



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113574206 A

(43) 申请公布日 2021.10.29

(21) 申请号 202080013794.9

62/954,355 2019.12.27 US

(22) 申请日 2020.01.16

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.08.11

(30) 优先权数据

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/IB2020/050360 2020.01.16

62/794,515 2019.01.18 US

62/803,283 2019.02.08 US

62/823,541 2019.03.25 US

62/828,341 2019.04.02 US

62/839,617 2019.04.27 US

62/844,643 2019.05.07 US

62/851,010 2019.05.21 US

62/868,838 2019.06.28 US

62/871,664 2019.07.08 US

62/879,389 2019.07.26 US

62/883,047 2019.08.05 US

62/890,007 2019.08.21 US

62/897,161 2019.09.06 US

62/903,528 2019.09.20 US

62/929,265 2019.11.01 US

62/935,559 2019.11.14 US

62/948,173 2019.12.13 US

(87) PCT国际申请的公布数据

W02020/148709 EN 2020.07.23

(71) 申请人 辉光能源公司

地址 美国新泽西州

(72) 发明人 R·米尔斯

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

11127

代理人 武肅 庞东成

(51) Int.Cl.

C25B 1/04 (2021.01)

C01B 3/10 (2006.01)

C01B 3/08 (2006.01)

权利要求书5页 说明书170页 附图69页

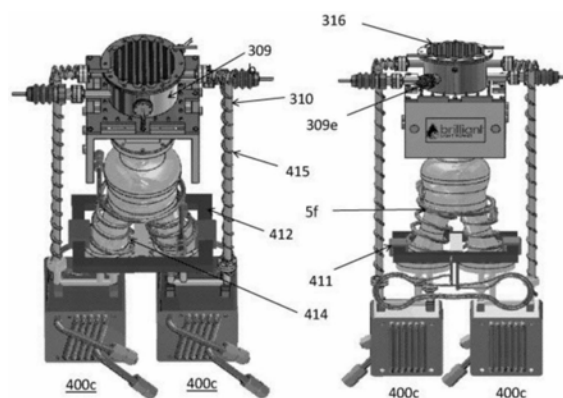
(54) 发明名称

磁流体动力氢电力产生器

(57) 摘要

描述了一种提供电力和热力中的至少一者的动力产生器,其包括(i)用于反应的至少一个反应池,所述反应涉及可通过独特的分析特征和光谱特征鉴别的原子氢氢产物,(ii)熔融金属注入系统,其包括向所述反应池提供熔融金属料流的至少一个泵诸如电磁泵和接收所述熔融金属料流的至少一个储液罐,以及(iii)点火系统,其包括电力源,所述电力源向所述至少一个熔融金属料流提供低压高电流电能以点燃等离子体从而引发所述反应的快速动力学和能量增益。在一些实施方式中,所述动力产生器可包括:(v)供应至所述等离子体的H₂源和O₂源,(vi)熔融金属回收系统,和(vii)功率转换器,其能够(a)使用聚光热光伏池将来自所述池的黑体辐射器的高功率光输出转换为电,或者(b)使用磁流体动力转

换器将所述高能等离子体转换为电。



1. 一种产生电能和热能中的至少一者的动力系统,其包括:
至少一个容器,其能够维持低于大气压的压力;
反应物,其能够经历产生足够能量以在所述容器中形成等离子体的反应,所述反应物包含:

a) 氢气与氧气的混合物,和/或

水蒸气,和/或

氢气与水蒸气的混合物;

b) 熔融金属;

质量流量控制器,其用以控制至少一种反应物进入该容器的流量;

真空泵,其用以在一种或多种反应物正流入所述容器时使所述容器中的压力维持低于大气压;

熔融金属注射器系统,其包括容纳所述熔融金属中的一些的至少一个储罐、被构造用于递送所述储罐中的所述熔融金属并穿过注射器管从而提供熔融金属料流的熔融金属泵系统(例如,一个或多个电磁泵)以及用于接收所述熔融金属料流的至少一个非注射器熔融金属储罐;

至少一个点燃系统,其包括电力源或点燃电流源以将电力供应至所述至少一个熔融金属料流以在所述氢气和/或氧气和/或水蒸气正流入所述容器时点燃所述反应;

反应物供应系统,其用以补给在所述反应中消耗的反应物;

功率转换器或输出系统,其用以将从所述反应产生的能量(例如,来自所述等离子体的光和/或热输出)的一部分转换为电力和/或热力。

2. 根据权利要求1所述的动力系统,还包括用于混合所述氢气和所述氧气的气体混合器以及氢与氧复合器和/或氢解离器。

3. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述氢与氧复合器包含由惰性载体材料担载的复合器催化金属。

4. 根据权利要求1所述的动力系统,其中将惰性气体(例如,氩)注入至所述容器中。

5. 根据权利要求1所述的动力系统,其还包括被构造用于将水注入至所述容器中(例如,得到包含水蒸气的等离子体)的水微量注射器。

6. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述熔融金属注射系统还包括在所述熔融金属储罐和所述非注射熔融金属储罐中的电极;并且所述点燃系统包括电力源或点燃电流源以将相反电压供应至所述注射器储罐电极和所述非注射器储罐电极;其中所述电力源供应流经所述熔融金属料流的电流和功率,以引起所述反应物的所述反应从而在所述容器内侧形成等离子体。

7. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述熔融金属泵系统是一个或多个电磁泵并且每个电磁泵包括以下中的一种:

a) DC或AC导电型,其包括穿过电极提供给所述熔融金属的DC或AC电流源和恒定或同相交替的矢量交叉磁场源,或

b) 感应型,其包括穿过熔融金属的短接回路的交变磁场源,其在所述金属中感应产生交变电流;和同相交替的矢量交叉磁场源。

8. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述注射器储罐包括与其中的所述熔融金属

接触的电极,并且所述非注射器储罐包括与由所述注射器系统提供的所述熔融金属形成接触的电极。

9. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述非注射器储罐在所述注射器上方对齐(例如,与所述注射器竖直对齐)并且所述注射器被构造用于产生朝所述非注射器储罐取向的所述熔体料流,使得来自所述熔融金属料流的熔融金属可收集在所述储罐中并且所述熔融金属料流与所述非注射器储罐电极形成电接触;并且其中所述熔融金属汇集在所述非注射器储罐电极上。

10. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述容器包括沙漏形几何结构(例如,其中所述容器的内表面区域的中间部分具有比沿长轴的每一远端的横截面小20%或10%或5%以内的横截面的几何结构)并且在横截面的竖直定向上取向(例如,所述容器的长轴与重力大致平行),其中所述注射器储罐低于腰部并且被构造而使得所述储罐中的熔融金属液位大致临近所述沙漏的腰部以增加所述点燃电流密度。

11. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述熔融金属与水反应而形成原子氢。

12. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述熔融金属是镓并且所述动力系统还包括镓再生系统以从氧化镓(例如,所述反应中产生的氧化镓)再生镓。

13. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述容器包括将光从所述容器的内部传输至光伏转换器的透光光伏(PV)窗以及构成旋转窗的容器几何结构和至少一个挡板中的至少一者。

14. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述功率转换器或输出系统为磁流体动力转换器,所述磁流体动力转换器包括连接至所述容器的喷嘴、磁流体动力通道、电极、磁体、金属收集系统、金属再循环系统、热交换器和任选的气体再循环系统。

15. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述熔融金属泵系统包括第一级电磁泵和第二级电磁泵,其中所述第一级包括用于金属再循环系统的泵,而所述第二级包括所述金属注射器系统的泵。

16. 根据权利要求1所述的动力系统,其中所述反应产生表征为以下中的一者或多者的氢产物:

- a) 在 1900 至 2000cm^{-1} 和 5500 至 6200cm^{-1} 中的一个或多个范围处具有拉曼峰的氢产物;
- b) 具有以 0.23 至 0.25eV 的整数倍间隔开的多个拉曼峰的氢产物;
- c) 在 1900 至 2000cm^{-1} 处有红外峰的氢产物;
- d) 具有以 0.23 至 0.25eV 的整数倍间隔开的多个红外峰的氢产物;
- e) 具有在 200 至 300nm 的范围内以 0.23 至 0.3eV 的整数倍间隔开的多个UV荧光发射光谱峰的氢产物;
- f) 具有在 200 至 300nm 的范围内以 0.2 至 0.3eV 的整数倍间隔开的多个电子束发射光谱峰的氢产物;
- g) 具有在 5000 至 $20,000\text{cm}^{-1}$ 的范围内以 $1000 \pm 200\text{cm}^{-1}$ 的整数倍间隔开的多个拉曼光谱峰的氢产物;
- h) 具有在 40 至 8000cm^{-1} 的范围内的连续拉曼光谱的氢产物;
- i) 由于顺磁位移和纳米颗粒位移中的至少一者而具有在 1500 至 2000cm^{-1} 范围内的拉曼峰的氢产物;

- j) 具有处于在490至525eV范围内的能量的X射线光电子能谱峰的氢产物;
- k) 引起高场MAS NMR基质位移的氢产物;
- l) 相对于TMS具有大于-5ppm的高场MAS NMR或液体NMR位移的氢产物;
- m) 包含大聚集体或聚合物 H_n (n为大于3的整数) 的氢产物;
- n) 包含大聚集体或聚合物 H_n (n为大于3的整数) 的氢产物, 所述大聚集体或聚合物 H_n 具有16.12至16.13的飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 峰;
- o) 包含金属氢化物的氢产物, 其中所述金属包含Zn、Fe、Mo、Cr、Cu和W中的至少一者;
- p) 包含 H_{16} 和 H_{24} 中的至少一者的氢产物;
- q) 包含无机化合物 M_xX_y 和 H_2 的氢产物, 其中M是阳离子且X是阴离子, 其具有 $M(M_xX_yH_2)_n$ 的电喷雾电离飞行时间次级离子质谱 (ESI-ToF) 和飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 峰中的至少一者, 其中n是整数;
- r) 包含 $K_2CO_3H_2$ 和 $KOH H_2$ 中的至少一者的氢产物, 其具有分别为 $K(K_2H_2CO_3)_n^+$ 和 $K(KOH H_2)_n^+$ 的电喷雾电离飞行时间次级离子质谱 (ESI-ToF) 和飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 峰中的至少一者;
- s) 包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者的磁性氢产物, 其中所述金属包含Zn、Fe、Mo、Cr、Cu、W和反磁金属中的至少一者;
- t) 包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者的氢产物, 其中所述金属包含Zn、Fe、Mo、Cr、Cu、W和通过磁性磁化率测量术展现磁性的反磁金属中的至少一者;
- u) 包含在电子顺磁共振 (EPR) 谱中不活跃的的金属的氢产物, 其中所述EPR谱包括约 $2.0046 \pm 20\%$ 的g因子和约 $1.6 \times 10^{-2} \text{eV} \pm 20\%$ 的质子分裂诸如质子-电子偶极分裂能中的至少一者;
- v) 包含氢分子二聚物 $[H_2]_2$ 的氢产物, 其中所述EPR谱至少显示约 $9.9 \times 10^{-5} \text{eV} \pm 20\%$ 的电子-电子偶极分裂能和约 $1.6 \times 10^{-2} \text{eV} \pm 20\%$ 的质子-电子偶极分裂能;
- w) 包含使用氢或氦载气时具有负气相色谱峰的气体的氢产物;
- x) 具有 $\frac{1.70127a_0^2}{p^2} \pm 10\%$ 的四极矩/e的氢产物, 其中p是整数;
- y) 包含分子二聚物的质子氢产物, 所述分子二聚物具有在 $(J+1) 44.30 \text{cm}^{-1} \pm 20 \text{cm}^{-1}$ 的范围内的整数J至J+1跃迁的翻滚旋转能, 其中包含氘的所述分子二聚物的相应旋转能是包含质子的所述二聚物的相应旋转能的1/2;
- z) 包含分子二聚物的氢产物, 所述分子二聚体具有来自以下各者的群组的至少一个参数: (i) $1.028 \text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子的间隔距离, (ii) $23 \text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的氢分子之间的振动能, 以及 (iii) $0.0011 \text{eV} \pm 10\%$ 的氢分子之间的范德华能;
- aa) 包含固体的氢产物, 所述固体具有来自以下各者的群组的至少一个参数: (i) $1.028 \text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子的间隔距离, (ii) $23 \text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的氢分子之间的振动能, 以及 (iii) 0.019eV 的氢分子之间的范德华能;
- bb) 具有 (i) $(J+1) 44.30 \text{cm}^{-1} \pm 20 \text{cm}^{-1}$ 、(ii) $(J+1) 22.15 \text{cm}^{-1} \pm 10 \text{cm}^{-1}$ 和 (iii) $23 \text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的FTIR和拉曼光谱特征, 和/或显示 $1.028 \text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子间隔的X射线或中子衍射图

案,和/或 $0.0011\text{eV} \pm 10\%$ /分子氢的汽化能的量热测定值的氢产物;

cc) 具有 (i) $(J+1) 44.30\text{cm}^{-1} \pm 10\% \text{cm}^{-1}$ 、(ii) $(J+1) 22.15\text{cm}^{-1} \pm 10\% \text{cm}^{-1}$ 和 (iii) $23\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的 FTIR 和拉曼光谱特征,和/或显示 $1.028\text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子间隔的 X 射线或中子衍射图案,和/或 $0.019\text{eV} \pm 10\%$ /分子氢的汽化能的量热测定值的固体氢产物;

dd) 包含氢氢负离子的氢产物,所述氢氢负离子是磁性的并且以在其束缚-自由结合能区中的磁单位来连接通量;

ee) 一种氢产物,其中使用有机柱采用含水溶剂,高压液相色谱 (HPLC) 显示出保留时间长于载体空体积时间的色谱峰,其中通过质谱诸如 ESI-ToF 检测所述峰显示出至少一种无机化合物的碎片。

17. 一种电极系统,其包括:

a) 第一电极和第二电极;

b) 熔融金属 (例如,熔融银、熔融镓) 料流,其与所述第一电极和所述第二电极进行电接触;

c) 循环系统,其包括泵以从储罐抽吸所述熔融金属并将其传送穿过管道 (例如,管) 以产生离开所述管道的所述熔融金属料流;

d) 电力源,其经构造用于提供所述第一电极与所述第二电极之间的电势差;

其中所述熔融金属料流同时与所述第一电极和所述第二电极接触以在所述电极之间产生电流。

18. 一种电路,其包括:

a) 加热部件,其用于产生熔融金属;

b) 泵送部件,其用于将来自储罐的所述熔融金属传送穿过管道以产生离开所述管道的所述熔融金属的料流;

c) 第一电极和第二电极,其与动力供应部件进行电气连通以用于产生跨越所述第一电极和所述第二电极的电势差;

其中所述熔融金属料流同时与所述第一电极和所述第二电极接触以在所述第一电极与所述第二电极之间形成电路。

19. 在包括第一电极和第二电极的电路中,改良包括跨越所述电极传递熔融金属料流以允许电流在所述电极之间流动。

20. 一种用于产生等离子体的系统,其包括:

a) 熔融金属注射器系统,其经构造用于从金属储罐产生熔融金属料流;

b) 电极系统,其用于产生感应电流以流经所述熔融金属料流;

c) 以下各项中的至少一者: (i) 经构造用于使计量体积的水与熔融金属接触的水注入系统,其中所述水的一部分与所述熔融金属的一部分反应而形成所述金属的氧化物和氢气, (ii) 过量氢气与氧气的混合物,以及 (iii) 过量氢气与水蒸气的混合物,以及

d) 动力供应器,其经构造用于供应所述电流;

其中当经过所述金属料流供应电流时产生所述等离子体。

21. 根据权利要求 20 所述的系统,其还包括:

a) 泵送系统,其经构造用于将在产生所述等离子体之后收集的金属转移至所述金属储罐;和

b) 金属再生系统,其经构造用于收集所述金属氧化物并将所述金属氧化物转化为所述金属;其中所述金属再生系统包括阳极、阴极、电解质;其中在所述阳极与所述阴极之间供应电偏压以将所述金属氧化物转化为所述金属;

其中将在所述金属再生系统中再生的金属转移至所述泵送系统。

磁流体动力氢电力产生器

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求以下专利申请的优先权：2019年1月18日提交的美国专利申请No.62/794,515、2019年2月8日提交的美国申请No.62/803,283、2019年3月25日提交的美国申请No.62/823,541、2019年4月2日提交的美国申请No.62/828,341、2019年4月27日提交的美国申请No.62/839,617、2019年5月7日提交的美国申请No.62/844,643、2019年5月21日提交的美国申请No.62/851,010、2019年6月28日提交的美国申请No.62/868,838、2019年7月8日提交的美国申请No.62/871,664、2019年7月26日提交的美国申请No.62/879,389、2019年8月5日提交的美国申请No.62/883,047、2019年8月21日提交的美国申请No.62/890,007、2019年9月6日提交的美国申请No.62/897,161、2019年9月20日提交的美国申请No.62/903,528、2019年11月1日提交的美国申请No.62/929,265、2019年11月14日提交的美国申请No.62/935,559、2019年12月13日提交的美国申请No.62/948,173和2019年12月27日提交的美国专利申请No.62/954,355,特此将这些专利每一者全文以引用方式并入本文。

技术领域

[0003] 本公开涉及动力产生领域,具体而言,涉及用于产生动力的系统、装置和方法。更具体而言,本公开的实施方式涉及动力产生装置和系统以及相关方法,其产生光动力、等离子体和热力并经由磁流体动力功率转换器(power converter)、光动力-电力转换器、等离子体-电力转换器、光子-电力转换器或热力-电力转换器产生电力。此外,本公开的实施方式描述了利用水或水基燃料源的点燃以使用光伏功率转换器产生光动力、机械动力、电力和/或热力的系统、装置和方法。本公开中详细描述了这些和其他相关的实施方式。

背景技术

[0004] 动力产生可以采取多种从等离子体获取动力的形式。等离子体的成功商业化可能取决于能够有效形成等离子体然后捕获所产生的等离子体的动力的动力产生系统。

[0005] 在点燃某些燃料期间可能形成等离子体。这些燃料可包括水或水基燃料源。在点燃期间,形成由剥离电子的原子构成的等离子体云,并且可以释放高的光动力。等离子体的高光动力可以被本公开的电转换器利用。离子和激发态原子可以重组并经历电子弛豫,从而发出光动力。光动力可以通过光伏转换成电。

发明内容

[0006] 本公开涉及产生电能和热能中的至少一者的动力系统,其包括:

[0007] 至少一个容器,其能够维持低于大气压的压力;

[0008] 反应物,其能够经历产生足够能量以在该容器中形成等离子体的反应,该反应物包含:

[0009] c) 氢气与氧气的混合物,和/或

[0010] 水蒸气,和/或

- [0011] 氢气与水蒸气的混合物;
- [0012] d) 熔融金属;
- [0013] 质量流量控制器,其用以控制至少一种反应物进入该容器的流量;
- [0014] 真空泵,其用以在一种或多种反应物正流入该容器时使该容器中的压力维持低于大气压;
- [0015] 熔融金属注射器系统,其包括容纳该熔融金属中的一些的至少一个储罐、构造用于递送该储罐中的该熔融金属并穿过注射器管从而提供熔融金属料流的熔融金属泵系统(例如,一个或多个电磁泵)以及用于接收该熔融金属料流的至少一个非注射器熔融金属储罐;
- [0016] 至少一个点燃系统,其包括电力源或点燃电流源以将电力供应至所述至少一个熔融金属料流以在所述氢气和/或氧气和/或水蒸气正流入所述容器时点燃该反应;反应物供应系统,其用以补给在反应中所消耗的反应物;
- [0017] 功率转换器或输出系统,其用以将从该反应产生的能量(例如,来自等离子体的光和/或热输出)的一部分转换为电力和/或热力。
- [0018] 该动力系统可包括黑体辐射器和用以输出来自该黑体辐射器的光的窗。这些实施方式可用于产生光(例如,用于照明)。
- [0019] 在一些实施方式中,该动力系统还可包括用于混合氢气与氧气的气体混合器以及氢与氧复合器和/或氢解离器。例如,该动力系统可包括氢与氧复合器,其中该氢与氧复合器包含由惰性载体材料负载的复合器催化金属。
- [0020] 可以以使反应(具体而言,能够输出足够能量以维持等离子体生成和净能量输出的反应)最大化的参数来操作该动力系统。例如,在一些实施方式中,在操作期间容器的压力在0.1托至50托的范围内。在某些具体实施中,氢质量流量以1.5至1000范围内的倍率超过氧质量流量。在一些实施方式中,该压力可在50托以上,并且还可包括气体再循环系统。
- [0021] 在一些实施方式中,将惰性气体(例如,氩)注入至该容器中。该惰性气体可用于延长某些原位形成的反应物(诸如新生水)的寿命。
- [0022] 该动力系统可包括水微量注射器,该水微量注射器构造用于将水注入至该容器中,使得所述反应的能量输出所产生的等离子体包含水蒸气。在一些实施方式中,该微量注射器将水注入至该容器中。在一些实施方式中, H_2 摩尔百分比在水蒸气(例如,由微量注射器注入的水蒸气)的摩尔百分比的1.5倍至1000倍的范围中。
- [0023] 该动力系统还可包括加热器,以使金属(例如,镓或银或铜或它们的组合)熔融而形成熔融金属。该动力系统还可包括被构造用于在反应之后回收熔融金属的熔融金属回收系统,该熔融金属回收系统包括从非注射器熔融金属储罐收集溢流的熔融金属溢流通道。
- [0024] 该熔融金属注射系统还可包括在该熔融金属储罐和该非注射熔融金属储罐中的电极;并且该点燃系统包括电力源或点燃电流源以将相反电压供应至注射器和非注射器储罐电极;其中电力源供应电流和功率流穿过熔融金属料流,以引起反应物的反应从而在该容器内侧形成等离子体。
- [0025] 电力源通常递送足以引起反应物反应而形成等离子体的高电流电能。在某些实施方式中,电力源包括至少一个超级电容器。在多个具体实施中,来自熔融金属点燃系统的电流可在10A至50,000A的范围内。

[0026] 通常,熔融金属泵系统被构造用于将熔融金属从熔融金属储罐泵送至非注射储罐,其中在该熔融金属储罐与该非注射储罐之间形成熔融金属料流。在一些实施方式中,该熔融金属泵系统是一个或多个电磁泵并且每个电磁泵包括以下中的一种:

[0027] c) DC或AC导电型,其包括通过电极提供给熔融金属的DC或AC电流源和恒定或同相交替的矢量交叉磁场源,或

[0028] d) 感应型,其包括通过熔融金属短接回路的交变磁场源,其在金属中感应产生交变电流;和同相交替的矢量交叉磁场源。

[0029] 在一些实施方式中,熔融金属点燃系统的电路由熔融金属料流闭合而引起点燃,以进一步引起点燃(例如,以小于10,000Hz的点燃频率)。该注射器储罐可包括与其中的熔融金属接触的电极,并且该非注射器储罐包括与由注射器系统提供的熔融金属形成接触的电极。

[0030] 在多个具体实施中,该非注射器储罐在该注射器上方对齐(例如,与该注射器竖直对齐)并且该注射器被构造用于产生朝该非注射器储罐取向的熔融流,使得来自该熔融金属料流的熔融金属可收集在该储罐中并且该熔融金属料流与非注射器储罐电极形成电接触;并且其中该熔融金属汇集在该非注射器储罐电极上。在某些实施方式中,至非注射器储罐的点燃电流可包括:

[0031] a) 气密密封的具耐高温能力的馈通件,其穿透该容器;

[0032] b) 电极汇流条,和

[0033] c) 电极。

[0034] 点燃电流密度可至少出于如下原因而与容器几何结构有关:容器几何结构与最终等离子体形状有关。在多个具体实施中,该容器可包括沙漏形几何结构(例如一种几何结构,其中该容器内表面区域中间部分的横截面比沿长轴的每一远端的横截面小20%或10%或5%以内)并且在横截面的竖直定向上取向(例如,长轴与重力大致平行),其中该注射器储罐在腰部下面并且经构造而使得该储罐中的熔融金属液位大致临近该沙漏的腰部以增加点燃电流密度。在一些实施方式中,该容器是围绕纵向主轴对称的。在一些实施方式中,该容器可以是沙漏形几何结构并且包括难熔金属衬里。在一些实施方式中,具有沙漏形几何结构的容器的注射器储罐可包括用于点燃电流的正电极。

[0035] 熔融金属可包含银、镓、银-铜合金、铜或它们的组合中的至少一者。在一些实施方式中,熔融金属具有低于700℃的熔点。例如,熔融金属可包含铋、铅、锡、铟、镉、镓、铟或合金(诸如洛斯金属、Cerrosafe、伍德合金(Wood's metal)、菲尔德金属、Cerrolow 136、Cerrolow 117、Bi-Pb-Sn-Cd-In-Tl和镓铟锡合金)中的至少一者。在某些方面中,该动力产生系统的接触熔融金属的组件中的至少一者(例如,储罐、电极)包含、包覆有或涂覆有抵抗与熔融金属形成合金的一种或多种抗合金材料。示例性的抗合金材料是钨、钽、SS 347和陶瓷。在一些实施方式中,该容器的至少一部分由陶瓷和/或金属构成。陶瓷可包含金属氧化物、石英、氧化铝、氧化锆、氧化镁、氧化钨、碳化硅、碳化锆、二硼化锆、氮化硅和玻璃陶瓷中的至少一者。在一些实施方式中,该容器的金属包含不锈钢和难熔金属中的至少一者。

[0036] 熔融金属可与水发生反应以原位形成原子氢。在多个具体实施中,熔融金属是镓并且该动力系统还包括镓再生系统以从氧化镓(例如,反应中所产生的氧化镓)再生镓。该镓再生系统可包括氢气和原子氢中的至少一者的源以将氧化镓还原至镓金属。在一些实施

方式中,将氢气从在该动力产生系统外部的源递送至该镓再生系统。在一些实施方式中,原位产生氢气和/或原子氢。该镓再生系统可包括将电力递送至在反应中产生的镓(或镓/氧化镓组合)的点燃系统。在若干具体实施中,该电力可将镓表面上的氧化镓电解为镓金属。在一些实施方式中,该镓再生系统可包括电解质(例如,包含碱金属或碱土金属卤化物的电解质)。在一些实施方式中,该镓再生系统可包括碱性pH水性电解系统、用以将氧化镓运输至该系统中的部件和用以使镓返回至该容器(例如,至熔融金属储罐)的部件。在一些实施方式中,该镓再生系统包括撇渣器和斗式提升机以从镓表面移除氧化镓。在多个具体实施中,动力系统可包括通往真空泵的排气管线以维持排放气体流并且还包括在该排气管线中的静电沉淀系统以收集排放气体流中的氧化镓颗粒。

[0037] 在一些实施方式中,该动力系统还可包括至少一个热交换器(例如,耦合至容器的壁的热交换器、可将热转移至熔融金属或从熔融金属转移热或者将热转移至熔融金属储罐或从熔融金属储罐转移热的热交换器)。

[0038] 在一些实施方式中,该动力系统包括反应功率输出的至少一个功率转换器或输出系统,包括以下各者的群组中的至少一者:热光伏转换器、光伏转换器、光电转换器、磁流体动力转换器、等离子体动力转换器、热离子转换器、热电转换器、斯特林发动机(Sterling engine)、超临界CO₂循环转换器、布雷顿循环转换器(Brayton cycle converter)、外部燃烧器型布雷顿循环发动机或转换器、兰金循环发动机或转换器、有机兰金循环转换器、内部燃烧型发动机和热力发动机、加热器和锅炉。该容器可包括将光从容器的内部传输至光伏转换器的透光光伏(PV)窗以及容器几何形状和包含旋转窗的至少一个挡板中的至少一者。该旋转窗包括用以还原氧化镓的系统,该系统包括氢还原系统和电解系统中的至少一者。在一些实施方式中,该旋转窗包含以下各者或由以下各者构成:石英、蓝宝石、氟化镁或它们的组合。在若干具体实施中,该旋转窗涂覆有抑制镓和氧化镓中的至少一者的粘附的涂层。该旋转窗涂层可包含类金刚石、碳、氮化硼和碱金属氢氧化物中的至少一者。

[0039] 功率转换器或输出系统可包括磁流体动力(MHD)转换器,该磁流体动力(MHD)转换器包括连接至该容器的喷嘴、磁流体动力通道、电极、磁体、金属收集系统、金属再循环系统、热交换器和任选的气体再循环系统。在一些实施方式中,熔融金属可包含银。在具有磁流体动力转换器的实施方式中,可将氧气递送至该磁流体动力转换器以在与熔融金属料流中的银发生相互作用之后形成银纳米颗粒(例如,其在分子态中的大小是诸如小于约10nm或小于约1nm),其中该银纳米颗粒穿过磁流体动力喷嘴而被加速度以赋予从反应产生的功率的动能存量。反应物供应系统可将氧气供应至转换器并且控制氧气至转换器的递送。在多个具体实施中,在磁流体动力通道中将银纳米颗粒的动能存量的至少一部分转换为电能。此版本的电能可导致该纳米颗粒的聚结。该纳米颗粒可在磁流体动力转换器的冷凝区段(在本文中也称为MHD冷凝区段)中聚结为至少部分地吸收氧的熔融金属,并且通过金属再循环系统使包含所吸收的氧的熔融金属返回至注射器储罐。在一些实施方式中,可通过容器中的等离子体而将氧从金属释放。在一些实施方式中,使等离子体维持在磁流体动力通道和金属收集系统中以增强熔融金属对氧的吸收。

[0040] 熔融金属泵系统可包括第一级电磁泵和第二级电磁泵,其中该第一级包括用于金属再循环系统的泵,而该第二级包括金属注射器系统的泵。

[0041] 由反应诱发的反应产生足够能量以便引发等离子体在容器中形成。这些反应可产

生表征为以下中的一者或多者的氢产物：

[0042] ff) 在 1900 至 2000cm^{-1} 和 5500 至 6100cm^{-1} 的一个或多个范围处具有拉曼峰的氢产物；

[0043] gg) 具有以 0.23 至 0.25eV 的整数倍间隔开的多个拉曼峰的氢产物；

[0044] hh) 在 1900 至 2000cm^{-1} 处有红外峰的氢产物；

[0045] ii) 具有以 0.23 至 0.25eV 的整数倍间隔开的多个红外峰的氢产物；

[0046] jj) 具有在 200 至 300nm 的范围内以 0.23 至 0.3eV 的整数倍间隔开的多个UV荧光发射光谱峰的氢产物；

[0047] kk) 具有在 200 至 300nm 的范围内以 0.2 至 0.3eV 的整数倍间隔开的多个电子束发射光谱峰的氢产物；

[0048] ll) 具有在 5000 至 $20,000\text{cm}^{-1}$ 的范围内以 $1000 \pm 200\text{cm}^{-1}$ 的整数倍间隔开的多个拉曼光谱峰的氢产物；

[0049] mm) 具有在 40 至 8000cm^{-1} 的范围内的连续拉曼光谱的氢产物；

[0050] nn) 由于顺磁位移和纳米颗粒位移中的至少一者而具有在 1500 至 2000cm^{-1} 的范围中的拉曼峰的氢产物；

[0051] oo) 具有处于在 490 至 525eV 的范围内的一能量的X射线光电子能谱峰的氢产物；

[0052] pp) 引起高场MAS NMR基质位移的氢产物；

[0053] qq) 相对于TMS具有大于 -5ppm 的高场MAS NMR或液体NMR位移的氢产物；

[0054] rr) 包含大聚集体或聚合物 H_n (n 是大于3的整数) 的氢产物；

[0055] ss) 包含大聚集体或聚合物 H_n (n 是大于3的整数) 的氢产物, 其具有 16.12 至 16.13 的飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 峰；

[0056] tt) 包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者的氢产物, 其中所述金属包含Zn、Fe、Mo、Cr、Cu和W中的至少一者；

[0057] uu) 包含 H_{16} 和 H_{24} 中的至少一者的氢产物；

[0058] vv) 包含无机化合物 M_xX_y 和 H_2 的氢产物, 其中M是阳离子且X是阴离子, 其具有 $(\text{M}_x\text{X}_y\text{H}_2)_n$ 的电喷雾电离飞行时间次级离子质谱 (ESI-ToF) 和飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 峰中的至少一者, 其中 n 是整数；

[0059] ww) 包含 $\text{K}_2\text{CO}_3\text{H}_2$ 和 KOHH_2 中的至少一者的氢产物, 其具有分别为 $K(\text{K}_2\text{H}_2\text{CO}_3)_n^+$ 和 $K(\text{KOH}\text{H}_2)_n^+$ 的电喷雾电离飞行时间次级离子质谱 (ESI-ToF) 和飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 峰中的至少一者；

[0060] xx) 包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者的磁性氢产物, 其中所述金属包含Zn、Fe、Mo、Cr、Cu、W和反磁金属中的至少一者；

[0061] yy) 包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者的氢产物, 其中所述金属包含Zn、Fe、Mo、Cr、Cu、W和通过磁性磁化率测量术 (susceptometry) 展现磁性的反磁金属中的至少一者；

[0062] zz) 包含在电子顺磁共振 (EPR) 谱中不活跃的的金属的氢产物, 其中EPR谱包括约 $2.0046 \pm 20\%$ 的 g 因子和约 $1.6 \times 10^{-2}\text{eV} \pm 20\%$ 的质子分裂诸如质子-电子偶极分裂能中的至少一者；

[0063] aaa) 包含氢分子二聚物 $[H_2]_2$ 的氢产物,其中EPR谱至少显示约 $9.9 \times 10^{-5} \text{eV} \pm 20\%$ 的电子-电子偶极分裂能和约 $1.6 \times 10^{-2} \text{eV} \pm 20\%$ 的质子-电子偶极分裂能;

[0064] bbb) 包含使用氢或氦载气时具有负气相色谱峰的气体的氢产物;

[0065] ccc) 具有 $\frac{1.70127 a_0^2}{p^2} \pm 10\%$ 的四极矩/e的氢产物,其中p是整数;

[0066] ddd) 包含分子二聚物的质子氢产物,所述分子二聚物具有在 $(J+1) 44.30 \text{cm}^{-1} \pm 20 \text{cm}^{-1}$ 的范围内的整数J至J+1跃迁的翻滚旋转能,其中包含氘的该分子二聚物的对应旋转能是包含质子的该二聚物的对应旋转能的1/2;

[0067] eee) 包含分子二聚物的氢产物,所述分子二聚物具有来自以下各者的群组的至少一个参数: (i) $1.028 \text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子的间距, (ii) $23 \text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的氢分子之间的振动能,以及 (iii) $0.0011 \text{eV} \pm 10\%$ 的氢分子之间的范德华能;

[0068] fff) 包含固体的氢产物,所述固体具有来自以下各者的群组的至少一个参数: (i) $1.028 \text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子的间距, (ii) $23 \text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的氢分子之间的振动能,以及 (iii) $0.019 \text{eV} \pm 10\%$ 的氢分子之间的范德华能;

[0069] ggg) 具有 (i) $(J+1) 44.30 \text{cm}^{-1} \pm 20 \text{cm}^{-1}$ 、(ii) $(J+1) 22.15 \text{cm}^{-1} \pm 10 \text{cm}^{-1}$ 和 (iii) $23 \text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的FTIR和拉曼光谱特征,和/或显示 $1.028 \text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子间隔的X射线或中子衍射图案,和/或 $0.0011 \text{eV} \pm 10\%$ /分子氢的汽化能量的量热测定值的氢产物;

[0070] hhh) 具有 (i) $(J+1) 44.30 \text{cm}^{-1} \pm 20\% \text{cm}^{-1}$ 、(ii) $(J+1) 22.15 \text{cm}^{-1} \pm 10\% \text{cm}^{-1}$ 和 (iii) $23 \text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的FTIR和拉曼光谱特征,和/或显示 $1.028 \text{\AA} \pm 10\%$ 的氢分子间隔的X射线或中子衍射图案,和/或 $0.019 \text{eV} \pm 10\%$ /分子氢的汽化能量的量热测定值的固体氢产物;

[0071] iii) 包含氢氢负离子的氢产物,所述氢氢负离子是磁性的并且以在其束缚-自由结合能区中的磁单位来连接通量;

[0072] jjj) 氢产物,其中使用有机柱采用包含水的溶剂,高压液相色谱 (HPLC) 显示出保留时间长于载体空体积时间的色谱峰,其中通过质谱诸如ESI-ToF检测所述峰显示出至少一种无机化合物的碎片。

[0073] 在一些实施方式中,氢产物可表征为:

[0074] a) 具有在 40 至 8000cm^{-1} 的范围内的连续拉曼光谱的氢产物;

[0075] b) 由于顺磁位移和纳米颗粒位移中的至少一者而具有在 1500 至 2000cm^{-1} 的范围中的拉曼峰的氢产物;

[0076] c) 具有处于在 490 至 525eV 的范围内的能量的X射线光电子能谱峰的氢产物;

[0077] d) 包含在电子顺磁共振 (EPR) 谱中不活跃的金属的氢产物,其中EPR谱包括约 $2.0046 \pm 20\%$ 的g因子和约 $1.6 \times 10^{-2} \text{eV} \pm 20\%$ 的质子分裂诸如质子-电子偶极分裂能中的至少一者;

