



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102150283 B

(45) 授权公告日 2013.06.05

(21) 申请号 200980135584.0

(22) 申请日 2009.08.12

(30) 优先权数据

61/089,289 2008.08.15 US

12/539,125 2009.08.11 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2011.03.10

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2009/053588 2009.08.12

(87) PCT申请的公布数据

W02010/019695 EN 2010.02.18

(73) 专利权人 瓦里安半导体设备公司

地址 美国麻萨诸塞州

(72) 发明人 彼德·L·凯勒曼

菲德梨克·卡尔森 法兰克·辛克莱

(74) 专利代理机构 北京同立钧成知识产权代理

有限公司 11205

代理人 臧建明

(51) Int. Cl.

H01L 31/042 (2006.01)

(56) 对比文件

EP 0443268 A1, 1991.08.28,

US 2006213589 A1, 2006.09.28,

US 4417944 A, 1983.11.29,

US 3681033 A, 1972.08.01,

CN 101133194 A, 2008.02.27,

US 3430680 A, 1969.03.04,

US 2007169684 A1, 2007.07.26,

US 2007190752 A1, 2007.08.16,

US 2006102078 A1, 2006.05.18,

审查员 刘斌

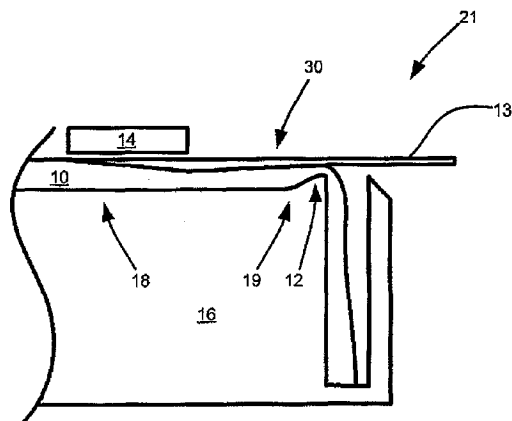
权利要求书1页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

板厚控制

(57) 摘要

本发明揭示一种用于形成板的方法及设备。将熔化物冷却,且在所述熔化物上形成板。此板具有第一厚度。随后使用例如加热器或熔化物使所述板自第一厚度变薄至第二厚度。所述冷却可经配置以允许溶质被截留于板的一区中,且可使此特定板变薄且移除溶质。所述熔化物可为例如硅、硅锗、镓或氮化镓。



1. 一种形成板的方法,包括:
将材料的熔化物冷却;
在所述熔化物中形成所述材料的板,所述板具有第一厚度;以及
使所述板自所述第一厚度变薄至第二厚度,所述第二厚度小于所述第一厚度,所述变薄在所述形成之后发生于所述熔化物中。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中所述熔化物是选自由硅、硅锗、镓以及氮化镓组成的群。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中所述变薄以至少 $1\text{ }\mu\text{m/s}$ 的速率而发生。
4. 根据权利要求1所述的方法,还包括自所述熔化物来分离所述板,且在所述形成之后使用辐射加热器使所述板变薄。
5. 根据权利要求4所述的方法,其中自所述熔化物来分离所述板包括:使用溢道,且使用所述辐射加热器使所述分离在所述变薄之前发生。
6. 根据权利要求1所述的方法,其中所述第一厚度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 且所述第二厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。
7. 根据权利要求1所述的方法,还包括通过所述变薄而使所述板的表面平滑。
8. 根据权利要求1所述的方法,还包括通过更改所述变薄的参数来控制所述第二厚度。

板厚控制

技术领域

[0001] 本发明涉及由熔化物形成板,尤其涉及减少由熔化物形成的板的厚度。

背景技术

[0002] 硅晶圆或板可用于例如集成电路或太阳能电池工业中。随着对可再新生的能源的需求增加,对太阳能电池的需求亦持续增加。存在两种类型的太阳能电池:硅太阳能电池及薄膜太阳能电池。大部分太阳能电池是由硅晶圆制成,诸如单晶硅晶圆。目前,晶体硅太阳能电池的主要成本在于制造太阳能电池的晶圆。太阳能电池的效率或在标准照明下产生的功率的量部分地受到此晶圆的品质的限制。随着对太阳能电池的需求增加,太阳能电池工业的一目标是降低成本/功率比。在不降低品质的情况下晶圆的制造成本的任何减少均将使成本/功率比降低,且使此清洁的能源技术能更广泛使用。

[0003] 效率最高的硅太阳能电池可具有大于 20% 的效率。这些太阳能电池是使用电子级 (electronics-grade) 单晶硅晶圆制成的。这些晶圆可自使用 Czochralski 方法生长的单晶硅圆柱形梨晶 (cylindrical boule) 通过锯切薄片而制成。这些薄片的厚度可小于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。为维持单晶体生长,梨晶必须自含有熔化物的坩埚 (crucible) 缓慢地生长,生长速度例如小于 $10\text{ }\mu\text{m/s}$ 。后续锯切过程导致每晶圆大约 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的锯口损失 (kerf loss) 或由于锯刃的宽度而带来的损失。圆柱形梨晶或晶圆亦可能需制成为正方形以制作正方形太阳能电池。制成为正方形及锯口损失均会导致材料浪费及材料成本增加。随着太阳能电池变得较薄,每次切割时浪费的硅的百分比亦增加。对铸锭分割 (ingot slicing) 技术的限制可能会妨碍获得较薄太阳能电池的能力。

[0004] 其它太阳能电池是使用自多晶硅铸锭锯切而得的晶圆制成的。多晶硅铸锭的生长速度可以比单晶硅快。然而,所得晶圆的品质较低,因为存在较多缺陷及晶粒间界 (grain boundary),且此较低品质会导致较低效率的太阳能电池。用于多晶硅铸锭的锯切过程与单晶硅铸锭或梨晶一样是低效率的。

[0005] 可减少硅浪费的另一解决方案是在离子植入之后自硅铸锭来分裂晶圆。举例而言,将氢、氘或其它稀有气体离子植入于硅铸锭的表面的下方以形成一植入区。在此之后进行物理热处理或化学热处理,用以沿此植入区自铸锭来分裂晶圆。虽然经由离子植入来进行分裂可在无锯口损失的情况下制作晶圆,但此方法是否可用于经济地制作硅晶圆仍有待证实。

