形状。图4至图6表示三个实施例。图4所示的冲头28a具有平的冲头端头30a,图5所示的冲头28b具有锥形逐渐变窄的冲头端头30b,以及图6所示的冲头28c具有半球状圆形的冲头端头30c。

[0067] 在图7中,在待生长的SiC体积单晶2的生长方向19上,以保持板27的后侧的示意平面图表示图3的能够借助于单冲头28被弯曲的籽晶夹持器25。

[0068] 图8中与图7的籽晶夹持器25相同的表示方法表示生长布置1中使用的另一个实施例的籽晶夹持器31。籽晶夹持器31的结构与籽晶夹持器25基本相同,也是可弯曲的,由此允许对SiC籽晶8施加机械应力。然而,与籽晶夹持器25不同的是,除了居中布置的冲头28外,籽晶夹持器31还具有其他的冲头32,冲头32沿圆形线33等距离地同心放置在冲头28周围。冲头32也是圆柱形的,可沿中心纵轴14的方向调节。冲头32的冲头直径略小于中心冲头28的冲头直径。因此,籽晶夹持器31具有数个用于其弯曲的冲头28和32,从而可以非常具体地调节SiC晶种8的弯曲度以及由此引入SiC晶种8的机械应力。

[0069] 借助于籽晶夹持器25和31,只能在预处理期间调整SiC籽晶8的弯曲度,以减少SiC籽晶中存在的籽螺位错24。预处理完成后,冲头28和32可以缩回,包括与其附接的SiC籽晶8的籽晶夹持器25或31可以恢复到未弯曲状态,然后接下来进行SiC体积单晶2的实际生长。

[0070] 相比之下,图9和图10表示生长布置1中分别使用的成形籽晶夹持器(shaped seed holder)34和35的其他实施示例,每个籽晶夹持器分别具有不平整的接触面36和37,用于与SiC籽晶8接接,并且每个籽晶夹持器还搁置在坩埚侧壁13的壁突出部26上。与籽晶夹持器25和31不同,籽晶夹持器34和35不可调节或弯曲。在籽晶夹持器34和35的情况下,与各自的接触面36或37接合的SiC籽晶8经受永久弯曲,其中在这些实施示例中,对减少籽螺位错24起决定性作用的机械应力也是根据各自接触面36或37的不平整形状引入SiC籽晶8。在籽晶夹持器34的情况下,接触面36凹入地弯曲。相应地,与其粘接的SiC籽晶8向后弯曲,即远离晶体生长区5。在籽晶夹持器35的情况下,接触面37凸出地弯曲,使得与其粘接的SiC籽晶8沿着晶体生长区5的方向向前弯曲,与籽晶夹持器34和35的情况类似。原则上,还可以实现不平整接触面的任何其他形状,精确的形状可以适用于在每种单独情况下待引入SiC籽晶8的机械应力曲线。

[0071] 如有必要,首先可以检查SiC籽晶8是否存在籽螺位错24。这种检查例如通过X射线形貌法(X-ray topography)进行。然后,在这个检查期间已经发现的籽螺位错24特别多的子区域然后可以有选择性地被施加机械应力,从而减少特别是那个地方异常(或超过平均值)高数量的籽螺位错24。

[0072] 总之,生长布置1与所描述的用于减少SiC籽晶8中存在的籽螺位错24的不同变体相结合,能够生长出高等级的SiC体积单晶2,其仅具有少量的体积单晶螺位错20,其中少量的体积单晶螺位错20分布不均匀且较佳地集中在堆积子区域21内,在进一步使用SiC体积单晶2用于生产高等级电子元件时,可以有利地被排除在外。

[0073] 然后,由这些高等级的SiC体积单晶2能够生产出同样高等级的SiC衬底38、39(见

图11和图12的平面示意图)。通过将SiC体积单晶2作为垂直于生长方向19或中央纵轴14的圆盘轴向地连续切割或锯切,由相关的SiC体积单晶2得到这些圆盘状的SiC衬底38、39。在图2的示意图中,在SiC体积单晶2内形成SiC衬底的这样的圆盘40的位置用虚线的矩形表示。这样的SiC衬底38或39大且薄。在一个可能的实施方式中,其总的主表面41或42的衬底直径为至少150mm,例如200mm,而衬底厚度约500 μm 。由SiC体积单晶2制成的SiC衬底38或39,就像SiC体积单晶2一样,具有较低的总螺位错密度,较佳地至多为 $1,000\text{cm}^{-2}$,并且在衬底38、39的情况下剩余的体积单晶螺位错20的不均匀分布,还可以理解为并被称为衬底螺位错43。二者都能提高SiC衬底38或39用于生产元件的适用性。总螺位错密度,对于SiC体积单晶2而言,指的是在垂直于中心纵轴14或生长方向19的SiC体积单晶2的完整横截面积;而对于SiC衬底38或39而言,指的是完整的总主表面41或42。从图11和图12中可看出不均匀的螺位错分布,图中分别表示各自的SiC衬底38或39的硅侧。