[0078] e) 包含氢分子二聚物 $[H_2]_2$ 的氢产物,其中EPR谱至少显示约 $9.9 \times 10^{-5} \text{eV} \pm 20\%$ 的电子-电子偶极分裂能和约 $1.6 \times 10^{-2} \text{eV} \pm 20\%$ 的质子-电子偶极分裂能;

[0079] f) 包含氢氢负离子的氢产物,所述氢氢负离子是磁性的并且以在其束缚-自由结合能区中的磁通量子单位来连接通量;

[0080] 在某些具体实施中,该反应产生可表征为以下各项中的一者或多者的 H_2 :

[0081] a) 具有包括以下中的至少一者的傅里叶变换红外线光谱 (FTIR) : 在 $1940\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 处的 H_2 旋转能量和其中缺乏其他高能特征的指纹区域中的振动谱带;

[0082] b) 具有包括高场基质峰的质子魔角自旋核磁共振谱 (^1H MAS NMR) ;

[0083] c) 具有显示金属氢化物和氢聚合物中的至少一者在 100°C 至 1000°C 的温度区域内分解的热重分析 (TGA) 结果;

[0084] d) 具有包括在 260nm 区域中的 H_2 振转谱带的电子束激发发射光谱, 该振转谱带包括以约 0.23eV 至 0.3eV 彼此间隔开的多个峰;

[0085] e) 具有包括在 260nm 区域中的 H_2 振转谱带的电子束激发发射光谱, 该振转谱带包括以 0.23eV 至 0.3eV 彼此间隔开的一系列峰, 其中在 0K 至 150K 的范围内的低温下所述峰的强度降低;

[0086] f) 具有包括在 260nm 区域中的 H_2 振转谱带的二阶的光致发光拉曼光谱, 该振转谱带包括以 0.23eV 至 0.3eV 彼此间隔开的多个峰;

[0087] g) 具有包括 H_2 振转谱带的二阶的光致发光拉曼光谱, 该振转谱带包括在 5000 至 $20,000\text{cm}^{-1}$ 的范围内间隔为 $1000 \pm 200\text{cm}^{-1}$ 的整数倍数的多个峰;

[0088] h) 具有包括在 $1940\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 和 $5820\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 中的一者或多者处的 H_2 旋转峰的拉曼光谱;

[0089] i) 具有在 40 至 8000cm^{-1} 的范围内的连续拉曼光谱;

[0090] j) 由于顺磁位移和纳米颗粒位移中的至少一者而具有在 1500 至 2000cm^{-1} 的范围内的拉曼峰;

[0091] k) 具有 X 射线光电子能谱 (XPS), 该 X 射线光电子能谱包含在 490 至 500eV 的 H_2 总能量;

[0092] l) 该氢产物与 $\text{K}_2\text{CO}_3\text{H}(1/4)_2$ 和 KOHH_2 (例如, 在包括吸气剂的实施方式中) 相互作用并且电喷雾电离飞行时间二次离子质谱 (ESI-ToF) 和飞行时间二次离子质谱 (ToF-SIMS) 中的至少一者分别包括 $\text{K}(\text{K}_2\text{H}_2\text{CO}_3)_n^+$ 和 $\text{K}(\text{KOH}\text{H}_2)_n^+$ 的峰;

[0093] m) 具有 $\frac{1.70127a_0^2}{4^2} \pm 10$ 的四极矩/e; 以及

[0094] n) 分别具有在 $(J+1) 44.30\text{cm}^{-1} \pm 20\text{cm}^{-1}$ 和 $(J+1) 22.15\text{cm}^{-1} \pm 10\text{cm}^{-1}$ 的范围内的整数 J 至 $J+1$ 跃迁的翻滚旋转能;

[0095] o) 具有来自以下各者的群组的至少一个参数: (i) $1.028 \text{ \AA} \pm 10\%$ 的 H_2 分子的间距, (ii) $23\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的 H_2 分子之间的振动能, 以及 (iii) $0.0011\text{eV} \pm 10\%$ 的 H_2 分子之间的范德华能;

[0096] p) 具有 (i) $(J+1) 44.30\text{cm}^{-1} \pm 20\text{cm}^{-1}$ 、(ii) $(J+1) 22.15\text{cm}^{-1} \pm 10\text{cm}^{-1}$ 和 (iii) $23\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的 FTIR 和拉曼光谱特征, 和/或显示 $1.028 \text{ \AA} \pm 10\%$ 的 H_2 分子间隔的 X 射线或中子衍射图案, 和/或 $0.0011\text{eV} \pm 10\%$ / H_2 的汽化能量的量热测定值。

[0097] 在一些实施方式中, 氢产物可形成为固体 H_2 并且表征为:

[0098] a) 具有来自以下各者的群组的至少一个参数: (i) $1.028 \text{ \AA} \pm 10\%$ 的 H_2 分子的间距, (ii) $23\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的 H_2 分子之间的振动能, 以及 (iii) $0.019\text{eV} \pm 10\%$ 的 $\text{H}_2(1/4)$ 分子之间的范德华能;

[0099] b) 具有 (i) $(J+1) 44.30\text{cm}^{-1} \pm 20\text{cm}^{-1}$ 、(ii) $(J+1) 22.15\text{cm}^{-1} \pm 10\text{cm}^{-1}$ 和 (iii) $23\text{cm}^{-1} \pm 10\%$ 的 FTIR 和拉曼光谱特征, 和/或展示 $1.028 \text{ \AA} \pm 10\%$ 的氢分子间隔的 X 射线或中子衍射图案, 和/或 $0.019\text{eV} \pm 10\%$ / H_2 的汽化能量的量热测定值。在多种实施方式中, 氢产物可类似地表征为从各种分数氢反应器形成的产物 (诸如通过在包含水蒸气的气氛中的线爆轰形成的那些)。这类产物可以:

[0100] a) 包含大聚集体或聚合物 H_n (n 是大于 3 的整数);

[0101] b) 包含大聚集体或聚合物 H_n (n 是大于 3 的整数), 所述大聚集体或聚合物 H_n 具有 16.12 至 16.13 的飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 峰;

[0102] c) 包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者, 其中所述金属包含 Zn、Fe、Mo、Cr、Cu 和 W 中的至少一者并且所述氢包含 H;

[0103] d) 包含 H_{16} 和 H_{24} 中的至少一者;

[0104] e) 包含无机化合物 M_xX_y 和 H_2 , 其中 M 是金属阳离子且 X 是阴离子, 并且电喷雾电离飞行时间次级离子质谱 (ESI-ToF) 和飞行时间次级离子质谱 (ToF-SIMS) 中的至少一者包含 $\text{M}_x\text{X}_y\text{H}(1/4)_n$ 的峰, 其中 n 为整数;

[0105] f) 有磁性并且包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者, 其中所述金属包含 Zn、Fe、Mo、Cr、Cu、W 和反磁金属中的至少一者, 并且所述氢为 $\text{H}(1/4)$;

[0106] g) 包含金属氢化物和进一步包含氢的金属氧化物中的至少一者, 其中所述金属包含 Zn、Fe、Mo、Cr、Cu、W 和反磁金属中的至少一者, 并且 H 为

[0107] $\text{H}(1/4)$, 其中所述产物通过磁性磁化率测量术展现磁性;

[0108] h) 包含在电子顺磁共振 (EPR) 谱中不活跃的金属, 其中 EPR 谱显示约 $2.0046 \pm 20\%$ 的 g 因子和约 $1.6 \times 10^{-2}\text{eV} \pm 20\%$ 的质子分裂诸如质子-电子偶极分裂能;

[0109] i) 包含氢分子二聚物 $[\text{H}_2]_2$, 其中 EPR 谱至少显示约 $9.9 \times 10^{-5}\text{eV} \pm 20\%$ 的电子-电子偶极分裂能和约 $1.6 \times 10^{-2}\text{eV} \pm 20\%$ 的质子-电子偶极分裂能;

[0110] j) 包含或释放使用氢或氢载气时具有负气相色谱峰的 H_2 (例如, 所述氢产物);

[0111] 在一些实施方式中, 通过所述反应形成的氢产物包含与以下中的至少一者络合的氢产物: (i) 非氢的元素; (ii) 包含 H^+ 、普通 H_2 、普通 H^- 和普通 H_3^+ 中的至少一者的普通氢物质; 有机分子物质; 和 (iv) 无机物质。在一些实施方式中, 氢产物包含氧阴离子化合物。在多种实施方案中, 氢产物 (或来自包含吸气剂的实施方式的回收的氢产物) 可包含至少一种具有选自以下群组的结构式的化合物:

[0112] a) MH 、 MH_2 或 M_2H_2 , 其中 M 为碱金属阳离子, 且 H 或 H_2 为氢产物;

[0113] b) MH_n , 其中 n 为 1 或 2, M 为碱土金属阳离子, 且 H 为氢产物。

[0114] c) MHX , 其中 M 为碱金属阳离子, X 为诸如卤素原子之类中性原子、分子或诸如卤素阴离子之类的带单个负电荷的阴离子中的一者, 且 H 为氢产物;

[0115] d) MHX , 其中 M 为碱土金属阳离子, X 为带单个负电荷的阴离子, 且 H 为氢产物;

[0116] e) MHX , 其中 M 为碱土金属阳离子, X 为带双负电荷的阴离子, 且 H 为所述氢产物;

[0117] f) M_2HX , 其中 M 为碱金属阳离子, X 为带单个负电荷的阴离子, 且 H 为所述氢产物;

[0118] g) MH_n , 其中 n 为整数, M 为碱金属阳离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0119] h) M_2H_n , 其中n为整数, M为碱土金属阳离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0120] i) M_2XH_n , 其中n为整数, M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0121] j) $M_2X_2H_n$, 其中n为1或2, M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0122] k) M_2X_3H , 其中M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 且H为所述氢产物;

[0123] l) M_2XH_n , 其中n为1或2, M为碱土金属阳离子, X为带双负电荷的阴离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0124] m) $M_2XX'H$, 其中M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, X'为带双负电荷的阴离子, 且H为所述氢产物;

[0125] n) $MM'H_n$, 其中n为1至3的整数, M为碱土金属阳离子, M'为碱金属阳离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0126] o) $MM'XH_n$, 其中n为1或2, M为碱土金属阳离子, M'为碱金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0127] p) $MM'XH$, 其中M为碱土金属阳离子, M'为碱金属阳离子, X为带双负电荷的阴离子, 且H为氢产物;

[0128] q) $MM'XX'H$, 其中M为碱土金属阳离子, M'为碱金属阳离子, X和X'为带单个负电荷的阴离子, 且H为氢产物;

[0129] r) $MXX'H_n$, 其中n为1至5的整数, M为碱金属或碱土金属阳离子, X为带单或双负电荷的阴离子, X'为金属或类金属、过渡元素、内过渡元素或稀土元素, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0130] s) MH_n , 其中n为整数, M为诸如过渡元素、内过渡元素或稀土元素之类的阳离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0131] t) MXH_n , 其中n为整数, M为诸如碱金属阳离子、碱土金属阳离子之类的阳离子, X为另一阳离子诸如过渡元素、内过渡元素或稀土元素阳离子, 且该化合物的氢内容物 H_n 包含所述氢产物中的至少一种;

[0132] u) $(MH_mMCO_3)_n$, 其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子, m和n各为整数, 且该化合物的氢内容物 H_m 包含所述氢产物中的至少一种;

[0133] v) $(MH_mMNO_3)_n^+ nX^-$, 其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子, m和n各为整数, X为带单个负电荷的阴离子, 且该化合物的氢内容物 H_m 包含所述氢产物中的至少一种;

[0134] w) $(MHMNO_3)_n$, 其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子, n为整数, 且该化合物的氢内容物H包含所述氢产物中的至少一种;

[0135] x) $(MHMOH)_n$, 其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子, n为整数, 且该化合物的氢内容物H包含所述氢产物中的至少一种;

[0136] y) $(MH_mM'X)_n$, 其中m和n各为整数, M和M'各为碱金属或碱土金属阳离子, X为带单或双负电荷的阴离子, 且该化合物的氢内容物 H_m 包含所述氢产物中的至少一种; 以及

[0137] $z) (MH_m M' X')_n^+ nX^-$, 其中m和n各为整数,M和M'各为碱金属或碱土金属阳离子,X和X'为带单或双负电荷的阴离子,且该化合物的氢内容物 H_m 包含所述氢产物中的至少一种。

[0138] 由所述反应形成的氢产物的阴离子可以是一个或多个带单个负电荷的阴离子,包括卤离子、氢氧根离子、碳酸氢根离子、硝酸根离子、带双负电荷的阴离子、碳酸根离子、氧化物和硫酸根离子。在一些实施方式中,氢产物嵌入于晶格中(例如,借助使用位于(例如)容器中或排气管线中的吸气剂诸如 K_2CO_3)。例如,氢产物可嵌入于盐晶格中。在多种具体实施中,该盐晶格可包含碱金属盐、碱金属卤化物、碱金属氢氧化物、碱土金属盐、碱土金属卤化物、碱土金属氢氧化物或它们的组合。

[0139] 还提供电极系统,该电极系统包括:

[0140] e) 第一电极和第二电极;

[0141] f) 熔融金属(例如,熔融银、熔融镓)流,其与所述第一电极和所述第二电极进行电接触;

[0142] g) 循环系统,其包括泵以从储罐抽吸所述熔融金属并将其传送穿过管道(例如,管)以产生离开所述管道的所述熔融金属料流;

[0143] h) 电力源,其构造用于提供所述第一电极与所述第二电极之间的电势差;其中所述熔融金属料流同时与所述第一电极和所述第二电极接触以在所述电极之间产生电流。在一些实施方式中,电力足以产生超过100A的电流。

[0144] 还提供电路,该电路可包括:

[0145] d) 加热部件,其用于产生熔融金属;

[0146] e) 泵送部件,其用于将来自储罐的所述熔融金属传送穿过管道以产生离开所述管道的所述熔融金属的流;

[0147] f) 第一电极和第二电极,其与动力供应部件进行电气连通以用于产生跨越所述第一电极和所述第二电极的电势差;

[0148] 其中所述熔融金属料流同时与所述第一电极和所述第二电极接触以在所述第一电极与所述第二电极之间形成电路。例如,在包括第一和第二电极的电路中,改良可包括跨越所述电极传递熔融金属料流以准许电流在它们之间流动。

[0149] 另外,提供用于产生等离子体(其可用于本文所述的动力产生系统中)的系统。这些系统可包括:

[0150] e) 熔融金属注射器系统,其被构造用于从金属储罐产生熔融金属料流;

[0151] f) 电极系统,其用于产生感应电流以流经所述熔融金属料流;

[0152] g) 以下各项中的至少一者:(i) 被构造用于使计量体积的水与所述熔融金属接触的水注入系统,其中所述水的一部分与所述熔融金属的一部分反应而形成所述金属的氧化物和氢气,(ii) 过量氢气与氧气的混合物,以及(iii) 过量氢气与水蒸气的混合物,以及

[0153] h) 动力供应器,其被构造用于供应所述电流;

[0154] 其中当供应电流穿过所述金属流时产生所述等离子体。在一些实施方式中,该系统还可包括:

[0155] 泵送系统,其被构造用于将在产生所述等离子体之后收集的金属转移至所述金属

储罐。在一些实施方式中,该系统可包括:

[0156] 金属再生系统,其被构造用于收集所述金属氧化物并将所述金属氧化物转化为所述金属;其中所述金属再生系统包括阳极、阴极、电解质;其中在所述阳极与所述阴极之间供应电偏压以将所述金属氧化物转化为所述金属。在某些具体实施中,该系统可包括:

[0157] c) 泵送系统,其被构造用于将在产生所述等离子体之后收集的金属转移至所述金属储罐;和

[0158] d) 金属再生系统,其被构造用于收集所述金属氧化物并将所述金属氧化物转化为所述金属;其中所述金属再生系统包括阳极、阴极、电解质;其中在所述阳极与所述阴极之间供应电偏压以将所述金属氧化物转化为所述金属;其中将在所述金属再生系统中再生的金属转移至所述泵送系统。在某些具体实施中,该金属是镓、银或它们的组合。在一些实施方式中,该电解质是碱金属氢氧化物(例如,氢氧化钠、氢氧化钾)。

附图说明

[0159] 附图并入本说明书并构成本说明书的一部分,其示出了本公开的多个实施方式,并与说明书一起用于解释本公开的原理。在附图中:

[0160] 图1为根据本公开实施方式的磁流体动力(MHD)转换器组件(阴极、阳极、绝缘体和汇流条、馈通件凸缘)的示意图。

[0161] 图2至图3为根据本公开实施方式的包括作为液体电极的双EM泵注射器的SunCell®动力产生器的示意图,其示出了倾斜储罐和包括一对MHD返回EM泵的磁流体动力(MHD)转换器。

[0162] 图4为根据本公开实施方式的单级感应注射EM泵的示意图。

[0163] 图5为根据本公开实施方式的包括作为液体电极的双EM泵注射器的磁流体动力(MHD) SunCell®动力产生器的示意图,其示出了倾斜储罐、球形反应池腔室、直线磁流体动力(MHD)通道、气体添加壳体 and 用于注射的单级感应EM泵以及单级感应或DC传导MHD返回EM泵。

[0164] 图6为根据本公开实施方式的二级感应EM泵的示意图,其中第一级充当MHD返回EM泵而第二级充当注射EM泵。

[0165] 图7为根据本公开实施方式的二级感应EM泵的示意图,其中第一级充当MHD返回EM泵而第二级充当注射EM泵,其中使洛伦兹泵送力更加优化。

[0166] 图8为根据本公开实施方式的感应点燃系统的示意图。

[0167] 图9至图10为根据本公开实施方式的包括作为液体电极的双EM泵注射器的磁流体动力(MHD) SunCell®动力产生器的示意图,其示出了倾斜储罐、球形反应池腔室、直线磁流体动力(MHD)通道、气体添加壳体、用于注射和MHD返回二者的二级感应EM泵(其各自具有强制风冷系统)和感应点燃系统。

[0168] 图11为根据本公开实施方式的包括作为液体电极的双EM泵注射器的磁流体动力(MHD) SunCell®动力产生器的示意图,其示出了倾斜储罐、球形反应池腔室、直线磁流体动力(MHD)通道、气体添加壳体、用于注射和MHD返回二者的二级感应EM泵(其各自具有强制风冷系统)、感应点燃系统和在EM泵管、储罐、反应池腔室和MHD返回管道上的感应耦合加热天线。

[0169] 图12至图19为根据本公开实施方式的包括作为液体电极的双EM泵注射器的磁流体动力 (MHD) **SunCell®**动力产生器的示意图,其示出了倾斜储罐、球形反应池腔室、直线磁流体动力 (MHD) 通道、气体添加壳体、用于注射和MHD返回二者的两级感应EM泵 (其各自具有风冷系统) 和感应点燃系统。

[0170] 图20为示出了根据本公开的实施方式的 **SunCell®**的示例性螺旋形火焰加热器和包括一系列环形圈的火焰加热器的示意图。

[0171] 图21为示出了根据本公开的实施方式的电解器的示意图。

[0172] 图22为根据本公开实施方式的包括作为液体电极的双EM泵注射器的 **SunCell®**动力产生器的示意图,其示出了倾斜储罐和包括一对MHD返回EM泵和一对MHD返回气泵或压缩机的磁流体动力 (MHD) 转换器。

[0173] 图23为根据本公开实施方式的来自Smithells Metals Reference Book-第8版, 11-20的银-氧相图的示意图。

[0174] 图24为根据本公开实施方式的 **SunCell®**热力产生器的示意图,一者包括壁中嵌入有冷却剂管的半球壳形辐射热吸收器热交换器,其用以接收来自包括黑体辐射器的反应池的热力并将热传递至冷却剂,而另一者包括圆周圆柱形热交换器和锅炉。

[0175] 图25为示出了根据本公开的实施方式的 **SunCell®**热力产生器的细节的示意图,该 **SunCell®**热力产生器包括作为液体电极的注射器储罐中的单EM泵注射器和倒置基座。

[0176] 图26至图28为示出了根据本公开实施方式的 **SunCell®**热力产生器的细节的示意图,该 **SunCell®**热力产生器包括作为液体电极的注射器储罐中的单EM泵注射器和部分倒置的基座以及用以遏制PV窗的金属化的锥形反应池腔室。

[0177] 图29为示出了根据本公开的实施方式的 **SunCell®**热力产生器的细节的示意图,该 **SunCell®**热力产生器包括作为液体电极的注射器储罐中的单EM泵注射器、部分倒置的基座;感应点燃系统和PV窗。

[0178] 图30为示出了根据本公开的实施方式的 **SunCell®**热力产生器的细节的示意图,该 **SunCell®**热力产生器包括具有衬里的立方体形反应池腔室以及作为液体电极的注射器储罐中的单EM泵注射器和倒置基座。

[0179] 图31为示出了根据本公开的实施方式的 **SunCell®**热力产生器的细节的示意图,该 **SunCell®**热力产生器包括沙漏形反应池腔室衬里以及作为液体电极的注射器储罐中的单EM泵注射器和倒置基座。

[0180] 图32为示出了根据本公开的实施方式的 **SunCell®**热力产生器的细节的示意图,该 **SunCell®**热力产生器包括作为液体电极的注射器储罐中的单EM泵注射器、部分倒置的基座;感应点燃系统和斗式提升机氧化镓撇渣器。

[0181] 图33为根据本公开实施方式的分数氢反应池腔室的示意图,该分数氢反应池腔室包括用以使线爆轰以充当反应物源中的至少一者的部件以及用以传播分数氢反应以形成诸如分子分数氢之类的低能氢物质的部件。

[0182] 图34为包含低能氢的分数氢反应产物的电子顺磁共振谱 (EPR) 谱图,该低能氢包含通过如下方式而形成的白色聚合化合物:将从 **SunCell®**中的分数氢反应运行收集的

Ga_2O_3 溶解于KOH水溶液中,让纤维生长并漂浮至表面,在该表面处通过过滤收集该纤维。

[0183] 图35A为根据本公开实施方式的包含低能氢物质诸如分子分数氢的反应产物的傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱,所述分子分数氢由Zn导丝在包含空气中水蒸气的气氛中爆轰而形成。

[0184] 图35B为对白色聚合化合物使用Thermo Scientific DXR SmartRaman光谱仪和780nm激光器而获得的拉曼光谱,该白色聚合化合物通过以下方式来形成:将从SunCell®中的分数氢反应运行收集的 Ga_2O_3 溶解于KOH水溶液中,让纤维生长并漂浮至表面,在该表面处通过过滤收集该纤维。

[0185] 图35C至图35D为对白色聚合化合物使用Horiba Jobin Yvon LabRam ARAMIS光谱仪和325nm激光而获得的拉曼光谱,该白色聚合化合物通过以下方式来形成:将从SunCell®中的分数氢反应运行收集的 Ga_2O_3 溶解于KOH水溶液中,让纤维生长并漂浮至表面,在该表面处通过过滤收集该纤维。

[0186] 图36为根据本公开实施方式的暴露于分数氢气体的KCl吸气剂相对于外部TMS的 ^1H MAS NMR谱,其显示出由于分子分数氢的磁性而处于-4.6ppm的高场位移基峰。

[0187] 图37为根据本公开实施方式的包含低能氢物质诸如分子分数氢的反应产物的振动样品磁强计记录,所述低能氢物质由Mo线在包含空气中的水蒸气的气氛中爆轰而形成。

[0188] 图38为根据本公开实施方式的点燃包含所吸收的 H_2 和 H_2O 的80mg银喷丸在5nm至450nm区域的绝对光谱,显示出1.3MW的平均NIST校准光学功率,基本上全部在紫外和极紫外光谱区域中,所述银喷丸来自对银熔体进行气体处理然后将其滴入水储罐中。

[0189] 图39为根据本公开实施方式的在具有约1托的环境 H_2O 蒸气压的气氛氙中点燃泵送至W电极中的熔融银的光谱(100nm至500nm区域,由于蓝宝石光谱仪窗,截止波长为180nm),其示出了在气氛随着银的汽化而变得对UV辐射光学稠厚时转变为5000K黑体辐射的UV线发射。

[0190] 图40为根据本公开实施方式的通过Pyrex SunCell®中的分数氢反应维持的800托氙-氢等离子体的高分辨率可见光谱,其示出了1.3nm的斯塔克增宽,对应于 $3.5 \times 10^{23}/\text{m}^3$ 的电子密度和需要约8.6GW/ m^3 来维持的10%电离分数。

[0191] 图41为根据本公开实施方式的包括 H_2 (1/4) 的旋转振动P分支的来自氙/ H_2 (1/4) 气体的电子束激发的紫外发射光谱。

[0192] 图42为根据本公开实施方式的来自氙/ H_2 (1/4) 气体的电子束激发的紫外发射光谱,其中通过使气体混合物流动穿过冷却至液态氙温度的HayeSep®D色谱柱而极大地增强 H_2 (1/4) 的旋转振动P分支的强度。

[0193] 图43为根据本公开实施方式的来自浸渍有分数氢反应产物气体的KCl的电子束激发的紫外发射光谱,其示出了晶格中的 H_2 (1/4) 旋转振动P分支。

[0194] 图44为根据本公开实施方式的来自浸渍有分数氢的KCl的电子束激发的紫外发射光谱,该光谱示出了晶格中的 H_2 (1/4) 旋转振动P分支,其随温度而改变强度,从而确认了 H_2 (1/4) 旋转振动归属。

[0195] 图45为暴露于因从SunCell®收集的 $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{H}_2$ (1/4) 的热分解而产生的气体的KCl吸气剂的拉曼模式二阶光致发光光谱,其中借助具有325nm激光和1200光栅的Horiba Jobin

Yvon LabRam ARAMIS光谱仪在8000-19,000 cm^{-1} 拉曼位移的范围内记录光谱。

[0196] 图46为在In金属箔上使用Thermo Scientific DXR SmartRaman光谱仪和780nm激光器而获得的拉曼光谱,所述In金属箔暴露于来自一系列在氩气下的固体燃料点燃的产物气体,所述点燃各自包括与30mg去离子水混合的100mg Cu,该拉曼光谱示出了匹配 $\text{H}_2(1/4)$ 的自由转子能量(0.2414eV)的1982 cm^{-1} 处的反向拉曼效应峰。

[0197] 图47A-B为根据本公开实施方式的使用Thermo Scientific DXR SmartRaman光谱仪和780nm激光器在80mg银喷丸点燃之前和之后在铜电极上获得的拉曼光谱,所述银喷丸包含1摩尔% H_2O ,其中通过用点焊机施加12V 35,000A电流来实现爆轰,并且该光谱显示了约1940 cm^{-1} 处的反向拉曼效应峰,其匹配 $\text{H}_2(1/4)$ 的自由转子能量(0.2414eV)。

[0198] 图48A-B为根据本公开实施方式的在暴露于来自连续氩气气氛点燃密封在DSC盘中的固体燃料(100mg Cu+30mg去离子水)的气体的In金属箔上记录的XPS谱。(a)示出了仅存在元素In、C、O和痕量K峰的全扫描谱图。(b)示出了归属于 $\text{H}_2(1/4)$ 的498.5eV处的峰的高分辨率谱,其中基于全谱扫描中不存在任何其他相应的主要元素峰而排除了其他可能性。

[0199] 图49A-B为根据本公开实施方式的Mo分数氢聚合化合物的XPS谱,其具有归属于 $\text{H}_2(1/4)$ 的496eV处的峰,其中因为仅存在Mo、O和C峰而不存在其他候选物的峰,所以排除诸如Na、Sn和Zn之类的其他可能性。强度小于Mo3p的Mo 3s在506eV处,另外的样品也显示 $\text{H}_2(1/4)$ 496eV峰。(A)全谱扫描。(B) $\text{H}_2(1/4)$ 的496eV峰的区域中的高分辨率扫描。

[0200] 图50A-B为根据本公开实施方式的,包含1摩尔% H_2O 的80mg银喷丸点燃后在铜电极上的XPS谱,其中通过使用点焊机施加12V 35,000A电流来实现爆轰。496eV处的峰归属于 $\text{H}_2(1/4)$,其中诸如Na、Sn和Zn之类的其他可能性被排除,因为不存在这些候选物的相应峰。爆轰后的拉曼光谱(图46A-B)示出了约1940 cm^{-1} 处的反向拉曼效应峰,其匹配 $\text{H}_2(1/4)$ 的自由转子能量(0.2414eV)。

[0201] 图51A-E为根据本公开实施方式的利用HP 5890系列II气相色谱仪记录的对照气相色谱图,该色谱仪使用安捷伦分子筛柱,采用氦载气和设定在60℃的热导检测器(TCD),使得任何 H_2 峰都是正的。(A)1000托氢的气相色谱图,其显示出在10分钟处的正峰。(B)1000托甲烷的气相色谱图,其显示出在17分钟处的小的正 H_2O 污染峰和在50.5分钟处的正甲烷峰。(C)1000托氢(90%)与甲烷(10%)混合物的气相色谱图,其显示出在10分钟处的正氢峰和在50.2分钟处的正甲烷峰。(D)760托空气的气相色谱图,其显示出在17.1分钟处的非常小的正 H_2O 峰、在17.6分钟处的正氧峰和在35.7分钟处的正氮峰。(E)将镓金属加热至950℃而得到的气体的气相色谱图,其未显示出峰。

[0202] 图52A-B是通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自在SunCell®中运行的分数氢反应。根据本公开的实施方式,在气体释放之后立刻用HP 5890系列II气相色谱仪记录气相色谱图,该色谱仪使用安捷伦分子筛柱,采用氦载气和设定在60℃的热导检测器(TCD),使得任何 H_2 峰都是正的。(A)从经NaOH处理的 Ga_2O_3 析出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自SunCell®中的分数氢反应运行,该气相色谱图显示出在10分钟处的已知的正氢峰和在9分钟处的归属于 $\text{H}_2(1/4)$ 的新颖负峰,该新颖负峰分别在8.9分钟和9.3分钟处具有正前缘和后缘。没有已知的气体具有比 H_2 或He快的迁移时间和比 H_2 或He高的热导率,这是分数氢特性的并且鉴别分数氢,这是因其由于示例性的 $\text{H}_2(1/4)$ 具有小64倍的体积和小16倍的弹道横截面而具有大得多的平均自由路径。(B)归

属于 H_2 (1/4) 的负峰的展开图。

[0203] 图53为根据本公开实施方式的通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自 SunCell®中的分数氢反应运行,该气相色谱图是在记录图52A至图52B中所示气相色谱图的时间之后让容器中的气体静置超过24小时后记录的。再次观察到10分钟处的氢峰,但不存在具有比氢短的保留时间的新颖负峰,此与甚至与 H_2 相比 H_2 (1/4) 的较小大小和相应的高扩散率一致。37分钟处的正峰对应于痕量氮污染。

[0204] 图54A-B是通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自 SunCell®中的第二分数氢反应运行。根据本公开的实施方式用HP 5890系列II气相色谱仪记录气相色谱图,该色谱仪使用安捷伦分子筛柱,采用氢载气和设定在60℃的热导检测器(TCD),使得任何 H_2 峰都是正的。(A) 从经NaOH处理的 Ga_2O_3 析出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自 SunCell®中的分数氢反应运行,该气相色谱图显示出在10分钟处的已知的正氢峰、在42.4分钟处的正未知峰、在51.8分钟处的正甲烷峰和在8.76分钟处的归属于 H_2 (1/4) 的新颖负峰,该新颖负峰分别在8.66分钟和9.3分钟处具有正前缘和后缘。没有已知的气体具有比 H_2 或He快的迁移时间和比 H_2 或He高的热导率,这是分数氢特性的并且鉴别分数氢,这是因其由于示例性的 H_2 (1/4) 具有小64倍的体积和小16倍的弹道横截面而具有大得多的平均自由路径。(B) 归属于 H_2 (1/4) 的负峰的展开图。

[0205] 图55A-B是通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自在 SunCell®中运行的第三分数氢反应运行。根据本公开的实施方式用HP 5890系列II气相色谱仪记录气相色谱图,该色谱仪使用安捷伦分子筛柱,采用氢载气和设定在60℃的热导检测器(TCD),使得任何 H_2 峰都是正的。(A) 从经NaOH处理的 Ga_2O_3 逸出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自 SunCell®中的分数氢反应运行,该气相色谱图显示出在10分钟处的已知的正氢峰和在51.9分钟处的正甲烷峰和在8.8分钟处的归属于 H_2 (1/4) 的新颖负峰,该新颖负峰分别在8.7分钟和9.3分钟处具有正前缘和后缘。没有已知的气体具有比 H_2 或He快的迁移时间和比 H_2 或He高的热导率,这是分数氢特性的并且鉴别分数氢,这是因其由于示例性的 H_2 (1/4) 具有小64倍的体积和小16倍的弹道横截面而具有大得多的平均自由路径。(B) 归属于 H_2 (1/4) 的负峰的展开图。

[0206] 图56为根据本公开实施方式的通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的气体的质谱,其确认了氢和甲烷的存在,该 Ga_2O_3 收集自 SunCell®中的分数氢反应运行,该质谱是在记录图55A至图55B中所示的气相色谱图之后记录的。甲烷形成是特别的并且归因于高能分数氢等离子体,该高能分数氢等离子体引起氢与痕量 CO_2 或来自不锈钢反应器的碳发生反应。

[0207] 图57为根据本公开实施方式的通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自 SunCell®中的第三分数氢反应运行,该气相色谱图是在记录图55A至图52B中所示气相色谱图的时间之后让气体容器静置超过24小时后记录的。再次观察到10分钟处的氢峰和53.7分钟处的甲烷峰,但不存在具有比氢短的保留时间的新颖负峰,此与甚至与 H_2 相比 H_2 (1/4) 的较小大小和相应的高扩散率一致。

[0208] 图58为根据本公开实施方式的从经NaOH处理的 Ga_2O_3 析出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自 SunCell®中的第四分数氢反应运行,该气相色谱图显示出在10分钟处

的已知的正氢峰和在7.4分钟处的归属于 H_2 (1/4) 的新颖正峰,这是因为没有已知气体具有比 H_2 或He快的迁移时间。 H_2 (1/4) 峰的正性质指示分数氢气体在氦载气中的浓度较低。

[0209] 图59是分数氢气的气相色谱图,该分数氢气体从 SunCell®流出,吸收进作为溶剂的液态氦中,并然后通过让液态氦在升温至27°C之后蒸发而释放。相较于使用采用热导检测器和氦载气的第二HP 5890系列II气相色谱仪在安捷伦柱上在12.58分钟处观察到的氢,在8.05分钟处观察到分数氢峰。

[0210] 图60是分子分数氢气的气相色谱图,该分子分数氢气体使用冷却至液态氦温度的 HayeSep®D色谱柱来富集,使用通过低温泵系统冷却至55K的带阀微腔室与痕量空气一起液化,通过升温至室温而蒸发以实现1000托腔室压力,并且使用采用热导检测器和氦载气的HP 5890系列II气相色谱仪注入至安捷伦柱上。分别在19分钟和35分钟处观察到氧和氮,并且在6.9分钟处观察到 H_2 (1/4)。

[0211] 图61是通过使用覆盖有氢微波等离子体的钨丝来加热 KNO_3 并解离 H_2 而形成的分数氢反应等离子体的波长校准的光谱(3900-4090Å)。由于通量是由H (1/2) 以整数单位的磁通量子来连接的要求,因此将能量量子化,并且归因于 H^- (1/2) 形成的发射包括在对应束缚-自由谱带中的一系列超精细谱线,该系列超精细谱线具有由磁通量子能量 E_Φ 、自旋-自旋能量 E_{ss} 和所观察结合能峰 E_B^* 的总和给出的能量 $E_{HF} = (j^2 3.00213 \times 10^{-5} + 3.0563) \text{ eV}$,其中根据本公开实施方式,在4000Å至4060Å的区域中的光谱与所预测的发射谱线匹配并且排除诸如氮之类的其他物质。

具体实施方式

[0212] 本文公开了动力产生系统和动力产生的方法,其将从涉及原子氢的反应输出的能量转换为电能和/或热能。这些反应可涉及催化剂系统,该催化剂系统从原子氢中释放能量从而形成电子层处于更靠近原子核位置的较低能态。所释放的动力用于动力产生,并且另外,新的氢物质和化合物是所需的产物。这些能态通过经典物理定律预测,并且需要催化剂来接受来自氢的能量,以便经历相应的能量释放跃迁。

[0213] 经典物理学给出了氢原子、氢负离子、氢分子离子和氢分子的封闭解,并且预测了具有分数主量子数的相应物质。原子氢可经历与某些物质(包括其本身)的催化反应,所述物质可接受原子氢势能的整数倍的能量 $m \cdot 27.2 \text{ eV}$,其中m为整数。所预测的反应涉及共振非辐射能量从原本稳定的原子氢传递至能够接受该能量的催化剂。产物为H (1/p),其为称作“分数氢原子”的原子氢的分数里德伯态,其中 $n = 1/2, 1/3, 1/4, \dots, 1/p$ ($p \leq 137$, 为整数) 替代用于氢激发态的里德伯方程中的众所周知的参数 $n = \text{整数}$ 。各分数氢态也包含电子、质子和光子,但来自光子的场贡献增加结合能而非减小结合能,其对应于能量解吸而非吸收。因为原子氢的势能为27.2eV,所以m个H原子充当另外第(m+1)个H原子的 $m \cdot 27.2 \text{ eV}$ 的催化剂[R.Mills, The Grand Unified Theory of Classical Physics; 2016年9月版,发布于<https://brilliantlightpower.com/book-download-and-streaming/> (“Mills GUTCP”)]。例如,一H原子可经由跨空间能量转移(诸如通过磁或感应电偶极-偶极耦合)从