[0006] 又一解决方案是自熔化物垂直拉出一薄硅带 (ribbon),且随后使得所拉出的硅冷却且固化为板 (sheet)。此方法的拉动速率可限制于小于大约 18mm/分 。必须沿垂直带移除在硅的冷却及固化期间的移除的潜热 (latent heat)。此做法导致沿带的大的温度梯度 (gradient)。此温度梯度给晶体硅带添加应力,且可能导致不良品质的多晶粒硅。带的宽度及厚度亦可能由于此温度梯度而受限制。举例而言,宽度可限于小于 80mm 且厚度可限于 $180\text{ }\mu\text{m}$ 。

[0007] 自熔化物实体拉出的水平硅带亦已经过测试。在一种方法中,将附接至一杆的晶

种 (seed) 插入至熔化物中,且在坩埚的边缘上方以一低角度拉动该杆及所得的板。对所述角度与表面张力进行平衡以防止熔化物溅出坩埚。然而,难以起始及控制此拉动过程。必须为坩埚及熔化物提供入口 (access) 以插入晶种,所述入口可能会导致热损失。可将额外的热添加至坩埚以补偿此热量损失。此额外的热可能会导致熔化物中的垂直温度梯度,所述垂直温度梯度可能会引起非层迭 (non-laminar) 的流体流。而且,必须执行可能较难的倾斜角度调节以对在坩埚边缘处形成的弯月面 (meniscus) 的重力及表面张力进行平衡。此外,由于热正在板及熔化物的分离点处被移除,因此在正作为潜热移除的热与正作为显热 (sensible heat) 移除的热之间存在突然改变。此情况可能导致在此分离点处沿带的大的温度梯度,且可能导致晶体中的位错 (dislocation)。位错及翘曲 (warping) 可能由于沿板的这些温度梯度而发生。

[0008] 尚未执行例如通过使用溢道 (spillway) 而自熔化物水平分离薄板的制作。通过分离而自熔化物水平地制作的板可能比自铸锭分割的硅便宜,且可消除锯口损失或由于制成为正方形而带来的损失。通过分离而自熔化物水平地制作的板亦可能比使用氢离子或其它拉出硅带方法而自铸锭分裂的硅便宜。此外,自熔化物水平分离的板与拉出的带相比可改良板的晶体品质。诸如此类的可减少材料成本的晶体生长方法将为减少硅太阳能电池的成本的主要达成步骤。然而,板可能具有不正确的厚度,或可能具有包含在其晶格内的杂质或溶质。因此,此项技术中需要一种改良的由熔化物形成板的方法,且更特定而言,需要一种减少由熔化物形成的板的厚度的方法。

发明内容

[0009] 根据本发明的第一方面,提供一种形成板的方法。所述方法包括对材料的熔化物进行冷却,以及在所述熔化物中形成所述材料的板。所述板具有第一厚度。使所述板自所述第一厚度变薄至第二厚度。所述第二厚度小于所述第一厚度。

[0010] 根据本发明的第二方面,提供一种用于形成板的设备。所述设备包括容器,其界定一种经配置以固持材料的熔化物的通道。冷却板安置于靠近所述熔化物处。所述冷却板经配置以在所述熔化物上形成所述材料的板。所述设备亦具有辐射加热器。

[0011] 根据本发明之第三方面,提供一种形成板的方法。所述方法包括第一阶段中对材料的熔化物进行冷却。所述第一阶段中的冷却具有第一参数。在所述熔化物中形成所述材料的板的第一层。所述板的第一层具有第一厚度及第一溶质浓度。在第二阶段中对所述熔化物进行冷却。所述第二阶段中的冷却具有不同于所述第一参数的第二参数。使所述板自第一厚度增加至第二厚度,且形成所述板的第二层。所述第一厚度与所述第二厚度之间的第二层具有高于第一溶质浓度的第二溶质浓度。使所述板自所述第二厚度变薄至所述第一厚度。

附图说明

[0012] 图 1 是自熔化物分离一种板的设备的实施例的横截面侧视图。

[0013] 图 2 是自熔化物拉出一种板的设备的实施例的横截面侧视图。

[0014] 图 3 是使用图 1 的设备时在熔化物内的变薄的横截面侧视图。

[0015] 图 4 是使用图 2 的设备时在熔化物内的变薄的横截面侧视图。

- [0016] 图 5 是使用图 1 的设备以加热器进行的变薄的横截面侧视图。
- [0017] 图 6 是使用图 2 的设备以加热器进行的变薄的横截面侧视图。
- [0018] 图 7 表示在接近板-熔化物界面处该熔化物及固体中的随着时间而变的浓度分布。
- [0019] 图 8 是使用图 1 的设备的变薄及净化的横截面侧视图。
- [0020] 图 9 是使用图 2 的设备的变薄及净化的横截面侧视图。
- [0021] 图 10 是在板生长期间俘获杂质时的横截面侧视图。
- [0022] 图 11 是对板进行加热时的横截面图。

具体实施方式

[0023] 结合太阳能电池来描述本文的设备及方法的实施例。然而,这些实施例亦可用于制作例如集成电路、平坦面板或本领域技术人员已知的其它基板。此外,虽然本文将熔化物描述为硅,但熔化物可含有锗、硅锗、镓、氮化镓、其它半导体材料或本领域技术人员已知的其它材料。因此,本发明不限于下文描述的特定实施例。

[0024] 图 1 是自熔化物分离一种板的设备的实施例的横截面侧视图。板形成设备 21 具有容器 16 以及面板 15 及 20。容器 16 以及面板 15 及 20 可为例如钨、氮化硼、氮化铝、钼、石墨、碳化硅或石英。容器 16 经配置以容纳熔化物 10。熔化物 10 可为硅。熔化物 10 在一实施例中可经由进料口 (feed) 11 来补充。进料口 11 可容纳固体硅。在另一实施例中,可将熔化物 10 泵送 (pumped) 至容器 16 中。板 13 将形成于熔化物 10 上。在一实例中,板 13 将至少部分地在熔化物 10 内浮动。虽然在图 1 中将板 13 说明为在熔化物 10 中浮动,但板 13 可至少部分地浸没在熔化物 10 中,或可在熔化物 10 的顶部上浮动。在一实例中,板 13 的仅 10% 自熔化物 10 的顶部上方突出。熔化物 10 可在设备 21 内循环。

[0025] 此容器 16 界定至少一通道 17。此通道 17 经配置以固持熔化物 10,且熔化物 10 自通道 17 的第一点 18 流动至第二点 19。在一实例中,通道 17 内的环境为静止的,以防止熔化物 10 中出现波纹 (ripples)。熔化物 10 可由于例如压力差、重力、磁流体动力学驱动设备、螺旋泵 (screw pump)、叶轮泵 (impeller pump)、轮或其它输送方法而流动。熔化物 10 随后流过溢道 12。此溢道 12 可为斜坡、堰 (weir)、小坝 (small dam) 或隅角,且不限于图 1 中说明的实施例。溢道 12 可为任何允许自熔化物 10 来分离一种板 13 时的形状。