[0074] 在根据图11的SiC衬底38中,衬底螺位错43集中在轴向边缘区域形成的堆积子区域44中,而在中心区域形成的利用子区域45中,衬底螺位错43则明显较少。因此,利用子区域45特别适合用于生产高等级元件。在这方面,存在与图2中示意性示出的体积单晶2的情况类似的螺位错分布,以及可以通过使用SiC籽晶8来实现,此SiC籽晶8已根据图3、图9或图10的弯曲度进行了预处理和在实际生长前进行热预处理。

[0075] 在根据图12的SiC衬底39的情况下,状况相反。在这种情况下,衬底螺位错43集中在中心区域形成的堆积子区域46中,而在轴向边缘区域形成的利用子区域47中,衬底螺位错43明显较少。因此,利用子区域47特别适用于生产高等级元件。

[0076] 在SiC衬底38、39的情况下,各自的利用子区域45或47明显大于各自的堆积子区域44或46。各个堆积子区域44或46具有相关的堆积子区域48或49,是各个总主表面41或42的一部分,至多占总主表面的20%。不过,在相关的总主表面41或42上存在的所有衬底螺位错43的至少80%位于此堆积子区域48或49内。在图11和图12中,较小的堆积子区域44或46与较大的旨在用于进一步使用的利用子区域45或47之间的边界分别由虚线(名义的)边界线50表示。