另一个H接受27.2eV而充当其催化剂,从而形成随具有短波限和 $m^2 \cdot 13.6 \text{ eV} \left(\frac{91.2}{m^2} \text{ nm} \right)$ 的

能量的连续谱带发射而衰减的中间体。除原子H以外,从原子H接受 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 且伴随分子势能大小减少相同能量的分子也可充当催化剂。 H_2O 的势能为 81.6eV 。然后,通过相同机理,预测通过金属氧化物的热力学上有利的还原而形成的新生 H_2O 分子(不是以固态、液态或气态键合的氢)充当催化剂,以形成 $\text{H}(1/4)$,释放能量为 204eV ,其包括 81.6eV 转移至 HOH 和释放截止波长在 10.1nm 处的连续辐射(122.4eV)。

[0214] 在涉及跃迁至 $H\left[\frac{a_H}{p=m+1}\right]$ 态的H原子催化剂反应中, m 个H原子充当另外第 $(m+1)$

个H原子的 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 的催化剂。然后, $m+1$ 个氢原子之间的反应(借此 m 个原子从第 $(m+1)$ 个氢原子以共振和非辐射方式接受 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 而使得 $m\text{H}$ 充当催化剂)通过以下给出:

$$[0215] \quad m \cdot 27.2 \text{ eV} + m\text{H} + \text{H} \rightarrow m\text{H}_{\text{快}}^+ + m\text{e}^- + \text{H}^* \left[\frac{a_H}{m+1} \right] + m \cdot 27.2 \text{ eV} \quad (1)$$

$$[0216] \quad \text{H}^* \left[\frac{a_H}{m+1} \right] \rightarrow \text{H} \left[\frac{a_H}{m+1} \right] + [(m+1)^2 - 1^2] \cdot 13.6 \text{ eV} - m \cdot 27.2 \text{ eV} \quad (2)$$

$$[0217] \quad m\text{H}_{\text{快}}^+ + m\text{e}^- \rightarrow m\text{H} + m \cdot 27.2 \text{ eV} \quad (3)$$

[0218] 并且,总反应为

$$[0219] \quad \text{H} \rightarrow \text{H} \left[\frac{a_H}{p=m+1} \right] + [(m+1)^2 - 1^2] \cdot 13.6 \text{ eV} \quad (4)$$

[0220] 关于新生 H_2O 的势能的催化反应($m=3$) [R.Mills, The Grand Unified Theory of Classical Physics; 2016年9月出版,发布于<https://brilliantlightpower.com/book-download-and-streaming/>]为

$$[0221] \quad 81.6 \text{ eV} + \text{H}_2\text{O} + \text{H} \left[a_H \right] \rightarrow 2\text{H}_{\text{快}}^+ + \text{O}^- + \text{e}^- + \text{H}^* \left[\frac{a_H}{4} \right] + 81.6 \text{ eV} \quad (5)$$

$$[0222] \quad \text{H}^* \left[\frac{a_H}{4} \right] \rightarrow \text{H} \left[\frac{a_H}{4} \right] + 122.4 \text{ eV} \quad (6)$$

$$[0223] \quad 2\text{H}_{\text{快}}^+ + \text{O}^- + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 81.6 \text{ eV} \quad (7)$$

[0224] 并且,总反应为

$$[0225] \quad \text{H} \left[a_H \right] \rightarrow \text{H} \left[\frac{a_H}{4} \right] + 81.6 \text{ eV} + 122.4 \text{ eV} \quad (8)$$

[0226] 在能量传递至催化剂(式(1)和(5))之后,形成具有H原子半径和中心场为质子中心场的 $m+1$ 倍的中间体 $\text{H}^* \left[\frac{a_H}{m+1} \right]$ 。预测半径随着电子经历径向加速度而减小至稳定态,该稳定态的半径为未经催化的氢原子半径的 $1/(m+1)$,且释放出 $m^2 \cdot 13.6\text{eV}$ 能量。由于

$H^* \left[\frac{a_H}{m+1} \right]$ 中间体引起的极紫外连续辐射谱带 (如式 (2) 和式 (6)) 预计具有通过以下给出的短波限和能量 $E_{\left(H \rightarrow H \left[\frac{a_H}{p=m+1} \right] \right)}$;

$$[0227] \quad E_{\left(H \rightarrow H \left[\frac{a_H}{p=m+1} \right] \right)} = m^2 \cdot 13.6 \text{ eV} \quad ; \quad \lambda_{\left(H \rightarrow H \left[\frac{a_H}{p=m+1} \right] \right)} = \frac{91.2}{m^2} \text{ nm} \quad (9)$$

[0228] 并且延伸至比相应的波限更长的波长。这里, 预测由于 $H^*[a_H/4]$ 中间体的衰减而引起的极紫外连续辐射谱带为在 $E = m^2 \cdot 13.6 = 9 \cdot 13.6 = 122.4 \text{ eV}$ (10.1nm) 处具有短波限 [其中在式 (9) 中, $p=m+1=4$ 且 $m=3$] 并延伸至更长的波长。观察到对于理论上预测的 H 向较低能量 (所谓的“分数氢”态 $H(1/4)$) 跃迁而言的 10.1nm 处且到达更长波长的连续辐射谱带, 其仅由包含一些氢的脉冲箍缩气体放电引起。通过式 (1) 和式 (5) 预测的另一观察结果为由快 H^+ 的复合形成快激发态 H 原子。这些快速原子引起巴尔莫 α 发射增宽。大于 50eV 的巴尔莫 α 线增宽表明在某些混合氢等离子体中具有动能异常高的氢原子群体, 这是一个已经确立的现象, 其中原因是由于在分数氢的形成中所释放的能量。在连续发射氢箍缩等离子体中观察到快 H 。

[0229] 用以形成分数氢的其他催化剂和反应是可能的。可基于其已知的电子能级来鉴别的特定物质 (例如, He^+ 、 Ar^+ 、 Sr^+ 、 K 、 Li 、 HCl 和 NaH 、 OH 、 SH 、 SeH 、新生 H_2O 、 nH (n =整数)) 需要与原子氢一起来催化该过程。该反应涉及非辐射性能量转移, 随后是 $q \cdot 13.6 \text{ eV}$ 连续发射或 $q \cdot 13.6 \text{ eV}$ 转移至 H 以形成异常热的激发态 H 和能量低于对应于分数主量子数的未反应原子氢的氢原子。也就是说, 在氢原子的主能级的式中:

$$[0230] \quad E_n = -\frac{e^2}{n^2 8\pi\epsilon_0 a_H} = -\frac{13.598 \text{ eV}}{n^2} \quad (10)$$

$$[0231] \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

[0232] 其中 a_H 为氢原子的波尔半径 (52.947pm), e 为电子电荷的大小, 且 ϵ_0 为真空电容率, 分数量子数:

$$[0233] \quad n=1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{p}; \text{ 其中 } p \leq 137, \text{ 为整数} \quad (12)$$

[0234] 取代用于氢激发态的里德伯式中众所周知的参数 n =整数并表示称为“分数氢”的较低能态氢原子。氢的 $n=1$ 态和氢的 $n=\frac{1}{\text{整数}}$ 态为非辐射性的, 但经由非辐射性能量转移, 两种非辐射状态之间的跃迁 (比如 $n=1$ 至 $n=1/2$) 是可能的。氢为由式 (10) 和 (12) 给出的稳态的特例, 其中氢或分数氢原子的相应半径是由下式给出:

$$[0235] \quad r = \frac{a_H}{p} \quad (13)$$

[0236] 其中 $p=1, 2, 3, \dots$ 。为使能量守恒, 能量必须以正常 $n=1$ 态的氢原子的势能的整

数单位从氢原子转移至催化剂,且半径跃迁至 $\frac{a_H}{m+p}$ 。通过使普通氢原子与具有以下的净

反应焓的合适催化剂反应而形成分数氢:

$$[0237] \quad m \cdot 27.2 \text{ eV} \quad (14)$$

其中m为整数。据信,随着净反应焓更接近地匹配 $m \cdot 27.2 \text{ eV}$,催化的速率增加。已经发现,净反应焓在 $m \cdot 27.2 \text{ eV}$ 的 $\pm 10\%$ 、优选 $\pm 5\%$ 范围内的催化剂适于大多数应用。

[0238] 催化反应涉及两步能量释放:非辐射性能量转移至催化剂,接着随着半径减小,进行另外的能量释放,直至相应的稳定最终状态。因此,一般反应由下式给出:

$$[0239] \quad m \cdot 27.2 \text{ eV} + \text{Cat}^{q+} + H \left[\frac{a_H}{p} \right] \rightarrow \text{Cat}^{(q+r)+} + re^- + H^* \left[\frac{a_H}{(m+p)} \right] + m \cdot 27.2 \text{ eV} \quad (15)$$

$$[0240] \quad H^* \left[\frac{a_H}{(m+p)} \right] \rightarrow H \left[\frac{a_H}{(m+p)} \right] + [(p+m)^2 - p^2] \cdot 13.6 \text{ eV} - m \cdot 27.2 \text{ eV} \quad (16)$$

$$[0241] \quad \text{Cat}^{(q+r)+} + re^- \rightarrow \text{Cat}^{q+} + m \cdot 27.2 \text{ eV} \text{ 和} \quad (17)$$

[0242] 总反应为

$$[0243] \quad H \left[\frac{a_H}{p} \right] \rightarrow H \left[\frac{a_H}{(m+p)} \right] + [(p+m)^2 - p^2] \cdot 13.6 \text{ eV} \quad (18)$$

[0244] q、r、m和p为整数。 $H^* \left[\frac{a_H}{(m+p)} \right]$ 具有氢原子的半径(对应于分母中为1)和等于质子中心场(m+p)倍的中心场,且 $H \left[\frac{a_H}{(m+p)} \right]$ 是半径为H半径的 $\frac{1}{(m+p)}$ 的对应稳态。

[0245] 催化剂产物H(1/p)也可与电子反应而形成分数氢氢负离子 H^- (1/p),或者两个H(1/p)可发生反应而形成相应的分子分数氢 H_2 (1/p)。具体而言,催化剂产物H(1/p)也可与电子反应而形成具有结合能 E_b 的新氢负离子 H^- (1/p):

$$[0246] \quad E_b = \frac{\hbar^2 \sqrt{s(s+1)}}{8\mu_e a_0^2 \left[\frac{1+\sqrt{s(s+1)}}{p} \right]^2} - \frac{\pi\mu_0 e^2 \hbar^2}{m_e^2} \left(\frac{1}{a_H^3} + \frac{2^2}{a_0^3 \left[\frac{1+\sqrt{s(s+1)}}{p} \right]^3} \right) \quad (19)$$

[0247] 其中p=整数>1, $s=1/2$, $\hbar$ 为普朗克常数拔(Planck's constant bar), μ_0 为真空

的磁导率, m_e 为电子的质量, μ_e 为由 $\mu_e = \frac{m_e m_p}{\frac{m_e}{\sqrt{3}} + m_p}$ 给出的约化电子质量,其中 m_p 为质子的质

量, a_0 为波尔半径,且离子半径为 $r_1 = \frac{a_0}{p} \left(1 + \sqrt{s(s+1)} \right)$ 。根据式(19),氢负离子的计算电离能

为0.75418eV,且实验值为 $6082.99 \pm 0.15 \text{cm}^{-1}$ (0.75418eV)。分数氢负离子的结合能可通过X射线光电子能谱法(XPS)测量。

[0248] 高场偏移的NMR峰是存在较低能态氢的直接证据,所述低能态氢相对于普通氢负离子半径减小且质子的反磁性屏蔽增大。位移通过两个电子的反磁性和大小为p的光子场的贡献总和给出(Mills GUTCP式(7.87)):

$$[0249] \quad \frac{\Delta B_T}{B} = -\mu_0 \frac{pe^2}{12m_e a_0 \left(1 + \sqrt{s(s+1)}\right)} (1 + p\alpha^2) = -\left(p29.9 + p^2 1.59 \times 10^{-3}\right) \text{ppm} \quad (20)$$

[0250] 其中第一项适用于 H^- ,其中 $p=1$ 并且对于 $\text{H}^-(1/p)$, $p=\text{整数}>1$,且 α 为精细结构常数。所预测的分数氢负离子峰相对于普通氢负离子异常地向高场偏移。在一个实施方式中,所述峰是TMS的高场。相对于TMS的NMR位移可以比单独的或构成化合物的普通 H^- 、 H 、 H_2 或 H^+ 中的至少一者的已知NMR位移大。该位移可大于以下中的至少一者:0、-1、-2、-3、-4、-5、-6、-7、-8、-9、-10、-11、-12、-13、-14、-15、-16、-17、-18、-19、-20、-21、-22、-23、-24、-25、-26、-27、-28、-29、-30、-31、-32、-33、-34、-35、-36、-37、-38、-39和-40ppm。相对于裸质子的绝对位移范围(其中TMS的位移相对于裸质子为约-31.5)可为 $(p29.9 + p^2 2.74) \text{ppm}$ (式(20)),其约在以下中的至少一者的范围内: $\pm 5 \text{ppm}$ 、 $\pm 10 \text{ppm}$ 、 $\pm 20 \text{ppm}$ 、 $\pm 30 \text{ppm}$ 、 $\pm 40 \text{ppm}$ 、 $\pm 50 \text{ppm}$ 、 $\pm 60 \text{ppm}$ 、 $\pm 70 \text{ppm}$ 、 $\pm 80 \text{ppm}$ 、 $\pm 90 \text{ppm}$ 和 $\pm 100 \text{ppm}$ 。相对于裸质子的绝对位移的范围可为 $-(p29.9 + p^2 1.59 \times 10^{-3}) \text{ppm}$ (式(20)),其约在以下中的至少一者的范围内:0.1%至99%、1%至50%和1%至10%。在另一个实施方式中,分数氢物质(诸如,分数氢原子、氢负离子或分子)在固体基质(诸如,氢氧化物诸如NaOH或KOH的基质)中的存在可引起基质质子向高场偏移。基质质子(诸如NaOH或KOH的基质质子)可交换。在一个实施方式中,该位移可导致基质峰在相对于TMS约-0.1ppm至-5ppm的范围内。NMR测定可包括魔角旋转 ^1H 核磁共振谱法(MAS ^1H NMR)。

[0251] $\text{H}(1/p)$ 可与质子反应且两个 $\text{H}(1/p)$ 可发生反应以分别形成 $\text{H}_2(1/p)^+$ 和 $\text{H}_2(1/p)$ 。利用非辐射约束由椭球坐标中的拉普拉斯算子求解氢分子离子和分子电荷和电流密度函数、键距和能量。

$$[0252] \quad (\eta - \zeta)R_\xi \frac{\partial}{\partial \xi} \left(R_\xi \frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right) + (\zeta - \xi)R_\eta \frac{\partial}{\partial \eta} \left(R_\eta \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right) + (\xi - \eta)R_\zeta \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(R_\zeta \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}\right) = 0 \quad (21)$$

[0253] 在长椭球体分子轨道的各焦点处具有+pe的中心场的氢分子离子的总能量 E_T 为:

$$\begin{aligned}
 [0254] \quad E_T = -p^2 & \left\{ \frac{e^2}{8\pi\epsilon_o a_H} (4\ln 3 - 1 - 2\ln 3) \left[1 + p \sqrt{\frac{2e^2}{4\pi\epsilon_o (2a_H)^3} \frac{m_e}{m_e c^2}} \right] \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} \hbar \sqrt{\frac{pe^2}{4\pi\epsilon_o \left(\frac{2a_H}{p}\right)^3} - \frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{3a_H}{p}\right)^3}} \right\} \\
 & \quad \mu \\
 & = -p^2 16.13392 \text{ eV} - p^3 0.118755 \text{ eV} \quad (22)
 \end{aligned}$$

[0255] 其中p为整数,c为真空中的光速,且μ为约化的核质量。在长椭球体分子轨道的各焦点处具有+pe的中心场的氢分子的总能量为:

$$\begin{aligned}
 [0256] \quad E_T = -p^2 & \left\{ \frac{e^2}{8\pi\epsilon_o a_0} \left[\left(2\sqrt{2} - \sqrt{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \ln \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}-1} - \sqrt{2} \right] \left[1 + p \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_o a_0^3} \frac{m_e}{m_e c^2}} \right] \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} \hbar \sqrt{\frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{a_0}{p}\right)^3} - \frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{\left(1+\frac{1}{\sqrt{2}}\right)a_0}{p}\right)^3}} \right\} \\
 & \quad \mu \\
 & = -p^2 31.351 \text{ eV} - p^3 0.326469 \text{ eV} \quad (23)
 \end{aligned}$$

[0257] 氢分子 $H_2(1/p)$ 的键解离能 E_D 为对应氢原子的总能量与 E_T 之间的差:

$$[0258] \quad E_D = E(2H(1/p)) - E_T \quad (24)$$

[0259] 其中

$$[0260] \quad E(2H(1/p)) = -p^2 27.20 \text{ eV} \quad (25)$$

[0261] E_D 由式(23-25)给出:

$$[0262] \quad E_D = -p^2 27.20 \text{ eV} - E_T$$

$$[0263] \quad = -p^2 27.20 \text{ eV} - (-p^2 31.351 \text{ eV} - p^3 0.326469 \text{ eV})$$

$$[0264] \quad = p^2 4.151 \text{ eV} + p^3 0.326469 \text{ eV} \quad (26)$$

[0265] $H_2(1/p)$ 可由X射线光电子能谱法(XPS)鉴别,其中除电离电子之外的电离产物可为以下可能性中的至少一者:诸如包含两个质子和一个电子的那些、氢(H)原子、分数氢原子、分子离子、氢分子离子和 $H_2(1/p)^+$,其中能量可因基质而位移。

[0266] 催化产物气体的NMR提供了对 $H_2(1/p)$ 的理论预测的化学位移的确定性测试。一般来讲,由于椭球坐标中的分数半径(其中电子显著更靠近原子核), $H_2(1/p)$ 的 1H NMR共振预测为在 H_2 的NMR共振的高场。 $H_2(1/p)$ 的预测的位移 $\frac{\Delta B_T}{B}$ 由两个电子的反磁性和大小为p的光

子场的贡献的总和给出 (Mills GUTCP式 (11.415-11.416)):

$$[0267] \quad \frac{\Delta B_T}{B} = -\mu_0 \left(4 - \sqrt{2} \ln \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}-1} \right) \frac{pe^2}{36a_0 m_e} (1 + p\alpha^2) \quad (27)$$

$$[0268] \quad \frac{\Delta B_T}{B} = -(p28.01 + p^2 1.49 \times 10^{-3}) \text{ppm} \quad (28)$$

[0269] 其中第一项适用于 H_2 , 其中 $p=1$, 并且对于 $H_2(1/p)$, p =大于1的整数。实验绝对 H_2 气相共振位移-28.0ppm与预测的绝对气相位移-28.01ppm(式(28))十分相符。预测的分子分数氢的峰相对于普通 H_2 异常地向高场偏移。在一个实施方式中, 所述峰是TMS的高场。相对于TMS的NMR位移可以比单独的或构成化合物的普通 H^- 、 H 、 H_2 或 H^+ 中的至少一者的已知NMR位移大。该位移可大于以下中的至少一者: 0、-1、-2、-3、-4、-5、-6、-7、-8、-9、-10、-11、-12、-13、-14、-15、-16、-17、-18、-19、-20、-21、-22、-23、-24、-25、-26、-27、-28、-29、-30、-31、-32、-33、-34、-35、-36、-37、-38、-39和-40ppm。相对于裸质子的绝对位移的范围(其中TMS的位移相对于裸质子为约-31.5ppm)可为 $-(p28.01 + p^2 2.56) \text{ppm}$ (式(28)), 其约在以下的至少一者中的范围内: $\pm 5 \text{ppm}$ 、 $\pm 10 \text{ppm}$ 、 $\pm 20 \text{ppm}$ 、 $\pm 30 \text{ppm}$ 、 $\pm 40 \text{ppm}$ 、 $\pm 50 \text{ppm}$ 、 $\pm 60 \text{ppm}$ 、 $\pm 70 \text{ppm}$ 、 $\pm 80 \text{ppm}$ 、 $\pm 90 \text{ppm}$ 和 $\pm 100 \text{ppm}$ 。相对于裸质子的绝对位移的范围可为 $-(p28.01 + p^2 1.49 \times 10^{-3}) \text{ppm}$ (式(28)), 其约在以下中的至少一者的范围内: 0.1%至99%、1%至50%和1%至10%。

[0270] 氢型分子 $H_2(1/p)$ 从 $v=0$ 跃迁至 $v=1$ 的振动能 E_{vib} 为:

$$[0271] \quad E_{\text{vib}} = p^2 0.515902 \text{eV} \quad (29)$$

[0272] 其中 p 为整数。

[0273] 氢型分子 $H_2(1/p)$ 从 J 跃迁至 $J+1$ 的旋转能 E_{rot} 为:

$$[0274] \quad E_{\text{rot}} = E_{J+1} - E_J = \frac{\hbar^2}{I} [J+1] = p^2 (J+1) 0.01509 \text{eV} \quad (30)$$

[0275] 其中 p 为整数且 I 为转动惯量。在气体中的和捕获于固体基质中的电子束激发分子上观察到 $H_2(1/4)$ 的旋转振动发射。

[0276] 旋转能的 p^2 相关性由核间距离的反向 p 相关性和对转动惯量 I 的相应影响引起。 $H_2(1/p)$ 的预测的核间距离 $2c'$ 为

$$[0277] \quad 2c' = \frac{a_0 \sqrt{2}}{p} \quad (31)$$

[0278] $H_2(1/p)$ 的旋转能和振动能中的至少一者可通过电子束激发发射光谱、拉曼光谱和傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱中的至少一者来测量。 $H_2(1/p)$ 可捕获于用于测量的基质中(诸如于 MOH 、 MX 和 M_2CO_3 (M =碱金属; X =卤离子)中的至少一者中)。

[0279] 在一个实施方式中, 观察到作为约 1950cm^{-1} 处的反向拉曼效应 (IRE) 峰的分子分数氢产物。通过使用包含与支持表面增强拉曼散射 (SERS) 的拉曼激光波长相当的粗糙度特征物或粒度的导电材料来增强峰, 以显示IRE峰。

[0280] I. 催化剂

[0281] 在本公开中, 诸如分数氢反应、 H 催化、 H 催化反应、涉及氢时的催化、氢形成分数氢

的反应和分数氢形成反应均是指诸如由式 (14) 限定的催化剂与原子H形成具有由式 (10) 和 (12) 给出的能级的氢态的式 (15-18) 的反应。当提及进行将H催化至具有由式 (10) 和式 (12) 给出的能级的H态或分数氢态的反应混合物时, 诸如分数氢反应物、分数氢反应混合物、催化剂混合物、形成分数氢的反应物、产生或形成低能态氢或分数氢的反应物的相应术语也可互换地使用。

[0282] 本公开的催化低能氢跃迁需要从原子H接受能量以引起跃迁的催化剂, 该催化剂可呈未催化原子氢的势能27.2eV的整数m倍的吸热化学反应的形式。吸热催化剂反应可以是诸如原子或离子之类的物质电离一个或多个电子(例如, 对于 $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^{2+}$, $m=3$), 并且可还包含键断裂与一个或多个电子从初始键的一个或多个搭配物电离的协同反应(例如, 对于 $\text{NaH} \rightarrow \text{Na}^{2+} + \text{H}$, $m=2$)。 He^+ 因为以54.417eV(其为 $2 \cdot 27.2\text{eV}$)电离, 所以其满足催化剂标准——焓变等于27.2eV的整数倍的化学或物理过程。整数个氢原子也可充当具有27.2eV焓的整数倍的催化剂。催化剂能够以约 $27.2\text{eV} \pm 0.5\text{eV}$ 和 $\frac{27.2}{2} \text{eV} \pm 0.5\text{eV}$ 中的一者的整数单位从原子氢接受能量。

[0283] 在一个实施方式中, 催化剂包含原子或离子M, 其中t个电子各自从原子或离子M电离至连续能级, 以使得t个电子的电离能的总和大致为 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 和 $m \cdot \frac{27.2}{2} \text{eV}$ 中的一者, 其中m为整数。

[0284] 在一个实施方式中, 催化剂包含双原子分子MH, 其中M-H键的断裂加上t个电子各自从原子M电离至连续能级使得键能和t个电子的电离能的总和大约为 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 和 $m \cdot \frac{27.2}{2} \text{eV}$ 中的一者, 其中m为整数。

[0285] 在一个实施方式中, 催化剂包含选自以下的原子、离子和/或分子: AlH、AsH、BaH、BiH、CdH、ClH、CoH、GeH、InH、NaH、NbH、OH、RhH、RuH、SH、SbH、SeH、SiH、SnH、SrH、TlH、 C_2 、 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 NO_2 和 NO_3 分子, 以及Li、Be、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Kr、Rb、Sr、Nb、Mo、Pd、Sn、Te、Cs、Ce、Pr、Sm、Gd、Dy、Pb、Pt、Kr、 2K^+ 、 He^+ 、 Ti^{2+} 、 Na^+ 、 Rb^+ 、 Sr^+ 、 Fe^{3+} 、 Mo^{2+} 、 Mo^{4+} 、 In^{3+} 、 He^+ 、 Ar^+ 、 Xe^+ 、 Ar^{2+} 和 H^+ , 以及 Ne^+ 和 H^+ 原子或离子。

[0286] 在其他实施方式中, 通过如下方式提供用以产生分数氢的 MH^- 型氢催化剂: 电子转移至受体A, M-H键断裂以及t个电子各自从原子M电离至连续能级, 使得包括MH与A的电子亲和力和(EA)之差、M-H键能和t个电子从M电离的电离能的电子传递能量之和为大约 $m \cdot 27.2\text{eV}$, 其中m为整数。能够提供大约 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 的净反应焓的 MH^- 型氢催化剂为 OH^- 、 SiH^- 、 CoH^- 、 NiH^- 和 SeH^- 。

[0287] 在其他实施方式中, 通过如下提供用以产生分数氢的 MH^+ 型氢催化剂: 从可带负电的供体A转移电子, M-H键断裂以及t个电子各自从原子M电离至连续能级, 使得包括MH与A的电离能之差、M-H键能以及t个电子从M电离的电离能的电子传递能量之和为大约 $m \cdot 27.2\text{eV}$, 其中m为整数。

[0288] 在一个实施方式中, 分子或带正电或带负电的分子离子中的至少一者充当从原子H接受约 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 的催化剂, 其中所述分子或带正电或带负电的分子离子的势能的大小减小约 $m \cdot 27.2\text{eV}$ 。示例性的催化剂为 H_2O 、OH、酰胺基 NH_2 和 H_2S 。

[0289] O_2 可充当催化剂或催化剂源。氧分子的键能为5.165eV,并且氧原子的第一、第二和第三电离能分别为13.61806eV、35.11730eV和54.9355eV。反应 $O_2 \rightarrow O + O^{2+}$ 、 $O_2 \rightarrow O + O^{3+}$ 和 $2O \rightarrow 2O^+$ 分别提供约为 E_H 的2倍、4倍和1倍的净焓并且包括通过接受来自H的这些能量而形成分数氢的催化剂反应,以形成分数氢。

[0290] II. 分数氢

[0291] 具有由 $E_B = \frac{13.6 \text{ eV}}{(1/p)^2}$ (其中p为大于1,优选为2至137的整数)给出的结合能的氢原子

是本公开的H催化反应的产物。原子、离子或分子的结合能(也被称作电离能)是从原子、离子或分子移除一个电子所需的能量。具有式(10)和式(12)中给出的结合能的氢原子在下

文被称作“分数氢原子”或“分数氢”。具有半径 $\frac{a_H}{p}$ (其中 a_H 为普通氢原子的半径且p为整数)

的分数氢的标记为 $H \left[\frac{a_H}{p} \right]$ 。具有半径 a_H 的氢原子在下文中被称作“普通氢原子”或“正常氢

原子”。普通原子氢的特征在于其结合能为13.6eV。

[0292] 根据本公开,提供一种具有根据式(19)的结合能的分数氢氢负离子(H^-),所述结合能在p=2到最高23时大于普通氢负离子的结合能(约0.75eV),而p=24(H^-)时的结合能小于普通氢负离子的结合能。对于式(19)的p=2至p=24,氢负离子结合能分别为3.6、6.6、11.2、16.7、22.8、29.3、36.1、42.8、49.4、55.5、61.0、65.6、69.2、71.6、72.4、71.6、68.8、64.0、56.8、47.1、34.7、19.3和0.69eV。本文还提供包含新颖氢负离子的示例性组合物。

[0293] 还提供包含一种或多种分数氢氢负离子和一种或多种其他元素的示例性化合物。此类化合物被称为“分数氢氢化物化合物(hydrino hydride compound)”。

[0294] 普通氢物质的特征在于以下结合能:(a)氢负离子,0.754eV(“普通氢负离子”);(b)氢原子(“普通氢原子”),13.6eV;(c)双原子氢分子,15.3eV(“普通氢分子”);(d)氢分子离子,16.3eV(“普通氢分子离子”);和(e) H_3^+ ,22.6eV(“普通三氢分子离子”)。本文中,关于氢的形式,“正常”与“普通”同义。

[0295] 根据本公开的另一个实施方式,提供一种化合物,其包含至少一种结合能增加的

氢物质,诸如:(a)氢原子,其具有约 $\frac{13.6 \text{ eV}}{\left(\frac{1}{p}\right)^2}$ 诸如在 $\frac{13.6 \text{ eV}}{\left(\frac{1}{p}\right)^2}$ 的约0.9倍至1.1倍的范围内的

结合能,其中p为2至137的整数;(b)氢负离子(H^-),其具有约

$$\text{结合能} = \frac{\hbar^2 \sqrt{s(s+1)}}{8\mu_e a_0^2 \left[\frac{1 + \sqrt{s(s+1)}}{p} \right]^2} - \frac{\pi\mu_0 e^2 \hbar^2}{m_e^2} \left(\frac{1}{a_H^3} + \frac{2^2}{a_0^3 \left[\frac{1 + \sqrt{s(s+1)}}{p} \right]^3} \right) \quad \text{诸如在}$$

$$\text{结合能} = \frac{\hbar^2 \sqrt{s(s+1)}}{8\mu_e a_0^2 \left[\frac{1+\sqrt{s(s+1)}}{p} \right]^2} - \frac{\pi\mu_0 e^2 \hbar^2}{m_e^2} \left(\frac{1}{a_H^3} + \frac{2^2}{a_0^3 \left[\frac{1+\sqrt{s(s+1)}}{p} \right]^3} \right) \text{的约} 0.9 \text{ 倍至}$$

1.1 倍的范围内的结合能, 其中 p 为 2 至 24 的整数; (c) $H_4^+(1/p)$; (d) 三分数氢分子离子

$$H_3^+(1/p), \text{ 其具有约 } \frac{22.6}{\left(\frac{1}{p}\right)^2} \text{ eV}, \text{ 诸如在 } \frac{22.6}{\left(\frac{1}{p}\right)^2} \text{ eV} \text{ 的约} 0.9 \text{ 倍至} 1.1 \text{ 倍的范围内的结合能, 其}$$

$$\text{中 p 为 2 至 137 的整数; (e) 双分数氢, 其具有约 } \frac{15.3}{\left(\frac{1}{p}\right)^2} \text{ eV}, \text{ 诸如在 } \frac{15.3}{\left(\frac{1}{p}\right)^2} \text{ eV} \text{ 的约} 0.9 \text{ 倍至} 1.1$$

$$\text{倍的范围内的结合能, 其中 p 为 2 至 137 的整数; (f) 双分数氢分子离子, 其具有约 } \frac{16.3}{\left(\frac{1}{p}\right)^2} \text{ eV},$$

$$\text{诸如在 } \frac{16.3}{\left(\frac{1}{p}\right)^2} \text{ eV} \text{ 的约} 0.9 \text{ 倍至} 1.1 \text{ 倍的范围内的结合能, 其中 p 为整数, 优选为 2 至 137 的整}$$

数。

[0296] 根据本公开的另一个实施方式, 提供一种化合物, 其包含至少一种结合能增加的氢物质, 诸如: (a) 双分数氢分子离子, 其具有约

$$[0297] \quad E_T = -p^2 \left\{ \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 a_H} (4\ln 3 - 1 - 2\ln 3) \left[1 + p \sqrt{\frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 (2a_H)^3} \frac{1}{m_e c^2}} \right] - \frac{1}{2} \hbar \sqrt{\frac{pe^2}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{2a_H}{p}\right)^3} - \frac{pe^2}{8\pi\epsilon_0 \left(\frac{3a_H}{p}\right)^3}} \frac{1}{\mu} \right\}, \text{ 诸如在}$$

$$= -p^2 16.13392 \text{ eV} - p^3 0.118755 \text{ eV}$$

$$E_T = -p^2 \left\{ \frac{\frac{e^2}{8\pi\epsilon_o a_H} (4\ln 3 - 1 - 2\ln 3) \left[1 + p \sqrt{\frac{2e^2}{4\pi\epsilon_o (2a_H)^3} \frac{m_e}{m_e c^2}} \right]}{-\frac{1}{2} \hbar \sqrt{\frac{pe^2}{4\pi\epsilon_o \left(\frac{2a_H}{p}\right)^3} - \frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{3a_H}{p}\right)^3}} \mu} \right\} \text{的约0.9倍至1.1倍的范围内的}$$

$$= -p^2 16.13392 \text{ eV} - p^3 0.118755 \text{ eV}$$

总能量,其中p为整数, $\hbar$ 为普朗克常数, m_e 为电子的质量,c为真空中的光速,且 μ 为约化的核质量,以及(b)双分数氢分子,其具有约

$$[0298] \quad E_T = -p^2 \left\{ \frac{\frac{e^2}{8\pi\epsilon_o a_0} \left[\left(2\sqrt{2} - \sqrt{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \ln \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}-1} - \sqrt{2} \right] \left[1 + p \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_o a_0^3} \frac{m_e}{m_e c^2}} \right]}{-\frac{1}{2} \hbar \sqrt{\frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{a_0}{p}\right)^3} - \frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{\left(1+\frac{1}{\sqrt{2}}\right)a_0}{p}\right)^3}} \mu} \right\} \text{, 诸如在}$$

$$= -p^2 31.351 \text{ eV} - p^3 0.326469 \text{ eV}$$

$$E_T = -p^2 \left\{ \frac{\frac{e^2}{8\pi\epsilon_o a_0} \left[\left(2\sqrt{2} - \sqrt{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \ln \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}-1} - \sqrt{2} \right] \left[1 + p \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_o a_0^3} \frac{m_e}{m_e c^2}} \right]}{-\frac{1}{2} \hbar \sqrt{\frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{a_0}{p}\right)^3} - \frac{pe^2}{8\pi\epsilon_o \left(\frac{\left(1+\frac{1}{\sqrt{2}}\right)a_0}{p}\right)^3}} \mu} \right\} \text{的约0.9至1.1倍}$$

$$= -p^2 31.351 \text{ eV} - p^3 0.326469 \text{ eV}$$

的范围内的总能量,其中p为整数且 a_0 为波尔半径。

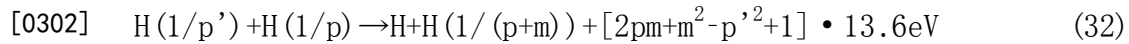
[0299] 根据本公开的一个实施方式,其中该化合物包含带负电的结合能增加的氢物质,该化合物还包含一种或多种阳离子,诸如质子、普通 H_2^+ 或普通 H_3^+ 。

[0300] 本文提供一种用于制备包含至少一种分数氢氢负离子的化合物的方法。此类化合物在下文被称作“分数氢氢化物化合物”。该方法包括使原子氢与净反应焓为约 $\frac{m}{2} \cdot 27 \text{ eV}$

(其中m为大于1的整数,优选为小于400的整数)的催化剂反应,以产生结合能为约 $\frac{13.6 \text{ eV}}{\left(\frac{1}{p}\right)^2}$

(其中p为整数,优选为2至137的整数)的结合能增加的氢原子。该催化的另一产物为能量。结合能增加的氢原子可与电子源反应以产生结合能增加的氢负离子。结合能增加的氢负离子可与一种或多种阳离子反应以产生包含至少一种结合能增加的氢负离子的化合物。

[0301] 在一个实施方式中,通过在本文中被称作歧化(如Mills GUT第5章中所给出的,将其以引用的方式并入)的过程,氢经历向式(18)中具有高p值分数氢的跃迁,可实现极高功率和能量中的至少一者。氢原子H(1/p) p=1,2,3,...137可经历向式(10)和(12)所给出的较低能态的进一步跃迁,其中一个原子的跃迁是通过以共振和非辐射方式接受m·27.2eV且伴随有其势能的相反变化的另一个原子来催化。由式(32)给出的由m·27.2eV共振传递至H(1/p')而诱导的H(1/p)至H(1/(p+m))的跃迁的总的一般方程通过以下表示:



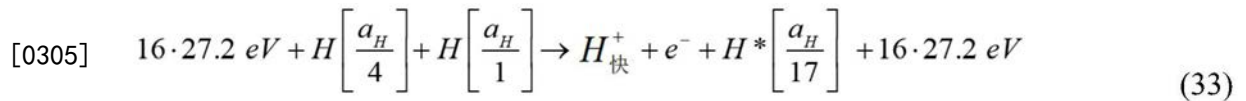
[0303] 来自分数氢过程的EUV光可解离双分数氢分子并且所得分数氢原子可充当催化剂以跃迁至较低能态。示例性的反应包括通过H(1/4)将H催化为H(1/17),其中H(1/4)可为通过HOH对另一H进行催化的反应产物。预计分数氢的歧化反应产生X射线区域中的特征。如由

式(5-8)所示,HOH催化剂的反应产物为 $H\left[\frac{a_H}{4}\right]$ 。考虑在含H₂O气体的氢云中可能有跃迁反

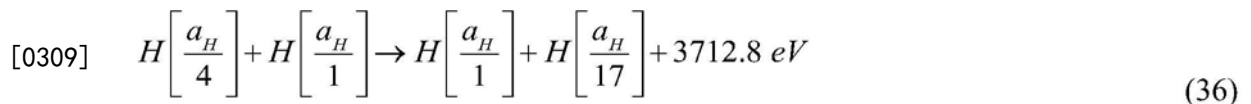
应,其中第一氢型原子 $H\left[\frac{a_H}{p}\right]$ 为H原子,并且充当催化剂的第二受体氢型原子 $H\left[\frac{a_H}{p'}\right]$ 为

$H\left[\frac{a_H}{4}\right]$ 。因为 $H\left[\frac{a_H}{4}\right]$ 的势能为

[0304] $4^2 \cdot 27.2\text{eV} = 16 \cdot 27.2\text{eV} = 435.2\text{eV}$,所以该跃迁反应由以下给出:



[0308] 并且,总反应为



[0310] 由于 $H^* \left[\frac{a_H}{p+m} \right]$ 中间体引起的极紫外连续辐射谱带 (例如式 (16) 和式 (34)) 预计具有由以下给出的短波限和能量 $E_{\left(H \rightarrow H \left[\frac{a_H}{p+m} \right] \right)}$:

$$[0311] \quad E_{\left(H \rightarrow H \left[\frac{a_H}{p+m} \right] \right)} = \left[(p+m)^2 - p^2 \right] \cdot 13.6 \text{ eV} - m \cdot 27.2 \text{ eV}$$

$$[0312] \quad \lambda_{\left(H \rightarrow H \left[\frac{a_H}{p+m} \right] \right)} = \frac{91.2}{\left[(p+m)^2 - p^2 \right] \cdot 13.6 \text{ eV} - m \cdot 27.2 \text{ eV}} \text{ nm} \quad (37)$$

[0313] 并且延伸至比相应的截止波长更长的波长。此处, 预计由于 $H^* \left[\frac{a_H}{17} \right]$ 中间体的衰变而引起的极紫外连续辐射谱带具有在 $E=3481.6\text{eV}; 0.35625\text{nm}$ 的短波限并且延伸至更长波长。美国国家航空航天局的钱德拉X射线天文台 [E.Bulbul, M.Markevitch, A.Foster, R.K.Smith, M.Loewenstein, S.W.Randall, “Detection of an unidentified emission line in the stacked X-Ray spectrum of galaxy clusters,” The Astrophysical Journal, 第789卷, 第1期, (2014); A.Boyarsky, O.Ruchayskiy, D.Iakubovskiy, J.Franse, “An unidentified line in X-ray spectra of the Andromeda galaxy and Perseus galaxy cluster,” (2014), arXiv:1402.4119[astro-ph.CO]] 在英仙座星团中观察到具有 3.48keV 临界值的宽X射线峰, 其不匹配任何已知原子跃迁。BulBul 等人将其归属于未知身份暗物质的 3.48keV 特征匹配 $H \left[\frac{a_H}{4} \right] + H \left[\frac{a_H}{1} \right] \rightarrow H \left[\frac{a_H}{17} \right]$ 跃迁并且进一步证实分数氢的身份为暗物质。

[0314] 物质的新颖氢组合物可包含:

[0315] (a) 至少一种具有以下结合能的中性、正或负氢物质 (在下文中为“结合能增加的氢物质”)

[0316] (i) 大于对应普通氢物质的结合能, 或者

[0317] (ii) 大于其对应普通氢物质不稳定或因为该普通氢物质的结合能小于环境条件 (标准温度和压力, STP) 下的热能或者为负而观察不到的任何氢物质的结合能; 和

[0318] (b) 至少一种其他元素。通常, 本文描述的氢产物是结合能增加的氢物质。

[0319] 在此上下文中, 所谓“其他元素”意指除结合能增加的氢物质以外的元素。因此, 其他元素可为普通氢物质, 或除氢以外的任何元素。在一组化合物中, 其他元素和结合能增加的氢物质为中性的。在另一组化合物中, 其他元素和结合能增加的氢物质带电荷, 使得所述其他元素提供平衡电荷以形成中性化合物。前一组化合物表征为分子和配位键合; 后一组的特征为离子键合。

[0320] 还提供新颖化合物和分子离子, 其包含:

[0321] (a) 至少一种具有以下总能量的中性、正或负氢物质 (在下文中为“结合能增加的氢物质”)

[0322] (i) 大于对应普通氢物质的总能量,或者

[0323] (ii) 大于其对应普通氢物质不稳定或因为该普通氢物质的总能量小于环境条件下的热能或为负而观察不到的任何氢物质的总能量;和

[0324] (b) 至少一种其他元素。

[0325] 氢物质的总能量为从氢物质移除所有电子的能量的总和。根据本公开的氢物质的总能量大于对应普通氢物质的总能量。根据本公开的总能量增加的氢物质也被称作“结合能增加的氢物质”,即使总能量增加的氢物质的一些实施方式可具有比对应普通氢物质的第一电子结合能小的第一电子结合能。例如,p=24时式(19)的氢负离子的第一结合能小于普通氢负离子的第一结合能,而p=24时式(19)的氢负离子的总能量远远大于对应普通氢负离子的总能量。

[0326] 本文还提供新颖化合物和分子离子,其包含:

[0327] (a) 多种具有以下结合能的中性、正或负氢物质(在下文中为“结合能增加的氢物质”)

[0328] (i) 大于对应普通氢物质的结合能,或者

[0329] (ii) 大于其对应普通氢物质不稳定或因为该普通氢物质的结合能小于环境条件下的热能或为负而观察不到的任何氢物质的结合能;和

[0330] (b) 任选的一种其他元素。本公开的化合物在下文中被称作“结合能增加的氢化合物”。

[0331] 可通过使一种或多种分数氢原子与电子、分数氢原子、化合物中的一者或多者反应来形成结合能增加的氢物质,所述化合物含有所述结合能增加的氢物质中的至少一者和至少一种除结合能增加的氢物质以外的其他原子、分子或离子。

[0332] 还提供新颖化合物和分子离子,其包含:

[0333] (a) 多种具有以下总能量的中性、正或负氢物质(在下文中为“结合能增加的氢物质”)

[0334] (i) 大于普通分子氢的总能量,或者

[0335] (ii) 大于其对应普通氢物质不稳定或因为该普通氢物质的总能量小于环境条件下的热能或为负而观察不到的任何氢物质的总能量;和

[0336] (b) 任选的一种其他元素。本公开的化合物在下文中被称作“结合能增加的氢化合物”。

[0337] 在一个实施方式中,提供一种化合物,其包含至少一种选自以下的结合能增加的氢物质:(a) 根据式(19)的结合能对于p=2至最高23大于且对于p=24小于普通氢负离子的结合能(约0.8eV)的氢负离子(“结合能增加的氢负离子”或“分数氢氢负离子”);(b) 结合能大于普通氢原子的结合能(约13.6eV)的氢原子(“结合能增加的氢原子”或“分数氢”);(c) 具有大于约15.3eV的第一结合能的氢分子(“结合能增加的氢分子”或“双分数氢”);和(d) 具有大于约16.3eV的结合能的分子氢离子(“结合能增加的分子氢离子”或“双分数氢分子离子”)。在本公开中,结合能增加的氢物质和化合物也称作低能氢物质和化合物。分数氢包含结合能增加的氢物质或等同地较低能量的氢物质。

[0338] III. 化学反应器

[0339] 本公开还涉及用于产生本公开的结合能增加的氢物质和化合物(诸如双分数氢分

子和分数氢氢化物化合物)的其他反应器。根据池类型,其他催化产物为动力以及任选的等离子体和光。此类反应器在下文中被称作“氢反应器”或“氢池”。氢反应器包括用于制备分数氢的池。用于制备分数氢的池可采用以下形式:化学反应器或气体燃料池(诸如气体放电池)、等离子体炬池或微波动力池和电化学池。在一个实施方式中,催化剂为HOH并且HOH和H中的至少一者的来源为冰。冰可具有高表面积以增加从冰形成HOH催化剂和H的速率以及分数氢反应速率中的至少一者。该冰可呈精细切片的形式以增加表面积。在一个实施方式中,池包含电弧放电池,其包括冰至少一个电极以使得放电涉及冰的至少一部分。

[0340] 在一个实施方式中,电弧放电池包括容器、两个电极、高电压动力源(诸如能够提供约100V至1MV范围内的电压和在约1A至100kA范围内的电流的动力源),以及水源(诸如储罐以及形成并供应 H_2O 液滴的部件)。液滴可在电极之间移动。在一个实施方式中,液滴引发电弧等离子体的点燃。在一个实施方式中,该水电弧等离子体包含可发生反应以形成分数氢的H和HOH。可通过控制液滴尺寸以及将液滴供应至电极的速率来控制点燃速率和对应功率比。高电压源可包括至少一个可由高电压动力源充电的高电压电容器。在一个实施方式中,电弧放电池还包括诸如功率转换器之类的部件,所述功率转换器为诸如本公开的功率转换器,诸如用以将来自分数氢过程的动力(诸如光和热)转换成电的PV转换器和热力发动机中的至少一者。

[0341] 用于制备分数氢的池的示例性实施方式可采用以下形式:液体燃料池、固体燃料池、异质燃料池、CIHT池和SF-CIHT或SunCell®池。这些池中的每一者包括:(i)包括原子氢源的反应物;(ii)至少一种用于制备分数氢的催化剂,其选自固体催化剂、熔融催化剂、液体催化剂、气态催化剂或它们的混合物;和(iii)用于使氢与催化剂反应来制备分数氢的容器。如本文所使用并且如本公开所设想的,除非另外规定,否则术语“氢”不仅包括氕(1H),而且还包括氘(2H)和氚(3H)。示例性的化学反应混合物和反应器可包括本公开的SF-CIHT、CIHT或热池实施方式。在此“化学反应器”章节中给出了额外的示例性实施方式。在本公开中给出了在混合物反应期间形成的具有用作催化剂的 H_2O 的反应混合物的实例。其他催化剂可用于形成结合能增加的氢物质和化合物。可在诸如反应物、反应物的重量%、 H_2 压力和反应温度之类的参数方面根据这些示例性情况调节反应和条件。合适的反应物、条件和参数范围是本公开的反应物、条件和参数范围。通过13.6eV整数倍的预测连续辐射谱带、由H线的多普勒线增宽所测得的在其他方面无法解释的超高H动能、H线的反向、在无击穿电场的情况下形成等离子体以及如在Mills先前出版物中所报导的异常等离子体余辉持续时间显示分数氢和分子分数氢是本公开的反应器的产物。其他研究人员已对数据(诸如关于CIHT池和固体燃料的数据)在场外进行了独立验证。通过本公开的池形成分数氢也通过在长的持续时间内连续输出的电能所证实,这些电能是电输入的多倍,其在大多数情况下超过在无替代源情况下的输入的10倍以上。所预测的分子分数氢 $H_2(1/4)$ 通过以下各者而鉴别为CIHT池与固体燃料的产物:MAS H NMR,其显示了约-4.4ppm的预测高场位移基质峰;ToF-SIMS和ESI-ToFMS,其显示了 $H_2(1/4)$ 与吸气基质复合成为 $m/e=M+n2$ 峰,其中M为母离子的质量并且n为整数;电子束激发发射光谱和光致发光发射光谱,其显示了具有 H_2 能量的16倍或量子数 $p=4$ 平方倍数的 $H_2(1/4)$ 的预测旋转和振动光谱;拉曼和FTIR光谱,其显示了 $1950cm^{-1}$ 的 $H_2(1/4)$ 的旋转能,其为 H_2 的旋转能的16倍或量子数 $p=4$ 平方倍数;XPS,其显示了500eV的 $H_2(1/4)$ 的预测总结合能;以及到达时间在 $m/e=1$ 峰之前的ToF-SIMS峰,该 $m/e=$

1峰对应于动能约204eV的H,该动能将所预测的H至H(1/4)的能量释放与传递至第三体H的能量相匹配,如以下中所报导的:Mills先前出版物和R.Mills X Yu,Y.Lu,G Chu,J.He,J.Lotoski,“Catalyst Induced Hydrino Transition(CIHT)Electrochemical Cell”,International Journal of Energy Research,(2013)以及R.Mills,J.Lotoski,J.Kong,G Chu,J.He,J.Trevey,“High-Power-Density Catalyst Induced Hydrino Transition (CIHT)Electrochemical Cell”(2014),将其以全文引用的方式并入本文中。

[0342] 使用水流热量计和Setaram DSC 131差示扫描量热计(DSC)二者,通过观察到来自形成分数氢的固体燃料的超过最大理论能量60倍的热能,证实通过本公开的池(诸如包括用以产生热力的固体燃料的池)形成了分数氢。MAS H NMR显示了约-4.4ppm的预测H₂(1/4)高场基质位移。始于1950cm⁻¹的拉曼峰匹配H₂(1/4)的自由空间旋转能(0.2414eV)。这些结果报导于Mills先前出版物以及报导于R.Mills,J.Lotoski,W.Good,J.He,“Solid Fuels that Form HOH Catalyst”,(2014)中,将其以全文引用的方式并入本文中。

[0343] IV.SunCell和功率转换器

[0344] 产生电能和热能中的至少一者的动力系统(本文中也称为“SunCell”)可包括:

[0345] 能够保持压力低于大气压的容器;

[0346] 反应物,其能够经历产生足够能量以在该容器中形成等离子体的反应,该反应物包含:

[0347] a) 氢气与氧气的混合物,和/或

[0348] 水蒸气,和/或

[0349] 氢气与水蒸气的混合物;

[0350] b) 熔融金属;

[0351] 质量流量控制器,其用以控制至少一种反应物进入该容器的流量;

[0352] 真空泵,其用以在一种或多种反应物正流入该容器中时使该容器中的压力维持低于大气压;

[0353] 熔融金属注射器系统,其包括容纳该熔融金属中的一些的至少一个储罐、构造用于递送该储罐中的该熔融金属并穿过注射器管从而提供熔融金属料流的熔融金属泵系统(例如,一个或多个电磁泵)以及用于接收该熔融金属料流的至少一个非注射器熔融金属储罐;

[0354] 至少一个点燃系统,其包括电力源或点燃电流源以将电力供应至所述至少一个熔融金属料流以在所述氢气和/或氧气和/或水蒸气正流入所述容器中时点燃该反应;

[0355] 反应物供应系统,其用以补给在反应中所消耗的反应物;以及

[0356] 功率转换器或输出系统,其用以将从该反应产生的能量(例如,来自等离子体的光和/或热输出)的一部分转换为电力和/或热力。

[0357] 在一些实施方式中,该动力系统可包括:光学整流天线(诸如,A.Sharma,V.Singh,T.L.Bougher,B.A.Cola,“A carbon nanotube optical rectenna”,Nature Nanotechnology,第10卷,(2015),第1027-1032页,doi:10.1038/nnano.2015.220所报道的光学整流天线),该参考文献以全文引用的方式并入)以及至少一个热力-电动力转换器。在另一个实施方式中,容器能够具有大气压、高于大气压和低于大气压中的至少一者的压力。在另一个实施方式中,所述至少一个直接等离子体-电转换器可包括以下的群组中的至少

一者:等离子体动力功率转换器、 $\vec{E} \times \vec{B}$ 直接转换器、磁流体动力功率转换器、磁镜磁流体动力功率转换器、电荷漂移转换器、杆式(Post)或百叶窗式(Venetian Blind)功率转换器、回旋管、光子聚束微波功率转换器和光电转换器。在另一个实施方式中,所述至少一个热-电转换器可包括以下的群组中的至少一者:热力发动机、蒸气机、蒸气涡轮机和发电机、气体涡轮机和发电机、兰金循环发动机、布雷顿循环发动机、斯特林发动机、热离子功率转换器和热电功率转换器。可包括将热量排至环境气氛的闭合冷却剂系统或开放系统的示例性热-电系统为超临界CO₂、有机兰金或外部燃烧器气体涡轮机系统。

[0358] 除本公开的UV光伏和热光伏之外,SunCell®可包括本领域已知的其他电转换部件,诸如热离子功率转换系统、磁流体动力功率转换系统、涡轮机功率转换系统、微型涡轮机功率转换系统、兰金或布雷顿循环涡轮机功率转换系统、化学和电化学功率转换系统。兰金循环涡轮机可包括超临界CO₂、有机物(诸如氢氟烃或氟烃)或蒸气工作流体。在兰金或布雷顿循环涡轮机中,SunCell®可向涡轮机系统的预热器、回热器、锅炉和外部燃烧器型热交换器级中的至少一者提供热力。在一个实施方式中,布雷顿循环涡轮机包括集成于涡轮机的燃烧区段中的SunCell®涡轮加热器。SunCell®涡轮加热器可包括接收来自压缩机和回热器中的至少一者的气流的管道,其中空气被加热并且管道将加热的压缩流引导至涡轮机的入口,以做压力体积功。SunCell®涡轮加热器可替代或补充气体涡轮机的燃烧室。兰金或布雷顿循环可关闭,其中功率转换器还包括冷凝器和冷却器中的至少一者。

[0359] 转换器可为Mills先前出版物和Mills先前专利申请中给出的转换器。分数氢反应物(诸如H源和H₂O源)和SunCell®系统可包括本公开或诸如以下的先前美国专利申请中的分数氢反应物和SunCell®系统:Hydrogen Catalyst Reactor(氢催化剂反应器),PCT/US08/61455,2008年4月24日提交的PCT;Heterogeneous Hydrogen Catalyst Reactor(非均相氢催化剂反应器),PCT/US09/052072,2009年7月29日提交的PCT;Heterogeneous Hydrogen Catalyst Power System(非均相氢催化剂动力系统),PCT/US10/27828,2010年3月18日提交的PCT;Electrochemical Hydrogen Catalyst Power System(电化学氢催化剂动力系统),PCT/US11/28889,2011年3月17日提交的PCT;H₂O-Based Electrochemical Hydrogen-Catalyst Power System(基于H₂O的电化学氢催化剂动力系统),2012年3月30日提交的PCT/US12/31369;CIHT Power System(CIHT动力系统),2013年5月21日提交的PCT/US13/041938;Power Generation Systems and Methods Regarding Same(动力产生系统和与其相关的方法),PCT/IB2014/058177,2014年1月10日提交的PCT;Photovoltaic Power Generation Systems and Methods Regarding Same(光伏动力产生系统和与其相关的方法),PCT/US14/32584,2014年4月1日提交的PCT;Electrical Power Generation Systems and Methods Regarding Same(电力产生系统和与其相关的方法),PCT/US2015/033165,2015年5月29日提交的PCT;Ultraviolet Electrical Generation System Methods Regarding Same(紫外电力产生系统和与其相关的方法),PCT/US2015/065826,2015年12月15日提交的PCT;Thermophotovoltaic Electrical Power Generator(热光伏电力产生器),PCT/US16/12620,2016年1月8日提交的PCT;Thermophotovoltaic Electrical Power Generator Network(热光伏电力产生器网络),PCT/US2017/035025,2017年12月7日提交的PCT;Thermophotovoltaic Electrical Power Generator(热光伏电力产生器),PCT/US2017/013972,2017年1月18日提交的PCT;Extreme and Deep Ultraviolet

Photovoltaic Cell (极紫外光伏池和深紫外光伏池), PCT/US2018/012635, 2018年01月05日提交的PCT; Magnetohydrodynamic Electric Power Generator (磁流体动力电力产生器), PCT/US18/17765, 2018年2月12日提交的PCT; Magnetohydrodynamic Electric Power Generator (磁流体动力电力产生器), PCT/US2018/034842, 18年5月29日提交的PCT; 以及 Magnetohydrodynamic Electric Power Generator (磁流体动力电力产生器), PCT/IB2018/059646, 2018年12月5日提交的PCT (“Mills 先前专利申请”), 将它们以全文引用的方式并入本文中。

[0360] 在一个实施方式中, 点燃 H_2O 而形成分数氢, 同时以热、等离子体和电磁(光)动力中的至少一者的形式释放高能量。(本公开中的“点燃”表示 H 至分数氢的极高反应速率, 其可表现为爆发、脉冲或其他形式的高功率释放)。 H_2O 可构成可通过施加高电流(诸如, 在约10A至100,000A的范围内的电流)点燃的燃料。这可通过施加诸如约5,000至100,000V之类的高电压以首先形成高导电等离子体(诸如电弧)而实现。作为另一种选择, 可使高电流穿过导电基质, 诸如熔融金属如进一步包含诸如 H 和 HOH 之类的分数氢反应物的银, 或包含 H_2O 的化合物或混合物, 其中所得燃料诸如固体燃料的电导率高。(在本公开中, 使用固体燃料来指代形成诸如 HOH 和 H 之类的催化剂的反应混合物, 所述催化剂进一步反应而形成分数氢。等离子体电压可较低, 诸如在约1V至100V的范围内。然而, 反应混合物可包括除固体以外的其他物理状态。在实施方式中, 反应混合物可为以下中的至少一种状态: 气态、液态、熔融基质(诸如熔融导电基质, 诸如熔融金属, 诸如熔融的银、银铜合金和铜中的至少一者)、固态、浆状、溶胶凝胶、溶液、混合物、气体悬浮物、气动流和本领域技术人员已知的其他状态)。在一个实施方式中, 具有极低电阻的固体燃料包含含有 H_2O 的反应混合物。低电阻可能是由于反应混合物的导体组分所导致。在实施方式中, 固体燃料的电阻为在以下范围内的至少一者: 约 10^{-9} 欧姆至100欧姆、 10^{-8} 欧姆至10欧姆、 10^{-3} 欧姆至1欧姆、 10^{-4} 欧姆至 10^{-1} 欧姆以及 10^{-4} 欧姆至 10^{-2} 欧姆。在另一个实施方式中, 具有高电阻的燃料包含含有痕量或微量摩尔百分比的添加化合物或材料的 H_2O 。在后一种情况下, 可使高电流流过燃料, 以通过引起击穿而形成高度导电状态(诸如电弧或电弧等离子体)而实现点燃。

[0361] 在一个实施方式中, 反应物可包含 H_2O 源和导电基质, 以形成催化剂源、催化剂、原子氢源和原子氢中的至少一者。在另一个实施方式中, 包含 H_2O 源的反应物可包含以下中的至少一者: 体相 H_2O 、非体相状态的 H_2O 、一种或多种化合物, 所述一种或多种化合物经历以下中的至少一者: 反应以形成 H_2O 和释放结合 H_2O 。另外, 结合 H_2O 可包含与 H_2O 相互作用的化合物, 其中 H_2O 处于以下中的至少一者的状态: 吸收 H_2O 、结合 H_2O 、物理吸附 H_2O 和水合水。在实施方式中, 反应物可包含导体和一种或多种化合物或材料, 所述一种或多种化合物或材料经历以下中的至少一者: 释放体相 H_2O 、吸收 H_2O 、结合 H_2O 、物理吸附 H_2O 和水合水, 以及以 H_2O 作为其反应产物。在其他实施方式中, 新生 H_2O 催化剂源和原子氢源中的至少一者可包含以下中的至少一者: (a) 至少一种 H_2O 源; (b) 至少一种氧源; 和 (c) 至少一种氢源。

[0362] 在一个实施方式中, 分数氢反应速率取决于高电流的施加或形成。在SunCell®的一个实施方式中, 形成分数氢的反应物经受可引起极快反应速率和能量释放的低电压、高电流、高功率脉冲。在一示例性实施方式中, 60Hz电压小于15V峰值, 电流在100A/cm²至50,000A/cm²峰值之间的范围内, 并且功率在1000W/cm²至750,000W/cm²之间的范围内。在这些参数的约1/100倍至100倍的范围内的其他频率、电压、电流和功率是合适的。在一个实施方

式中,分数氢反应速率取决于高电流的施加或形成。在一个实施方式中,选择电压以引起在100A至1,000,000A、1kA至100,000A、10kA至50kA中的至少一个范围内的高AC、DC或AC-DC混合电流。DC或峰值AC电流密度可在以下中的至少一者的范围内:100A/cm²至1,000,000A/cm²、1000A/cm²至100,000A/cm²和2000A/cm²至50,000A/cm²。DC或峰值AC电压可在选自以下的至少一个范围内:约0.1V至1000V、0.1V至100V、0.1V至15V和1V至15V。AC频率可在以下范围内:约0.1Hz至10GHz、1Hz至1MHz、10Hz至100kHz和100Hz至10kHz。脉冲时间可在选自以下的至少一个范围内:约10⁻⁶s至10s、10⁻⁵s至1s、10⁻⁴s至0.1s和10⁻³s至0.01s。

[0363] 在一个实施方式中,从被催化为分数氢状态的原子氢转移能量导致催化剂的电离。从催化剂电离的电子可积聚在反应混合物和容器中并引起空间电荷累积。该空间电荷可改变后续能量从原子氢转移至催化剂的能级,从而降低反应速率。在一个实施方式中,施加高电流会移除空间电荷,以引起分数氢反应速率的增加。在另一个实施方式中,高电流诸如电弧电流使得可充当H和HOH催化剂源的反应物(诸如水)的温度极快提高。高温可引起水热解为H和HOH催化剂中的至少一者。在一个实施方式中, SunCell®的反应混合物包含H源和催化剂(诸如nH(n为整数)和HOH中的至少一者)源。nH和HOH中的至少一者可通过至少一种物理相的水(诸如,固态、液态和气态水中的至少一者)的热解或热分解而形成。热解可在高温(诸如,在约500K至10,000K、1000K至7000K和1000K至5000K的至少一个范围内的温度)下发生。在一示例性实施方式中,反应温度为约3500至4000K,以使得原子H的摩尔分数较高,如J.Lede, F.Lapicque和J Villiermaux所示[J.Lédé, F.Lapicque, J.Villiermaux, "Production of hydrogen by direct thermal decomposition of water", International Journal of Hydrogen Energy, 1983, 第8卷, 1983, 第675-679页; H.H.G.Jellinek, H.Kachi, "The catalytic thermal decomposition of water and the production of hydrogen", International Journal of Hydrogen Energy, 1984, 第9卷, 第677-688页; S.Z.Baykara, "Hydrogen production by direct solar thermal decomposition of water, possibilities for improvement of process efficiency", International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 第29卷, 第1451-1458页; S.Z.Baykara, "Experimental solar water thermolysis", International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 第29卷, 第1459-1469页, 将它们以引用的方式并入本文中]。热解可由固体表面(诸如池组件中的一者)辅助。可通过输入功率和通过分数氢反应所维持的等离子体将固体表面加热至高温。可冷却热解气体(诸如点燃区域的下流的那些气体)以防止产物复合或逆反应成初始的水。反应混合物可包含处于比产物气体的温度低的温度下的冷却剂,诸如固相、液相或气相中的至少一者。热解反应产物气体的冷却可通过使产物与冷却剂接触而实现。冷却剂可包含低温蒸气、水和冰中的至少一者。

[0364] 在一个实施方式中,燃料或反应物可包含H源、H₂、催化剂源、H₂O源和H₂O中的至少一者。合适的反应物可包含导电金属基质和水合物,诸如碱金属水合物、碱土金属水合物和过渡金属水合物中的至少一者。水合物可包含MgCl₂·6H₂O、BaI₂·2H₂O和ZnCl₂·4H₂O中的至少一者。作为另一种选择,反应物可包含银、铜、氢、氧和水中的至少一者。

[0365] 在一个实施方式中,可在低压力下操作反应池腔室5b31以实现高气体温度。然后,可通过反应混合物气体源和控制器增加压力以增加反应速率,其中所述高温通过水二聚物的H键以及H₂共价键中的至少一者的热解而维持新生HOH和原子H。用以实现热解的例示性

阈气体温度为约3300℃。具有比约3300℃高的温度的等离子体可使H₂O二聚物键断裂以形成新生HOH从而充当分数氢催化剂。反应池腔室H₂O蒸气压、H₂压力和O₂压力中的至少一者可在约0.01托至100大气压、0.1托至10大气压和0.5托至1大气压中的至少一个范围内。EM泵送速率可在约0.01ml/s至10,000ml/s、0.1ml/s至1000ml/s和0.1ml/s至100ml/s中的至少一个范围内。在一个实施方式中,可初始维持高点燃功率和低压力中的至少一者以加热等离子体和池从而实现热解。初始功率可包括高频率脉冲、具有高占空比的脉冲、较高电压和较高电流以及连续电流中的至少一者。在一个实施方式中,实现以下各项中的至少一者:可减小点燃功率;以及可在加热等离子体和池以实现热解之后增加压力。在另一个实施方式中, SunCell®可包括额外的等离子体源(诸如等离子体炬、辉光放电、微波或RF等离子体源)以用于加热分数氢反应等离子体和池从而实现热解。

[0366] 在一个实施方式中,点燃系统包括用于进行以下中的至少一者的开关:引发电流和在实现点燃之后中断电流。可通过熔融金属料流的接触引发电流的流动。可通过部件(诸如以下中的至少一者)以电子方式执行切换:绝缘栅双极晶体管(IGBT)、硅控整流器(SCR)和至少一个金属氧化物半导体场效晶体管(MOSFET)。作为另外一种选择,可以机械方式对点燃进行开关。可在点燃之后中断电流以便相对于输入点燃能量优化输出分数氢产生的能量。点燃系统可包括开关以允许可控量的能量流入燃料中以引起爆轰并在其中产生等离子体的阶段期间关掉动力。在一个实施方式中,用以递送高电流电能短脉冲的电力源包含以下中的至少一者:

[0367] 选择用于产生高AC、DC或AC-DC混合电流的电压,该电流在100A至1,000,000A、1kA至100,000A、10kA至50kA中的至少一者的范围内;

[0368] 在以下中的至少一者的范围内的DC或峰值AC电流密度:1A/cm²至1,000,000A/cm²、1000A/cm²至100,000A/cm²和2000A/cm²至50,000A/cm²;

[0369] 其中该电压由固体燃料的电导率确定,其中该电压由所需电流乘以固体燃料样品的电阻而得到;

[0370] DC或峰值AC电压在0.1V至500kV、0.1V至100kV和1V至50kV中的至少一者的范围内,以及

[0371] AC频率在0.1Hz至10GHz、1Hz至1MHz、10Hz至100kHz和100Hz至10kHz中的至少一者的范围内。

[0372] 系统还包括诸如蓄电池(诸如锂离子蓄电池)的启动动力/能量源。作为另一种选择,可通过从外部动力源至产生器的连接件提供用于启动的外部动力诸如电网动力。连接件可包括动力输出汇流条。启动动力能量源可进行以下中的至少一者:向加热器供应动力以维持熔融金属导电基质、给注射系统提供动力以及给点燃系统提供动力。

[0373] SunCell®可包括高压水电解器,诸如包括质子交换膜(PEM)的电解器,其使水处于高压下以提供高压氢。H₂和O₂腔室中的每一者可包括分别用以消除污染物O₂和H₂的复合器。PEM可充当阳极和阴极隔室的分离器和盐桥中的至少一者,以允许在阴极处产生氢并且在阳极处产生氧作为单独的气体。阴极可包含二硫化物析氢催化剂,诸如包含铌和钽中的至少一者的催化剂,其可进一步包含硫。阴极可包括本领域已知的阴极,诸如Pt或Ni。氢可在高压下产生,并且可直接地或通过渗透通过氢渗透膜供应至反应池腔室5b31。SunCell®可包括从阳极室至将氧气递送到储存容器或排气孔的点的氧气管线。在一个实施方式中,

SunCell®包括传感器、处理器和电解电流控制器。

[0374] 在另一个实施方式中,可依据以下方式获得氢燃料:水电解;重整天然气;通过使蒸汽与碳发生反应以形成 H_2 和CO以及 CO_2 而进行的合成气反应和水-气变换反应中的至少一者;以及本领域技术人员已知的其他氢产生方法。

[0375] 在另一个实施方式中,氢可通过使用所供应的水和由SunCell®产生的热量热解来产生。热解循环可包括本公开或本领域已知的热解循环,诸如基于金属及其氧化物(诸如SnO/Sn和ZnO/Zn中的至少一者)的热解循环。在其中感应耦合加热器、EM泵和点燃系统仅在启动期间消耗功率的实施方式中,氢可通过热解产生,使得附加电力要求极低。SunCell®可包括蓄电池诸如锂离子蓄电池以提供动力来运行系统诸如气体传感器和控制系统,诸如用于反应等离子体气体的那些。

[0376] 磁流体动力(MHD)转换器

[0377] 基于在交叉磁场中形成离子或导电介质的质量流量的电荷分离是众所周知的磁流体动力(MHD)功率转换。阳离子和阴离子在相对的方向上经历洛伦兹方向并且在相应的MHD电极处被接收以影响它们之间的电压。形成离子质量流量的典型MHD方法为通过喷嘴使接种有离子的高压气体膨胀,以产生通过交叉磁场的高速流,其中一组MHD电极相对于偏转场交叉以接收经偏转离子。在一个实施方式中,压力通常大于大气压,并且定向质量流量可通过分数氢反应以形成等离子体和高度导电、高压和高温熔融金属蒸气来实现,所述熔融金属蒸气膨胀以产生通过MHD转换器的交叉磁场区段的高速流。可通过MHD转换器的流动可为轴向或径向的。可通过约束磁体(诸如亥姆霍兹线圈或磁瓶的那些磁体)实现其他定向流动。

[0378] 具体而言,图1至图22中所示的MHD电力系统可包括本公开的分数氢反应等离子体源,诸如包括EM泵5ka、至少一个储罐5c、至少两个电极(诸如包括双熔融金属注射器5k61的电极)、分数氢反应物源(诸如HOH催化剂源和H源)、点燃系统(包括将电压和电流施加至电极以由分数氢反应物形成等离子体的电力源2)的等离子体源,和MHD电力转换器。在一个实施方式中,点燃系统可包括电压和电流源,诸如DC动力供应器和一组电容器,以输送具有高电流脉冲容量的脉冲点燃。在一双重熔融金属注射器实施方式中,电流流经所注入的熔融金属料流以在所述流连接时将等离子体点燃。包括分数氢反应等离子体源和MHD转换器的MHD动力系统的组件可由抗氧化材料(诸如抗氧化金属)、包括抗氧化涂层的金属以及陶瓷中的至少一者组成,使得系统可在空气中操作。

[0379] 图1至图22中所示的磁流体动力功率转换器可包括横向于z轴的磁通量源,z轴为流过MHD转换器300的轴向熔融金属蒸气和等离子体流的方向。由于气体沿z轴的膨胀,该导电电流可具有沿z轴的优先速度。可通过约束磁体(诸如亥姆霍兹线圈或磁瓶的那些磁体)实现进一步的定向流动。因此,金属电子和离子传播至横向磁通量的区域中。传播电子和离子上的洛伦兹力通过以下给出

$$[0380] \quad F = ev \times B \quad (38)$$

[0381] 该力横向于电荷的速度和磁场,并且在阳离子和阴离子的相对方向上。因此,形成横向电流。横向磁场源可包括随着沿z轴的位置提供不同强度的横向磁场的组件,以便优化具有平行速度分散的流动电荷的交叉偏转(式(38))。

[0382] 储罐5c熔融金属可呈液态和气态中的至少一种状态。储罐5c熔融金属可定义为

MHD工作介质并且可因此被称作MHD工作介质或被称作熔融金属,其中隐含的是熔融金属可进一步呈液态和气态中的至少一种状态。也可使用诸如熔融金属、液态金属、金属蒸气或气态金属之类的特定状态,其中也可存在另一种物理状态。一示例性的熔融金属为可呈液态和气态中的至少一者的银。MHD工作介质可还包含添加剂,其包括以下中的至少一者:添加的金属,其在工作温度范围下可呈液态和气态中的至少一者;化合物,诸如本公开中的一者,其在工作温度范围下可呈液态和气态中的至少一者;和气体,诸如稀有气体(诸如氦气或氩气)、水、 H_2 和本公开的其他等离子体气体中的至少一者。MHD工作介质添加剂可与MHD工作介质成任何所需的比例。

