

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102066860 A

(43) 申请公布日 2011. 05. 18

(21) 申请号 200880011103. 0

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2008. 04. 02

F25J 1/02 (2006. 01)

(30) 优先权数据

102007017212. 7 2007. 04. 12 DE

(85) PCT申请进入国家阶段日

2009. 09. 30

(86) PCT申请的申请数据

PCT/DE2008/000557 2008. 04. 02

(87) PCT申请的公布数据

W02008/125078 DE 2008. 10. 23

(71) 申请人 于利奇研究中心有限公司

地址 德国于利奇

(72) 发明人 M·巴舍 A·博克哈罗夫

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

司 72001

代理人 石克虎 林森

权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 4 页

(54) 发明名称

冷却气体的方法和设备

(57) 摘要

本发明涉及用于无振动冷却气体的方法和设备。所述气体在第一冷却步骤中与第一冷却介质热接触。接着在第二冷却步骤中流过与第二冷却介质热接触的液化器,并被冷却不多于 10K。该小温度梯度对离开液化器的气态或液态气流为非常均匀和层流的起决定性作用。因此适于再加工成大小保持相同的固态球粒流。该球粒可在真空中输送数米远,并且还适合作为以强激光照射来产生等离子体的靶材料。

1. 一种用于冷却气体的方法,其包括下列步骤:
 - 在第一冷却步骤中该气体被输送通过与第一冷却介质热接触的导管;
 - 在第二冷却步骤中该气体被输送通过与第二冷却介质热接触的液化器,且其中该气体冷却了不大于其熔点和沸点之间的温度差的两倍。
2. 权利要求 1 的方法,其特征在于,在第二冷却步骤中该气体冷却了不大于其熔点和沸点之间的温度差的 1.5 倍。
3. 权利要求 1-2 之一的方法,其特征在于,该第二冷却介质通常比第一冷却介质更冷。
4. 权利要求 1-3 之一的方法,其特征在于,选择其蒸气可与环境交换的液化低温气体作为第一冷却介质。
5. 权利要求 1-4 之一的方法,其特征在于,所述第二冷却介质被输送通过所述液化器。
6. 权利要求 5 的方法,其特征在于,所述气体和所述第二冷却介质被逆向输送通过所述液化器。
7. 权利要求 1-6 之一的方法,其特征在于,选择气态的第二冷却介质。
8. 权利要求 5-7 之一的方法,其特征在于,所述气体在进入所述液化器前与来自该液化器的第二冷却介质在中间冷却器中进行热接触。
9. 权利要求 1-8 之一的方法,其特征在于,所述气体在第一冷却步骤和中间冷却器之间经加温。
10. 权利要求 1-9 之一的方法,其特征在于,所述气体在第二冷却步骤中液化。
11. 权利要求 10 的方法,其特征在于,通过振动喷嘴输送所述液化气。
12. 权利要求 11 的方法,其特征在于,所述喷嘴平行于所述液化气的流向振动。
13. 权利要求 12 的方法,其特征在于,所述喷嘴以振幅为 100-1000nm 振动。
14. 权利要求 11-13 之一的方法,其特征在于,所述液化气由振动喷嘴转移进真空中。
15. 权利要求 14 的方法,其特征在于,所述液化气在转移进真空时经凝固。
16. 权利要求 14-15 之一的方法,其特征在于,所述转移进真空是与所述振动喷嘴间隔开实施的。
17. 权利要求 14-16 之一的方法,其特征在于,所述液化气通过其中存在呈气态的相同气体的腔转移进真空中。
18. 权利要求 17 的方法,其特征在于,所述气体在腔中处于三相点附近。
19. 权利要求 14-18 之一的方法,其特征在于,所述液化气通过其内径在朝向真空方向不断减小的喷嘴转移进真空中。
20. 权利要求 19 的方法,其特征在于,所述喷嘴在气体入口处的内径是在真空侧的内径的最多 10 倍大。
21. 权利要求 14-20 之一的方法,其特征在于,所述气体以至少两阶段转移进真空。
22. 权利要求 21 的方法,其特征在于,在第一阶段中压力为 10^{-5} mbar 或更高,优选 10^{-4} mbar 或更高。
23. 权利要求 21-22 之一的方法,其特征在于,在最后一个阶段中的压力为 10^{-6} mbar 或更低,优选 10^{-7} mbar 或更低。
24. 权利要求 14-23 之一的方法,其特征在于,转移进真空后的气体速度为至少 50m/s,优选至少 100m/s。