[0026] 面板 15 在此特定实施例中经配置以部分地在熔化物 10 的表面下方延伸。此做法可防止当该板 13 形成于熔化物 10 上时波或波纹干扰该板 13。这些波或波纹可能由于来自进料口 11 的熔化物材料的添加、泵送或本领域技术人员已知的其它原因而形成。

[0027] 在一特定实施例中,可将容器 16 以及面板 15 及 20 维持在稍微高于大约 1687K 的温度。对于硅,1687K 表示冻结温度或界面 (interface) 温度。通过将容器 16 以及面板 15 及 20 的温度维持在稍微高于熔化物 10 的冻结温度,冷却板 14 可使用辐射冷却而起作用以获得熔化物 10 上或熔化物 10 中的板 13 的期望冻结速率。在此特定实施例中,冷却板 14 由单一区段或部分区段组成,但在另一实施例中可包含多个区段或部分区段。可将通道 17 的底部加热至高于熔化物 10 的熔化温度,以在熔化物 10 中在界面处产生小的垂直温度梯度以防止板 13 上的组分过冷 (constitutional supercooling) 或者形成枝蔓体 (dendrite) 或分支突出物。然而,容器 16 以及面板 15 及 20 可处于熔化物 10 的熔化温度以上的任何

温度。此情况可防止熔化物 10 在容器 16 以及面板 15 及 20 上固化。

[0028] 可通过将设备 21 至少一部分或完全封闭于一封闭体内而将设备 21 维持于稍微高于熔化物 10 的冻结温度的温度。若封闭体将设备 21 维持于高于熔化物 10 的冻结温度的温度,则可避免或减少对设备 21 进行加热的需要,且封闭体中或周围的加热器可补偿任何热损失。此封闭体可为等温的且具有非各向同性的传导性。在另一特定实施例中,加热器未安置于封闭体上或封闭体中,而是安置于设备 21 中。在一实例中,可通过在容器 16 内嵌入加热器且使用多区域温度控制来将容器 16 的不同区加热至不同温度。

[0029] 封闭体可控制设备 21 的安置环境。在一特定实施例中,封闭体中含有惰性气体。可将此惰性气体维持于高于熔化物 10 的冻结温度。惰性气体可减少向熔化物 10 内的溶质添加,所述添加可能会致使在板 13 形成过程期间的组成不稳定性。

[0030] 设备 21 包含冷却板 14。冷却板 14 允许在板 13 形成于熔化物 10 上时的排热 (heat extraction)。当冷却板 14 的温度降低至熔化物 10 的冻结温度以下时,冷却板 14 可致使板 13 在熔化物 10 上或熔化物 10 中冻结。此冷却板 14 可使用辐射冷却,且可由例如石墨、石英或碳化硅制造。冷却板 14 可自液体熔化物 10 快速地、均一地且以受控的量移除热。在板 13 形成时可减少对熔化物 10 的干扰以防止板 13 中的缺陷。

[0031] 在熔化物 10 的表面上方来自熔化物 10 的熔解热 (heat of fusion) 及热的排热在与其它带拉动方法相比可达成较快地制作该板 13,同时维持具有低缺陷密度的板 13。对熔化物 10 的表面上板 13 或在熔化物 10 上浮动的板 13 进行冷却允许在大面积上缓慢地移除熔解潜热,同时该板 13 的排热速率较大。

[0032] 冷却板 14 的尺寸可在长度及宽度上均增加。增加长度对于相同的垂直生长速率及所得的板 13 厚度而言可允许较快的板 13 排热速率。增加冷却板 14 的宽度可导致较宽的板 13。不同于垂直式板拉动方法,对使用图 1 中描述的设备及方法的实施例制作的板 13 的宽度不存在固有的实体限制。

[0033] 在一特定实例中,熔化物 10 及板 13 以大约 1cm/s 的速率流动。冷却板 14 的长度大约为 20cm 且宽度大约为 25cm。板 13 的厚度可在大约 20 秒生长至大约 100 μm 。因此,所述板的厚度可以大约 5 $\mu\text{m/s}$ 的速率生长。可以大约 10m²/小时的速率制作厚度大约为 100 μm 的板 13。

[0034] 在一实施例中可使熔化物 10 中的热梯度最小化。此做法可允许熔化物 10 的流动稳定且形成层迭。此做法亦可允许使用冷却板 14 经由辐射冷却而形成板 13。在一特定实例中,冷却板 14 与熔化物 10 之间的大约 300K 的温度差可以大约 7 $\mu\text{m/s}$ 的速率在熔化物 10 上或熔化物 10 中形成板 13。

[0035] 通道 17 的在冷却板 14 下游及在面板 20 下方的区可为等温的。这些温区可允许板 13 的退火。

[0036] 在板 13 形成于熔化物 10 上之后,使用溢道 12 将板 13 与熔化物 10 分离。熔化物 10 自通道 17 的第一点 18 流动至第二点 19。板 13 将随熔化物 10 一起流动。板 13 的输送可为连续运动。在一实例中,板 13 可以与熔化物 10 的流动速度大约相同的速度流动。因此,板 13 可相对于熔化物 10 静止地形成及输送。可更改溢道 12 的形状或溢道 12 的定向以改变熔化物 10 或板 13 的速率分布。

[0037] 在溢道 12 处,熔化物 10 与板 13 分离。在一实施例中,熔化物 10 的流动可在溢道

12 上输送熔化物 10, 且至少部分地可在溢道 12 上输送该板 13。此做法可使单晶板 13 的破裂程度最小或防止使单晶板 13 破裂, 因为无外部应力施加于板 13。在此特定实施例中, 熔化物 10 将在溢道 12 上流动而远离该板 13。在溢道 12 处可不施加冷却, 以防止对板 13 的热冲击 (thermal shock)。在一实施例中, 在溢道 12 处的分离是在近等温条件下发生。

[0038] 板 13 在设备 21 中的形成速度可比被垂直于熔化物而拉动的方式更快, 因为熔化物 10 的流动速度可允许板 13 在熔化物 10 上适当地冷却及结晶。板 13 的流动速度将大约与熔化物 10 的流动速度相同。此做法可减少板 13 上的应力。垂直于熔化物而拉动带的速度有限, 原因在于因拉动引起的施加于带上的应力。在一实施例中, 设备 21 中的板 13 可能不存在任何此类拉动应力。此情况可使板 13 的品质及板 13 的制作速度提高。