[0383] 在一个实施方式中,选择介质与添加剂介质的比率以得到MHD转换器的任选的电转换性能。工作介质(诸如银或银-铜合金)可在过饱和条件下运行。

[0384] 在一个实施方式中,MHD发电机300可包括法拉第、通道霍尔和盘霍尔类型中的至少一者。在通道霍尔MHD实施方式中,膨胀或产生器通道308可沿z轴竖直取向,其中熔融金属等离子体(诸如银蒸气和等离子体)流过加速器区段(诸如限制或喷嘴喉部307),随后是膨胀区段308。通道可包括螺线管磁体306,诸如超导或永磁体,诸如横向于沿x轴的流动方向的海尔贝克阵列。管道形MHD产生器上的最佳磁场可包括一种马鞍形。磁体可通过MHD磁体安装托架306a固定。磁体可包括液体冷冻剂或可包括具有或不具有液体冷冻剂的低温致冷机。低温致冷机可包括干燥稀释致冷机。磁体可包括磁场的返回路径,诸如磁轭,诸如C形或矩形后磁轭。示例性永磁体材料是SmCo,示例性磁轭材料是磁性CRS、冷轧钢或铁。该产生器可包括至少一组电极,诸如沿y轴的分段电极304,其横向于磁场(B)以接收跨越MHD电极304产生电压的横向洛伦兹偏转离子。在另一个实施方式中,至少一个通道(诸如产生器通道308)可包括除具有平面壁的几何结构以外的几何结构,诸如圆柱形壁通道。Walsh描述了磁流体动力产生[E.M.Walsh,Energy Conversion Electromechanical,Direct,Nuclear,Ronald Press Company, NY, NY, (1967),第221-248页],将其整个公开内容以引用的方式并入本文中。可通过增加磁场强度来将洛伦兹力增加至所需的洛伦兹力。可增加MHD磁体306的磁通量。在一个实施方式中,磁通量可在约0.01T至15T、0.05T至10T、0.1T至5T、0.1T至2T和0.1T至1T的至少一个范围内。

[0385] 在一个实施方式中,盘式产生器包括:等离子体入口,其用以维持从反应池腔室流动至盘的中心中的等离子体;管道,其缠绕在边缘周围以收集熔融金属以及可能还有气体,该气体通过再循环器再循环至反应池腔室;和该再循环器。磁性激发场可包括在盘上方和下方的一对圆形亥姆霍兹线圈。磁体可供应可与其他设计相比较相对更靠近于等离子体的简单平行磁力线,并且磁场强度作为距离的三次幂而增加。法拉第电流可在盘的边缘的大致一完全短路中流动。盘式MHD产生器还可包括环电极,其中霍尔效应电流可在中心附近的环电极与边缘附近的环电极之间流动。

[0386] 为避免MHD电极被熔融金属蒸汽电短路,电极304(图1)可包括导体,每一者安装于电绝缘体覆盖的导电柱305上,该导电柱充当引线305a的支座且可进一步充当电极与产生器通道308的壁的间隔物。电极304可分段并且可包括阴极302和阳极303。除支座305以外,电极可自由地悬挂在产生器通道308中。沿垂直轴线间隔开的电极可足以防止熔融金属短路。电极可包含难熔导体,诸如W或Mo。引线305a可连接至可用难熔绝缘体(诸如BN)绝缘的线。该线可接合在线束中,该线束穿透可包含金属的MHD汇流条馈通件凸缘301处的通道。在

MHD转换器外,该线束可连接至功率合并器和逆变器。在一个实施方式中,MHD电极304包括液体电极诸如液体银电极。在一个实施方式中,点燃系统可包括液体电极。点燃系统可为DC或AC。反应器可包含陶瓷,诸如石英、氧化铝、氧化锆、氧化钪或派热克斯玻璃。液体电极可包含陶瓷熔块,其还可包括负载有诸如银之类的熔融金属的微孔。

[0387] 在一个实施方式中,分数氢反应混合物可包含氧、水蒸气和氢中的至少一者。MHD组件可包含材料诸如陶瓷,诸如金属氧化物,诸如氧化锆和氧化钪中的至少一者,或在氧化气氛下稳定的二氧化硅或石英。陶瓷组件之间的密封件可包括石墨或陶瓷织物在一个实施方式中,动力系统的至少一个组件可包含陶瓷,其中陶瓷可包含金属氧化物、氧化铝、氧化锆、氧化镁、氧化钪、碳化硅、碳化锆、二硼化锆、氮化硅和玻璃陶瓷中的至少一者,该玻璃陶瓷为诸如 $\text{Li}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times n\text{SiO}_2$ 系统(LAS系统)、 $\text{MgO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times n\text{SiO}_2$ 系统(MAS系统)、 $\text{ZnO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times n\text{SiO}_2$ 系统(ZAS系统)。SunCell®的陶瓷零件可通过本公开的部件接合,诸如通过两个或更多个陶瓷部件的陶瓷胶合、陶瓷与金属零件的钎焊、滑动螺母密封件、垫圈密封件和湿密封件。垫圈密封件可包括用垫圈密封的两个凸缘。凸缘可用诸如螺栓之类的紧固件整合在一起。在一个实施方式中,MHD电极304可包含可在操作期间较不易受腐蚀或降解影响的材料。在一个实施方式中,MHD电极304可包含导电陶瓷,诸如导电固体氧化物。在另一个实施方式中,MHD电极304可包含液体电极。液体电极可包含在电极工作温度下为液体的金属。液态金属可包含工作介质金属,诸如熔融银。熔融电极金属可包含浸渍有熔融金属的基质。基质可包含难熔材料诸如金属,诸如W、碳、可导电的陶瓷或本公开的其他难熔材料。负电极可包含固体难熔金属。负极性可保护负电极免遭氧化。正电极可包含液体电极。

[0388] 在一个实施方式中,导电陶瓷电极可包含本公开中的一者,诸如碳化物(诸如ZrC、HfC或WC)或硼化物(诸如ZrB₂)或可在高达1800℃下工作的复合材料(诸如ZrC-ZrB₂、ZrC-ZrB₂-SiC和具有20%SiC的ZrB₂复合材料)。电极可包含碳。在一个实施方式中,多个液体电极可通过通用歧管供应液态金属。液态金属可由EM泵泵送。液体电极可包括浸渍在非反应性基质(诸如陶瓷基质,诸如金属氧化物基质)中的熔融金属。作为另一种选择,可通过基质泵送液态金属以连续供应熔融金属。在一个实施方式中,电极可包含连续注入的熔融金属,诸如点燃电极。注射器可包含非反应性难熔材料,诸如金属氧化物,诸如ZrO₂。在一个实施方式中,液体电极中的每一者可包括暴露于MHD通道等离子体的熔融金属的流动料流。

[0389] MHD磁体306可包括永磁体和电磁体中的至少一者。电磁体306可以是非冷却的、水冷的和具有对应超低温管理的超导磁体中的至少一者。示例性的磁体为可磁化MHD通道308的螺线管或鞍形线圈和可磁化盘通道的跑道线圈。超导磁体可包括超低温致冷机和超低温-杜瓦系统中的至少一者。超导磁体系统306可包括:(i)超导线圈,其可包括NbTi或NbSn的超导线绕组,其中该超导体可包覆于普通导体(诸如铜线)上以保护免受由诸如振动之类的手段诱导的超导体状态或高温超导体(HTS)的暂时局部淬灭,该高温超导体为诸如YBa₂Cu₃O₇,通常被称作YBCO-123或简称YBCO;(ii)液氮杜瓦,其在线圈的两侧上提供液氮;(iii)液氮杜瓦,其在螺线管磁体的内半径和外半径上具有液氮,其中液氮和液氮杜瓦二者可包括辐射挡板和辐射屏蔽层(可包含铜、不锈钢和铝中的至少一者)和在壁处的高真空绝缘体;和(iv)各磁体的入口,其可已附接低温泵和压缩机,该低温泵和压缩机可由SunCell®动力产生器经由其输出动力端子的动力输出供给动力。

[0390] 在一个实施方式中,磁流体动力功率转换器是分段法拉第产生器。在另一个实施

方式中,由离子流的洛伦兹偏转形成的横向电流在平行于离子输入流的方向(z轴)上经历进一步的洛伦兹偏转,以在至少第一MHD电极与沿z轴相对移位的第二MHD电极之间产生霍尔电压。这种装置在本领域中称为磁流体动力功率转换器的霍尔产生器实施方式。MHD电极在xy平面中相对于z轴成角度的类似装置构成本发明的另一个实施方式,并且被称为具有“窗框”构造的对角产生器。在每种情形中,电压可驱动电流通过电负载。分段法拉第产生器、霍尔产生器和对角产生器的实施方式在Petrick[J.F.Louis,V.I.Kovbasyuk,Open-cycle Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation,M Petrick和B.Ya Shumyatsky编著,Argonne National Laboratory,Argonne,Illinois,(1978),第157-163页]中给出,将它们的整个公开内容以引用的方式并入。

[0391] SunCell®可包括至少一个MHD工作介质返回管道310、一个返回储罐311和对应的泵312。泵312可包括电磁(EM)泵。SunCell®可包括双熔融金属管道310、返回储罐311和对应的EM泵312。对应入口上升管5qa(包括在最低储罐熔融金属液位高度处具有开口)可控制每一返回储罐311中的熔融金属液位。返回EM泵312可将MHD工作介质从MHD冷凝器通道309的端部泵送至返回储罐311并且接着返回至对应注射器储罐5c。在一个实施方式中,可使MHD通道308壁维持在诸如高于银熔点的温度下以避免液体固化。在另一个实施方式中,熔融金属返回流穿过返回管道310直接到对应的返回EM泵312并且接着到对应的注射器储罐5c。在一个实施方式中,对抗压力梯度(诸如约10大气压)泵送MHD工作介质(诸如银)以完成熔融金属流电路(包括注射、点燃、膨胀和返回流)。为实现高压,EM泵可包括一系列的级。SunCell®可包括双熔融金属注射器系统,其包括一对储罐5c,该对储罐每一者包括EM泵注射器5ka和5k61和入口上升管5qa,以控制对应储罐5c中的熔融金属液位。返回流可进入对应EM泵组装件5kk的基部5kk1。

[0392] MHD产生器可包括接收膨胀流的冷凝器通道区段309且产生器还包括返回流通道或管道310,其中MHD工作介质(诸如银蒸气)在其于冷凝器区段中损失温度、压力和能量中的至少一者时冷却,并且穿过通道或管道310流回至储罐。产生器可包括至少一个返回泵312和返回泵管313以将返回流泵送至储罐5c和EM泵注射器5ka。返回泵和泵管可泵送液体、蒸气和气体中的至少一者。返回泵312和返回泵管313可包括电磁(EM)泵和EM泵管。EM泵的入口可具有比出口泵管直径更大的直径,以增加泵出口压力。在一个实施方式中,返回泵可包括EM泵-注射器电极5ka的注射器。在双熔融金属注射器实施方式中,产生器包括返回储罐311,每个所述返回储罐311具有对应的返回泵,诸如返回EM泵312。返回储罐311可进行以下中的至少一者:平衡回流的熔融金属(诸如熔融银流)以及冷凝或分离与液态银混合的银蒸气。储罐311可包括热交换器以冷凝银蒸气。储罐311可包括第一级电磁泵,以优选泵送液态银以将液态银与气态银分离。在一个实施方式中,可通过离心力将液态金属选择性地注入至返回EM泵312中。返回管道或返回储罐可包括离心区段。离心储罐可从入口至出口逐渐变细,使得离心力在顶部比在底部更大,以迫使熔融金属到达底部并将其与气体(诸如金属蒸气和任何工作介质气体)分离。作为另一种选择, SunCell®可安装于离心台上,该离心台围绕垂直于返回熔融金属流动方向的轴旋转以产生分离液态和气态物质的离心力。

[0393] 在一个实施方式中,凝结的金属蒸气流至两个独立返回储罐311中,并且每个返回EM泵312将熔融金属泵送至对应储罐5c中。在一个实施方式中,两个返回储罐311和EM泵储罐5c中的至少一者包括液位控制系统,诸如本公开中的液位控制系统,诸如入口上升管

5qa。在一个实施方式中,根据返回储罐中的液位返回熔融金属可以较高或较低的速率抽吸至返回储罐311中,其中抽吸速率由对应的液位控制系统(诸如入口上升管)控制。

[0394] 在一个实施方式中,MHD转换器300还可包括至少一个加热器,诸如感应耦合加热器。加热器可预热与MHD工作介质接触的组件,诸如反应池腔室5b31、MHD喷嘴区段307、MHD产生器区段308、MHD冷凝区段309、返回管道310、返回储罐311、返回EM泵312和返回EM泵管313中的至少一者。加热器可包括至少一个致动器以啮合和回缩加热器。加热器可包括多个线圈和线圈区段中的至少一者。线圈可包括本领域已知的线圈。线圈区段可包括至少一个开环线圈,诸如本公开中的开环线圈。在一个实施方式中,MHD转换器可包括至少一个冷却系统,诸如热交换器316。MHD转换器可包括冷却器,其用于至少一个池和MHD组件,诸如以下群组中的至少一者:腔室5b31、MHD喷嘴区段307、MHD磁体306、MHD电极304、MHD产生器区段308、MHD冷凝区段309、返回管道310、返回储罐311、返回EM泵312和返回EM泵管313。冷却器可移除从MHD流动通道损失的热量,诸如从腔室5b31、MHD喷嘴区段307、MHD产生器区段308和MHD冷凝区段309中的至少一者损失的热量。冷却器可从MHD工作介质回流系统(诸如返回管道310、返回储罐311、返回EM泵312和返回EM泵管313中的至少一者)移除热量。冷却器可包括可将热量排放至环境气氛的辐射热交换器。

[0395] 在一个实施方式中,冷却器可包括再循环器或回热器,其将能量从冷凝区段309转移至储罐5c、反应池腔室5b31、喷嘴307和MHD通道308中的至少一者。转移的能量(诸如热量)可包括来自剩余热能、压力能和工作介质的汽化热中的至少一者的能量,该工作介质为诸如包含汽化金属、动能气溶胶和气体(诸如稀有气体)中的至少一者的工作介质。热导管为无源两相装置,其能够在几米的距离下以几十度的温度降差转移大的热通量,诸如高达 $20\text{MW}/\text{m}^2$;因而,仅使用少量工作流体就可以显著降低材料上的热应力。钠和锂热导管可转移大的热通量并且沿轴向方向几乎保持等温。锂热导管可传递高达 $200\text{MW}/\text{m}^2$ 。在一个实施方式中,诸如熔融金属热导管(诸如液体碱金属,诸如包裹于难熔金属(诸如W)中的钠或锂)之类的热导管可转移来自冷凝器309的热量并将其再循环至反应池腔室5b31或喷嘴307。在一个实施方式中,至少一个热导管回收银汽化热并使其再循环,使得回收的热力为输入至MHD通道308的动力输入的一部分。

[0396] 在一个实施方式中,**SunCell®**的组件(诸如包括MHD转换器的组件)中的至少一者可包括热导管以进行以下中的至少一者:将热量从**SunCell®**动力产生器的一个部分转移至另一部分和将热量从加热器(诸如感应耦合加热器)转移至**SunCell®**组件,诸如EM泵管5k6、储罐5c、反应池腔室5b31和MHD熔融金属返回系统,诸如MHD返回管道310、MHD返回储罐311、MHD返回EM泵312和MHD返回EM管。作为另一种选择,**SunCell®**或至少一个组件可在烘箱(诸如本领域已知的烘箱)内加热。在一个实施方式中,可加热至少一个**SunCell®**组件以至少启动操作。

[0397] **SunCell®**加热器415可为电阻加热器或感应耦合加热器。示例性的**SunCell®**加热器415包括Kanthal A-1 (Kanthal)电阻加热线、能够有至多 1400°C 的工作温度且具有高电阻率和良好抗氧化性的铁素体-铬-铝合金(FeCrAl合金)。用于合适加热元件的另外的FeCrAl合金为Kanthal APM、Kanthal AF、Kanthal D和Alkrothal中的至少一者。诸如电阻线元件之类的加热元件可包含可在 1100°C 至 1200°C 范围内操作的NiCr合金,诸如

Nikrothal 80、Nikrothal 70、Nikrothal 60和Nikrothal 40中的至少一者。作为另一种选择,加热器415可包括能够在氧化气氛中在1500℃至1800℃范围内操作的二硅化钼(MoSi_2),诸如Kanthal Super 1700、Kanthal Super 1800、Kanthal Super 1900、Kanthal Super RA、Kanthal Super ER、Kanthal Super HT和Kanthal Super NC中的至少一者。加热元件可包含与氧化铝形成合金的二硅化钼(MoSi_2)。加热元件可具有抗氧化涂层诸如氧化铝涂层。电阻加热器415的加热元件可包含可能能够在高达1625℃的温度下操作的SiC。

[0398] SunCell®加热器415可包括内部加热器,该内部加热器可通过对SunCell®组件的外部开放但对内部封闭的组件壁的热电偶套管或凹部引入。SunCell®加热器415可包括内部电阻加热器,其中可通过跨越所述经加热的SunCell®组件的壁的磁感应或通过穿透所述经加热的SunCell®组件的壁的液体电极而将动力耦合至内部加热器。

[0399] SunCell®加热器可包括绝缘体以增加其效率和有效性中的至少一者。该绝缘体可包含陶瓷诸如本领域技术人员已知的陶瓷,诸如包含氧化铝-硅酸盐的绝缘体。绝缘体可为可移除或可逆中的至少一者。绝缘体可以机械方式移除。绝缘体可包括可抽真空的腔室和泵,其中通过抽真空而施加绝缘,并且通过添加诸如稀有气体(诸如氦)之类的热传递气体使绝缘逆转。具有可添加或泵离的诸如氦之类的热传递气体的真空腔室可充当可调节绝缘体。SunCell®可包括引起强制对流热传递的气体循环系统,其激活后使热绝缘切换至非热绝缘模式。

[0400] 在另一个实施方式中,SunCell®可包括颗粒绝缘体和至少一个绝缘储罐,所述绝缘储罐具有在待热绝缘的组件周围的至少一个腔室,以在SunCell®升温期间容纳绝缘体。示例性的颗粒绝缘体包括沙和陶瓷珠粒(诸如氧化铝或氧化铝-硅酸盐珠粒,如莫来石珠粒)中的至少一者。可在升温之后移除珠粒。珠粒可通过重力流移除,其中壳体可包括用于珠粒移除的滑槽。珠粒也可用诸如螺旋钻、输送机或气动泵之类的珠粒输送机来以机械方式移除。颗粒绝缘体可还包含诸如液体(诸如水)之类的流化剂,以在填充绝缘储罐时增加流动。所述液体可在加热之前移除并且在绝缘体输送期间添加。绝缘体-液体混合物可包含浆料。SunCell®可包括至少一个另外的储罐以填充绝缘储罐或从绝缘储罐排空绝缘体。该填充储罐可包括维持浆料的部件,诸如搅拌器。在一个实施方式中,SunCell®还可包括在待绝缘的组件周边的液体绝缘储罐、液体绝缘体和泵,其中所述可逆绝缘体可包含可在启动之后排尽或泵离的液体。液体绝缘储罐可包括薄壁石英。示例性的液体绝缘体为具有29W/m K的传热系数的镓,并且另一者为具有8.3W/m K的传热系数的水银。液体绝缘体可包括至少一个辐射屏蔽件,其中所述液体诸如镓可反射辐射。在另一个实施方式中,液体绝缘体可包含熔融盐,诸如盐的熔融低共熔混合物,诸如多个以下中的至少两个的混合物:碱金属和碱土金属卤化物、碳酸盐、氢氧化物、氧化物、硫酸盐和硝酸盐。液体绝缘体可包含加压的液体或超临界液体,诸如 CO_2 或水。

[0401] 在一个实施方式中,可逆绝缘体可包含一材料,该材料在至少约熔融金属(诸如银)的熔点至约SunCell®工作温度的范围内热导率随温度显著增加。可逆绝缘体可包含可以在加热期间是绝缘的并且在高于所需启动温度的温度下变为导热的固体化合物。石英为在银熔点到约1000℃至1600℃的石英SunCell®的所需工作温度的温度范围内热导率显著增加的示例性绝缘材料。可调节石英绝缘体厚度,以实现在启动期间所需的绝缘体行为和

在操作期间热传递至负载。另一示例性实施方式包含高度多孔的半透明陶瓷材料。

[0402] 在另一个实施方式中,经加热的 SunCell®的热量损失主要通过辐射方式。绝缘体可包括容纳 SunCell®的真空腔室和辐射屏蔽层中的至少一者。可在启动之后移除辐射屏蔽层。SunCell®可包括机构以进行以下中的至少一者:旋转热屏蔽层和平移热屏蔽层。该热屏蔽层还可包括绝缘体(诸如二氧化硅或氧化铝绝缘体)的背衬层。在一个示例性的实施方式中,辐射屏蔽层可经转动以降低反射表面积。在另一个实施方式中,辐射屏蔽层还可包括加热元件,诸如 MoSi_2 加热元件。

[0403] 在一个实施方式中,感应电流(诸如在EM泵管区段405和406中感应的电流)可通过电阻加热而引起EM泵区段405中的银熔融。电流可由EM泵变压器绕组401感应。EM泵管区段405可在启动之前预先加载银。在一个实施方式中,分数氢反应的热量可加热至少一个 SunCell®组件。在一个示例性实施方式中,加热器(诸如感应耦合加热器)加热EM泵管5k6、储罐5c以及至少反应池腔室5b31的底部。至少一个其他组件可被分数氢反应释放的热量加热,诸如反应池腔室5b31的顶部、MHD喷嘴307、MHD通道308、MHD冷凝区段309和MHD熔融金属返回系统中的至少一者,该MHD熔融金属返回系统为诸如MHD返回管道310、MHD返回储罐311、MHD返回EM泵312和MHD返回EM管。

[0404] 分数氢反应物源(诸如 H_2O 、 H_2 和 O_2 中的至少一者)可渗透穿过可渗透池组件(诸如池腔室5b31、储罐5c、MHD膨胀通道308和MHD冷凝区段309中的至少一者)。可在至少一个位置诸如穿过EM泵管5k6、MHD膨胀通道308、MHD冷凝区段309、MHD返回管道310、返回储罐311、MHD返回泵312、MHD返回EM泵管313将分数氢反应气体引入所述熔融金属料流中。气体注射器(诸如质量流量控制器)可以是能够诸如穿过EM泵管5k6、MHD返回泵312和MHD返回EM泵管313中的至少一者在MHD转换器的高压侧上以高压注入。气体注射器可以是能够诸如在至少一个位置诸如穿过MHD冷凝区段309、MHD返回管道310和返回储罐311在MHD转换器的低压侧上以较低压力注入分数氢反应物。在一个实施方式中,可通过可进一步包括压力阻止器和回流止回阀以防止熔融金属流回至水供应源的流量控制器(诸如质量流量控制器)穿过EM泵管5k4注入水和水蒸气中的至少一者。可穿过选择性渗透膜(诸如陶瓷或碳膜)注入水。

[0405] 在一个实施方式中,转换器可包括PV转换器,其中分数氢反应物注射器能够通过部件中的至少一者(诸如通过在递送位点的工作压力下的渗透或注入)供应反应物。在另一个实施方式中, SunCell®还可包括氢气源和氧气源,其中两种气体化合以在反应池腔室5b31中提供水蒸气。氢源和氧源可各自包括相应的贮槽、直接或间接地使气体流入反应池腔室5b31的管线、流量调节器、流量控制器、计算机、流量传感器和至少一个阀中的至少一者。在后一情形中,气体可流入与反应池腔室5b31气体连续的腔室,诸如EM泵5ka、储罐5c、喷嘴307、MHD通道308和其它MHD转换器组件(诸如任何返回管线310a、管道313a和泵312a)中的至少一者。在一个实施方式中,可将 H_2 和 O_2 中的至少一者注入至注射区段EM泵管5k61中。可穿过双EM泵注射器的单独的EM泵管注入 O_2 和 H_2 。作为另一种选择,可在具有较低银蒸气压的区域(诸如MHD通道308或MHD冷凝区段309)中穿过注射器将气体(诸如氧和氢中的至少一者)添加至池内部。可穿过选择性膜(诸如陶瓷膜,诸如纳米多孔陶瓷膜)注入氢和氧中的至少一者。可穿过氧渗透膜诸如本公开中的一者,诸如可涂覆有 $\text{Bi}_{26}\text{Mo}_{10}\text{O}_{69}$ 以增加氧渗透速率的 $\text{BaCo}_{0.7}\text{Fe}_{0.2}\text{Nb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ (BCFN)氧渗透膜来供应氧。氢可穿过氢渗透膜诸如钯-银合金膜供应。SunCell®可包括电解器,诸如高压电解器。电解器可包括质子交换膜,其中纯氢可由

阴极隔室供应。纯氧可由阳极隔室供应。在一个实施方式中,EM泵零件涂覆有非氧化涂层或防氧化涂层,并且使用两个质量流量控制器在受控条件单独地注入氢和氧,其中可基于相应气体传感器所感测的池浓度来控制流量。

[0406] 反应池腔室5b31的分数氢反应混合物可还包含氧源诸如 H_2O 和包含氧的化合物中的至少一者。氧源诸如包含氧的化合物可过量以维持接近恒定的氧源存量,其中在池操作期间,较小部分可逆地与所供应的H源诸如 H_2 气反应以形成 HOH 催化剂。示例性的含氧化合物为氢氧化物(诸如 $Ga(OH)_3$ 、水合氧化镓、 $Al(OH)_3$)、羟基氧化物(诸如 $GaOOH$ 、 $AlOOH$ 和 $FeOOH$)、氧化物(诸如 MgO 、 CaO 、 SrO 、 BaO 、 ZrO_2 、 HfO_2 、 Al_2O_3 、 Li_2O 、 $LiVO_3$ 、 Bi_2O_3 、 Al_2O_3 、 WO_3)和本公开的其它物质。氧源化合物可为用于使氧化物陶瓷诸如氧化钇或氧化钪诸如氧化钇(Y_2O_3)、氧化镁(MgO)、氧化钙(CaO)、氧化锶(SrO)、氧化钽(Ta_2O_5)、三氧化二硼(B_2O_3)、 TiO_2 、氧化铈(Ce_2O_3)、锆酸锶($SrZrO_3$)、锆酸镁($MgZrO_3$)、锆酸钙($CaZrO_3$)和锆酸钡($BaZrO_3$)稳定的氧源化合物。

[0407] 在一个实施方式中,氢可作为气体穿过气体注射器注入。可使氢气保持在诸如1至100大气压的范围内的压力下,以减小保持所需动力所需的流量。在另一个实施方式中,氢可通过渗透或扩散穿过可渗透膜来供应至反应池腔室5b31。所述膜可包含:陶瓷诸如聚合物、二氧化硅、沸石、氧化铝、氧化锆、氧化钪、碳,或金属诸如Pd-Ag合金、铌、Ni、Ti、不锈钢,或本领域已知的其他氢可渗透材料,诸如由McLeod所报导的氢可渗透材料[L.S.McLeod, "Hydrogen permeation through microfabricated palladium-silver alloy membranes", PhD thesis Georgia Institute of Technology, 12月, (2008), https://smartechnology.gatech.edu/bitstream/handle/1853/31672/mcleod_logan_s_200812_phd.pdf], 该文献以全文引用的方式并入。可通过进行以下中的至少一者来增加 H_2 渗透速率:增加 H_2 可渗透膜诸如Pd或Pd-Ag膜的供应侧与反应池腔室5b31之间的压差、增加膜的面积、减小膜的厚度和升高膜的温度。膜可包括格栅或穿孔背衬以提供结构支撑来在以下中的至少一个条件下操作:诸如在约1至500大气压的范围内的较高压差,诸如在约 0.01cm^2 至 10m^2 的范围内的较大面积,诸如在10nm至1cm的范围内的减小厚度和诸如在约 30°C 至 3000°C 的范围内的升高温度。所述格栅可包含不与氢反应的金属。格栅可耐受氢脆化。一个示例性实施方式,具有 $5 \times 10^{-11} \text{m m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ 的渗透系数、 $1 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 的面积和 $1 \times 10^{-4} \text{m}$ 的厚度的Pd-Ag合金膜在 $1 \times 10^7 \text{Pa}$ 的压差和 300°C 的温度下操作以提供约0.01摩尔/s的 H_2 流量。在一个实施方式中,可通过将等离子体维持在渗透膜的外表面上来增加氢渗透速率。

[0408] 在一个实施方式中,包括内部隔室(诸如储罐5c、反应池腔室5b31、喷嘴307、MHD通道308、MHD冷凝区段309以及其他MHD转换器组件(诸如任何返回管线310a、管道313a和泵312a))的SunCell®和MHD转换器的至少一个组件容纳于气密封的壳体或腔室中,其中腔室中的气体通过跨越气体可渗透且银蒸气不可渗透的膜扩散而与内部池气体平衡。气体选择性膜可包含半渗透陶瓷,诸如本公开的半渗透陶瓷。池气体可包含氢、氧和稀有气体(诸如氩气或氦气)中的至少一者。外部壳体可包括用于各气体的压力传感器。SunCell®可包括用于各气体的源和控制器。稀有气体诸如氩气的源可包括贮槽。氢和氧中的至少一者的源可包括电解器,诸如高压电解器。气体控制器可包括流量控制器、气体调节器和计算机中的至少一者。可控制壳体中的气体压力以控制池内部(诸如储罐、反应池腔室和MHD转换器组件中)的各气体的气体压力。各气体的压力可在约0.1托至20大气压的范围内。在图9-21中所

示的一个示例性实施方式中,MHD通道308其可以是直的、发散的、或汇聚的,并且MHD冷凝区段309包括气体壳体309b、压力计309c以及气体供应和排空组装件309e,该排空组装件包括进气口管线、出气口管线和凸缘,其中气体可渗透膜309d可安装于MHD冷凝区段309的壁中。安装件可包括烧结接头、金属化陶瓷接头、钎焊接头或本公开的其他接头。气体壳体309b还可包括接入端口。气体壳体309b可包括金属诸如抗氧化金属(诸如SS 625)或金属上的抗氧化涂层(诸如具有合适CTE的金属(诸如钼)上的铱涂层)。作为另一种选择,气体壳体309b可包含陶瓷,诸如金属氧化物陶瓷,诸如氧化锆、氧化铝、氧化镁、氧化钪、石英或本公开的另一者。可冷却穿过金属气体壳体309b的陶瓷穿透部(诸如MHD返回管道310的那些)。穿透部可包括碳密封件,其中密封温度低于金属的碳化温度和陶瓷的碳还原温度。可针对热熔融金属移除密封件以使其冷却。密封件可包括冷却,诸如被动或强制的气冷或水冷。

[0409] 在一个示例性实施方式中,在MHD转换为电期间,黑体等离子体初始温度和最终温度为3000K和1300K。在一个实施方式中,MHD产生器在低压侧上冷却以维持等离子体流动。霍尔或产生器通道308可被冷却。冷却手段可为本公开中的一者。MHD产生器300可包括热交换器316诸如辐射热交换器,其中热交换器可经设计以根据其温度而辐射功率以维持所需的最低通道温度范围,诸如在约1000℃至1500℃的范围内。辐射热交换器可包括高表面积以使其大小和重量中的至少一者最小化。辐射热交换器316可包括多个表面,该多个表面可被构造成锥形或棱柱形小面以增加辐射表面积。辐射热交换器可在空气中操作。辐射热交换器的表面可用具有至少一种以下群组中的特性的材料涂覆:(i)能够高温操作,诸如难熔材料,(ii)具有高发射率,(iii)对氧化稳定,并且提供高表面积,诸如具有无阻碍或无阻挡发射的纹理化表面。示例性的材料为陶瓷,诸如氧化物,诸如MgO、ZrO₂、HfO₂、Al₂O₃和其他氧化稳定化的陶瓷,诸如ZrC-ZrB₂和ZrC-ZrB₂-SiC复合材料。

[0410] 产生器还可包括再生器或再生热交换器。在一个实施方式中,在以逆流方式通过以在膨胀区段308或其他热量损失区域中接收热量之后,流体返回至注射系统来预热注入池反应腔室5b31中的金属以维持池腔室温度。在一个实施方式中,可通过热交换器加热以下中的至少一者:工作介质,诸如银和稀有气体中的至少一者;池组件,诸如储罐5c、反应池腔室5b31和MHD转换器组件,诸如MHD冷凝区段309或其他热组件,诸如储罐5c、反应池腔室5b31、MHD喷嘴区段307、MHD产生器区段308和MHD冷凝区段309的群组中的至少一者,该热交换器从至少一个其他池或MHD组件(诸如储罐5c、反应池腔室5b31、MHD喷嘴区段307、MHD产生器区段308和MHD冷凝区段309的群组中的至少一者)接收热量。再生器或再生热交换器可将热量从一个组件转移至另一组件。

[0411] 在一个实施方式中,SunCell®还可包括熔融金属溢流系统,诸如包括溢流槽、至少一个泵、池熔融金属存量传感器、熔融金属存量控制器、加热器、温度控制系统以及可通过至少一个传感器和控制器确定视需要存储熔融金属并供应至SunCell®的熔融金属存量的熔融金属溢流系统。溢流系统的熔融金属存量控制器可包括本公开的熔融金属液位控制器,诸如入口上升管和EM泵。溢流系统可包括MHD返回管道310、返回储罐311、返回EM泵312和返回EM泵管313中的至少一者。

[0412] 电磁泵可各自包括用于液态金属的两种主要类型的电磁泵中的一者:AC或DC传导泵,其中跨越容纳有液态金属的管建立AC或DC磁场,并且将AC或DC电流穿过连接至管壁的电极分别馈送至液体;和感应泵,其中行波场感应出所需电流,如同感应电动机中一样,其

中电流可与所施加的AC电磁场交叉。感应泵可包括三种主要形式：环形线性、扁平线性和螺旋形。泵可包括本领域已知的其他泵，诸如机械泵和热电泵。机械泵可包括具有电动机驱动的叶轮的离心泵。给电磁泵的功率可以是恒定的或脉冲式的，以分别引起熔融金属的相应恒定或脉冲式注入。该脉冲式注入可由程序或函数产生器驱动。该脉冲式注入可在反应池腔室中维持脉冲等离子体。

[0413] 在一个实施方式中，EM泵管5k6包括流量断续器(flow chopper)以引起间歇式或脉冲式熔融金属注入。该断续器可包括阀，诸如进一步包括控制器的电子控制阀。该阀可包括电磁阀。作为另一种选择，该断续器可包括具有至少一个通路的旋转圆盘，该旋转圆盘周期性地旋转而横切熔融金属流以允许熔融金属流动穿过该通路，其中金属流由旋转圆盘不包括通路的区段阻挡。

[0414] 熔融金属泵可包括移动磁体泵(MMP)，诸如描述于以下文献中的移动磁体泵：M.G.Hvasta,W.K.Nollet,M.H.Anderson“Designing moving magnet pumps for high-temperature,liquid-metal systems”,Nuclear Engineering and Design,第327卷,(2018),第228-237页,其全部内容以引用的方式并入。MMP可以产生具有旋转永磁体阵列和多相场线圈中的至少一者的行进磁场。在一个实施方式中，MMP可包括多级泵，诸如用于MHD再循环和点燃注射的两级泵。该两级MMP泵可包括电动机，诸如使轴转动的电动机。该两级MMP还可包括两个鼓(各包括固定在每个鼓的表面上的一组周向安装的具有交替极性的磁体)和具有容纳鼓的U形部分的陶瓷容器，其中每个鼓可通过轴而旋转以使得熔融金属在陶瓷容器中流动。在另一个MMP实施方式中，交替磁体鼓由每个盘表面上具有两个交替极性磁体的盘代替，所述盘表面位于夹着的条带陶瓷容器的相对位置上，所述陶瓷容器容纳通过盘的旋转泵送的熔融金属。在另一个实施方式中，所述容器可包含磁场可渗透材料，诸如非铁金属(诸如不锈钢)或陶瓷(诸如本公开中的陶瓷)。可通过诸如空气冷却或水冷却之类的手段来冷却磁体以允许在高温下操作。

[0415] 示例性的商用AC EM泵为CMI Novacast CA15,其中加热和冷却系统可经改良以支持泵送熔融银。可通过本公开的加热器(诸如电阻加热器或感应耦合加热器)加热包括入口和出口区段的EM泵管和容纳有银的容器。诸如电阻加热器或感应耦合加热器之类的加热器可在EM泵管外部且还包括传热部件，以将热量从加热器传递至EM泵管(诸如热导管)。热导管可在高温下操作，诸如具有锂工作流体的热导管。可通过本公开的系统(诸如通过水冷却回路和制冷器)冷却EM泵的电磁体。