25. 权利要求 1-24 之一的方法,其特征在于,选择来自群组 (He、N₂、Ar、Kr、Xe) 中的至少一种气体作为冷却剂。

26. 用于冷却气体的设备,其特征在于包括至少两根可由气体和主冷却介质逆向流过的并相互热接触的导管的液化器。

27. 权利要求 26 的设备,其特征在于包括两根相互平行设置的导管的液化器。

28. 权利要求 26-27 之一的设备,其特征在于包括两根相互同心设置的导管的液化器。

29. 权利要求 26-28 之一的设备,包括在所述液化器上游的可与所述气体热接触的预冷却介质。

30. 权利要求 29 的设备,其特征在于,所述预冷却介质设置在容器中,可由所述气体流过的管道穿过该容器。

31. 权利要求 30 的设备,其特征在于环形容容器。

32. 权利要求 30-31 之一的设备,其特征在于在由该容器所限定的区域中设置的第二冷却介质的贮器。

33. 权利要求 26-32 之一的设备,其特征在于连接在所述液化器下游的喷嘴,所述喷嘴具有用于产生振动的机构。

34. 权利要求 33 的设备,其特征在于用于产生振动的压电式机构。

35. 权利要求 33-34 之一的设备,其特征在于至少一个连接在所述喷嘴下游的低压腔。

36. 权利要求 35 的设备,其特征在于多个串联设置的具有分级压力的低压腔。

37. 权利要求 35-36 之一的设备,其特征在于,所述低压腔在空间上与所述喷嘴间隔开。

38. 权利要求 37 的设备,其特征在于以三相点腔作为将该低压腔与喷嘴隔开的机构。

39. 权利要求 35-38 之一的设备,其特征在于,该低压腔的入口经配置为其内径朝向真空方向不断缩小的另一喷嘴。

40. 权利要求 39 的设备,其特征在于,所述另一喷嘴的内径在入口侧是该低压侧的最多 10 倍大。

41. 等离子体源,包括指向相互作用区的辐射源,其特征在于,包括权利要求 26-40 之一的设备,该设备经配置以使得该设备将该经冷却的气体发射进所述相互作用区。

42. 权利要求 41 的等离子体源,其特征在于以激光器作为辐射源。

43. 权利要求 41-42 之一的等离子体源,其特征在于用于接收未与来自辐射源的辐射相互作用的气体的冷阱。

44. 用于半导体的光刻结构化的设备,其特征在于根据权利要求 41-43 之一的等离子体源。

45. 粒子加速器,其特征在于根据权利要求 41-43 的等离子体源。

冷却气体的方法和设备

[0001] 本发明涉及用于冷却气体,特别是用于液化气体的方法和设备。

现有技术

[0002] 通过用强激光照射可由许多材料产生等离子体。这类等离子体特别可发射伦琴辐射以及极紫外 (EUV) 线。但其也可加速带电粒子如电子或质子。

[0003] 因为为产生等离子体需要非常高的激光强度,所以受照材料(靶)会在辐照位置处产生局部损坏。因此为长时间产生等离子体就需要能连续补给未耗用过的靶材料的源。

[0004] 由(Ö. Nordhage, "On a Hydrogen Pellet Target for Antiproton Physics with PANDA", Dissertation **Universität Uppsala**, ISBN 91-554-6649-4) 已知,首先液化氢,再用振动喷嘴将液体流分散成滴,并接着通过进一步冷却将这些滴固化成球粒。用这些球粒作为在同步加速器上与快质子相互作用的实验靶,并且原则上也可用于通过激光照射产生等离子体。

[0005] 如此产生的球粒及由此产生的等离子体的缺点是其强烈波动的品质。

[0006] 目的和解决方案

[0007] 因此,本发明的目的是提供一种用于冷却气体的方法和设备,其最终产物具有较小的品质波动,并由此与根据现有技术冷却的气体相比其更适合用作制备适于激光照射的球粒靶的原料。

[0008] 本发明中,该目的是通过主权利要求的方法及副权利要求的设备实现的。其它有利实施方案由引用它们的从属权利要求给出。基于设备的等离子体源以及其有利的应用是其它副权利要求的主题。

发明内容

[0009] 在本发明范围内研发了一种用于冷却气体的方法。在第一冷却步骤中该气体被输送通过与第一冷却介质热接触的导管。

[0010] 原则上,与该气体相比具有更低温度的任何介质均适合作冷却剂,该温度优选在跨介质上是空间均匀的和随时间不变的。例如可以是由该导管穿过的经冷却的固体。也可以是由该导管穿过的液体浴。该液体可特别是液化低温气体。

[0011] 特别有利地选择其蒸气与环境可交换的液化低温气体作为第一冷却剂。因为随着逸出蒸气还将在形成蒸气时所吸收的蒸发热传递给环境,所以只要该液化低温气体的温度不升高到超过其沸点,其就不会完全蒸发。

[0012] 在第二冷却步骤中,该气体被输送通过与第二冷却介质热接触的液化器。该第二冷却介质通常比第一冷却介质更冷。但也可与第一冷却介质的温度相同,特别是同一种冷却介质。

[0013] 在本发明的第二冷却步骤中,该气体被冷却了不大于其熔点和沸点之间的温度差的两倍,优选不大于 1.5 倍和非常特别优选不大于 1 倍。该熔点和沸点之间的温度差是该气体所固有的材料特性。例如对 H₂ 为 6K,对 N₂ 为 14K 以及对 Ar、Kr 和 Xe 各为 4K。