[0039] 在一实施例中, 板 13 可能会趋于笔直地越过溢道 12。在一些实例中可在此板 13 在溢道 12 上经过之后支撑此板 13 以防止破裂。支撑装置 22 经配置以支撑该板 13。支撑装置 22 可提供气压差以使用例如气体或空气鼓风机来支撑该板 13。在板 13 自熔化物 10 分离之后, 可缓慢改变板 13 所在环境的温度。在一实例中, 温度随着板 13 远离溢道 12 而移动时降低。

[0040] 在一实例中, 板 13 的生长、板 13 的退火以及板 13 使用溢道 12 自熔化物 10 的分离可在等温环境中进行。使用溢道 12 的分离以及板 13 与熔化物 10 的大约相等的流动速率使板 13 上的应力或机械应变程度最小。此做法可增加制作单晶板 13 的可能性。

[0041] 在另一实施例中, 在板形成设备 21 中将磁场施加于熔化物 10 及板 13。此做法可使熔化物 10 内的振荡流衰减, 且可改良该板 13 的结晶。

[0042] 图 2 是自熔化物拉出一种板的设备的一实施例的横截面侧视图。在此实施例中, 板形成设备 23 自熔化物 10 拉出该板 13。熔化物 10 在此实施例中可不在通道 17 中循环, 且可使用晶种来拉出该板 13。可经由通过冷却板 14 的冷却而形成该板 13, 且可将所得的板自熔化物 10 拉出。

[0043] 图 1 至图 2 的实施例均使用冷却板 14。冷却板 14 的长度上的不同冷却温度、熔化物 10 的不同流动速率或板 13 的不同拉动速度、板形成设备 21 或板形成设备 23 的各个部分的长度、或板形成设备 21 或板形成设备 23 内的定时 (timing) 可用于过程控制。若熔化物 10 为硅, 则可在板形成设备 21 中形成多晶板 13 或单晶板 13。在图 1 或图 2 的实施例的任一个中, 板形成设备 21 或板形成设备 23 可包含在封闭体中。

[0044] 图 1 及图 2 仅为可自熔化物 10 形成板 13 的板形成设备的两个实例。垂直板或水平板 13 生长的其它设备或方法是可能的。本文描述的方法及设备的实施例可应用于任何垂直板或水平板 13 的生长方法或设备, 且不仅限于图 1 至图 2 的特定实施例。使用图 1 至图 2 的实施例形成的板 13 可能太厚, 或具有不正确的尺寸。板 13 亦可能不具有光滑表面。因此, 可使板 13 变薄至例如正确厚度或使其表面光滑。

[0045] 图 3 是使用图 1 的设备时在熔化物内的变薄的横截面侧视图。熔化物 10 在溢道 12 上流动。当熔化物 10 使用冷却板 14 而冻结时, 板 13 在熔化物 10 中形成。在冷却板 14 的下游但在溢道 12 的上游在区 30 中使板 13 变薄。此变薄将在溢道 12 之前使板 13 的尺寸自第一厚度改变为第二厚度。在板 13 朝溢道 12 流动时, 来自熔化物 10 的热将使板 13 的至少一部分被熔化而变回熔化物 10。

[0046] 在一特定实例中, 熔化物 10 或板 13 的流动速度为大约 1cm/s。在此特定实施例中

可使用层迭流。容器 16 的温度可比板 13 的冻结温度高大约 2K。冷却板 14 的温度与熔化物 10 的温度之间的差可为大约 300K。区 30 中的熔化物 10 的深度为大约 1cm。在区 30 中板 13 变薄而变回熔化物 10 的速率大约为 $1\mu\text{m/s}$ 。因此,板 13 的沿在第一点 18 与第二点 19 之间的熔化物 10 或板 13 流动的方向的变薄速率为大约 $1\mu\text{m/cm}$ 。区 30 在熔化物 10 或板 13 流动的方向上可具有大约 0.5m 的长度,以使板 13 自大约 $150\mu\text{m}$ 的厚度变薄至大约 $100\mu\text{m}$ 的厚度。可通过增加容器 16 的温度而减少区 30 的长度,但此可能要求冷却板 14 在较低温度下操作。在另一实施例中,使板 13 自大约 $200\mu\text{m}$ 的厚度变薄至大约 $100\mu\text{m}$ 的厚度。

[0047] 为了具有均一的变薄过程,温度梯度应足够低以避免对板 13 的浮力驱动的不均一或不稳定的对流。不稳定的对流是不均一的热通量,且因此总体能量输送难以由均一方式来控制。此可能导致板 13 的不均一的厚度。若板 13 及熔化物 10 中的温度差小于大约 5K,且区 30 中熔化物 10 的深度相对浅,则浮力驱动的对流可能不会引起问题。区 30 中熔化物 10 的深度可例如小于大约 1.22cm 或可为大约 0.97cm。然而,在一些实施例中,熔化物 10 中的对流可为可接受的。其它条件或参数是可能的,且此仅为变薄过程的一实例。此实施例不仅仅限于上述实例中列出的条件。

[0048] 图 4 是使用图 2 的设备时在熔化物内的变薄的横截面侧视图。使区 30 中的板 13 变薄亦可应用于板形成设备 23 以及图 3 的板形成设备 21。此处在使用冷却板 14 形成板 13 之后且在自熔化物 10 拉出该板 13 之前使板 13 自第一厚度变薄至第二厚度。

[0049] 图 5 是使用图 1 的设备以加热器进行的变薄的横截面侧视图。板形成设备 21 包含加热器 50 及液体轴承 (fluid bearing) 51。在此特定实施例中,加热器 50 及液体轴承 51 均相对于熔化物 10 上的板 13 的形成而倾斜。板 13 自第一点 18 流动至第二点 19 且在溢道 12 上流动。在板 13 经过溢道 12 之后,使用加热器 50 使板 13 变薄。使板 13 自第一厚度变薄至第二厚度。例如,可使板 13 自大约 $200\mu\text{m}$ 变薄至大约 $100\mu\text{m}$ 。

[0050] 将使用冷却板 14 来形成该板 13 与使用加热器 50 使板 13 变薄而分离可允许以小的温度梯度使板 13 冻结。板 13 的使用加热器 50 自板 13 熔化的任何部分可沿板 13 流回且进入熔化物 10 中,或可滴入一收集装置中。此情况至少一部分是由于板 13 的角度引起。在一特定实施例中,板 13 的自板 13 熔化的部分可富含溶质。

[0051] 在此特定实施例中,加热器 50 为辐射加热器。亦可使用其它加热器或具有对流组件的辐射加热器。加热器 50 可允许板 13 的均一变薄,且可能仅供应熔化的潜热而不更改板形成设备 21 的其它部分的温度。