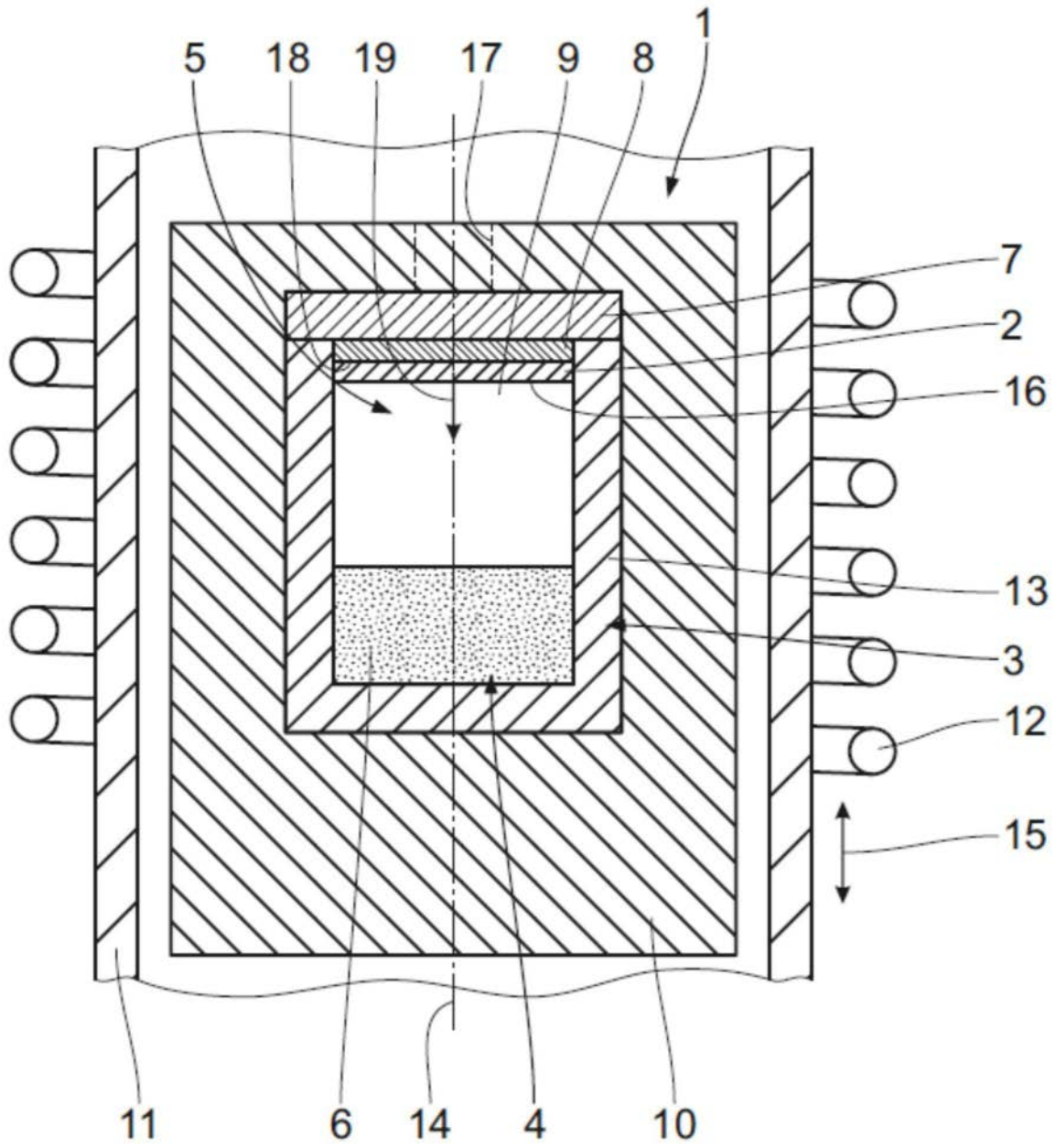


图1

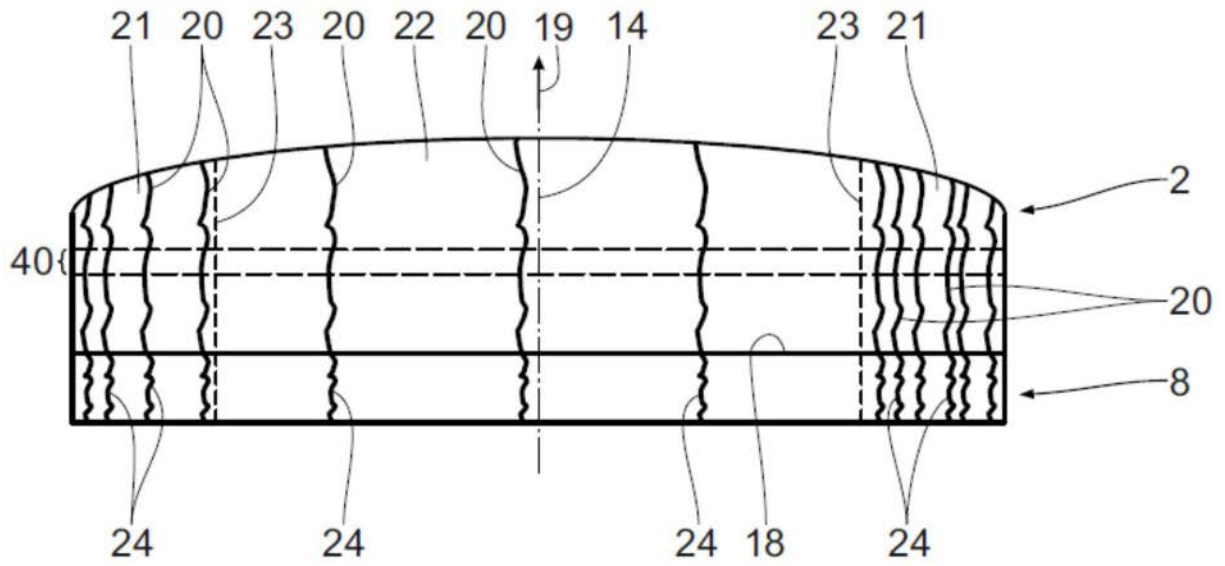