[0014] 该措施的作用是,该气体流在液化器中和液化器后是特别均匀的和特别是呈层流状。这些优点特别是在本发明的一个特别优选的实施方案中显示(其中气体在第二冷却步骤中液化):即在该液化气物流中无沸腾或凝固的位置。已经发现,以这种方式整理的液化气物流特别适合后续处理,例如形成确定大小和形状的滴:该液化气的温度波动引起来自该液化器的气体射流的速度波动。如果将该气体射流分成滴,则该速度波动降低了其品质。本发明的措施降低了速度波动,并因此可制备具有更好品质的液态气滴。

[0015] 根据本发明,如果在液化器中存在恒量的该气体,则该液化气的品质为最优。这可有利地通过向液化器中仅送入呈气相的气体实现。为此在液化器前不可将该气体已经冷却至低于沸点的温度。最佳是将该气体以仅稍高于其沸点的温度送入液化器,以使在液化器中其温度仅需少量变化。该液化器基本上吸收该气体的气相和液相之间的能量差。该气体不应在液化器中凝固,这是因为否则会堵塞该液化器。

[0016] 该液化器例如可以是其中置入气体导管的经冷却的固体。特别有利的是该第二冷却介质穿过该液化器。与例如用制冷机冷却液化器相比,其转给气体的振动更小。已经发现,通过液化器传递的振动有害于液化器中该气体物流的均匀性和层流性,并因此需阻止该振动。

[0017] 如果选择气态的第二冷却介质,则该液化器和通过其穿过的气体可在特别少振动下冷却。单个气体微粒不具有足以引起实心液化器的可测量偏转的动量。通过粒子整体的动量传送从统计上看其分布会使其几乎完全相抵消,并且该液化器总的无可测量的偏转。

[0018] 例如在液化低温气体上方的蒸气相适合作为气态的第二冷却介质。以该蒸气导出蒸发热。在该第二冷却介质的贮器中的恒定压力下,该蒸发速率和由此该保留的液化气存量及该蒸气相的温度几乎是恒定的。通过贮器中的压力可粗略调节蒸发速率和由此也可调节该第二冷却介质的蒸气相的温度。该压力同时决定了该第二冷却介质的流量,该流量对液化器中的冷却效率和由此单位时间可冷却的气体量起决定性作用。

[0019] 该气体和该第二冷却介质被逆向输送通过该液化器是有利的。其限制了该两物流之间出现最大温度差,该温度差可在气体物流中引起湍流,特别是当其在第二冷却步骤中液化时。

[0020] 在本发明的一个特别有利的实施方案中,该气体在进入液化器前与来自该液化器的第二冷却介质在中间冷却器中进行热接触,例如通过热交换器进行热接触。这降低了在第二冷却步骤中在液化器中要跨接的温度差。同时可利用来自液化器的第二冷却介质的残余冷量,以致消耗较少的该冷却介质。

[0021] 在本发明的另一个有利的实施方案中,该气体在第一冷却步骤和中间冷却器之间经加温,例如用电热加温。由此该气体进入液化器的温度可特别灵敏地及也可快速地调节。紧接第一冷却步骤后的气体温度仅相对缓慢地变化,因为这时需对该第一冷却介质的全部储量进行加温或冷却。在中间冷却器中起作用的冷却与来自液化器的第二冷却介质的出口温度有关,并因此可不直接受影响,同时也不改变液化器中的温度行为。

[0022] 该第二冷却介质的温度可通过该低温气体的贮器中的压力粗略调节,该压力又决定了蒸发速率。该第二冷却介质在进入液化器前经加温是有利的,例如用电热加温。与通过改变贮器中的压力的间接温度改变相比,该加热可更灵敏和更快地进行。

[0023] 如果该气体用本发明方法液化,则本发明的一个特别有利的实施方案是该气体以

液化状态经该振动喷嘴输送。该喷嘴优选平行于该液化气的流向振动,并且振幅优选为100-1000nm。以这种方式可将液化气转换成由保持相同形状和大小的滴组成的流。流出的液化气的速度通过将该气体送入第一冷却步骤的压力决定,并可通过该压力的变化调节。

[0024] 已经发现,在现有技术的气体冷却中的不希望的振动是滴的品质和品质恒定不变的限制因素。这种振动例如通过应用伸入气体和设备中的冷头引起。本发明的无振动冷却避免了这类干扰,并与现有技术相比可制备不仅更高品质而且保持相同品质(特别是大小)的滴。

[0025] 由在振动喷嘴形成的滴例如可通过用强的激光脉冲照射产生等离子体,该等离子体发射伦琴辐射和/或极紫外(EUV)线。

[0026] 对这类和其它在真空中进行的应用,在本发明的一个特别有利的实施方案中该液化气由振动喷嘴转移进真空中。这里特别有利的是通过该喷嘴的震动固化成保持相同形状和大小的分散液化气。其是由表面蒸发产生的,并引起进一步冷却到凝固点之下。这形成了均匀的固态球粒流,该球粒即使在真空中也经较长的路径。这对用强激光脉冲照射特别有利的。因为这时产生的等离子体放出大量的热和高能辐射,所以应实施与球粒源有空间间距的照射,以不损伤该源。