[0416] 在一个实施方式(图4-22)中，EM泵400可包括AC感应型，其中银上的洛伦兹力由通过银的时变电流和交叉同步时变磁场产生。通过银的时变电流可由第一时变磁场的法拉第感应产生，该第一时变磁场由EM泵变压器绕组电路401a产生。第一时变磁场源可包括初级变压器绕组401，并且银可充当次级变压器绕组，诸如包括电流回路的EM泵管区段405和EM泵电流回路返回区段406的单匝短路绕组。初级绕组401可包括AC电磁体，其中第一时变磁场通过银405和406的周向回路(感应电流回路)由磁性电路或EM泵变压器磁轭402来传导。银可容纳在诸如陶瓷容器405和406之类的容器中，诸如包含本公开的陶瓷，诸如氮化硅(熔点1900℃)、石英、氧化铝、氧化锆、氧化镁或氧化钪的容器。可通过受控被动氧化在亚硝酸硅上形成保护性SiO₂层。容器可包括封围磁性电路或EM泵变压器磁轭402的通道405和406。容器可包括扁平区段405，以使得感应电流在垂直于同步时变磁场的方向上具有流动分量

和根据相应洛伦兹力的所需的泵流方向。交叉同步时变磁场可通过包括AC电磁体403和EM泵电磁轭404的EM泵电磁电路或组装件403c来产生。磁轭404可在容纳银的容器405的扁平区段处具有间隙。EM泵变压器绕组电路401a的电磁体401和EM泵电磁组装件403c的电磁体403可由单相AC动力源或本领域已知的其他适合的动力源提供动力。磁体可在靠近于回路弯曲部定位,以使得存在所需的电流矢量分量。为变压器绕组401和电磁体绕组403提供动力的AC电流的相位可同步以维持所需的洛伦兹泵送力方向。用于变压器绕组401和电磁体绕组403的动力供应器可为相同或独立的动力供应器。感应电流和B场的同步化可通过模拟部件(诸如延迟线组件)或通过数字部件,两者在本领域中均是已知。在一个实施方式中,EM泵可包括具有多个磁轭的单个变压器,以提供闭合电流回路405和406两者中的电流的感应并且充当电磁体403和磁轭404。由于使用单个变压器,相应的感应电流和AC磁场可同相。

[0417] 在一个实施方式(图2-22)中,感应电流回路可包括入口EM泵管5k6、电流回路405的EM泵管区段、出口EM泵管5k6以及穿过储罐5c中银的路径,该路径可包括包括这些组件的实施方式中的入口上升管5qa和注射器561的壁。EM泵可包括监测和控制系统,诸如用于初级绕组的电流和电压以及具有泵送参数的SunCell动力产生的反馈控制的监测和控制系统。示例性的测量的反馈参数可为反应池腔室5b31处的温度和MHD转换器处的电。监测和控制系统可包括相应的传感器、控制器和计算机。在一个实施方式中,可对SunCell®进行以下操作中的至少一者:由诸如手机之类的无线装置监测和由该无线装置控制。SunCell®可包括天线以发送和接收数据和控制信号。

[0418] 在仅具有一对电磁泵400的MHD转换器实施方式中,每个MHD返回管道310延伸并连接至相应电磁泵5kk的入口。该连接件可包括诸如Y形管套(Y-union)之类的管套,所述Y形管套具有MHD返回管道310的输入和储罐基部的凸台308,诸如储罐底板组装件409的凸台。在包括具有MHD转换器的加压SunCell®的实施方式中,EM泵的注射侧、储罐和反应池腔室5b31在相对于MHD返回管道310的高压下操作。每个EM泵的入口可仅包括MHD返回管道310。该连接件可包括诸如Y形管套之类的管套,所述Y形管套具有MHD返回管道310的输入和储罐基部的凸台,其中泵动力防止从来自储罐的入口流回流至MHD返回管道310。

[0419] 在MHD动力产生器实施方式中,注射EM泵和MHD返回EM泵可包括本公开中的任一者,诸如DC或AC传导泵和AC感应泵。在示例性的MHD动力产生器实施方式(图5)中,注射EM泵可包括感应EM泵400,并且MHD返回EM泵312可包括感应EM泵或DC传导EM泵。在另一个实施方式中,注射泵可还充当MHD返回EM泵。MHD返回管道310可在比来自储罐的入口低的压力位置处输入至EM泵。来自MHD返回管道310的入口可在适合于MHD冷凝区段309和MHD返回管道310中的低压的位置处进入EM泵。来自储罐5c的入口可在EM泵管压力较高的位置处进入,诸如在其中压力为所需的反应池腔室5b31工作压力的位置处。注射器区段5k61处的EM泵压力可至少为所需反应池腔室压力的压力。入口可在管和电流回路区段5k6、405或406处附接至EM泵。

[0420] EM泵可包括多级泵(图6-21)。该多级EM泵可在各自对应于基本上仅允许向前熔融金属流离开EM泵出口和注射器5k61的压力的不同泵级处接收输入金属流,诸如来自MHD返回管道310的输入金属流和来自储罐5c的基部的输入金属流。在一个实施方式中,多级EM泵组装件400a(图6)包括至少一个EM泵变压器绕组电路401a并且还至少包括至少一个AC EM泵电磁电路403c,所述EM泵变压器绕组电路包括穿过感应电流回路405和406的变压器绕组401

和变压器磁轭402,所述AC EM泵电磁电路包括AC电磁体403和EM泵电磁轭404。感应电流回路可包括EM泵管区段405和EM泵电流回路返回区段406。电磁轭404可在容纳有诸如银之类的泵送熔融金属的容器的扁平区段或电流回路405的EM泵管区段处具有间隙。在图7中示出的实施方式中,包括EM泵管区段405的感应电流回路可具有偏离用于区段406中的返回流的弯曲部定位的入口和出口,使得感应电流可更加横向于电磁体403a和403b的磁通量以优化横向于电流和磁通量二者的洛伦兹泵送力。泵送的金属可在区段405中是熔融的并且在EM泵电流回路返回区段406中是固态的。

[0421] 在一个实施方式中,多级EM泵可包括多个AC EM泵电磁电路403c,其提供垂直于电流和金属流二者的磁通量。该多级EM泵可沿电流回路405的EM泵管区段在其中入口压力适合于局部泵压以实现向前泵流的位置处接入口,其中压力在下一个AC EM泵电磁电路403c级处增加。在一个示例性实施方式中,MHD返回管道310进入电流回路,诸如在包括AC电磁体403a和EM泵电磁轭404a的第一AC电磁体电路403c之前的入口处的电流回路405的EM泵管区段。来自储罐5c的入口流可在第AC电磁体电路403c之后和在第二AC电磁体电路403c之前进入,这些AC电磁体电路包括AC电磁体403b和EM泵电磁轭404b,其中泵维持电流回路405中的熔融金属压力,该熔融金属压力维持从每入口至下一个泵级或至泵出口和注射器5k61的所需流量。每一泵级的压力可通过控制AC电磁体电路的相应AC电磁体的电流来控制。示例性的变压器包括硅钢层合变压器芯402,并且示例性的EM泵电磁轭404a和404b各自包括层压硅钢(晶粒取向钢)片叠层。

[0422] 在一个实施方式中,EM泵电流回路返回区段406诸如陶瓷通道可包括熔融金属流动限制器或可用固体电导体填充,以使得电流回路的电流闭合,同时防止熔融金属从EM泵管的较高压力区段回流至较低压力区段。所述固体可包含金属诸如本公开的不锈钢,诸如Haynes 230、Pyromet®合金625、Carpenter L-605合金、BioDur® Carpenter CCM®合金、Haynes 230、310SS或625SS。固体可包含难熔金属。固体可包含抗氧化金属。固体可包含金属或导电覆盖层或涂层诸如铱以避免固体导体氧化。

[0423] 在一个实施方式中,管道406中提供返回电流路径但阻止银回流的固体导体包含固态熔融金属,诸如固态银。可通过在沿管道406的路径的一个或多个位置处将温度维持在低于银的熔点而使得其在管道406的至少一部分中保持固态状态来维持固态银,以阻止银在管道406中流动。管道406可包括缺少管道加热或绝缘的热交换器(诸如冷却剂回路)和远离热区段405的区段中的至少一者,使得管道406的至少一部分的温度可维持在低于熔融金属的熔点。

[0424] 在一个实施方式中,转换器和电磁体中的至少一者的磁性绕组通过变压器磁轭402和电磁电路磁轭404中的至少一者的延伸而远离电流回路405容纳有流动金属的EM泵管区段。所述延伸允许以下中的至少一者:EM泵管405的更有效加热诸如感应耦合加热,以及变压器绕组401、变压器磁轭402以及包含AC电磁体403和EM泵电磁轭404的电磁电路403c中的至少一者的更有效冷却。就两级EM泵而言,磁性电路可包括AC电磁体403a和403b以及EM泵电磁轭404a和404b。变压器磁轭402和电磁轭404中的至少一者可包含具有高居里温度的铁磁材料,诸如铁或钴。绕组可包括高温绝缘线,诸如陶瓷涂覆的包层线,诸如镍包层铜线,诸如Ceramawire HT。EM泵变压器绕组电路或组装件401a和EM泵电磁电路或组装件403c中的至少一者可包括水冷却系统诸如本公开中的水冷却系统,诸如DC传导EM泵的磁体5k4的

水冷却系统(图2-3)。感应EM泵400b中的至少一者可包括空气冷却系统400b(图9-10)。感应EM泵400c中的至少一者可包括水冷却系统(图11)。该冷却系统可包括热导管,诸如本公开中的热导管。冷却系统可包括充当冷却剂管道的陶瓷夹套。冷却剂系统可包括冷却剂泵和热交换器以散热至负载或环境。夹套可至少部分地容纳待冷却的组件。磁轭冷却系统可包括内部冷却剂管道。冷却剂可包含水。冷却剂可包含硅油。

[0425] 示例性的变压器包括硅钢层合变压器芯。点燃变压器可包括(i)在约10至10,000匝、100至5000匝和500至25,000匝中的至少一个范围内的绕组数目;(ii)在约10W至1MW、100W至500kW、1kW至100kW和1kW至20kW中的至少一个范围内的功率,以及(iii)在约0.1A至10,000A、1A至5kA、1A至1kA和1A至500A中的至少一个范围内的初级绕组电流。在一个示例性实施方式中,点燃电流在约6V至10V的电压范围内,并且电流为约1000A;因此具有50匝的绕组在约500V和20A下操作以在1000A下提供10V的点燃电流。EM泵电磁体可包括在约0.01T至10T、0.1T至5T和0.1T至2T的至少一个范围内的通量。在一个示例性实施方式中,约0.5mm直径的磁线维持在约200℃下。

[0426] 在包括在池工作温度下不与铝形成合金或不与铝反应的SunCell®的实施方式中,熔融金属可包含铝。在一个示例性实施方式中,SunCell®(诸如图4-21中所示的SunCell®)包括与熔融铝金属接触的组件,诸如包含石英或陶瓷的反应池腔室5b31和EM泵管5k6,其中SunCell®还包括感应EM泵和感应点燃系统。

[0427] 至少一个管线(图9-21)诸如MHD返回管道310、EM泵储罐管线416和EM泵注射管线417中的至少一者可通过加热器(诸如电阻加热器或感应耦合加热器)加热。该感应耦合加热器可包括缠绕于管线周围的天线415,其中天线可被水冷却。缠绕有感应耦合加热器天线诸如5f和415的组件可包括内部绝缘层。感应耦合加热器天线可起到双重功能或者加热水冷却以维持相应组件的所需温度。SunCell还可包括结构支撑件418(其固定可安装在结构支撑件418上的组件诸如MHD磁体壳体306a、MHD喷嘴307和MHD通道308、电输出、传感器和控制管线419)和热屏障(诸如EM泵储罐管线416和EM泵注射管线417周围的420)。

[0428] 在一个实施方式中,点燃汇流条诸如5k2a可包括与湿密封件接头(诸如储罐5c处的接头)的固化熔融金属的一部分接触的电极。在另一个实施方式中,点燃系统包括感应系统(图8-21),其中施加至导电熔融金属以引起分数氢反应点燃的电源提供感应电流、电压和功率。点燃系统可包括无电极系统,其中点燃电流由通过感应点燃变压器组装件410的感应来施加。感应电流可流动穿过来自通过泵(诸如EM泵400)维持的多个注射器的相交熔融金属料流。在一个实施方式中,储罐5c还可包括陶瓷交叉连接通道414,诸如储罐5c的基部之间的通道。感应点燃变压器组装件410可包括感应点燃变压器绕组411和感应点燃变压器磁轭412,该磁轭可延伸穿过由储罐5c、来自多个熔融金属注射器的相交熔融金属料流和交叉连接通道414形成的感应电流回路。感应点燃变压器组装件410可与EM泵变压器绕组电路401a的感应点燃变压器组装件类似。

[0429] 在一个实施方式中,点燃电流源可包括AC感应型,其中诸如银之类的熔融金属中的电流由穿过银的时变磁场的法拉第感应产生。时变磁场源可包括初级变压器绕组、感应点燃变压器绕组411,并且银可至少部分地充当次级变压器绕组,诸如单匝短路绕组。初级绕组411可包括AC电磁体,其中感应点燃变压器磁轭412穿过包含熔融银的周向导电回路或电路传导时变磁场。在一个实施方式中,感应点燃系统可包括多个闭合磁回路轭412,其维

持穿过包括熔融银电路的次级绕组的时变通量。至少一个磁轭和相应磁性电路可包括绕组411,其中各自具有绕组411的多个磁轭412的累积通量可并行产生感应电流和电压。可选择各磁轭412绕组411的初级绕组匝数以从施加至各绕组的电压获得所需的次级电压,并且可通过选择具有相应绕组411的闭合回路磁轭412的数目来获得所需的次级电流,其中电压不依赖于磁轭和绕组的数目,并且并联电流是累加的。

[0430] 变压器电磁体可通过单相AC动力源或本领域已知的其他适合动力源供给动力。可增加变压器频率以减小变压器磁轭412的大小。变压器频率可至少在约1Hz至1MHz、1Hz至100kHz、10Hz至10kHz和10Hz至1kHz的范围内。变压器动力供应器可包括VFD变频驱动器。储罐5c可包括熔融金属通道诸如连接两个储罐5c的交叉连接通道414。封围变压器磁轭412的电流回路可包括储罐5c中所容纳的熔融银、交叉连接通道414、注射器管5k61中的银和相交以使感应电流回路闭合的所注入的熔融银流。感应电流回路可还至少部分包括容纳于EM泵组装件(诸如入口上升管5qa、EM泵管5k6、凸台和注射器5k61)中的至少一者中的熔融银。

[0431] 交叉连接通道414可处于储罐中所需的熔融金属(诸如银)液位处。作为另一种选择,交叉连接通道414可处于低于所需储罐熔融金属液位的位置,以使得通道在操作期间连续地填充有熔融金属。交叉连接通道414可朝向储罐5c的基部定位。通道可形成感应电流回路或电路的一部分并且还有助于熔融金属从具有较高银液位的一个储罐流动至具有较低液位的另一储罐以维持两个储罐5c中的所需液位。熔融金属排出压力的压差可致使金属在储罐之间的流动,以维持每个储罐中的所需液位。电流回路可包括相交熔融金属料流、注射器管5k61、储罐5c中的熔融金属柱和连接处于所需熔融银液位的储罐5c或低于所需液位的储罐的交叉连接通道414。电流回路可封围通过法拉第感应产生电流的变压器磁轭412。在另一个实施方式中,至少一个EM泵变压器磁轭402还可包括感应点燃变压器磁轭412,以通过额外供应穿过点燃熔融金属回路的时变磁场来产生感应点燃电流,该点燃熔融金属回路为诸如由相交熔融金属料流以及容纳于储罐中的熔融金属和交叉连接通道414形成的点燃熔融金属回路。储罐5c和通道414可包括诸电绝缘体如陶瓷。感应点燃变压器磁轭412可包括覆盖件413,该覆盖件可包括电绝缘体和热绝缘体中的至少一者,诸如陶瓷覆盖件。感应点燃变压器磁轭412在可包括周向缠绕的感应耦合加热器天线(诸如螺旋线圈)的储罐之间延伸的区段可通过覆盖件413热屏蔽或电屏蔽。储罐5c、通道414和覆盖件413中的至少一者的陶瓷可为本公开的陶瓷,诸如氮化硅(熔点1900℃)、石英诸如熔融石英、氧化铝、氧化锆、氧化镁或氧化钪。可通过受控被动氧化在亚硝酸硅上形成保护性SiO₂层。

[0432] 在一个实施方式中,交叉连接通道414维持储罐银液位接近恒定。**SunCell®**还可包括注射器5k61的浸没喷嘴5q。由于每个储罐5c的大约恒定的熔融金属液位,每个浸没喷嘴的深度以及因此排出压力(注射器通过该压力进行注入)可基本上保持恒定。在包括交叉连接通道414的实施方式中,入口上升管5qa可被移除并用通入储罐凸台408或EM泵储罐管线416中的端口替换。

[0433] **SunCell®**可包括热源,以在操作性启动期间加热至少一个组件。可选择热源以实现以下中的至少一者:避免过度加热感应EM泵和感应点燃系统中的至少一者的磁轭。热源可允许高效地热传递至**SunCell®**的热动力源实施方式的外部热交换器。热可维持用于熔融金属注射系统(诸如包括EM泵的双熔融金属注射系统)的熔融金属。在一个实施方式中,**SunCell®**包括加热器或加热源,诸如化学热源(诸如催化化学热源)、火焰或燃烧热源、电阻

加热器(诸如难熔丝加热器)、辐射加热源(诸如红外光源,诸如热灯或高功率二极管光源)和感应耦合加热器中的至少一者。

[0434] 辐射加热源可包括扫描待加热表面上的辐射功率的部件。该扫描部件可包括扫描镜。该扫描部件可包括至少一个镜并且还可包括在多个位置上移动所述镜的部件,诸如机械、气动、电磁、压电、液压和本领域已知的其他致动器。

[0435] 在一个实施方式中,加热器415可包括电阻加热器,诸如包括线,诸如Kanthal或本公开的其他线的电阻加热器。电阻加热器可包括可缠绕在待加热组件周围的难熔电阻丝或线。示例性的电阻加热器元件和组件可包含高温导体,诸如碳、镍铬合金、300系列不锈钢、英高合金800和Inconel 600、601、718、625、海恩斯230、188、214、镍、赫史特合金C、钛、钽、钼、TZM、铌、铈和钨。所述丝或线可灌封于灌封化合物中以保护其免受氧化。加热元件(如丝、线或网)可在真空中操作以保护其免受氧化。示例性的加热器包括Kanthal A-1 (Kanthal) 电阻加热线、能够有高达1400℃的工作温度且具有高电阻率和良好抗氧化性的铁素体-铬-铝合金(FeCrAl合金)。另一示例性的丝是形成非剥落性氧化物涂层的Kanthal APM,该氧化物涂层耐氧化和碳化环境并且可操作至1475℃。1375K和发射率为1下的热损失率为200kW/m²或0.2W/cm²。操作至1475K的市售电阻加热器具有4.6W/cm²的功率。可使用加热元件外部的绝缘体增加加热。

[0436] 示例性的加热器415包括Kanthal A-1 (Kanthal) 电阻加热线,其为能够有高达1400℃的工作温度并且具有高电阻率和良好抗氧化性的铁素体-铬-铝合金(FeCrAl合金)。用于合适加热元件的另外的FeCrAl合金为Kanthal APM、Kanthal AF、Kanthal D和Alkrothal中的至少一者。诸如电阻线元件之类的加热元件可包含可在1100℃至1200℃范围内操作的NiCr合金,诸如Nikrothal 80、Nikrothal 70、Nikrothal 60和Nikrothal 40中的至少一者。作为另一种选择,加热器415可包括能够在氧化气氛中在1500℃至1800℃范围内操作的二硅化钼(MoSi₂),诸如Kanthal Super 1700、Kanthal Super 1800、Kanthal Super 1900、Kanthal Super RA、Kanthal Super ER、Kanthal Super HT和Kanthal Super NC中的至少一者。加热元件可包含与氧化铝形成合金的二硅化钼(MoSi₂)。加热元件可具有抗氧化涂层诸如氧化铝涂层。电阻加热器415的加热元件可包含可能能够在高达1625℃的温度下操作的SiC。加热器可包含绝缘体,以增加其效率和有效性中的至少一者。该绝缘体可包含陶瓷诸如本领域技术人员已知的陶瓷,诸如包含氧化铝-硅酸盐的绝缘体。绝缘体可为可移除的或可逆的中的至少一者。绝缘体可在启动之后移除以更有效地将热传递至所需接收器,诸如周围环境或热交换器。绝缘体可以机械方式移除。绝缘体可包括可抽真空的腔室和泵,其中通过抽真空而施加绝缘体,并且通过添加诸如稀有气体(诸如氦)之类的热传递气体使绝缘体逆转。具有可添加或泵离的诸如氦之类的热传递气体的真空腔室可充当可调节绝缘体。

[0437] 电阻加热器415可通过串联和并联有线电路中的至少一者提供动力,以选择性地加热SunCell®不同组件。电阻加热线可包括双绞线以防止受引起时变场的系统干扰,这些系统为诸如感应系统,诸如至少一个感应EM泵、感应点燃系统和电磁体。可使电阻加热线取向以使得任何关联的时变磁通量最小化。所述加热线取向可以是使得任何闭合回路均在平行于磁通量的平面内的取向。

[0438] 催化化学热源和火焰或燃烧热源中的至少一者可包含燃料,诸如烃诸如丙烷和氧

或者氢和氧。**SunCell®**可包括电解器,其可供应 H_2 和 O_2 的大致化学计量混合物。电解器可包括气体分离器,以分开供应 H_2 或 O_2 中的至少一者。电解器可包括高压电解单元,诸如具有用于 H_2 和 O_2 中的至少一者的独立源的质子交换膜的电解单元。电解单元可在启动期间由蓄电池提供动力。**SunCell®**可包括用于来自 H_2O 电解的 H_2 和 O_2 气体的气体储存和供应系统。储气罐可储存来自随时间推移的 H_2O 电解的 H_2 和 O_2 气体中的至少一者。随时间推移的电解功率可由**SunCell®**或蓄电池提供。储气罐可将作为燃料的气体以一定速率释放至加热器,以获得比可获自蓄电池的功率更高的功率。电解的效率可优于90%。催化剂上的氢-氧复合和燃烧的效率可为几乎100%。火焰加热器可包括至少一个燃烧器和一部件,该部件使所述至少一个燃烧器在多个位置上移动或扫描以使得火焰覆盖较大面积。该扫描器可包括凸轮和机械、气动、电磁、压电、液压和本领域已知的其他致动器中的至少一者。

[0439] 在一个实施方式中,加热系统包括管道、歧管和至少一个壳体中的至少一者,以将至少一种燃料或燃料混合物(诸如 H_2 和 O_2 中的至少一者)供应至浸渍有催化剂的表面,以在**SunCell®**的至少一个组件的表面上燃烧燃料气体而充当加热源。氢和氧的化学计量混合物的最高温度为约2800°C。任何待加热组件的表面可用氢-氧复合器催化剂涂覆,催化剂诸如雷氏镍、氧化铜或贵金属,诸如铂、钯、钨、铌、铯或铱。示例性的催化表面为Pd、Pt或Ru涂覆的氧化铝、硅石、石英和氧化铝-硅酸盐中的至少一者。火焰加热器可包括经加热的丝,其中该丝的高温可至少部分地通过氢-氧复合反应来维持。

[0440] 在一个实施方式中, H_2+O_2 气体源可包含氢氧混合气炬系统,诸如包含类似市售单元诸如Honguang H160氧氢HHO气体火焰产生器的设计的氢氧混合气炬系统。在 H_2O 的电解电压为1.48V和约90%的典型电解效率的情况下,所需电流为每1W燃烧器约0.75A。在一个实施方式中,多个燃烧器可由通用气体管线(诸如供应 H_2+O_2 的化学计量混合物的气体管线)供应。火焰加热器可包括多个此类气体管线和燃烧器。管线和燃烧器可布置在合适结构中以实现**SunCell®**组件的所需加热。所述结构可包括至少一个螺旋,诸如图20-21中所示的具有气体管线424和多个燃烧器或喷嘴425的单螺旋氢氧混合气火焰加热器423。在也在图20-21中示出的备选设计中,氢氧混合气火焰加热器423可包括多个气体管线424和多个燃烧器或喷嘴425以实现在待加热**SunCell®**组件周围的一系列环形圈。提供对**SunCell®**组件的良好加热表面覆盖的另一示例性结构为DNA状双螺旋或三螺旋。诸如MHD返回管道310之类的线形组件可通过至少一个线形燃烧器结构加热。

[0441] 在一个实施方式中,诸如电阻型、燃烧器型或热交换器型之类的加热器可从**SunCell**组件内部(诸如储罐5c内部)透过可浇铸于储罐底部中的内部阱加热。

[0442] 点燃电流可为时变的,诸如约60Hz AC,但可具有其他特性和波形,诸如具有在1Hz至1MHz、10Hz至10kHz、10Hz至1kHz和10Hz至100Hz中的至少一个范围内的频率的波形,在约1A至100mA、10A至10mA、100A至1mA、100A至100kA和1kA至100kA中的至少一个范围内的峰值电流,以及在约1V至1MV、2V至100kV、3V至10kV、3V至1kV、2V至100V和3V至30V中的至少一个范围内的峰值电压,其中波形可包含正弦波、方波、三角形或其他所需波形,该波形可包括诸如在1%至99%、5%至75%和10%至50%中的至少一个范围内的占空比。为了使高频下的集肤效应最小化,点燃系统的绕组(诸如411)可包括编织线、复绞线和利兹线中的至少一者。

[0443] 在一个实施方式中,控制点燃电流的频率可控制分数氢反应的反应速率。控制感应点燃绕组411的动力供应器的频率可控制点燃电流的频率。点燃电流可为由时变磁场引起的感应电流。时变磁场可影响分数氢反应速率。在一个实施方式中,控制时变磁场的强度和频率中的至少一者以控制分数氢反应速率。可通过控制感应点燃绕组411的动力供应器来控制时变磁场的强度和频率。

[0444] 在一个实施方式中,调节点燃频率以在反应池腔室5b31和MHD通道308至少一者中引起相应的分数氢动力产生频率。动力输出频率诸如约60Hz AC可通过控制点燃频率来控制。点燃频率可通过变动感应点燃变压器组装件410的时变磁场的频率来调节。感应点燃变压器组装件410的频率可通过变动感应点燃变压器绕组411的电流的频率来调节,其中可变动供给至绕组411的功率的频率。MHD通道308中的时变功率可防止气溶胶射流的冲击形成。在另一个实施方式中,时变点燃可驱动导致时变电力输出的时变分数氢动力产生。MHD转换器可输出AC电,其也可包含DC分量。AC分量可用于为至少一个绕组(诸如变压器和电磁体绕组中的一者或多者中的至少一者,诸如EM泵变压器绕组电路401a的绕组和EM泵电磁电路403c的电磁体的绕组中的至少一者)提供动力。

[0445] 具有MHD转换器的加压 SunCell®可在不依赖重力的情况下操作。EM泵诸如400(诸如两级空气冷却EM泵400b)可位于一位置,以优化熔融金属入口和出口管道或管线的填充和最小化中的至少一者。示例性的包装为其中EM泵位于MHD冷凝区段309的端部与储罐5c的基部之间的中间位置的包装(图12-19)。

[0446] 在一个实施方式中,工作介质包含金属和气体,该气体在低温下可溶于熔融金属且在高温下不可溶于熔融金属或较不易溶于熔融金属。在一个示例性实施方式中,工作介质可包含银和氧中的至少一者。在一个实施方式中,反应池腔室中的氧压力维持在基本上防止熔融金属(诸如银)经历汽化的压力下。分数氢反应等离子体可加热氧和液态银至所需温度,诸如3500K。包含工作介质的混合物可在诸如25大气压的压力下流动穿过锥形MHD通道,其中压力和温度在热能转换成电时下降。随着温度下降,熔融金属(诸如银)可吸收气体(诸如氧)。接着,可将液体泵送回至储罐以在反应池腔室中再循环,其中等离子体加热可释放氧以增加维持所需的反应池腔室压力和温度条件以驱动MHD转换。在一个实施方式中,MHD通道的出口处的银的温度为约熔融金属的熔点,其中在一个大气压 O_2 下氧的溶解度为约 20cm^3 氧(STP)对 1cm^3 银。用于包含溶解的气体的液体的再循环泵送功率可大大低于游离气体的该功率。此外,可实质上减少在热力学动力循环期间使游离气体的压力和温度下降的气体冷却需求和MHD转换器体积。

[0447] 在一个实施方式中,工作介质金属可形成纳米颗粒气溶胶。存在与工作介质接触的气体时可促进纳米颗粒形成。在一个实施方式中,熔融金属和工作介质包含存在氧的情况下形成银纳米颗粒的银。纳米颗粒可在MHD喷嘴307中加速,其中在MHD通道308中将流动射流的动能转换为电。氧压力可足以充当喷嘴307中的加速剂气体。在一个实施方式中,在MHD喷嘴307的出口处银气溶胶几乎是纯液体加氧。银中的氧原子溶解度随着温度接近熔点而增加,其中溶解度最高达25%的摩尔分数[J. Assal, B. Hallstedt和L. J. Gauckler, "Thermodynamic assessment of the silver-oxygen system", J. Am. Ceram. Soc. 第80(12)卷, (1997), 第3054-3060页]。银在MHD通道308处诸如在出口处吸收氧,并且液态银和氧二者均再循环。氧可作为吸收于熔融银中的气体再循环。在一个实施方式中,在反应腔室

5b31中释放氧而再生该循环。高于熔点的银温度也充当热力再循环或再生的手段。在一个实施方式中,银气溶胶通过气体(诸如氧和稀有气体(诸如氩气或氦气)中的至少一者)在缩扩喷嘴(诸如拉伐尔喷嘴)中加速。MHD工作介质(流过MHD通道具有动能和电导性的介质)可包含银气溶胶、加速气体和银蒸气。在工作介质包含氧和银的情形中,该工作介质可还包含吸收于液态银中的氧,所述液态银可呈细液体颗粒或气溶胶形式。可在MHD通道的端部通过再循环器诸如泵(诸如EM泵312)和压缩机(图22)中的至少一者使工作介质再循环。包括MHD返回气体泵或压缩机312a的再循环器还可包括MHD返回气体管道310a、MHD返回气体贮罐311a和MHD返回气体管313a。再循环器可使工作介质中的银蒸气、液态银和加速气体中的至少一者再循环。液态银可呈气溶胶的形式,使得工作介质的几乎所有物质的再循环可使用诸如压缩机之类的气泵再循环。加速气体可包含氧,以致使液态银形成或维持为银气溶胶以有助于通过气泵再循环。诸如氧之类的加速气体可构成工作介质的大多数摩尔分数。加速气体摩尔分数可在约50-99摩尔%、50-95摩尔%和50-90摩尔%中的至少一个范围内。在另一个实施方式中,液态银可通过液态金属泵诸如本公开中的一者(诸如EM泵)再循环。在一个实施方式中,通过EM泵使加速剂气体(诸如氧)和液体金属(诸如银)中的至少一者再循环,其中氧可由熔融银吸收以利于其通过EM泵的泵送。

[0448] 在一个实施方式中,MHD转换器包括一类液态金属磁流体动力(LMMHD)转换器,其中通过MHD通道308将来自喷嘴307的导电等离子体射流的动能转换为电。MHD通道的入口处的动能输入功率 P_{input} 由在其速度 v 下的质量流量 $\dot{m}$ 给出。

$$[0449] \quad P_{input} = 0.5\dot{m}v^2 \quad (39)$$

[0450] 洛伦兹力 F_L 与流速成比例:

$$[0451] \quad dF_L = \sigma v B^2 (1-W) d^2 dx \quad (40)$$

[0452] 其中 σ 为流电导率, v 为流速, B 为磁场强度, W 为负载系数(跨越负载的电场与开路电场的比率), d 为电极间距,并且 dx 为沿着通道轴线的差分距离。接着,随着通道距离改变的速度与通道距离成比例。

$$[0453] \quad \frac{dv}{dx} = -kv \quad (41)$$

[0454] 其中作为近似 k 被当成常数,由边界条件确定:

$$[0455] \quad v = v_0 e^{-kx} \quad (42)$$

[0456] 该常数由可重整为下式的洛伦兹力(式(40))确定:

$$[0457] \quad \frac{dF_L}{dx} = \frac{dm}{dt} \frac{dv}{dx} = \dot{m} \frac{dv}{dx} = \sigma v B^2 (1-W) d^2 \quad (43)$$

[0458] 或

$$[0459] \quad \frac{dv}{dx} = \frac{\sigma v B^2 (1-W) d^2}{\dot{m}} \quad (44)$$

[0460] 通过比较式(6)与式(3),该常数为

$$[0461] \quad k = \frac{\sigma B^2 (1-W) d^2}{\dot{m}} \quad (45)$$

[0462] 通过组合式 (42) 和式 (45), 作为通道距离的函数的速度为

$$[0463] \quad v = v_0 e^{-\frac{\sigma B^2 (1-W) d^2}{\dot{m}} x} \quad (46)$$

[0464] MHD通道中的电功率 P_{electric} 转换由下式给出

$$[0465] \quad P_{\text{electric}} = VI = ELJ = EL\sigma (vB - E) A$$

$$[0466] \quad = vBWL\sigma (vB - WvB) d^2 = \sigma v^2 B^2 W (1-W) L d^2 \quad (47)$$

[0467] 其中 V 为MHD通道电压, I 为通道电流, E 为通道电场, J 为通道电流密度, L 为通道长度,并且 A 为电流横截面面积(喷嘴出口面积)。根据式 (46-47), 通道的相应功率由下式给出

$$[0468] \quad P = \int_0^L \sigma v_0^2 e^{-\frac{2\sigma B^2 (1-W) d^2}{\dot{m}} x} B^2 W (1-W) d^2 dx$$

$$= 0.5 \dot{m} v_0^2 W \left(1 - e^{-\frac{2\sigma B^2 (1-W) d^2}{\dot{m}} L} \right) \quad (48)$$

[0469] 高压银蒸气等离子体的电导率通过ANSYS建模确定为 10^6S/m 。在质量流量 $\dot{m}$ 为 0.5kg/s , 电导率 σ 保守地为 $500,000 \text{S/m}$, 速度为 1200m/s , 磁通量 B 为 0.1T , 负载系数 W 为 0.7 , 示例性直方矩形通道的通道宽度和电极间距 d 为 0.1m 以及通道长度 L 为 0.25m 的情形中, 功率参数为:

$$[0470] \quad P_{\text{input}} = 360 \text{kW} \quad (49)$$

$$[0471] \quad P_{\text{electric}} = 252 \text{kW} \quad (50)$$

$$[0472] \quad P_{\text{density}} = 101 \text{kW/liter} \quad (51)$$

$$[0473] \quad \eta = \frac{P_{\text{electric}}}{P_{\text{input}}} = 70 \% \quad (52)$$

[0474] 其中 P_{electric} 为施加至外部负载的电力, P_{density} 为功率密度,并且 η 为功率转换效率。在高的速度和传导率的情形中, 效率收敛至MHD通道的负载系数 W , 并且负载所施加的功率收敛至输入至MHD通道的动能功率 $0.5 \dot{m} v^2$ 乘以MHD通道的负载系数 W 。功率的剩余部分在内部MHD通道电阻中耗散。

[0475] 在一个实施方式中, LMMHD类型循环包括高导电性强射流形式, 其包括由在银的熔点下银和氧的两种独特性质促进的氧和银纳米颗粒气溶胶。在存在氧的情况下, 熔融银以高速率形成纳米颗粒, 该纳米颗粒表现类似于大致遵守理想气体定律的大分子。气溶胶在银的熔点(962°C)下形成; 因此, 具有类似于银原子的热力学性质的分子气体可在远低于 2162°C 的银沸点的温度处形成。银的这种独特性质有利于热力学循环, 从而避免在传统气体膨胀循环中的凝结和回收期间输入在MHD通道的端部处损失的 254kJ/摩尔 的非常高的汽化热。此外, 熔融银在其熔点温度下可吸收大量氧气, 该氧气可在MHD通道的端部处溶解于熔融银中并与熔融银一起经电磁 (EM) 泵送以再循环至反应池腔室。反应池腔室中的高温致氧被释放以充当所得的氧和银气溶胶的加速剂气体。由反应池腔室中的分数氢反应释放的热力导致高的压力上升并且高功率银等离子体射流离开MHD喷嘴并进入MHD通道, 在其

中发生MHD功率至电力转换。效率可以是非常高的,这是因(i)通道效率接近负载系数,如式(52)所示,(ii)在通道中耗散的残余动能加热气溶胶,该残余动能作为对凝结或聚结在MHD通道的端部处的气溶胶的热能存量的增量得以保存并与总的热能存量一起返回至反应池腔室,以及(iv)通过以溶液携带气体的熔融金属的非常低功率的电磁泵送而非通过气体的非常能量密集的多级中间冷却气体压缩来使加速剂气体返回。可提供252kW的电(式(50))的0.5kg/s银气溶胶流的泵功率 P_{pump} 由质量流 $\dot{m}$ 乘以 $5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 的反应腔室压力 P (式(56))的乘积除以银 10.5 g/cm^3 的密度 ρ 得出:

$$[0476] \quad P_{\text{pump}} = \frac{\dot{m}P}{\rho} = 24 \text{ W} \quad (53)$$