图2

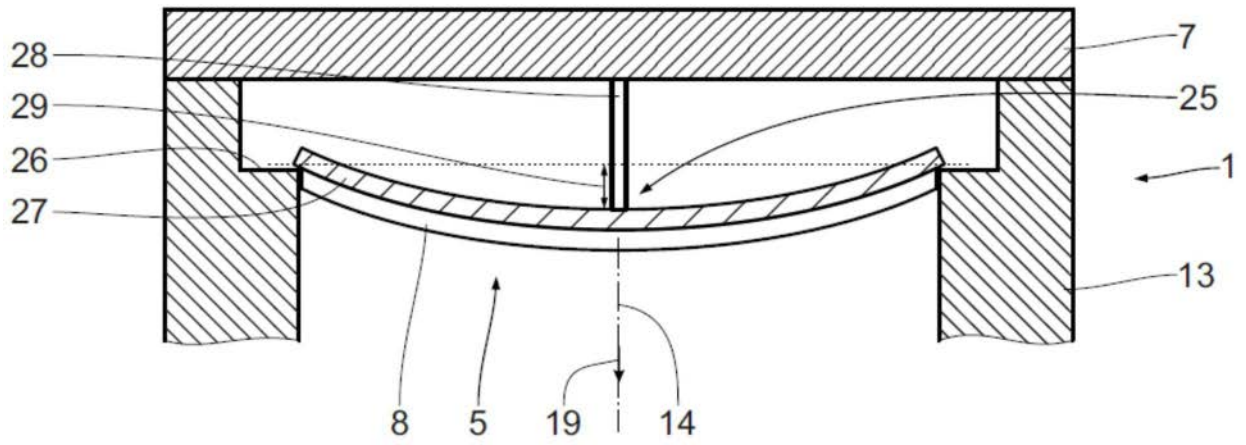
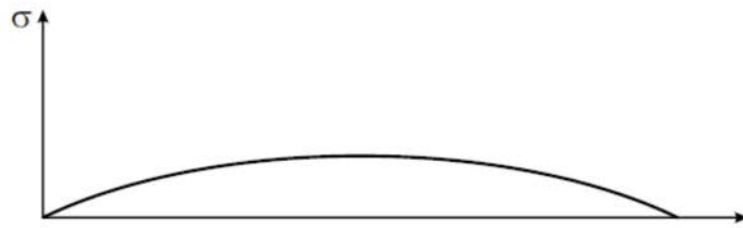