[0027] 有利的是该转移进真空是与振动喷嘴间隔开实施的;该液化气特别可通过其中存在呈气态的相同气体的腔转移进真空中,该气体在该腔中优选位于三相点附近。该三相点特别意指由0.2倍至3倍的三相点压力的压力和1倍至1.2倍的三相点温度的温度的组合。以此方式尽可能保证了在转移进真空时该液化气流或由此产生的滴的均匀性和飞行方向。

[0028] 基于同样原因,有利的是该液化气通过其内径在朝向真空方向不断减小的喷嘴转移进真空中。其中该喷嘴在气体入口处的内径应当最高为真空侧的内径10倍大,特别是3-4倍。这时该液体滴或球粒的速度也呈均匀分布,并且该球粒流紧紧围绕额定飞行方向对准。

[0029] 如果沿喷嘴的压力梯度最小,则该均匀性和准直性最大。如果沿喷嘴纵向的直径呈指数减小且该喷嘴有利地至少为其直径10倍长就则可实现此目的。

[0030] 在本发明的一个特别有利的实施方案中,该气体以至少两阶段转移进真空。在第一阶段中压力有利地为 10^{-5} mbar或更高,优选 10^{-4} mbar或更高,以致该气滴的形状在凝固成球粒时仍保持不变。在最后一阶段中的压力有利地为 10^{-6} mbar或更低,优选 10^{-7} mbar或更低,因为这是加速装置和用于产生EUV-光的装置的基压,所以该球粒可直接转移进该装置。为实现所述阶段,例如可以以球粒的飞行方向串联设置具有分级压力的多个真空腔,其各通过可穿过球粒的孔或喷嘴相互连接。该球粒的推力可利用各腔之间的压差。如果存在三相点腔,则由三相点腔向该第一真空腔的转移赋予球粒的加速度比在其余各腔之间的转移大得多。如果腔呈上下设置,则还可利用地球重力场作为其它推力,该效果是较小的(在10m下落路径中速度提高约15m/s)

[0031] 转移进真空后的球粒的速度为至少50m/s,优选至少100m/s。在借助于激光照射由球粒产生等离子体时,该球粒蒸发并由此消耗掉。该球粒流的速度和球粒流中球粒之间的间距由可能的重复率决定。

[0032] 气态和液态的He、N₂、Ar、Kr和Xe特别适合作为冷却剂。用本发明方法例如可制备He、N₂、Ar、Kr和Xe的液滴和固态球粒。

[0033] 在本发明中也研制了一种用于冷却气体的设备,特别是用于实施本发明方法的设备。该设备的特征在于包括至少两根可由气体和主冷却介质逆向流过的并相互热接触的导管的液化器。

[0034] 该措施的作用是,在该液化器运行中可在该两导管的整个长度上调节该两导管之间的小的温度差。如果该气体呈最热或最冷状态,则该第二冷却介质也是如此。由此可在第一导管的截面上实现小的温度梯度,这可改进第一导管中的物流的均匀性和层流性。

[0035] 在本发明的一个有利的实施方案中,该效应还可通过相互平行或同心配置该两导管来增强。

[0036] 在本发明的一个特别有利的实施方案中,在该液化器上游连接有可与该气体热接触的预冷却介质。该措施的作用是,该气体在与预冷却介质接触中已经能经过在其起始温度和所需目标温度之间的大部分温差。如果除该气体的起始温度外还预设了其在液化器中的最大温降,则可达更低的最终温度。

[0037] 该预冷却介质优选安置在容器中,可由气体流过的管道穿过该容器。这种配置使气体与预冷却介质之间的热接触最大化。

[0038] 该容器有利地呈环形。本文中环形意指在其内部所限定的区域的闭合形状。该区域不必是圆形的,而也可以是椭圆的或呈多角形;通过预冷却介质保护该区域免受环境的热入射。

[0039] 该主冷却介质的贮器有利地配置在该所限定的区域中。因此避免区域的快速受热。例如该预冷却介质可以是价格有利的液氮而该主冷却介质可以是非常昂贵的液氦。环境的热入射在该装置中耗用了附加的氮,但未耗用附加的氦。

[0040] 在本发明的一个特别有利的实施方案中,该设备包括连接在液化器下游的喷嘴,该喷嘴具有用于产生振动的机构。压电式机构特别适合作为产生振动的机构。在液化器中产生的液化气的层流可在合适选择规定的振幅下通过该喷嘴分裂成滴。