[0477] 大气压氧在银中的溶解度随着温度逼近熔点而增大,其中溶解度为至多每体积银约40至50体积氧(图23)。此外,氧在银中的溶解度随着与溶解氧处于平衡的氧气压而增加。氧在银中的高摩尔分数可如以下文献中所示在高 O_2 压下实现:J.Assal,B.Hallstedt和L.J.Gauckler,“Thermodynamic assessment of the silver-oxygen system”,J.Am Ceram.Soc.第80(12)卷,(1997),第3054-3060页。例如,在804K的温度、526巴(5.26×10^7 帕)的氧分压和液相中氧摩尔分数为0.25条件下存在Ag与 Ag_2O 之间的低共熔物。

[0478] 通过将分子氧转化为原子氧显著增加了氧原子向银中的掺入,超出了通过在给定氧压力和银温度下的气态溶解可实现的程度[A.de Rooij,“The oxidation of silver by atomic oxygen”,Product Assurance and Safety Department,ESTEC,Noordwijk,The Netherlands,ESA Journal 1989,(第13卷),第363-382页]。液态银中的氧溶解度关系大致与气态氧压力的1/2幂成比例,因为氧作为原子吸收进银中。当在与银的氧化反应中涉及O原子而非 O_2 分子时, AgO 以及 Ag_2O 即使在极低 O_2 压力下也是热力学稳定的, AgO 比 Ag_2O 更稳定,并且在热力学上有可能将 Ag_2O 氧化成 AgO ,在 O_2 分子的情况下这可能是不可能。为在MHD循环期间利用O原子的优良溶解度,可通过分数氢反应维持MHD通道等离子体射流以维持从 O_2 分子形成O原子。可在MHD通道的端部形成组合物诸如包含掺入熔融银中的0.25摩尔分数的氧的低共熔物并泵送至反应池腔室以回收银和氧。MHD循环还包括反应池腔室中释放氧,由于分数氢等离子体反应以及随后在MHD喷嘴区段中的等熵膨胀而使得温度和压力显著升高,以在MHD通道中形成气溶胶射流和射流的近等压流。

[0479] 为通过等熵膨胀将反应池腔室中的热和压力-体积能量存量成功地转换为MHD通道中的动能,氧必须有效地使银在缩扩喷嘴中加速。LMMHD的主要失效模式中的一者是加速剂气体滑移过大液体金属颗粒。理想地,金属颗粒表现为分子,并且热能向流入MHD通道中的等离子体射流的动能的转换大致遵守等熵膨胀的理想气体定律,最高效意味可能。考虑其中反应池腔室气氛是氧的情形,所注入的熔融金属是银,并且氧促进银纳米颗粒气溶胶的形成。银纳米颗粒在其与悬浮气体的平均自由路径相比较小时呈自由分子形态。在数学上,由下式给出的克努森数 K_n

$$[0480] \quad K_n = \frac{2\lambda}{d_{\text{Ag}}} \quad (54)$$

[0481] 是使得 $K_n \gg 1$,其中 λ 为悬浮氧气的平均路径,并且 d_{Ag} 为银颗粒的直径。在Levine [I.Levine,Physical Chemistry,McGraw-Hill Book Company,New York,(1978),第420-

421页]之后,与具有直径 d_B 和摩尔分数 f_B 的第二气体B发生碰撞的具有直径 d_A 的气体A的平均路径 λ_A 由下式给出:

$$[0482] \quad \lambda_A = \frac{k_B T}{\pi \left[\frac{d_A}{2} + \frac{d_B}{2} \right]^2 f_B P} \quad (55)$$

[0483] 对于6000K的温度T、5个大气压 ($5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) 的压力P、对应于0.25的气体分数 f_{O_2} 的25摩尔%氧以及对应于0.75的银气体分数 f_{Ag} 的75摩尔%银的气体参数,式(55)给出与具有 $5 \times 10^{-9} \text{ m}$ 的直径 d_{Ag} 的银颗粒发生碰撞的、具有 $1.2 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的分子直径 d_{O_2} 的悬浮气体氧的平均路径 λ_{O_2} 为

$$[0484] \quad \lambda_{O_2} = \frac{k_B T}{\pi \left[\frac{d_{O_2}}{2} + \frac{d_{Ag}}{2} \right]^2 f_{Ag} P} = 2.5 \times 10^{-9} \text{ m} \quad (56)$$

[0485] 其中 k_B 为波兹曼常数。对于与约3800个银原子对应的具有5nm直径的银气溶胶颗粒,大致满足分子形态。在此形态中,颗粒通过与悬浮气体分子的弹性碰撞而与该悬浮气体相互作用。借此,颗粒的表现类似于气体分子,其中该气体分子和颗粒处于连续且随机的运动中,在任何颗粒碰撞时无动能损失或增益,且平均动能对于颗粒和分子两者是相同的并且是共同温度的函数。

[0486] 在示例性的MHD热力循环中:(i)银纳米颗粒形成于反应池腔室中,其中可通过针对呈分子形态的纳米颗粒进行选择的热泳和热梯度中的至少一者来运输该纳米颗粒;(ii)在存在所释放O的情况下分数氢等离子体反应形成高的温度和压力的25摩尔%O和70摩尔%银纳米颗粒气体,其流进喷嘴入口中;(iii)25摩尔%O和75摩尔%银纳米颗粒气体经历喷嘴膨胀,(iv)在MHD通道中将所得的射流动能转换为电;(v)纳米颗粒的大小在MHD通道中增加并在MHD通道的端部处聚结为银液体,(vi)液态银吸收25摩尔%O,并且(vii)EM泵将该液体混合物泵回至反应池腔室。

[0487] 对于氧与银纳米颗粒的气体混合物,氧和呈自由分子形态的银纳米颗粒的温度是相同的,使得理想气体方程适用于估计喷嘴膨胀中的气体混合物的加速度,其中 O_2 与纳米颗粒的混合物在共同温度下具有共同动能。包含熔融金属纳米颗粒(诸如银纳米颗粒)的气体混合物在缩扩喷嘴中的加速可被视为理想气体/蒸气在该缩扩喷嘴中的等熵膨胀。给定滞止温度 T_0 ;滞止压力 p_0 ;气体常数 R_v ;以及比热比 k ,可使用Liepmann和Roshko[Liepmann, H.W.和A.Roshko Elements of Gas Dynamics, Wiley (1957)]的方程来计算热力学参数。滞止音速 c_0 和密度 ρ_0 由下式给出:

$$[0488] \quad c_0 = \sqrt{k R_v T_0}, \quad \rho_0 = \frac{p_0}{R_v T_0} \quad (57)$$

[0489] 喷嘴喉部条件(马赫数 $Ma^*=1$)由下式给出:

$$[0490] \quad T^* = \frac{T_0}{1 + \frac{(k-1)}{2}}, \quad p^* = \frac{p_0}{\left[1 + \frac{(k-1)}{2} \right]^{k/(k-1)}}, \quad \rho^* = \frac{p^*}{R_v T^*}$$

$$[0491] \quad c^* = \sqrt{kR_v T^*}, \quad u^* = c^*, \quad A^* = \frac{m}{\rho^* u^*} \quad (58)$$

[0492] 其中 u 为速度, m 为质量流量, A 为喷嘴横截面积。喷嘴出口条件(出口马赫数= Ma)由下式给出:

$$[0493] \quad T = \frac{T_0}{1 + \frac{(k-1)}{2} Ma^2}, \quad p = \frac{p_0}{\left[1 + \frac{(k-1)}{2} Ma^2\right]^{k/(k-1)}}, \quad \rho = \frac{p}{R_v T}$$

$$[0494] \quad c = \sqrt{kR_v T}, \quad u = cMa, \quad A = \frac{m}{\rho u} \quad (59)$$

[0495] 由于纳米颗粒的高分子量,MHD转换参数类似于LMMHD的转换参数,其中MHD工作介质稠密且相对于气态膨胀以低速度行进。

[0496] 考虑到银具有形成呈分子形态的合适纳米颗粒并且在不使用涡轮机械装置的情况下吸收合适质量的氧以循环加速剂气体(在此情形中为氧)的能力,氧和银纳米颗粒气溶胶MHD循环的可行性取决于气溶胶形成速率和氧可被吸收至熔融银中及从熔融银脱气的速率的动力学。进行相应的动力学研究并发现动力学是足够的。在一个实施方式中,诸如镓金属和镓纳米颗粒之类的另一金属可取代银金属和银纳米颗粒。

[0497] 在一个实施方式中,氧在银中的溶解度可增加超出可通过在给定氧压下通过向熔融银施加电场、电势和等离子体中的至少一者进行气态溶解来实现的氧溶解度。在一个实施方式中,可向熔融银施加电解或等离子体以增加液态银中的 O_2 溶解度,其中熔融银可包含电解或等离子体电极。向熔融银施加电场、电势和等离子体中的至少一者(诸如施加 O_2 电解或等离子体)也可增加 O_2 溶解于银中的速率。在一个实施方式中,**SunCell®**可包括至熔融银的电场、电势和等离子体中的至少一者的源。所述源可包括电极以及电力源和等离子体动力(诸如辉光放电、RF或微波等离子体动力)源中的至少一者。熔融银可包括电极诸如阴极。熔融银或固态银可包括阳极。氧可在阳极还原并与银反应而被吸收。在另一个实施方式中,熔融银可包括阳极。银可在阳极氧化并且与氧反应以引起氧吸收。

[0498] 在一个实施方式中,**SunCell®**还包括氧传感器和氧控制系统诸如用以实现以下中的至少一者的部件:用稀有气体稀释氧和泵离稀有气体。前者可包括稀有气体贮槽、阀、调节器和泵中的至少一者。后者可包括阀和泵中的至少一者。

[0499] MHD冷凝区段309处的气氛可具有极低银蒸气压,并且可主要包含氧。由于低的工作温度(诸如在约970°C至2000°C、970°C至1800°C、970°C至1600°C和970°C至1400°C中的至少一个范围内),银蒸气压可能较低。**SunCell®**可包括用以移除MHD冷凝区段309中的任何银气溶胶的部件。该气溶胶移除部件可包括用以聚结银气溶胶的部件,诸如旋风分离器。旋风分离器可包括MHD返回储罐311或MHD返回气体储罐311a。包含溶解的氧的银可通过泵送再循环至反应池腔室5b31,其中泵可包括电磁泵。较高的温度和缺乏施加至熔融银的电场、电势和等离子体中的至少一者可致使在反应池腔室中氧从银释放出来。在一个示例性实施方式中,由于工作温度低诸如约1200°C,MHD冷凝区段处的银压力极低,并且将旋风分离器用于使银气溶胶聚结成银液体,银液体随后充当负电极以将 O_2 电解进液态银中。

[0500] 在一个实施方式中,MHD循环包括在MHD喷嘴区段307中的等熵膨胀以在MHD通道

308中形成气溶胶射流和射流的等压流。气溶胶可通过诸如 H_2 、 O_2 、 H_2O 或稀有气体之类的加速剂气体在喷嘴307中加速。在一个实施方式中,MHD冷凝区段309中加速剂气体的压力能够维持加速剂气体的等离子体,其中反应腔室与MHD冷凝区段中加速剂气体的压力比大于1。该压力比可在约1.5至1000、2至500和10至20中的至少一个范围内。反应腔室和MHD冷凝区段中的氧加速剂气体的示例性压力分别在约1至10大气压和0.1至1大气压的范围内。反应池腔室可包含一些释放的且等离子体维持的O而不是 O_2 以增加蒸汽相,同时加速器引起的射流动能相应增加。在MHD通道308和MHD冷凝区段309中的至少一者中一些O可复合为 O_2 以增加从反应池腔室5b31至MHD冷凝区段309的压力梯度,从而增加射流动能和转换的电力。反应池腔室和MHD冷凝区段中的至少一者的气体温度可在其中金属蒸气压低的范围内,诸如在银蒸气的情形中低于2200℃。在一个实施方式中,与熔融金属诸如银相比,加速剂气体诸如氧的摩尔分数在约1至95摩尔%、10至90摩尔%和20至90摩尔%中的至少一个范围内。较高摩尔%的加速剂气体可在MHD喷嘴307的出口处提供较高射流动能。

[0501] 在一个实施方式中,气溶胶可包含熔融金属纳米颗粒,诸如银或镓纳米颗粒。颗粒的直径可在约1nm至100微米、1nm至10微米、1nm至1微米、1nm至100nm和1nm至10nm中的至少一个范围内。在一个实施方式中,MHD转换器的工作介质包含金属纳米颗粒的混合物,诸如银纳米颗粒与气体诸如氧气,所述气体可以是充当载体或膨胀辅助气体和有助于形成纳米颗粒或维持纳米颗粒的稳定性中的至少一者。在另一个实施方式中,工作介质可包含金属纳米颗粒。纳米颗粒气氛可通过将池温度和等离子体温度中的至少一者维持在高于某一温度来维持,该温度将纳米颗粒的蒸气压维持在所需的蒸气压(诸如在约1至100大气压、1至20大气压和1至10大气压中的至少一个范围内的压力)。池温度和等离子体温度中的至少一者可在约1000℃至6000℃、1000℃至5000℃、1000℃至4000℃、1000℃至3000℃和1000℃至2500℃中的至少一个范围内。

[0502] 在一个实施方式中,以一定参数维持反应池腔室5b31中的气氛,所述参数为诸如氧分压、总压力、温度、气体组成(诸如除了氧、氢和水蒸气中的至少一者以外还添加稀有气体)以及分数氢反应流速(其促进形成具有足够小的尺寸以处于分子形态的气溶胶颗粒)。在一个实施方式中,诸如银之类的悬浮气体和诸如银颗粒之类的颗粒中的至少一者可带电,以抑制物质之间的碰撞而使得气体混合物呈现分子形态行为。银可包含添加剂以利于颗粒带电。在一个实施方式中,SunCell®可包括尺寸选择部件以根据尺寸分离纳米颗粒流。尺寸选择部件可选择性维持具有适合于分子形态行为的尺寸的纳米颗粒的流入喷嘴307入口中。用以选择具有分子形态大小的颗粒的尺寸选择部件可包括在喷嘴307的入口前面的旋风分离器、重力分离器、挡板系统、筛网、热泳分离器或电场(诸如电场或磁场分离器)。在热泳的情形中,大颗粒可展现主动热扩散效应,其中大纳米颗粒从等离子体的热中心区域迁移至较冷的反应腔室池5b31壁。可将等离子体选择性地引导或管网输送以从热中心部分流入喷嘴入口中。

[0503] 纳米颗粒可通过这样来形成:通过反应池腔室5b31的一个区段中的分数氢反应的密集局部功率密度蒸发金属,在反应池腔室的另一冷却器区段中快速冷却,其中该温度可低于金属在环境压力下的沸点。在一个实施方式中,诸如银或镓纳米颗粒之类的纳米颗粒可通过所述金属在包含氧的气氛中蒸发和凝结来形成,其中氧化物层可形成于纳米颗粒表面上。氧化物层可防止气溶胶状态的纳米颗粒聚结。可控制氧浓度、金属蒸发速率、反应池

腔室温度和压力以及温度和压力梯度中的至少一者,以控制纳米颗粒的大小。可控制大小以使得纳米颗粒具有分子形态的大小。纳米颗粒可在MHD区段307中加速,相应的动能可在MHD通道区段308中转换为电,并且可致使纳米颗粒在MHD冷凝区段309中的聚结。**SunCell®**可包括冷凝区段中的聚结表面。纳米颗粒可撞击聚结表面,聚结,并且所得的可包含所吸收的氧的液态金属可流入MHD返回EM泵312中以被泵送至反应池腔室5b31。

[0504] 在一个实施方式中,**SunCell®**可包括还原部件,以至少部分地还原金属纳米颗粒上的氧化物涂层。该还原可允许纳米颗粒凝结或聚结。聚结可允许所得液体由MHD返回EM泵312泵送返回至反应池腔室5b31。还原部件可包括原子氢源,诸如原子氢的氢等离子体或化学解离源。等离子体源可包括辉光、电弧、微波、RF或本公开或本领域已知的其他等离子体源。氢等离子体源可包括辉光放电等离子体源,其包括多个能够在高压诸如一个大气压下操作的微中空阴极,诸如本公开中的一者。充当原子氢源的化学解离器可包含陶瓷负载的贵金属氢解离器,诸如氧化铝或硅石珠粒上负载的Pt,诸如本公开中的一者。化学解离器可能能够使 H_2+O_2 复合。氢解离器可包含以下中的至少一者:(i) SiO_2 负载的Pt、Ni、Rh、Pd、Ir、Ru、Au、Ag、Re、Cu、Fe、Mn、Co、Mo或W,(ii) 沸石负载的Pt、Rh、Pd、Ir、Ru、Au、Re、Ag、Cu、Ni、Co、Zn、Mo、W、Sn、In、Ga,和(iii) 莫来石、 SiC 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 CeO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 和混合氧化物负载的贵金属、贵金属合金、贵金属混合物以及稀土金属中的至少一者。氢解离器可包含负载型双金属,诸如包含Pt、Pd、Ir、Rh和Ru的负载型双金属。氢解离器的示例性双金属催化剂为负载型Pd-Ru、Pd-Pt、Pd-Ir、Pt-Ir、Pt-Ru和Pt-Rh。催化性氢解离器可包含催化转化器的材料,诸如负载型Pt。还原装置可位于MHD冷凝区段309和MHD返回储罐311中的至少一者中。

[0505] 在一个实施方式中,在MHD区段307中加速的气溶胶包含气体(诸如氧、 H_2 和稀有气体中的至少一者)、分子形态的银或镓纳米颗粒和较大颗粒(诸如直径范围为约10nm至1mm的银或镓颗粒)的混合物。所述气体和所述分子形态的纳米颗粒中的至少一者可充当载气,以在所述气体和所述分子形态的纳米颗粒中的至少一者在MHD喷嘴区段307中加速时加速所述较大颗粒。所述气体和分子形态的纳米颗粒可占足够的摩尔分数,以实现反应池腔室5b31中的气溶胶混合物的压力和热能存量的高动能转换。所述气体和分子形态的纳米颗粒的摩尔百分比可包含约1%至100%、5%至90%、5%至80%、5%至70%、5%至60%、5%至50%、5%至40%、5%至30%、5%至20%和5%至10%中的至少一个范围。

[0506] 在一个实施方式中,纳米颗粒可通过热泳或热梯度和场(诸如电场和磁场中的至少一者)中的至少一者输送。纳米颗粒可带电以使得电场有效。可通过施加涂层诸如通过氧的可控添加导致的氧化物涂层来实现带电。

[0507] 在一个实施方式中,银气溶胶中的至少一者聚结并且分数氢反应等离子体不维持在MHD冷凝区段309中,使得MHD冷凝区段309中环境气氛的传导率是使得电场、电势或等离子体可施加至氧气,以致使氧被吸收进银中,所述银随后被循环至反应池腔室中。在一个实施方式中,**SunCell®**可包括用以在MHD冷凝区段309将放电施加至蒸汽相的部件。放电可包含辉光、电弧、RF、微波、激光和可将 O_2 解离成原子O的本领域已知的其他等离子体形成手段或放电。放电部件可包括放电力供应器或等离子体产生器、放电电极或至少一个天线和壁穿透部(诸如液体电极穿透部)或感应耦合动力连接器中的至少一者。在另一个实施方式中,原子氧源可包括超热产生器,其中 O_2 吸收至银膜表面上,解离成原子O,其扩散穿过该膜以在相对表面上提供O原子。氧原子可解吸并接着由熔融银吸收。解吸部件可包括低能量电

子束。

[0508] 在一个实施方式中,可借助于微中空阴极放电来维持高压辉光放电。微中空阴极放电可保持在开口直径为大约100微米的两个紧密间隔开的电极之间。示例性的直流放电可维持至多约大气压。在一个实施方式中,高压下的大体积等离子体可通过叠加平行操作的独立辉光放电来维持。等离子体的电子密度可在给定电流下通过添加具有低电离电势的物质诸如金属(诸如铯)来增加。电子密度也可通过添加物质诸如从其热发射电子的丝状材料(诸如铯金属和其他电子枪热电子发射器中的至少一者,诸如含钽金属或铯处理的金属)来增加。在一个实施方式中,等离子体电压升高以使得等离子体电流的各电子通过与银气溶胶颗粒、加速剂气体或添加的气体或物质诸如铯蒸气中的至少一者发生碰撞来产生多个电子。等离子体电流可为DC或AC中的至少一者。AC功率可通过感应动力源和接收器(分别在MHD冷凝区段的腔室外部和内部)传递。

[0509] 在一个实施方式中,MHD转换器可包括储罐诸如MHD返回储罐311或MHD返回气体储罐311a,以增加在回收至反应池腔室5b31之前吸收于银中的氧的保压时间和银面积中的至少一者。可选择储罐的大小以实现所需的氧吸收。MHD返回储罐311或MHD返回气体储罐311a还可包括旋风分离器。旋风分离器可聚结银气溶胶颗粒。储罐可包括电解或等离子体放电腔室。

[0510] 在一个实施方式中,**SunCell®**可包括至少部分地还原金属纳米颗粒诸如银或镓纳米颗粒上的任何氧化物涂层部件。部分移除氧化物涂层可有利于纳米颗粒在所需的**SunCell®**区域中(诸如MHD冷凝区段309中)的聚结。可通过使颗粒与氢反应来实现还原。可在可控压力和温度下将氢气引入MHD冷凝区段中以实现至少部分还原。**SunCell®**可包括本公开的部件以维持包含氢的等离子体,以至少部分地还原氧化物涂层。未被氢还原的额外氧可被吸收进待回泵至反应池腔室5b31的聚结熔融金属中,以提供用于纳米颗粒表面氧化物形成和还原循环的氧。

[0511] 将洛仑兹定律最简单地应用于具有交叉电极的移动导体和不具有移动零件的磁场是闭合的液体磁流体动力循环。在闭合的液体磁流体动力循环的实施方式中,MHD功率转换效率的电势接近负载系数 W (跨越负载的电场与开路电场的比率)。由于MHD效率可接近 $W=1$,这些离子体的功率向电的电转换可接近压力-热向动能转换的效率,其中已实现99%的相应喷嘴效率。示例性的操作参数是至少100大气压的背景 O_2 压力、25摩尔%的在MHD通道出口处的 O 吸收于银中的摩尔分数、 $N=20$ 个银原子/纳米颗粒、 $W=0.98$ 、 1kg/s 的质量流量、 10^6S/m 的气体传导率、 2T 的均匀磁场以及分别等于1大气压、 1000K 和 1000m/s 的入口压力、温度和速度。这些参数导致从具有 4cm^2 最大横截面和 1800K 的气体离开温度的 16cm 长通道提取 471kW 的MHD功率,其中通过熔融银中的气体吸收而回收热存量。使用不具有移动零件的电磁泵以不显著的功率回收银。通道体积是 20.4cm^3 ,因此相应MHD功率密度是约 23.1kW/cm^3 (23.1MW/升),其与在现有高速度重型柴油发动机的仅约 30kW/升 的范围中的典型功率密度比较非常有利。在其他实施方式中, N (每纳米颗粒的银原子数目)的增加由于对于固定动能存量的速度较低以及相应的减小的减速洛仑兹力而导致更长的通道来实现相似的功率转换。

[0512] 在一个实施方式中,熔融金属可包含本领域已知的任何导电金属或合金。熔融金属或合金可具有低熔点。示例性的金属和合金为镓、铟、锡、锌和镓铟锡合金,其中典型低共

熔混合物的实例为68%Ga、22%In和10%Sn(按重量计),但比例可在62%-95%Ga、5%-22%In、0%-16%Sn(按重量计)之间变化。在其中金属可与氧和水中的至少一者反应以形成相应金属氧化物的实施方式中,分数氢反应混合物可包含熔融金属、金属氧化物和氢。金属氧化物可包含热分解为金属以释放氧的金属氧化物,诸如Sn、Zn和Fe氧化物中的至少一者。金属氧化物可充当氧源以形成HOH催化剂。可在金属氧化物与HOH催化剂之间回收氧,其中可重新供应被消耗而形成分数氢的氢。可选择池材料以使得其在电池的工作温度下是非反应性的。作为另一种选择,池可在低于材料可与 H_2 、 O_2 和 H_2O 中的至少一者反应的温度的温度下操作。池材料可包含不锈钢、诸如氮化硅、SiC、BN之类的陶瓷、诸如 YB_2 之类的硼化物、硅化物和诸如派热克斯玻璃、石英、 MgO 、 Al_2O_3 和 ZrO_2 之类的氧化物中的至少一者。在一个示例性实施方式中,池可包含BN和碳中的至少一者,其中工作温度小于约500°C至600°C。在一个实施方式中,该动力系统的至少一个组件可包含陶瓷,其中陶瓷可包含金属氧化物、氧化铝、氧化锆、氧化镁、氧化钪、碳化硅、碳化锆、二硼化锆、氮化硅和玻璃陶瓷中的至少一者,该玻璃陶瓷为诸如 $Li_2O \times Al_2O_3 \times nSiO_2$ 系统(LAS系统)、 $MgO \times Al_2O_3 \times nSiO_2$ 系统(MAS系统)、 $ZnO \times Al_2O_3 \times nSiO_2$ 系统(ZAS系统)。

[0513] 在一个实施方式中,注入金属可具有低熔点,诸如具有低于700°C的熔点的注入金属,诸如铋、铅、锡、铟、镉、镓、锑或合金(诸如洛斯金属、CerroSafe、伍德合金(Wood's metal)、菲尔德金属、CerroLow 136、CerroLow 117、Bi-Pb-Sn-Cd-In-Tl和Galinstan)中的至少一者。至少一个组件诸如储罐5c可包含陶瓷,诸如氧化锆、氧化铝、石英或派热克斯玻璃。储罐的端部可金属化以利于与电磁泵组装件5kk1的金属储罐底板或基部的连接。储罐与电磁泵组装件5kk1的基部之间的管套可包括钎焊或焊料,诸如银焊料。作为另一种选择,该管套可包括垫圈凸缘密封件。EM泵可包括金属EM泵管5k6、点燃电磁泵汇流条5k2和点燃连接件,诸如点燃电磁泵汇流条5k2a。熔融金属注入和点燃中的至少一者可由DC电流驱动,其中注射泵可包括DC EM泵。DC EM泵管5k6、储罐支撑件5kk1、EM泵汇流条5k2和点燃汇流条5k2a中的至少一者可包含金属,诸如不锈钢。点燃汇流条5k2a可连接至储罐支撑件5kk1和DC EM泵管5k6中的至少一者。反应池腔室5b31可包含陶瓷,诸如氧化锆、氧化铝、石英或派热克斯玻璃。作为另一种选择,反应池腔室5b31可包含SiC涂覆的碳。SunCell®可包括入口上升管5qa,诸如具有从顶部到底部的渐缩通道(tapered channel)或狭槽或随着储罐液位下降而对流入熔融金属进行节流的多个孔的入口上升管。所述节流可用以平衡储罐液位同时避免液位差极端值。可选择初始熔融金属填充液位和入口底部的高度,以设定最大和最小储罐高度。

[0514] 在一个实施方式中,熔融金属包含镓或合金,诸如Ga-In-Sn合金。具有低熔点金属(诸如低于300°C熔融的金属)的SunCell®可包括机械泵以将熔融金属注入至反应池腔室5b31中。对于低于机械泵最大能力的工作温度,机械泵可替代EM泵诸如感应EM泵400,并且在工作温度较高的情形中可使用EM泵。通常机械泵操作最高至约300°C的温度限值;然而,陶瓷齿轮泵操作高达1400°C。较低温度操作(诸如低于300°C)很适于热水和低压蒸气应用,其中SunCell®加热器包括热交换器114诸如图24中所示者。反应物气体诸如 H_2 和 O_2 可通过从贮槽422和管线422扩散透过气体可渗透膜309d来添加至池诸如反应池腔室5b31。

[0515] 一SunCell®加热器或热动力产生器实施方式(图24)包括球形反应器池腔室5b31,其具有空间分离的圆周半球形热交换器114,该热交换器114包括通过辐射从球形反应器

5b4接受热量的面板或区段114a。每个面板可包括球表面由穿过球体极点的两个大圆圈限定的区段。热交换器114还可包括歧管114b诸如具有来自热交换器的面板114a中每一者的冷却剂管线114c的环形歧管和冷却剂出口歧管114f。每个冷却剂管线114c可包括冷却剂入口端口114d和冷却剂出口端口114e。热动力产生器还可包括具有入口和出口309e的贮气瓶421和气体供应管422,该气体供应管422穿过热交换器114的顶部延伸至球形池5b31的顶部上的气体可渗透膜309d。气体供应管422可延伸穿过热交换器114顶部的冷却剂收集歧管114b。在另一个SunCell®加热器实施方式(图24)中,反应池腔室5b31可以是圆柱形的,其具有圆柱形热交换器114。贮气瓶421可在热交换器114外部,其中气体供应管422通过穿过热交换器114连接至反应池腔室5b31顶部上的半渗透性气膜309d。反应池腔室5b31、反应池腔室5b31顶部的气膜309d和气体供应管422的至少一部分中的至少一者可包含陶瓷。连接至贮气瓶421的气体供应管422可包含金属诸如不锈钢。气体供应管422的陶瓷和金属部分可通过气体供应管陶瓷接合至可包括垫圈诸如碳垫圈的金属凸缘422a。冷水可馈送进入口113中并在热交换器114中加热以形成蒸气,蒸气在锅炉116中收集并且离开蒸气出口111。热动力产生器还可包括双熔融金属注射器,所述双熔融金属注射器包括感应EM泵400、储罐5c和反应池腔室5b31。

[0516] 在一个实施方式诸如包括具有点燃汇流条(诸如点燃电磁泵汇流条5k2a)的点燃系统的SunCell®中,减小阻抗以增加点燃电流。SunCell®可包括直接接触熔融金属(诸如储罐5c中的熔融金属)的点燃汇流条。点燃汇流条可包括储罐支撑板5b8的穿透部,以直接接触熔融金属诸如银或镓。SunCell®可包括浸没式电极诸如浸没式EM泵注射器5k61,其在储罐熔融金属与由相应电磁泵产生的流的熔融金属之间提供直接电接触。至少一个注入熔融金属料流的电路可包括穿透储罐支撑板5b8的点燃汇流条5k2a、储罐5c中的熔融金属和接触来自浸没式EM泵注射器的相应流的储罐熔融金属,其中所述流穿透熔融金属以到达逆向流或相应对电极。储罐可在顶部包括足够面积以提供足够的熔融金属容量从而避免注入波动,其中容量由面积乘以浸没深度给出。注入波动可能是由于返回熔融金属料流的流量变化,其影响浸没深度和熔融金属表面的湍流中的至少一者。

[0517] 观察到等离子体反应在正电极上强烈得多,如基于可极大地增加分数氢反应动力学的离子复合的电弧电流机理所预测的。在分数氢反应器中,正电极是独特的,与辉光放电相反,在辉光放电中负电极为等离子体功率耗散和辉光产生的地方。在一个实施方式中,注射器储罐5c还可包括反应池腔室5b31底部的一部分,其中对电极可包括具有延伸部或基座的非注射器储罐,该延伸部或基座包括与注射器储罐和电极电隔离的凸起的基座电极。对电极或非注射器电极可包括电绝缘体并且还可包括滴落边缘以提供电隔离。注射器电极和对电极可分别为负的和正的。

[0518] 在一个示例性实施方式中,具有图25中所示的基座电极的SunCell®包括(i)注射器储罐5c、EM泵管5k6和喷嘴5q、储罐底板409a以及球形反应池腔室5b31圆顶,(ii)非注射器储罐,其包括套管储罐409d,所述套管储罐可包含焊接至下部半球5b41的SS,在套管储罐409d端部处具有套管储罐凸缘409e,(iii)电绝缘体插入储罐409f,其包括顶部处的基座5c1和底部处的插入储罐凸缘409g,该插入储罐凸缘409g与套管储罐凸缘409e配接,其中插入储罐409f、还可包括滴落边缘5c1a的基座5c和插入储罐凸缘409g可包含陶瓷诸如氮化硼、稳定化的BN(诸如BN-CaO或BN-ZrO₂)、碳化硅、氧化铝、氧化锆、氧化钪或石英,或难熔材

料诸如难熔金属、碳或具有保护层(诸如SiC或ZrB₂)的陶瓷,诸如包含SiC或ZrB₂碳的陶瓷,和(iv)储罐底板409a,诸如包括SS(具有用于点燃汇流条的穿透部10a1)和点燃汇流条10的储罐底板,其中底板螺栓连接至套管储罐凸缘409e以包夹插入储罐凸缘409g。在一个实施方式中, SunCell®可包括封围且气密地密封接头的真空壳体,所述接头包括套管储罐凸缘409e、插入储罐凸缘409g和储罐底板409a,其中该壳体在电极汇流条10处电隔离。

[0519] 在图25中所示的实施方式中,倒置基座5c2和点燃汇流条和电极10为以下中的至少一者:在池5b3的大致中心取向和在负z轴上对准,其中在适用时,至少一个注射器对电极5k61对抗重力沿正z方向注入来自其储罐5c的熔融金属。在适用时注入的熔体流可对抗重力在基座5c2中维持液态金属的涂层或液池。液池或涂层可至少部分地覆盖电极10。液池或涂层可保护电极免受损坏诸如腐蚀或熔融。在后一情形中,可增加EM泵送速率以增加流动的注入熔融金属进行的电极冷却。也可增加电极面积和厚度来耗散局部热点以防止熔融。基座可被正偏压而注射器电极可被负偏压。在另一个实施方式中,基座可经负偏压而注射器电极可经正偏压,其中注射器电极可浸没于熔融金属中。诸如镓之类的熔融金属可填充反应池腔室5b31的下部的一部分。除了注入熔融金属的涂层或液池以外,电极10诸如W电极也可通过所施加的负偏压而对于腐蚀稳定。在一个实施方式中,电极10可包括涂层诸如惰性导电涂层(诸如铯涂层)以保护电极免受腐蚀。在一个实施方式中,可冷却电极。冷却可降低电极腐蚀速率和与熔融金属形成合金的速率中的至少一者。冷却可通过诸如中心线水冷之类的手段来实现。在一个实施方式中,通过增加与来自注射器电极的等离子体和熔融金属材料流中的至少一者接触的表面的大小而增加反电极的表面积。在一个示例性实施方式中,将大的板或杯附接至电极10的端部。在另一个实施方式中,注射器电极可浸没以增加对电极的面积。图25示出了示例性的球形反应池腔室。其他几何结构诸如矩形、立方形、圆柱形和圆锥形在本公开的范畴内。在一个实施方式中,反应池腔室的基部(反应池腔室在此处连接至储罐的顶部)可以是倾斜的(诸如圆锥形的)以利于熔融金属进入EM泵的入口时的熔融金属混合。在一个实施方式中,反应池腔室的外部表面的至少一部分可包覆于具有高传热系数的材料(诸如铜)中以避免反应池腔室壁上的热点。在一个实施方式中, SunCell®包括多个泵(诸如EM泵)以在反应池腔室壁上注入熔融金属从而维持熔融金属壁以阻止反应池腔室中的等离子体使该壁熔融。在另一个实施方式中,反应池腔室壁包括衬里5b31a(诸如BN、熔融硅石或石英衬里)以避免热点。一示例性的反应池腔室包括以石英板加衬的立方体上部区段和包括在底部的EM泵的下部球形区段,其中该球形区段促进熔融金属混合。

[0520] 在一个实施方式中,套管储罐409d可包括点燃汇流条和电极10的紧密配合电绝缘体,以使得熔融金属仅容纳于倒置基座5c2端部处的杯状或滴落边缘5c1a中。具有插入储罐凸缘409g的插入储罐409f可通过储罐底板409a、套管储罐409d和套管储罐凸缘409e安装至池腔室5b3。电极可透过电极穿透部10a1穿透储罐底板409a。

[0521] 在另一个实施方式中,可用安装于储罐底板409a中的馈通件替换插入储罐凸缘409g,该馈通件将该馈通件和基座5c1或插入储罐409f的汇流条10与储罐底板409a电隔离。该馈通件可焊接至储罐底板。包括汇流条10的示例性馈通件是Solid Sealing Technology, Inc. (固体密封技术公司)的#FA10775。汇流条10可接合至电极8或汇流条10并且电极8可包括单件。储罐底板可直接接合至套管储罐凸缘。该管套可包括以居间垫圈螺栓连接在一起的Conflat凸缘。该凸缘可包括刀刃以密封软金属垫圈,诸如铜垫圈。包括插入