图3

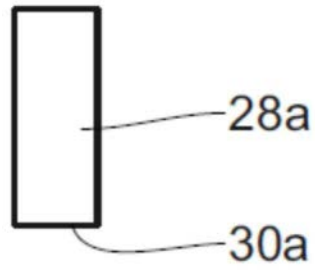


图4

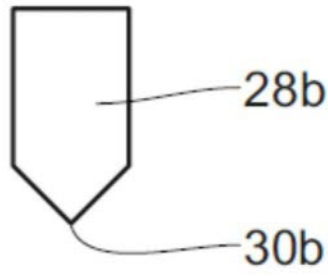


图5

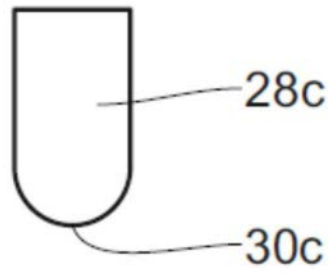


图6

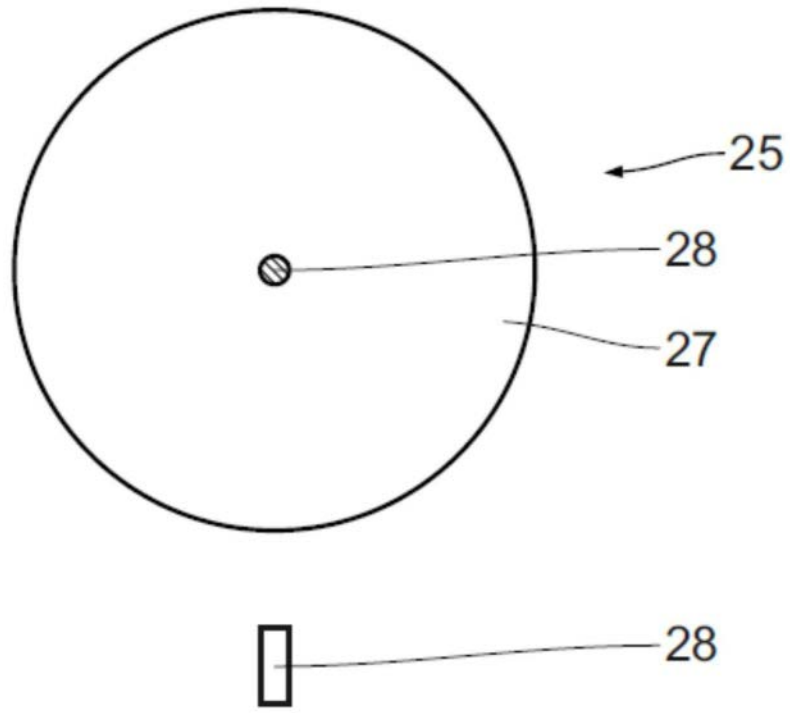


图7

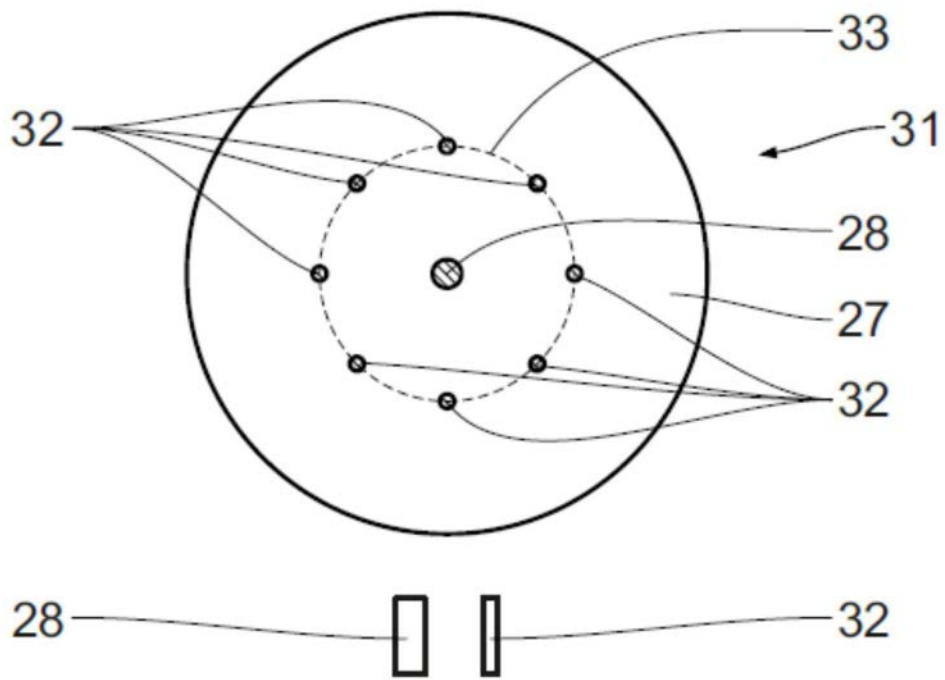


图8

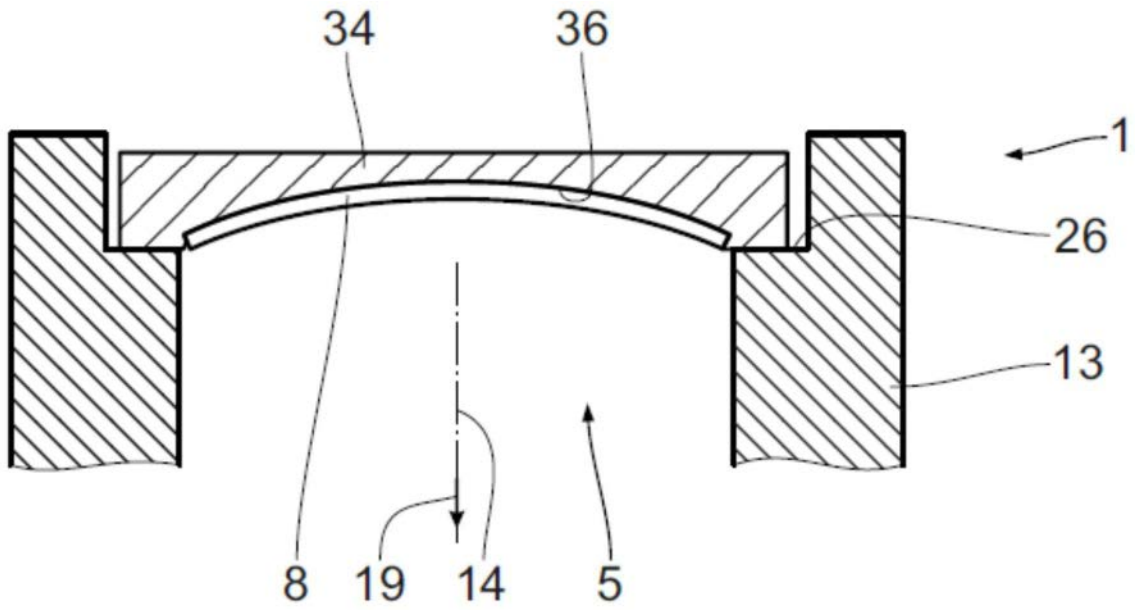


图9