[0052] 在此特定实施例中,液体轴承 51 使板 13 以一角度而倾斜。所述角度可较浅以防止对板 13 的应力。虽然说明了液体轴承 51,但可使用空气轴承、辊或另一板 13 移动机构。在另一实施例中,板 13 保持水平,且液体轴承 51 不使板 13 以一角度倾斜。在此实例中,板 13 的任何熔化部分均滴落。

[0053] 虽然将此实施例说明为在冷却板 14 与溢道 12 之间具有一距离,但可使此距离最小化。举例而言,可将冷却板 14 放置成紧密靠近溢道 12。替代于允许熔化物 10 在板 13 形成之后使板 13 变薄,但主要可由加热器 50 使板 13 变薄。但在另一实施例中,加热器 50 结合熔化物 10 一起作用以使板 13 变薄。

[0054] 图 6 是使用图 2 的设备以加热器进行的变薄的横截面侧视图。以加热器 50 使板

13 变薄亦可应用于板形成设备 23 以及图 5 的板形成设备 21。此处,在使用冷却板 14 形成板 13 之后且在自熔化物 10 拉出板 13 之后,使板 13 自第一厚度变薄至第二厚度。

[0055] 在另一实施例中,使板 13 变薄,且熔化物 10 经净化或具有减小的溶质含量。此情况与溶质的偏析系数 (segregation coefficient) 有关,所述系数提供生长的晶体板 13 与熔化物 10 中的杂质原子 (溶质) 的浓度之间的关系。许多溶质的偏析系数小于 1,其导致固体板 13 的溶质浓度低于液体熔化物 10 的溶质浓度。因此,在板 13 形成时,熔化物 10 中的溶质浓度增加,因为溶质优先停留于熔化物 10 中。此情况可致使在板 13 的结晶过程期间的组成不稳定性,且可能导致不良品质的板 13 或在其表面上具有枝蔓体或分支突出物的板 13。

[0056] 在此特定实施例中,在板 13 形成及变薄过程期间完成对熔化物 10 的净化。此净化可允许使用纯度较低的熔化物 10 进料 (feedstock) 或总体较少的熔化物 10 进料,因为熔化物 10 在板 13 形成时被净化。图 7 表示在接近板 - 熔化物界面处熔化物及固体中的随着时间的浓度分布。溶质偏析是部分地取决于板 13 的冻结过程,所述过程足够缓慢地执行以便使溶质在熔化物 10 中扩散。然而,若快速执行该板 13 的结晶,则偏析的溶质并无时间扩散至熔化物 10 中。因此,溶质可被俘获于固体板 13 中。

[0057] 如图 7 中所见,板 13 可以至少两个阶段来形成。在此特定实施例中,将阶段标记为阶段 70 及阶段 71。阶段 70 可称为“慢”,且阶段 71 可称为“快”。在阶段 70 中板 13 的生长的发生比阶段 71 慢,或以例如正常速度发生以制作经净化或高品质的晶体板 13。阶段 70 在一实例中可以大约 $5 \mu\text{m/s}$ 与大约 $10 \mu\text{m/s}$ 之间的速率来生长该板 13。在阶段 71 中板 13 的生长的发生比阶段 70 快,以便俘获在阶段 70 中被排斥的溶质。阶段 71 可经配置以防止对板 13 的应力。此做法可能要求阶段 70、71 具有不同长度或以不同温度来操作。举例而言,阶段 70 中的温度可在板 13 的结晶温度以下大约 100K 处操作,且阶段 71 可在板 13 的结晶温度以下大约 500K 处操作。

[0058] 在图 7 中,结晶在 t_1 及 t_2 处缓慢发生,其允许液体熔化物 10 中的偏析溶质扩散开。在 t_3 处,结晶足够迅速地发生以使得高浓度边缘俘获于所形成的晶体板 13 中,因此使晶体板 13 中的溶质浓度升高。在 t_4 及 t_5 处,在熔化物 10 中溶质含量减小,因为其俘获于晶体板 13 中。此情况可由以下公式表示:

$$[0059] \quad k = C_{SL}/C_{LS}$$

$$[0060] \quad k_{\text{eff}} = C_0/C_{LS}$$

[0061] 其中 k 表示均衡偏析系数,其等于 C_{SL} 除以 C_{LS} 。 k_{eff} 为由于界面的移动而引起的不平衡偏析系数,且 C_0 为远离冻结边缘的浓度。 k_{eff} 考虑到接近该板 13 的冻结边缘处的较高浓度。随着界面速率接近零, k_{eff} 接近 k 。在固体 - 液体界面处, C_{SL} 为固体中的溶质的浓度,且 C_{LS} 为液体中的溶质的浓度。板 13 或熔化物 10 的流动由 y 表示。

[0062] 在此实例中,在阶段 70 期间形成该板 13 的前 $50 \mu\text{m}$ 。此做法使得有效偏析系数可小于 1,此意味着液体熔化物 10 中的溶质 (诸如,铁) 的扩散比冻结速率快。在阶段 71 期间形成板 13 的下一 $150 \mu\text{m}$ 。高浓度溶质层俘获于板 13 中。为避免熔化物 10 中的溶质浓度的增加,在一实施例中,在板经过溢道 12 之后此所俘获的层自板 13 熔化脱落。在另一实例中,阶段 70 形成具有 $100 \mu\text{m}$ 的第一厚度的板 13,且阶段 71 对板 13 添加另一 $100 \mu\text{m}$ 厚度而形成 $200 \mu\text{m}$ 的第二厚度。其它厚度亦为可能的。

[0063] 使用上述阶段 70、71 且随后进行变薄,可移除在阶段 71 期间形成于板 13 上的富含溶质的层。图 8 是使用图 1 的设备的变薄及净化的横截面侧视图。冷却板 14 具有至少两个区段:第一区段 80 及第二区段 81。第一区段 80 及第二区段 81 对应于阶段 70、71。如图 8 所见,第一区段 80 及第二区段 81 相对于板 13 及熔化物 10 的流动而具有不同长度。在另一实例中,第一区段 80 及第二区段 81 在不同温度下操作。板 13 自第一点 18 流动至第二点 19 且在溢道 12 上流动。

[0064] 在板 13 经过溢道 12 之后,使用加热器 50 使板 13 变薄。使板 13 自第一厚度变薄至第二厚度。加热器 50 可为例如辐射加热器。亦可使用其它加热器或具有对流组件的辐射加热器。加热器 50 可允许板 13 的均一变薄,且可仅供应熔化物的潜热而不更改板形成设备 21 的其它部分的温度。