[0041] 在本发明的另一个有利的实施方案中,该设备包括至少一个连接于喷嘴后的低压腔。该由喷嘴出来的液化气滴可在转移进该低压腔中时凝固成球粒。已经发现,该固体球粒可作为液化气滴在产生位置和其应用位置之间移动较长的路径。该球粒例如可形成球粒靶,该靶在规定的相互作用区内与来自辐射源的辐射相互作用。这种球粒靶的优点是,该靶材料可连续补充供入相互作用区。

[0042] 为在冷冻时得到该滴的形状,有利地串联配置多个具有分级压力的低压腔。

[0043] 该低压腔有利在空间上与该喷嘴间隔开,如通过处于条件近于该气体三相点的三相点腔隔开。这样液滴从该喷嘴出来后在固化成球粒前可得到稳定的机会。

[0044] 在本发明的一个有利实施方案中,进入该低压腔的入口端经配置成其内径朝向真空方向不断缩小的另一喷嘴。该另一喷嘴的内径在入口侧应为该低压侧最多 10 倍大。这样进入低压腔中的液滴或球粒的速度也均匀分布,并且该球粒流紧紧围绕额定飞行方向对准。

[0045] 本发明中发现一种等离子体源。该源包括指向相互作用区的辐射源和本发明的用于冷却气体的设备。该设备经配置使得其能将经冷却的气体发射进相互作用区。激光特别适合作为辐射源。

[0046] 已经发现,这种等离子体源可连续运行,并且比现有技术的等离子体源的寿命更

长。该在来自辐射源的辐射照射时被耗用的作为靶材料的气体可与其聚集体状态无关地连续补充供入。如果从设备以球粒形式发射,则该设备有利与相互作用区以较大间距(1m以上的维度)安置。这样该设备不会由等离子体的加热和放射性辐射而受损。

[0047] 该等离子体源有利地包括吸收未与来自辐射源的辐射相互作用的气体部分的冷阱。该冷阱优选以呈气体流向或固体球粒的飞行方向安置在该气体或球粒与辐射相互作用的区域的后面。在冷阱中捕集过量的残余气体和未经利用的球粒可改进在等离子体源中的真空,并降低用于保持该真空所需的泵功率。

[0048] 用该等离子体源产生的等离子体可产生伦琴辐射和极紫外(EUV)辐射。在该等离子体中也可将带电粒子如电子和质子加速到大于100MeV的能量。所以该等离子体源例如可在用于半导体光刻结构化的设备中用作EUV-辐射源。其例如也可用于粒子加速器中。该经冷却的气体(优选呈球粒状)和该加速器粒子束相互作用的区域的结构可非常紧凑。

[0049] 具体说明部分

[0050] 下面以附图详述本发明的主题,而不是由此限制本发明的主题。

附图简介

[0051] 图1示出本发明的设备和本发明的方法的实施例。

[0052] 图2示出以本发明的方法产生的氢滴。

[0053] 图3示出直径为 $20\mu\text{m}$ 的氢球粒在离三相点腔约1.2m处的空间分布。

[0054] 图4示出具有多个真空腔的本发明设备的实施例。

[0055] 图1以截面图示出本发明的设备和本发明的方法的实施例。波状导管3经过装有液态预冷却介质(第一冷却介质)2的容器1,导管中的待冷却气体4在第一冷却步骤经冷却。在通过容器1限定的区域5的内部存在含主冷却介质(第二冷却介质)6的贮量的另一容器。

[0056] 该气体4在通过热交换器8与由液化器9出来的主冷却介质6接触前可任选通过加热器7加温。接着该气体进入液化器9。从主冷却介质6将蒸气相经导管10送入液化器。该液化器9将气体4转变成液体流,该液体流通过振动喷嘴11分裂成滴。该滴接着在转移进真空时通过表面蒸发而固化。

[0057] 在该方法的实施例中,应用氢作为气体4。预冷却介质2是液氮,主冷却介质6是液氢。该氢在第一冷却步骤中由室温(293K)冷却到81K。在该实施例中不使用加热器7。该氢蒸气由液氢贮器中出来时的温度为4.5K,在进入液化器时温度为5.05K。在进入热交换器8时其为16.2K,并将进入的氢冷却到21K,然后该氢在液化器中冷却到16.9K并由此液化。

[0058] 通过振动喷嘴11将来自液态氢的射流分裂成同样大小的滴12,将该滴送入充满气态氢的三相点腔(70mbar,14K)中。

[0059] 应用两种不同类型的振动喷嘴:内径为 $12\text{--}40\mu\text{m}$ 的镶有黄铜边的玻璃喷嘴和内径为 $16\text{--}40\mu\text{m}$ 的不锈钢喷嘴。玻璃喷嘴有平滑的内表面,因为是透明的所以在运行时可光学检测其运行。不锈钢喷嘴更可重现地制备,并且其出口孔有较好(即较小的)长/径比。所以需较小压力以将液化气推过不锈钢喷嘴。