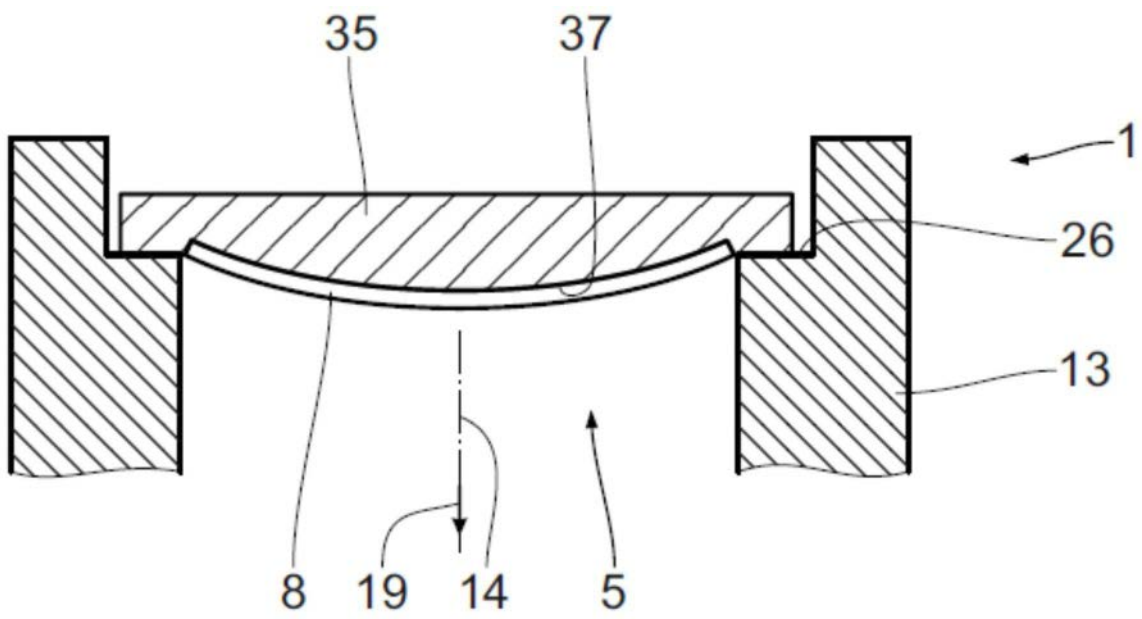


图10

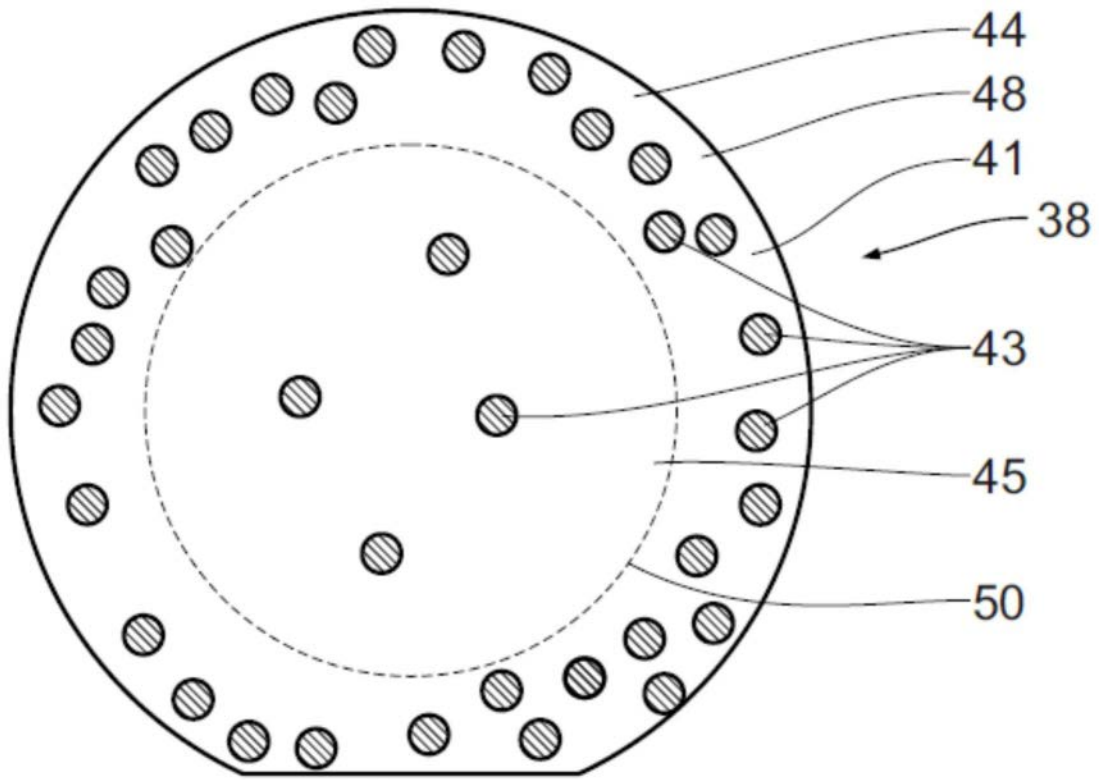


图11

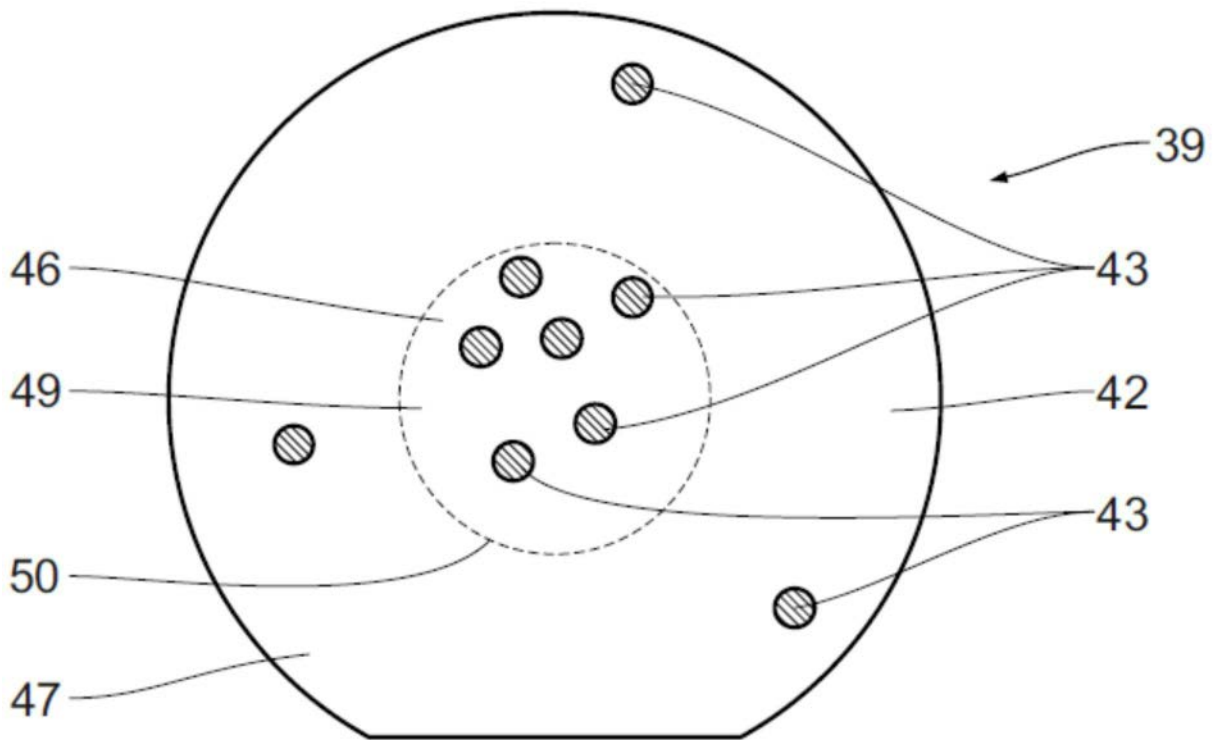


图12