[0065] 在此特定实施例中液体轴承 51 使板 13 以一角度倾斜。所述角度可较浅以防止对板 13 所施加的应力。板 13 通过液体轴承 51 而形成角度,使得角度 82 在熔化物 10 外部。虽然说明了液体轴承 51,但可使用空气轴承、辊或另一板 13 移动机构。在另一实施例中,板 13 保持水平,且液体轴承 51 不使板 13 以一角度倾斜。在此实例中板 13 的任何熔化部分均滴落。

[0066] 板 13 之通过加热器 50 而变薄且自板 13 熔化的任何部分将沿板 13 流回至角度 82。在该处,此熔化的板 13 或废熔化物将滴入例如突出部分 (bilge)83 中,其收集及分离熔化的板 13,且防止熔化的板 13 返回熔化物 10。此突出部分 83 可连接至熔化物 10 的循环或净化系统。在一实施例中,将突出部分 83 的内含物净化,且将此经净化的熔化物 10 再循环回至熔化物 10。此做法防止富含溶质的突出部分 83 内含物污染该熔化物 10。此板 13 的变薄与净化组合将移除溶质,维持高纯度熔化物 10,且维持熔化物 10 进料的高效率,同时降低熔化物 10 的浪费。

[0067] 在一实例中,图 8 的设备将取得通过冷却板 14 而形成的厚度大于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的板 13,且使其变薄至 $100\text{ }\mu\text{m}$ 或更小的厚度。可将板 13 的经移除或变薄的部分返回至熔化物 10,以避免材料损失或等效于“锯口损失”的损失。除自板 13 移除杂质或溶质以外,图 8 的变薄方法亦可使板 13 的表面上的任何隆凸 (protuberance) 变平滑。

[0068] 图 9 是使用图 2 的设备的变薄及净化的横截面侧视图。使用具有第一区段 80 及第二区段 81 的冷却板以及用加热器 50 使板 13 变薄亦可应用于板形成设备 23 以及图 8 的板形成设备 21。此处在使用冷却板 14 来形成该板 13 之后且在自熔化物 10 拉出该板 13 之后使该板 13 自第一厚度变薄至第二厚度。

[0069] 图 10 是在板生长期间俘获杂质的横截面侧视图。此图是较佳说明图 7 至图 9 中涉及的过程的近视图。冷却板 14 具有对应于阶段 70 及 71 的第一区段 80 及第二区段 81。所形成的板 13 将具有第一层 90 及第二层 91。在一实例中,第一层 90 对应于第一厚度,且与第一层 90 组合的第二层 91 对应于第二厚度。第一层 90 主要使用第一区段 80 来形成,且具有相对低的溶质浓度。第二层 91 主要使用第二区段 81 来形成,且与第一层 90 相比具有较高的溶质浓度。在通过第一区段 80 之形成期间自板 13 排斥的许多溶质可在通过第二区段 81 的板 13 形成期间被俘获,因为边界层可较薄。因此,第二层 91 可俘获溶质及杂质。在一实例中,第一层 90 中的溶质浓度可为大约 10^{-10} 原子/cc,且第二层 91 中的溶质浓度可为大约 10^{-8} 原子/cc。使用图 8 至图 9 的加热器 50 来移除第二层 91 或使第二层 91 变薄。

第一区段 80 及第二区段 81 具有不同的操作参数,诸如长度或温度。

[0070] 水平板 13 生长方法可出于额外原因而得益于图 3 至图 10 说明的变薄方法。某些资料暗示对可将板 13 水平制作得多薄可能存在限制。若板 13 被拉出或生长得过薄,则板 13 可能“切断”或破裂。此情况可能是由于熔化物 10 或板 13 中的不稳定性。另一暗示为此可能是由熔化物 10 的高表面张力及低粘度引起。因此,可能使熔化物 10 易于发生 Marangoni 效应。Marangoni 效应是由于表面张力而引起的沿界面的质量转移 (mass transfer)。具有高表面张力的液体对周围液体的拉动强度将高于具有低表面张力的液体的拉动强度。表面张力的梯度的存在将致使液体流动远离具有低表面张力的区。液体上或液体中的质量转移可能由于这些表面张力差异而发生。较厚的板 13 可更稳定或较不容易出现破裂或被“切断”。通过生长具有大约 $200\text{ }\mu\text{m}$ 或更大的厚度的板 13 且随后使板 13 变薄至大约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 或更小的厚度,可避免 Marangoni 效应或其它生长问题。若将板 13 的变薄部分返回至熔化物 10,则无材料损失。

[0071] 图 3 至图 10 中说明的用于变薄的方法及设备可组合在一起或单独使用。另外,除本文揭示的实施例中列出的厚度外,板 13 的其它厚度亦是可能的。

[0072] 可通过更改参数来控制图 3 至图 10 中说明的变薄。这些参数可为例如冷却板 14 的温度、熔化物 10 的温度、加热器 50 的操作温度、容器 16 的温度,或者板 13 或熔化物 10 的流动或拉动速度。所述参数可由控制器回应于来自量测装置的信号而更改。

[0073] 图 11 是对板进行加热的横截面图。在本文揭示的实施例中,对板 13 的平滑可使用例如加热器 50 或来自熔化物 10 的使板 13 熔化的热而发生。局部吸收的热与板 13 的局部表面积成比例,由此优先使形成于板 13 的表面上的隆凸、枝蔓体或其它不规则物 92 熔化。因此,可来自熔化物 10 或辐射的热通量 93 在板 13 停止之前使隆凸、枝蔓体或其它不规则物 92 熔化。因此,通过使板 13 变薄,将形成具有较小隆凸、枝蔓体或其它不规则物 92 或不具有隆凸、枝蔓体或其它不规则物 92 的较光滑板 13。板 13 的表面的均一性可与隆凸、枝蔓体或其它不规则物 92 的大小相关。

[0074] 本发明在范围上不受本文描述的特定实施例的限制。实际上,本领域技术人员自上述描述及附图将明了除本文描述以外的本发明的其它各种实施例以及对本发明的修改。因此,这些其它实施例及修改当属于本发明的范围内。此外,尽管本文已针对特定目的在特定环境中在特定实施方案的背景下描述本发明,但本领域技术人员将认识到其有用性不限于此,且可出于任何种目的在任何种环境中有益地实施本发明。因此,应鉴于如本文描述的本发明的完全广度及精神而解释本文陈述的专利申请范围。