[0060] 图2示出由振动喷嘴11出来的进入三相点腔的氢滴。其由腔中通过真空侧内径

为 $600\ \mu\text{m}$ 的另一喷嘴达到第一真空 10^{-2}mbar , 并凝固成球粒。该滴或球粒通过来自三相点腔的气流呈真空方向加速。通过另一喷嘴该球粒达到第二真空 10^{-4}mbar , 并从那里通过直径为 2cm 的管达到相互作用区, 在该区中用激光照射。该相互作用区可与三相点腔相隔开数米。在与三相点腔 1.2m 间隔中可观察到该球粒具有直径为 $18\text{--}60\ \mu\text{m}$ 的保持相同的品质。该球粒直径基本上相应于在液化器和三相点腔之间的振动喷嘴 11 末端直径。

[0061] 该球粒的空间分布和角分布以及其速度用 CCD- 照相机观测。该 $30\ \mu\text{m}$ 大的球粒转移进第一真空后的平均速度为约 70m/s 。经几秒后该球粒的大小除 1% 外是稳定的, 经几小时作除 10% 外是稳定的。

[0062] 在该实施例中, 用于转移进该真空的喷嘴的半径 R_c 随沿喷嘴的坐标 x 呈指数变细:

$$[0063] \quad R_c = R_1 + R_2 \cdot \exp(-\delta \cdot x)$$

[0064] 其中 δ 是自由变细参数, R_1 和 R_2 如下与进入侧的半径 R_{\max} 和真空侧的半径 R_{\min} 有关:

$$[0065] \quad R_1 = \frac{R_{\min} - R_{\max} \cdot \exp(-\delta \cdot l)}{1 - \exp(-\delta \cdot l)}$$

$$[0066] \quad R_2 = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{1 - \exp(-\delta \cdot l)}$$

[0067] 图 3 示出直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的氢球粒在离三相点腔约 1.2m 处的垂直于飞行方向的平面中的空间分布。图中绘出以任意单位表示的相对频度 n 与该球粒偏离主飞行方向 Δx 的关系。该球粒准直非常好; 此外大部分球粒偏离主飞行方向小于 $200\ \mu\text{m}$ 。这归因于该液态氢射流被非常的有规律地分裂成滴。对此的原因是向振动喷嘴 11 送入了均匀和呈层流的氢流。目前约 30% 的在振动喷嘴产生的球粒到过相互作用区。

[0068] 图 4 示出本发明的设备的实施例。该喷嘴 11 通向三相点腔 20。运行中压力为三相点压力的 0.2 倍至 3 倍。温度为三相点温度的 1 倍至 1.2 倍。在滴 12 的飞行方向上串联配置真空腔 21、22 和 23, 滴 12 通过该真空腔可逐步转移进真空中。该滴 12 在三相点腔 20 中仍是液态, 并在转移进腔 21 中时凝固。腔 21、22 和 23 是串接的, 并与三相点腔 20 通过球粒穿过的喷嘴 24 隔开。在第一腔 21 中运行时的压力的数量级为 10^{-4}mbar , 在最后腔 23 中的压力的数量级为 10^{-7}mbar 。