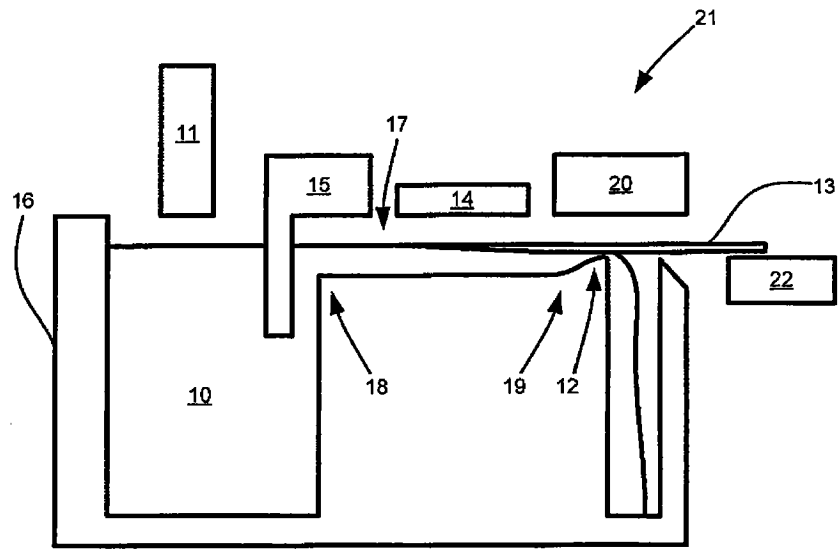


图 1

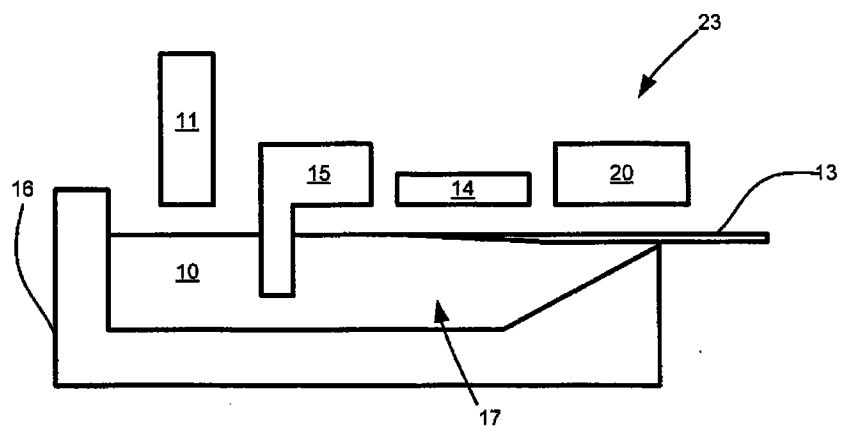


图 2

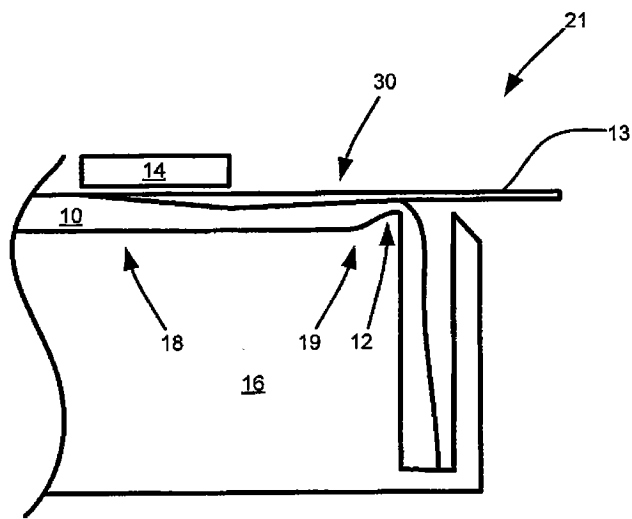


图 3

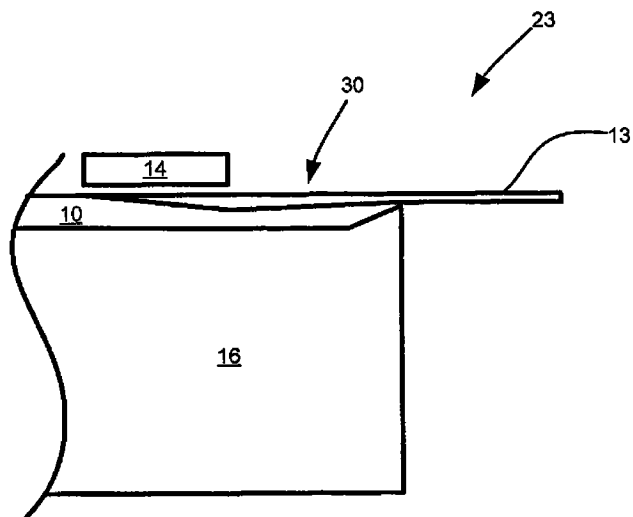


图 4

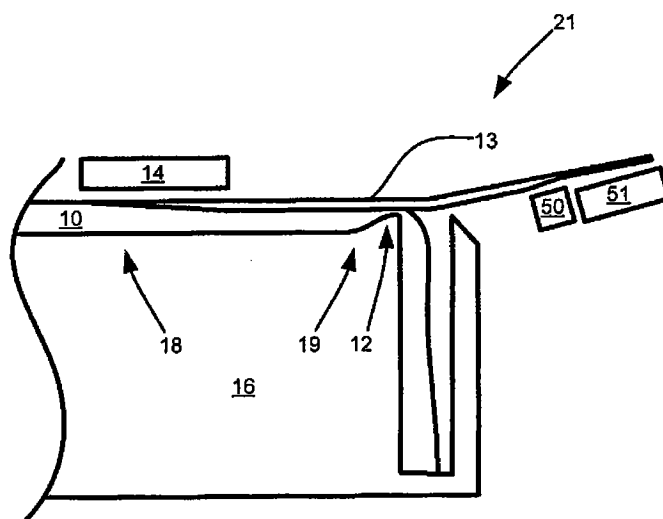


图 5

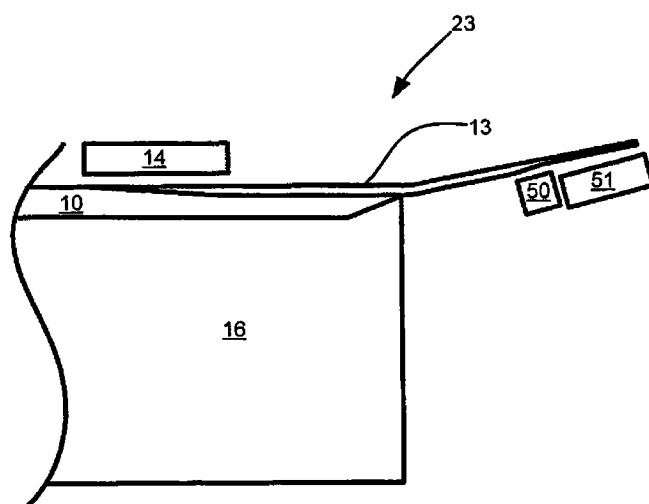