[0069] 该设备包括激光器 (未示出), 其射束 25 在相互作用区与待凝固成球粒的滴 12 相互作用。未经利用的球粒捕集于冷阱 27 中。

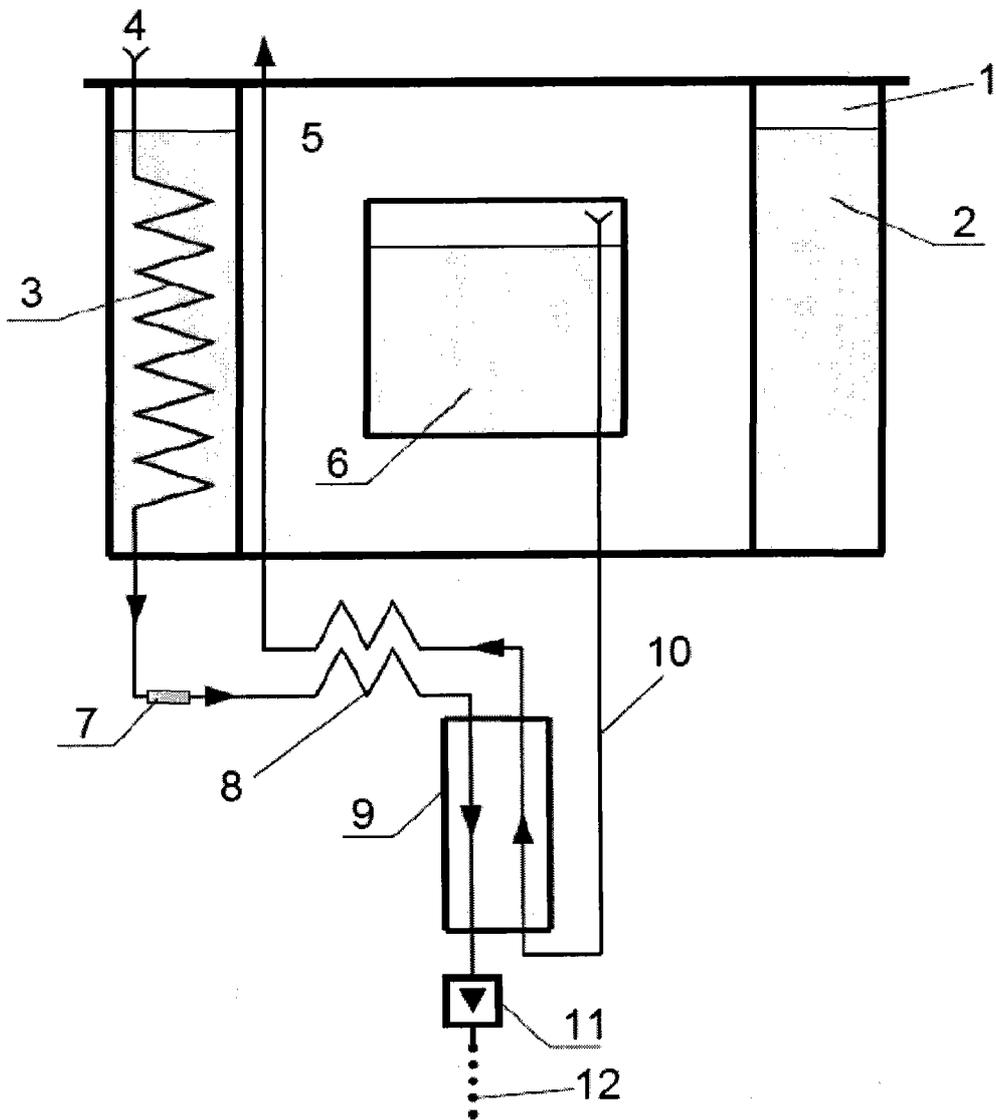


图 1