图 6

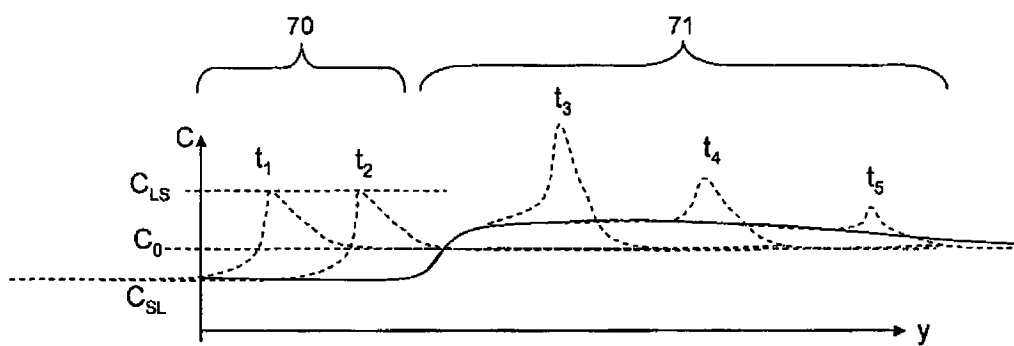


图 7

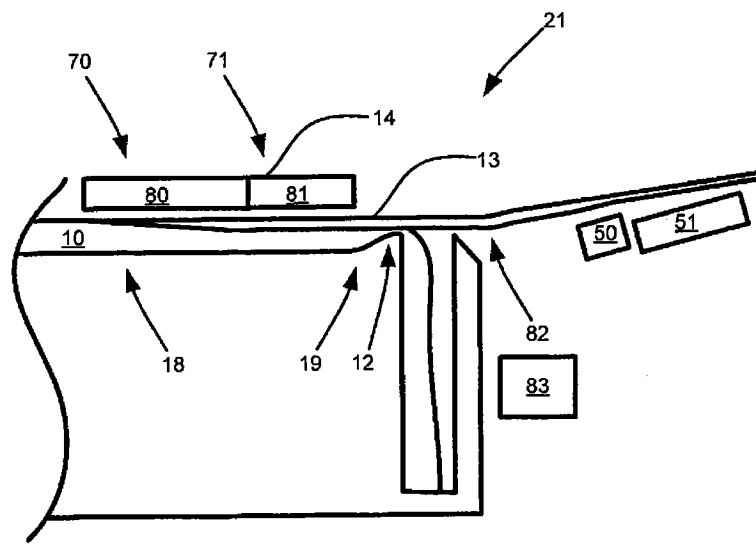


图 8

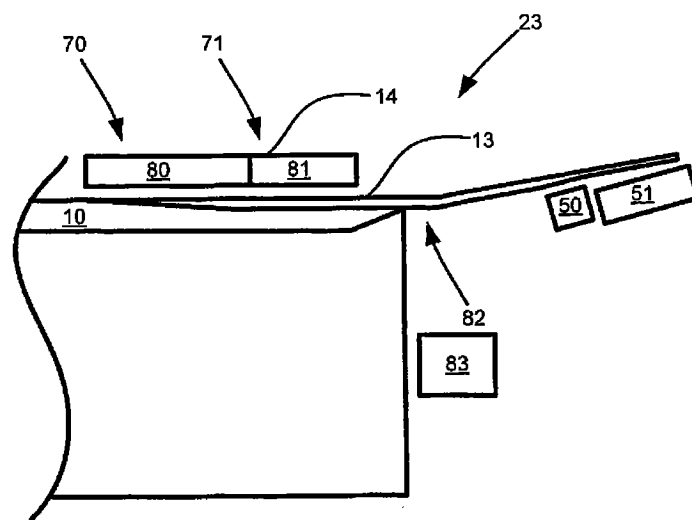


图 9

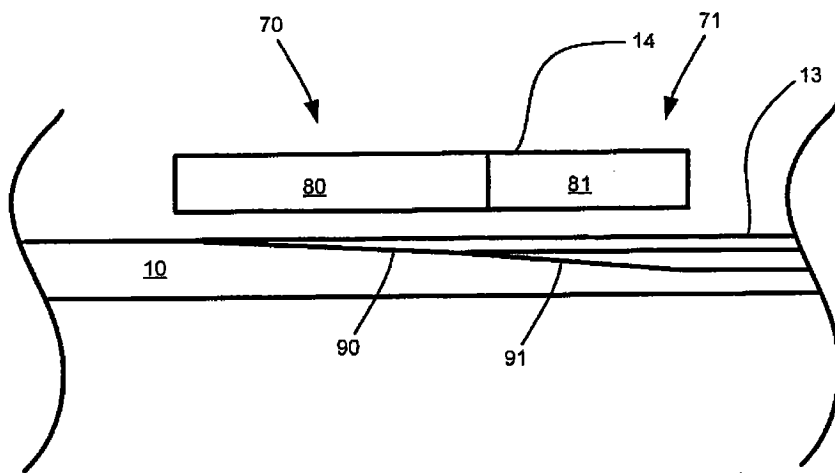


图 10

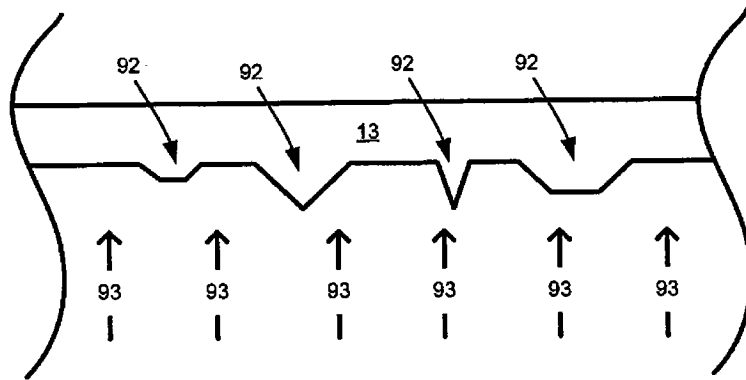


图 11