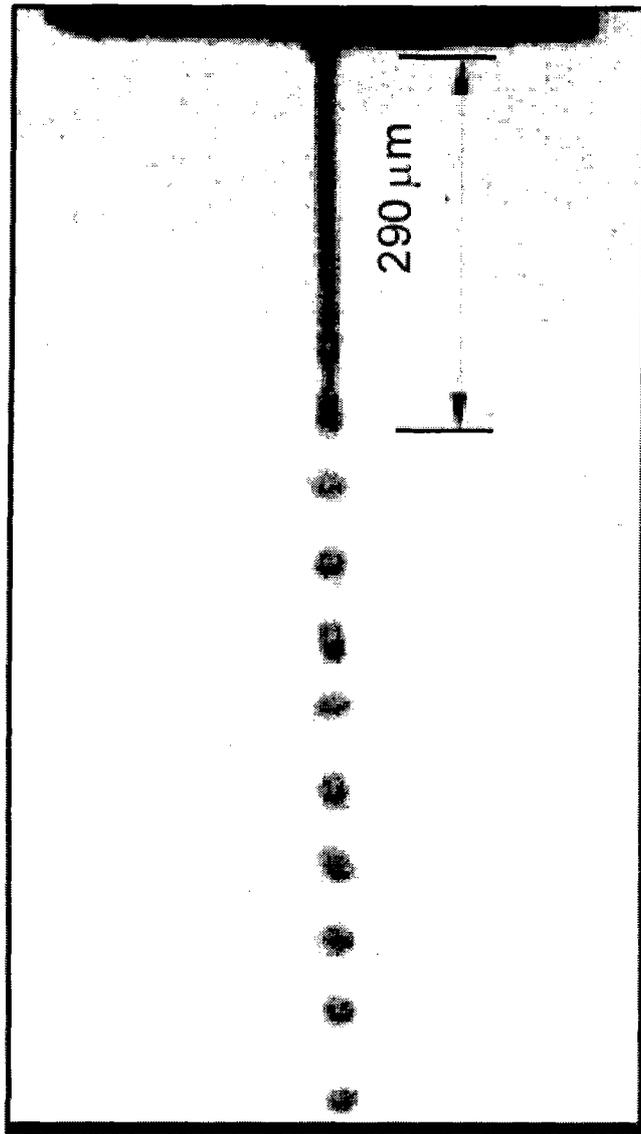


图 2

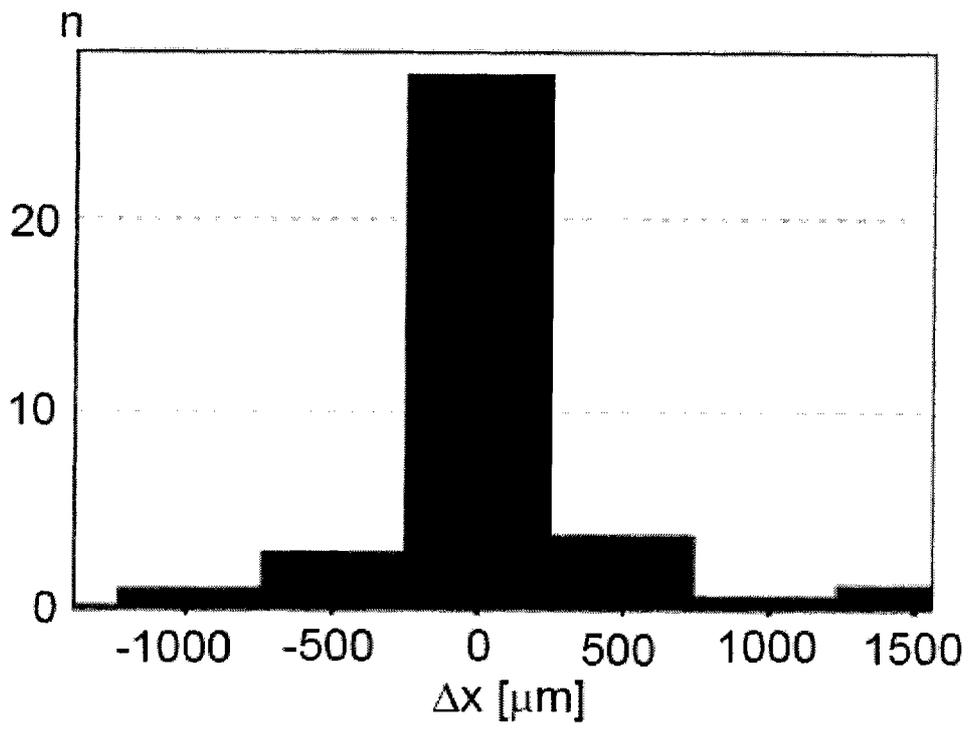


图 3

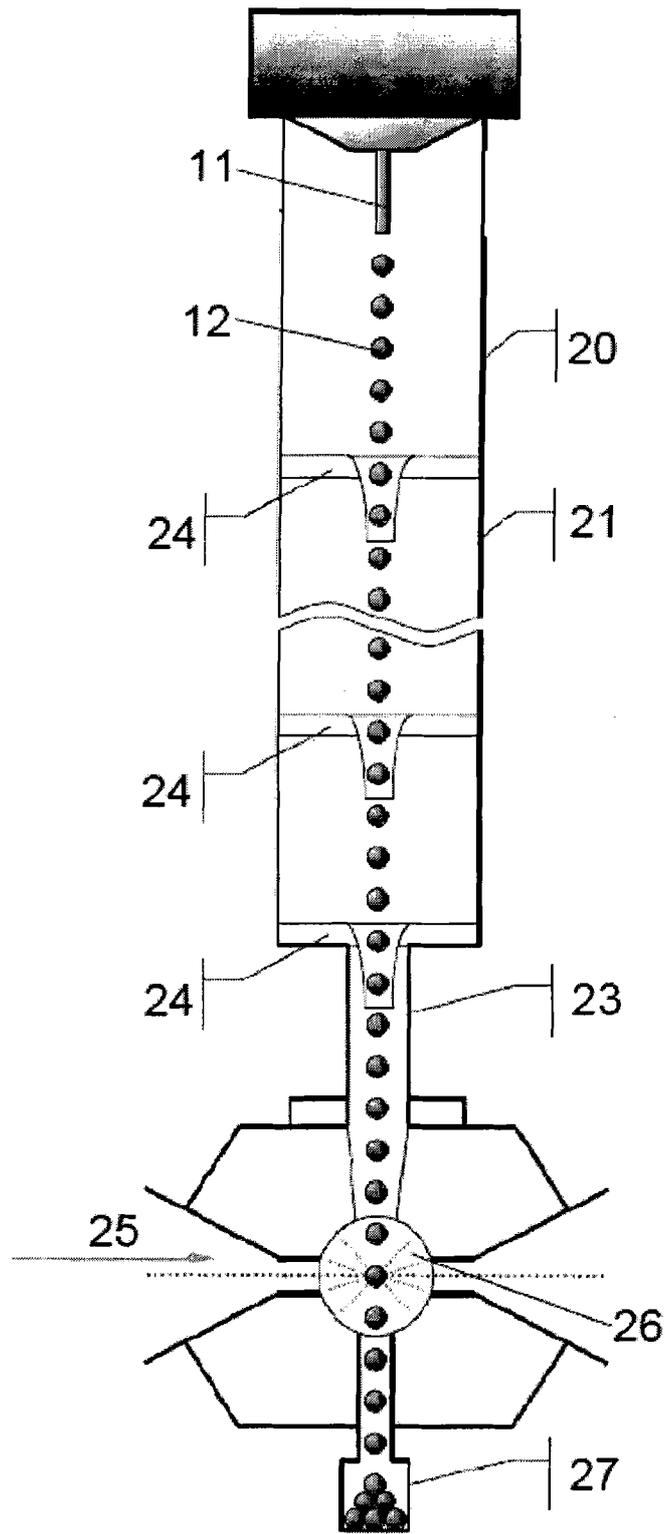


图 4