储罐409f的陶瓷基座5c1可钻孔于带埋头孔的储罐底板409a中,其中可以垫圈(诸如碳垫圈或本公开的另一者)密封基座与储罐底板之间的管套。电极8和汇流条10可在端部处包括端板,在这里发生等离子体放电。可通过推动圆盘(其继而将压力施加至垫圈)施加压力至垫圈以密封基座与储罐底板之间的管套。该圆盘可旋拧至电极8的端部上,使得转动圆盘会将压力施加至垫圈。馈通件可包括连接至汇流条和连接至电极的环状轴环。该环状轴环可包括在拉紧时将电极锁定就位的螺纹固定螺丝。位置可在由向上拉动基座的端盘施加的张力下以垫圈而锁定。基座5c1可包括用于通往固定螺丝的轴。该轴可以是带螺纹的,使得其可以非导电固定螺丝(诸如陶瓷固定螺丝,诸如BN固定螺丝)密封于基座的外表面上,其中基座可包含BN,诸如BN-ZrO₂。在另一个实施方式中,汇流条10和电极8可包括可根端连接的杆。在一个实施方式中,基座5c1可包括两个或更多个螺纹金属轴,每一螺纹金属轴具有抵靠汇流条10或电极8拉紧以在张力下将它们锁定就位的固定螺丝。张力可提供汇流条10与电极8的连接和垫圈上的压力中的至少一者。作为另一种选择,对电极包括缩短绝缘基座5c1,其中电极8和汇流条10中的至少一者包括阳螺纹、垫片和匹配的阴螺母,使得螺母和垫片抵靠该缩短绝缘基座5c1拉紧。作为另一种选择,电极8可包括在一端部上的阳螺纹,其旋拧至在汇流条10的一端部处的匹配阴螺纹中,并且电极8还包括固定垫片,其抵靠基座垫片和储罐底板409a(其可以是钻孔的)拉紧该缩短绝缘基座5c1。对电极可包括本领域技术人员已知的固定所述基座、汇流条和电极的其他部件。

[0522] 在另一个实施方式中,诸如以下各项的至少一个密封可包括湿密封件(图25): (i) 插入储罐凸缘409g与套管储罐凸缘409e之间的密封件,和(ii) 储罐底板409a与套管储罐凸缘409e之间的密封件。在后一情形中,可用安装于储罐底板409a中的馈通件替换插入储罐凸缘409g,该馈通件将该馈通件和基座5c1的汇流条10与储罐底板409a电隔离,并且该湿密封件可包括储罐底板409a与馈通件之间的湿密封件。由于镓以1900℃的熔点形成氧化物,因此湿密封件可包含固体氧化镓。

[0523] 在一个实施方式中,可透过氢渗透膜(诸如结构强化的Pd-Ag或铌膜)将氢供应至池。可通过维持可渗透膜的外表面上的等离子体而增加穿过氢渗透膜的氢渗透速率。**SunCell®**可包括半透膜,该半透膜可包括等离子体池的电极,诸如等离子体池的阴极。**SunCell®**诸如在图25中所示的**SunCell®**还可包括外部密封等离子体腔室,其包括包围池5b3的壁的一部分的外壁,其中池5b3的金属壁的一部分包括等离子体池的电极。该密封等离子体腔室可包括在池5b3周围的腔室,诸如壳体,其中池5b3的壁可包括等离子体池电极,并且该壳体或该腔室中的独立电极可包括对电极。**SunCell®**还可包括等离子体动力源和等离子体控制系统、气体源诸如氢气供应贮槽、氢供应监测器和调节器以及真空泵。

[0524] 在一个实施方式中,**SunCell®**包括干扰消除器,该干扰消除器包括用以缓解或消除点燃电路的电力源与EM泵5kk的电力源之间的任何干扰的部件。该干扰消除器可包括一个或多个电路元件和一个或多个控制器中的至少一者,以调节点燃和EM泵电流的相对电压、电流、极性、波形和占空比从而防止两个相应供应器之间的干扰。

[0525] 在一个实施方式中,**SunCell®**包括用以增加EM泵管5k61的注射器区段中的金属流的电阻的部件。该用以增加电阻的部件可包括对EM泵5kk上的金属流具有极小影响的电流限制器。电流电阻器可靠近于EM泵磁体5k4和汇流条5k2定位,使得电流电阻器不干扰可在

电流电阻器之后供应至金属流的点燃电流。电流电阻器可包括旋转以允许熔融金属流的多个叶片或桨叶。该桨叶或叶片可安装于轴上。该桨叶或叶片可包含绝缘体如陶瓷,诸如氮化硼、石英、氧化铝、氧化锆、氧化钪或本公开或本领域已知的其他陶瓷。在一个实施方式中,电流电阻器包括EM泵流的电流断流器,诸如绝缘体桨轮,诸如陶瓷(诸如BN)绝缘体桨轮。该断流器可容纳于壳体中,该壳体包括EM泵管5k61的注射器区段的一段中的突出部。桨轮的轴可固定至壳体的内侧壁。在一用以使旋转方向偏向于所需方向的实施方式中,桨叶或叶片中的至少一者可以是弯曲的或杯形的并且桨轮可从EM泵管流的中心偏移。壳体可适应该偏移。在一个实施方式中,电流断流器可位于EM泵的入口和注入出口侧中的至少一者中。EM泵管可包括具有较大直径的突出部或区段以形成包括用以缓解不稳定熔融金属流的流量调节器的储罐。该储罐可在流通过电流断流器之后接纳流。在一个实施方式中,该电流断流器可用以中断穿过入口和出口EM泵管两者中的熔融金属的电流。该电流断流器可包括在轮的一半上接纳入口流并在流的另一半上接纳外出流的单个桨轮。入口管和出口管中的每一者可包括在流的下游的储罐。出口流可帮助使轮转动以利于原本可以受诸如桨轮之类的电流断流器阻挡的入口流。

[0526] 在一个实施方式中,电流限制器可包括在EM泵管内侧的螺旋钻,其中其轴与流方向对准并且包括螺距以基于流的方向而利于所需的螺旋钻轴旋转。电流限制器可包括阿基米德螺杆泵类型,其中通过由EM泵推进的熔融金属流实现旋转。螺旋钻可包含电绝缘体,诸如陶瓷,诸如本公开的陶瓷。螺旋钻可包含碳或诸如不锈钢之类的金属,其可涂覆有绝缘体,诸如陶瓷,诸如氧化铝、硅石、莫来石、BN或本公开的另一者。对于诸如低于螺旋钻的熔点的低温操作,螺旋钻可包含特氟隆、Viton、Delrin或本领域技术人员已知的另一高温聚合物。在一个实施方式中,容纳螺旋钻的EM泵管区段可包括较大直径,其具有相应的较大直径螺旋钻用以减少对熔融金属流的阻力。螺旋钻可包括安装座以将其固定就位并允许其旋转。每一端上的螺旋钻安装座可各自包括在轴上的滑动轴承,该轴跨越EM泵管区段的容纳该螺旋钻的壳体的直径。安装座可包含对抗与镓形成合金的材料,诸如不锈钢、钽或钨。在一个实施方式中,EM泵管的注入区段包含电绝缘体,诸如陶瓷。喷嘴可被浸没以优先形成点燃功率与相应的所注入熔融金属料流之间的电接触。

[0527] 在一个实施方式中, SunCell®包括具有相应电源供应器的至少一个EM泵以及至少一个点燃系统及相应的动力供应器。在一个实施方式中,相应的电源具有不同频率,使得当存在共同传导电路(诸如具有熔融金属作为共同电触点的传导电路)时将来自其供应器的点燃功率与来自其供应器的EM泵功率解耦。在一个示例性实施方式中,AC传导EM泵可与DC传导点燃电流解耦,或DC传导EM泵可与AC传导点燃电流解耦。作为另一种选择,EM泵和点燃电流中的至少一者可包含由相应的AC变压器维持的感应AC电流,其中多个变压器经设计为不耦合。还可在包括机械泵(诸如本领域已知的磁耦合泵、叶轮泵、活塞泵、旋转磁体泵、蠕动泵或其他类型的机械泵)或线性感应EM泵的实施方式中消除电耦合,其中点燃电流和相应供应器的频率包括任何频率并且电流可以是传导或感应类型。

[0528] SunCell®还可包括光伏(PV)转换器和将光传输至PV转换器的窗。在图26-27中所示的实施方式中, SunCell®包括沿纵轴具有锥形横截面的反应池腔室5b31和在该锥形件顶点处的PV窗5b4。具有配接锥形件的窗可包括容纳PV阵列26a的任何所需几何形状,诸如圆形(图26)或正方形或矩形(图27)。该锥形件可遏制PV窗5b4的金属化以允许通过光伏(PV)

转换器26a进行有效的光电转换。PV转换器26a可包括聚光器PV池(诸如本公开的PV池)的密集接收器阵列且还可包括冷却系统诸如包括微通道板的冷却系统。PV窗5b4可包括遏制金属化的涂层。可冷却PV窗以防止PV窗涂层热降解。**SunCell®**可包括至少一个部分倒置的基座5c2,其在该倒置基座5c2的端部具有杯或滴落边缘5c1a,其类似于图25中所示的倒置基座,不同之处在于每个基座和电极10的纵轴可相对于纵轴或z轴以一定角度取向。该角度可在 1° 至 90° 的范围内。在一个实施方式中,至少一个注射器对电极5k61在适用时对抗重力沿正z方向斜向地注入来自其储罐5c的熔融金属。注射泵送可由安装于EM泵组装件滑动工作台409c上的EM泵组装件5kk提供。在示例性实施方式中,部分倒置的基座5c2和注射器对电极5k61如图26中所示在与水平轴或x轴成 135° 的轴上对准或如图27中所示在与水平轴或x轴成 45° 的轴上对准。具有插入储罐凸缘409g的插入储罐409f可通过储罐底板409a、套管储罐409d和套管储罐凸缘409e安装至池腔室5b3。电极可透过电极穿透部10a1穿透储罐底板409a。注射器电极的喷嘴5q可浸没于容纳于反应池腔室5b31和储罐5c的底部中的液态金属(诸如液体镓)中。气体可供应至反应池腔室5b31,或腔室可穿过气体端口诸如409h抽真空。

[0529] 在图28中所示的备选实施方式中,**SunCell®**包括:反应池腔室5b31,其沿着负垂直轴具有渐缩横截面;和PV窗5b4,其在该锥形件的较大直径端(包括反应池腔室5b31的顶部)处,与图26至图27中所示的实施方式的锥形件相反。在一个实施方式中,**SunCell®**包括反应池腔室5b31,其包括直圆柱几何结构。注射器喷嘴和基座对电极可在垂直轴上在该圆柱体的相对端处或沿着相对于垂直轴倾斜的线对准。

[0530] 在一个实施方式中,PV窗可包括可捆绑在一起的多个窄通道或管。每一通道可在远离反应池腔室的端部上包括PV窗。该通道可竖直取向。可通过管中的气体的机械抵抗力和重力中的至少一者阻止沿着通道的轴推进的熔融金属到达PV窗。可将向上移动颗粒的初始动能转换为重力能,使得停止向上运动。通道面积可在约 0.01cm^2 至 10cm^2 、 0.05cm^2 至 5cm^2 和 0.1cm^2 至 1cm^2 中的至少一个范围内。

[0531] 在一个实施方式中,PV窗包括:透光窗;和至少一个镜或反射器,其在物理上阻止熔融金属涂覆透光窗同时以使得光通过行进间接路径而入射于该透光窗上的方式反射光。该透光窗可包含材料诸如石英、蓝宝石、玻璃或本公开的另一窗材料。池的熔融金属可包含低发射率的熔融金属,诸如熔融镓或熔融银。反射器可包括表面,该表面涂覆有熔融金属使得该带涂层表面主要地反射来自池的入射光并引导该光入射于窗上。反射器可包括多个此类表面,诸如可以是平滑的金属板。金属颗粒可沿着笔直轨迹流动并且不从该多个反射器弹开。因此,该反射器可阻挡金属流到达窗。反射器可以任何所需角度取向成任何所需布置方式,该布置方式提供去往窗的间接光路径同时阻挡金属颗粒去往窗的直线路径。在一个示例性实施方式中,诸如金属板之类的反射器可布置成若干对,其包括大致平行平面,其中每一板相对于垂直轴具有大约相同倾斜角并且所述对的第二板相对于第一板在横向方向上偏移。多个此类对可以是如下情形中的至少一者:在横向方向上相对于彼此偏移;和在垂直方向上相对于彼此偏移。光入射角可约等于在反射期间的反射角。光可随着其在从至少一对反射器的多次反射之后沿着渐进垂直轨迹行进而横向地移位。反射器可被布置成至少部分地使任何横向光位移逆转。在一个示例性实施方式中,反射器可经布置而使得在正z方向上行进的光在横向方向上从第一反射器反射,然后在正z方向上由第二反射器反射。在另一个实施方式中,反射器可经布置而使得入射光随着轨迹在z方向上前进而在横向方向上

交替地来回反射。在一个示例性实施方式中,在z方向上的光传播经历以下反射序列:(i) 横向方向,诸如x方向,(ii) 正z方向,(iii) 相反横向方向,诸如负x方向,和(iv) 正z方向。可使光横越包括垂直之字形的光路径。可使用多(整数n)个堆叠的反射器对使之字形路径垂直延伸所需距离。每个对的构成件可相对于彼此平行。每一第n个连续对可垂直于第(n-1)个对而取向以形成之字形光通道。可控制之字形通道的x宽度、y宽度和z高度中的至少一者以选择性地将光与金属颗粒分开。x宽度、y宽度和z高度中的至少一者可在1mm至1m、5mm至100cm和1cm至50cm中的至少一个范围内。在一个实施方式中,通道x宽度或y宽度中的至少一者可随着垂直位置变化或在z方向上变化。通道的至少一个宽度可随高度而发生以下情形中的至少一者:渐缩、加宽或变化。通道可包括矩形通道,诸如正方形通道。在一个实施方式中,至少一个反射器可包括在表面上流动以维持高反射率的熔融金属(诸如镓)源。该熔融金属源可包括至少一个EM泵和一个熔融金属储罐。储罐可包括储罐5c。

[0532] SunCell可包括透明窗以充当对窗透明的波长的光源。SunCell可包括可充当黑体光源的黑体辐射器5b4。在一个实施方式中, SunCell®包括光源(例如,来自该反应的等离子体),其中在所需的照明应用(诸如居室、街道、商业或工业照明)中或针对加热或处理(诸如化学处理或光刻)而利用透过所述窗发射的分数氢等离子体光。

[0533] 在一个实施方式中, SunCell®包括具有储罐414的交叉连接通道的感应点燃系统、泵诸如感应EM泵、导电EM泵或注射器储罐中的机械泵和充当对电极的非注射器储罐。储罐414的交叉连接通道可包括限流部件以使得非注射器储罐可维持大致充满。在一个实施方式中,储罐414的交叉连接通道可容纳有不流动的导体,诸如固态导体,诸如固态银。

[0534] 在一个实施方式(图29)中, SunCell®包括在阴极和阳极汇流条或电流连接器之间的电流连接器或储罐跨接电缆414a。池主体5b3可包含非导体,或者池主体5b3可包含导体诸如不锈钢,其中至少一个电极与池主体5b3电隔离,使得迫使感应电流在电极之间流动。电流连接器或跨接电缆可将基座电极8中的至少一者和电连接器中的至少一者连接至EM泵和与EM泵的储罐5c中的金属接触的汇流条。SunCell®(诸如图25至图28中所示的 SunCell®)的阴极和阳极(其包括基座电极,诸如倒置基座5c2或与z轴成角度的基座5c2)可包括通过由至少一个EM泵5kk注入的熔融金属料流形成闭合电流回路的阳极与阴极之间的电连接器。金属料流可通过接触熔融金属EM泵注射器5k61和5q或者储罐5c中的金属和基座的电极中的至少一者而闭合导电回路。SunCell®还可包括在闭合导电回路中具有其轭402的点燃变压器401以感应出充当单回路短接次级绕组的回路的熔融金属中的电流。变压器401和402可在该闭合电流回路中感应出点燃电流。在一个示例性实施方式中,初级绕组可在1Hz至100kHz、10Hz至10kHz和60Hz至2000Hz中的至少一个频率范围内操作,输入电压可在约10V至10MV、50V至1MV、50V至100kV、50V至10kV、50V至1kV和100V至480V中的至少一个范围内操作,输入电流可在约1A至1MA、10A至100kA、10A至10kA、10A至1kA和30A至200A中的至少一个范围内操作,点燃电压可在约0.1V至100kV、1V至10kV、1V至1kV和1V至50V中的至少一个范围内操作,并且点燃电流可在约10A至1MA、100A至100kA、100A至10kA和100A至5kA的范围内。在一个实施方式中,等离子体气体可包含任何气体,诸如稀有气体、氢、水蒸气、二氧化碳、氮、氧和空气中的至少一者。气体压力可在大约1微托至100大气压、1毫托至10大气压、100毫托至5大气压和1托至1大气压中的至少一个范围内。

[0535] 当次级绕组由于由诸如来自分数氢等离子体反应的震波和所注入的金属料流的不稳定性中的至少一者的机制导致的电极之间的熔融料流的中断或不连续而是开路的时, 通量可在初级绕组中积聚并致使电压在次级绕组中上升直至重新建立等离子体为止。一旦等离子体开始, 电压便可由于与初级绕组中的通量相对的在次级绕组中形成的高电流而下降。因此, 在一个实施方式中, 包括至少一个熔融金属料流、至少一个EM泵储罐、至少一个熔融金属EM泵注射器和在每一端连接至相应电极汇流条并通过变压器初级绕组的跨接电缆的电流回路可固地调节电压以实现等离子体点燃同时使输入功率最小。

[0536] 在一个实施方式中, 反应池腔室包括不导电的壁, 使得感应通量穿透腔室并直接在反应池腔室中的熔融金属料流上导致感应的电压。相对于来自例如变压器的外部施加的AC电压, 直接感应可增加点燃电流的连续性质。池壁可包含石英或陶瓷(诸如氧化铝、氧化钪或氧化锆)或本公开的另一材料。SunCell®(诸如图25至图32中所示的示例性SunCell®)可包括电绝缘体诸如具有金属凸缘409g的陶瓷或石英池腔室5b3和在储罐5c至池腔室5b3连接处的电绝缘体。该凸缘可通过金属至石英或金属至陶瓷密封件(诸如本公开的密封件或本领域已知的密封件)附接至电绝缘体。电极汇流条10可焊接至板409a中, 板409a螺栓连接至凸缘409g并且由诸如铜垫圈之类的垫圈密封。汇流条10可由电绝缘体基座5c1(诸如包含BN的电绝缘体基座5c1)覆盖。在其中腔室壁是导电的另一个实施方式中, 壁可以是薄壁和非磁性壁中的至少一者以允许磁通量穿透并连接至所注入的熔融金属料流。可降低感应频率以允许最佳的通量穿透。

[0537] 在另一个实施方式中, 池腔室5b3包括导电区段和非导电区段。池腔室5b3可对于从点燃变压器初级绕组切割最少量的磁通量的区段包含电导体诸如不锈钢并且可对于大致垂直于来自感应点燃变压器的初级绕组的通量的磁通量线的区段包含电绝缘体。时变磁通量的穿透高度地取决于池腔室壁的磁导率, 如由Yang等人(D. Yang, Z. Hu, H. Zhao, H. Hu, Y. Sun, B. Hou, "Through-Metal-Wall Power Delivery and Data Transmission for Enclosed Sensors: A Review", Sensors, (2015), 第15卷, 31581-31605页; doi:10.3390/s151229870)所报告的, 将该文献以引用方式并入, 尤其是章节2.1。对于处于其退火状态中的304和316不锈钢通常报告K约为1.002至1.005的相对磁导率(<https://www.mtm-inc.com/ac-20110117-how-nonmagnetic-are-304-and-316-stainless-steels.html>); 然而, 石英是反磁性的并且镓的磁导率为 $-21.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$ (在290K下)。在包括立方体几何结构的反应腔室的示例性实施方式中, 反应池腔室包括使磁通量通过的窗, 诸如在从点燃变压器的初级绕组最大量地切割磁通量的磁通量线的两个相对侧上安装于SS凸缘中的石英窗。每个窗可通过焊接至SS面的螺栓连接的匹配凸缘密封至相应的池面。在熔融金属诸如镓涂覆窗的情形中, 预期对通量穿透的影响是极小的, 这是因示例性的熔融金属镓和银是反磁性的并且涂层可各自是非常薄的。该窗可经设置而使得磁通量穿透反应池腔室可在反应池腔室中的等离子体和来自EM泵的注入的熔融金属料流中的至少一者中最大量地直接感应电场。

[0538] 示例性的测试实施方式包括具有两个交叉EM泵注射器的石英SunCell®, 诸如图10中所示的SunCell®。各自包括感应型电磁泵(包括示例性的基于Fe的非晶磁心)的两个熔融金属注射器泵送镓钢锡合金料流, 使得它们相交而形成连接1000Hz变压器初级绕组的三角形电流回路。该电流回路包括料流、两个镓钢锡合金储罐和在该储罐的基部处的交叉通道。

该回路充当至1000Hz变压器初级绕组的短接次级绕组。该次级绕组中的感应电流以低的功耗在大气中维持等离子体。感应系统使基于银的工作流体 **SunCell®** (本公开的磁流体动力产生器) 成为可能, 其中根据本公开, 将分数氢反应物供应至反应池腔室。具体而言, (i) 点燃变压器的初级回路在1000Hz下操作, (ii) 输入电压为100V至150V, 以及 (iii) 输入电流为25A。EM泵电流变压器的60Hz电压和电流分别为300V和6.6A。每个EM泵的电磁体通过一系列299 μ F电容器以60Hz、15-20A提供动力以使所得磁场的相位与EM泵电流变压器的洛仑兹交叉电流匹配。

[0539] 该变压器由1000Hz AC动力供应器提供动力。在一个实施方式中, 点燃变压器可由变频驱动器诸如单相变频驱动器 (VFD) 提供动力。在一个实施方式中, VFD输入功率经匹配以提供输出电压和电流 (其进一步提供所需点燃电压和电流), 其中针对VFD的相应输出电压和电流而选择匝数和线规。感应点燃电流可在约10A至100kA、100A至10kA和100A至5kA中的至少一个范围内。感应点燃电压可在0.5V至1kV、1V至100V和1V至10V中的至少一个范围内。频率可在约1Hz至100kHz、10Hz至10kHz和10Hz至1kHz中的至少一个范围内。示例性的VFD为ATO 7.5kW、220V至240V输出单相500Hz VFD。

[0540] 另一示例性的测试实施方式包括具有一个EM泵注射器电极和基座对电极 (其之间具有连接的跨接电缆414a) 的Pyrex **SunCell®**, 诸如图29中所示的 **SunCell®**。包括DC型电磁泵的熔融金属注射器泵送与基座对电极连接以闭合包括该料流、EM

[0541] 泵储罐和跨接电缆 (在每一端处连接至相应的电极汇流条) 的电流回路并通过60Hz变压器初级绕组的镓铟锡合金料流。该回路充当至60Hz变压器初级绕组的短接次级绕组。该次级绕组中的感应电流以低的功耗在大气中维持等离子体。感应点燃系统使本公开的基于银或镓的熔融金属 **SunCell®** 动力产生器成为可能, 其中根据本公开, 将分数氢反应物供应至反应池腔室。具体而言, (i) 点燃变压器的初级回路在60Hz下操作, (ii) 输入电压是300V峰值, 并且 (iii) 输入电流是29A峰值。最大感应等离子体点燃电流是1.38kA。

[0542] 在一个实施方式中, 电力源或点燃动力源包括非直流 (DC) 源, 诸如时变电流源, 诸如脉冲或交流 (AC) 源。峰值电流可在诸如10A至100mA、100A至10mA、100A至1mA、100A至100kA、100A至10kA和100A至1kA中的至少一个范围内。峰值电压可在0.5V至1kV、1V至100V和1V至10V中的至少一个范围内。在一个实施方式中, 可选择EM泵动力源和AC点燃系统以避免将导致无效EM泵送和所需点燃波形的畸变中的至少一者的推断。

[0543] 在一个实施方式中, 用以供应点燃电流的电力源或点燃动力源可包括以下中的至少一者: DC、AC以及DC和AC动力供应器, 诸如由AC电、DC电以及DC和AC电中的至少一者提供动力的动力供应器, 诸如开关式动力供应器、变频驱动器 (VFD)、AC至AC转换器、DC至DC转换器和AC至DC转换器、DC至AC转换器、整流器、全波整流器、反相器、光伏阵列产生器、磁流体动力产生器和常规动力产生器, 诸如兰金或布雷顿循环提供动力的产生器、热离子产生器和热电产生器。点燃动力源可包括用以产生所需点燃电流的至少一个电路元件, 诸如过渡、IGBT、感应器、变压器、电容器、整流器、桥 (诸如H-桥)、电阻器、运算放大器或本领域已知的另一电路元件或功率调节装置。在一个示例性实施方式中, 点燃动力源可包括全波整流高频源, 诸如以约50% 占空比或更大占空比供应正方波脉冲的全波整流高频源。频率可约60Hz至100kHz的范围内。示例性的供应器提供在约10kHz至40kHz的范围内的频率下的约30至40V和3000至5000A。在一个实施方式中, 用以供应点燃电流的电力可包括可与AC变压器

或动力供应器串联的经充电至初始偏移电压(诸如在1V至100V的范围内的电压)的电容器组,其中所得的电压可包括具有AC调变的DC电压。DC组件可以以取决于其正常放电时间常数的速率衰减,或者可增加或消除放电时间,其中点燃动力源还包括将电容器组再充电的DC动力供应器。DV电压组件可辅助起始等离子体,其中此后可以较低电压维持等离子体。

[0544] 在一个实施方式中, SunCell®包括用以使电极(诸如包括注射器电极和对电极的组)之间的电流密度集中以增加分数氢反应速率的部件。高电流密度可形成电弧电流,该电弧电流另外降低输入功率以增加由于分数氢反应引起的功率增益。在一个实施方式(诸如图25中所示的实施方式)中,池腔室5b3或壁或反应池腔室5b31是非导电的,使得在具有高点燃电流密度的情况下高度聚焦分数氢反应等离子体。储罐5c、池腔室5b3和反应池腔室5b31壁中的至少一者可包含非导体,诸如石英、熔融硅石、陶瓷(诸如氧化铝、氧化钪、氧化锆)或本公开的另一非导体。对电极的凸缘和储罐凸缘可包含接合至非导体的金属,诸如接合至石英或Pyrex的金属,如本发明中所公开的。在其中反应腔室和储罐可包含诸如石英或熔融硅石之类的非导体的诸如图25中所示的实施方式中,反应池腔室5b31、储罐5c和气体端口409h中的至少一者可包含接合至金属高温凸缘的石英以(i)将反应池腔室连接至基座电极组装件,诸如包括凸缘409g、汇流条10、电极8和基座5c1的基座电极组装件,(ii)将储罐5c的底部连接至EM泵组装件,该EM泵组装件包括底板、具有任选的筛网5qa1或升管5qa的EM泵入口以及EM泵喷射器管,以及(iii)将气体供应器和真空端口中的至少一者连接至相应的气体和真空管线。密封件、凸缘、连接件、垫圈和紧固件可以是本公开的密封件、凸缘、连接件、垫圈和紧固件或本领域已知的密封件、凸缘、连接件、垫圈和紧固件。在一个实施方式中,反应池腔室壁可包含诸如金属(诸如不锈钢)之类的导体,其包含非导体涂层(诸如BN、莫来石、氧化铝、硅石或本公开的另一者),其中从反应池腔室外侧穿透至内侧的电引线是电隔离的。

[0545] 在一个实施方式中,分数氢等离子体和点燃电流中的至少一者可包含电弧电流。电弧电流可具有如下的特性:电流越高,电压越低。在一个实施方式中,选择反应池腔室壁和电极中的至少一者以形成且支持分数氢等离子体电流和包含电弧电流(即在非常高电流下具有非常低电压的电流)的点燃电流中的至少一者。在一单个注射器池设计(诸如图25中所示的注射器池设计)的实施方式中,非注射器电极8可以是正电极。分数氢反应可在正电极发生。使非注射器电极为正电极可增加反应池腔室中分数氢反应具有最高动力学的区域处的电流密度。电极8(图25)可在暴露于分数氢反应的端部5c1a上是凹形的以支持镓汇集从而保护电极8免受热损坏。在一个实施方式中,注射器电极可以是非浸没的以使等离子体集中且增加电流密度。注射器电极可包含难熔材料,诸如难熔金属,诸如钨。反应池腔室体积和熔融金属表面积中的至少一者(诸如反应池腔室和储罐中的至少一者)可最小化以增加点燃电流密度。电流密度可在约 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $100\text{MA}/\text{cm}^2$ 、 $10\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $10\text{MA}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $10\text{MA}/\text{cm}^2$ 和 $1\text{kA}/\text{cm}^2$ 至 $1\text{MA}/\text{cm}^2$ 中的至少一个范围内。在增加电流密度的示例性实施方式中,非注射器电极8可以是正或负电极并且包括一部分,诸如难熔金属部分,诸如至少部分地突出至BN基座5c2的凹形基座滴落边缘5c1中的W或Ta杆。在一个实施方式中,BN基座5c2的凹形基座滴落边缘5c1可包含难熔材料,诸如陶瓷(诸如本公开的陶瓷)或难熔金属(诸如钨、钽或钼或本公开的另一者)。基座5c2的顶部部分可包含在汇流条10上的电绝缘体以阻止其短接至反应腔室壁。该绝缘体可包括陶瓷,诸如BN或本公开的另一者 H_2 流可随着电流密度

的增加而增加以产生更高输出功率和增益中的至少一者。与等离子体和来自注射器电极的熔融金属料流中的至少一者接触的表面的尺寸。在一个示例性实施方式中,将大的板或杯附接至电极10的端部。在另一个实施方式中,注射器电极可浸没以增加对电极的面积。在包括球形池(诸如图25中所示的球形池)的实施方式中,电极经布置而使得点燃发生在球形反应池腔室的中心中以通过来自分数氢反应的外出震波的法向入射反射强化分数氢反应等离子体。

[0546] 在一个实施方式中,熔融金属可包括具有支持来自分数氢反应的高增益的至少一种性质的金属或合金。熔融金属可包含具有如下的群组中的至少一个属性的熔融金属:高传导率,其用以减少输入电压并改善增益;低粘度,其用以改善EM泵送以支持更强烈的分数氢反应;抵抗形成氧化物涂层以改善SunCell®电极之间的传导率;以及拥有润湿PV窗的低倾向性。在一个示例性实施方式中,熔融金属可包含镓铟锡合金。镓铟锡合金的镓组份可还原合金的其他氧化物(诸如 In_2O_3 和 SnO_2 中的至少一者)以形成氧化镓。该氧化镓可转换回镓金属或通过本公开的手段(诸如氢还原)来移除。在一个实施方式中,熔融金属可包含镓铟锡合金加上小量(诸如少于2重量%)的至少一种其他金属,诸如铋和锑中的一者或多者。其他金属可实现以下各项中的至少一者:减少PV窗润湿;增加流动性;减少氧化;以及增加熔融金属的沸点。在一个示例性实施方式中,包含低共熔合金的熔融金属包含68-69重量% Ga、21-22重量% In和9.5-10.5重量% Sn以及小量的Bi和Sb(各自为0-2重量%),并且杂质水平小于0.001%,其中熔点是约-19.5°C并且沸点高于1800°C。在另一个实施方式中,熔融金属包括菲尔德合金,其包含低共熔混合物或铋、铟和锡。

[0547] 在一个实施方式中,点燃系统可将高起始功率施加至等离子体并然后在电阻下降之后降低点燃功率。电阻可由于以下各项中的至少一者而下降:归因于点燃电路中(诸如电极或熔融金属料流上)任何氧化物的还原的传导率增加;以及等离子体的形成。在一个示例性实施方式中,点燃系统包括与AC串联的电容器组以产生高功率DC的AC调制,其中DC电压随着电容器的放电而衰减并且只剩下较低AC功率。

[0548] 在一个实施方式中,基座电极8可凹陷于插入储罐409f中,其中所泵送熔融金属填充诸如5c1a之类的口袋以动态地形成与基座电极8接触的熔融金属汇集区。基座电极8可包含在SunCell®的工作温度下不与熔融金属(诸如镓)形成合金的导体。示例性的基座电极8包含钨、钼、不锈钢或钼,其中低于600°C的工作温度下Mo不与镓形成合金,诸如 Mo_3Ga 。在一个实施方式中,EM泵的入口可包括过滤器5qa1,诸如阻挡合金颗粒同时准许镓进入的筛网或网格。为增加表面积,过滤器可以垂直方式和水平方式中的至少一者延伸并连接至入口。该过滤器可包含抵抗与镓形成合金的材料,诸如不锈钢(SS)、钼或钨。示例性的入口过滤器包括具有等于入口的直径的直径但垂直地升高的SS圆柱体。作为日常维护的部分,可定期清洁过滤器。

[0549] 在一个实施方式中,非注射器电极可间歇地浸没于熔融金属中以便使其冷却。在一个实施方式中,SunCell®包括注射器EM泵及其储罐5c以及至少一个额外的EM泵,并且可包括用于该额外EM泵的另一储罐。使用该额外储罐,该额外EM泵可进行以下操作中的至少一者:(i)将熔融金属可逆地泵送进反应池腔室中以间歇地浸没非注射器电极以便使其冷却;以及(ii)将熔融金属泵送至非注射器电极上以便使其冷却。SunCell®可包括具有冷却剂的冷却剂储槽、用以使冷却剂循环穿过非注射器电极的冷却剂泵以及用以排放来自冷却

剂的热的热交换器。在一个实施方式中,非注射器电极可包括用于冷却剂(诸如水、熔融盐、熔融金属或本领域已知的另一冷却剂)的通道或套管以使非注射器电极冷却。

[0550] 在图25中所示的倒置的实施方式中,使**SunCell®**旋转180°,使得非注射器电极在池的底部并且注射器电极在反应池腔室的顶部,使得熔融金属注入是沿着负z轴。非注射器电极和注射器电极中的至少一者可安装于相应的板中并且可通过相应的凸缘密封件连接至反应池腔室。该密封件可包括垫圈,该垫圈包含不与镓形成合金的材料,诸如Ta、W或陶瓷(诸如本发明或本领域已知的陶瓷)。在底部的反应池腔室区段可充当储罐,可消除前一储罐,并且EM泵可在该新的底部储罐中包括可穿透底部底板、连接至EM泵管并将熔融金属流提供至EM泵的入口升管,其中EM泵管的出口部分穿透顶部板并连接至在反应池腔室内侧的喷嘴。在操作期间,EM泵可泵送来自底部储罐的熔融金属并且将其注入至在反应池腔室的底部的非注射器电极8中。倒置的**SunCell®**可通过由池的顶部的注射器电极注入的高镓流来冷却。非注射器电极8可包括用以汇集镓的凹形腔以更好地使电极冷却。在一个实施方式中,非注射器电极可充当正电极;然而,相反极性也是本公开的实施方式。

[0551] 在一个实施方式中,电极8可通过发射辐射来冷却。为增加热传递,可增加辐射表面积。在一个实施方式中,汇流条10可包括所附接的辐射器,诸如叶片辐射器,诸如平板。可通过沿着汇流条10的轴固定边缘的面而附接该板。该叶片可包括桨轮模式。叶片可通过从汇流条10的热传导而加热,汇流条10可通过以下中的至少一者来加热:点燃电流以电阻方式加热以及分数氢反应加热。诸如叶片之类的辐射器可包含难熔金属,诸如Ta或W。

[0552] 在一个实施方式中,**SunCell®**包括局限点燃电流和等离子体电流中的至少一者以增加电流密度的部件。局限部件可包括等离子体局限磁体。**SunCell®**还可包括实现以下各项中的至少一者的磁体:局限等离子体;和稳定等离子体,以增加电流密度。局限部件可包括充分高的电流的点燃电流源以引起磁箍缩效应。可选择电流使得在电流箍缩时产生电弧电流,其中电压随电流增加而下降。电弧电流可增加功率增益。可通过施加至电极的DC或AC动力或通过维持电流回路(诸如包括本公开的感应点燃系统的双重所注入熔融金属料流的电流回路)中的感应电流而形成箍缩等离子体。**SunCell®**可包括稠密等离子体聚焦装置。在一个实施方式中,反应腔室壁可充当电极,并且由注射器电极形成的金属料流可构成对电极,使得点燃功率的施加会在两个两个电极之间引起表现为稠密聚焦等离子体的等离子体。在一个实施方式(诸如图25中所示的实施方式)中,反应池腔室和储罐中的至少一者可包括非导体,诸如石英或本公开的另一陶瓷,并且非注射器电极可包括与注射器电极电隔离的反应池腔室的衬里5b31a。该衬里可电连接至电极8。熔融金属料流和衬里电极可包括箍缩等离子体装置诸如等离子体聚焦装置的同心电极。点燃功率可提供充足电压、电流和功率中的至少一者以在两个电极之间的等离子体中引起箍缩效应。可由控制器连续地或间断地施加点燃功率。

[0553] 在一个实施方式中,用于将分数氢反应所产生的光从反应池腔室5b31传输至光伏(PV)功率转换器的PV窗可位于倒置基座后方(图25)。倒置基座可阻断金属流向PV窗以防止其变得不透明。在一个实施方式中,**SunCell®**还可包括至少一个等离子体可渗透挡板或滤网,以阻断金属颗粒流向PV窗同时允许由分数氢反应形成的发光等离子体透过。挡板或滤网可包括至少一个格栅或编织物诸如包含不锈钢或其他难熔耐腐蚀材料(诸如金属或陶

瓷)的格栅或编织物中的一者或多者。

[0554] 在一个实施方式中,反应池腔室5b31可包括一系列挡板以阻止金属颗粒使光伏(PV)窗金属化。反应池腔室可包括圆柱形几何结构。该挡板可被布置成优先地阻挡金属颗粒的轨迹或流同时允许发光等离子体流动至透过PV窗5b4发射光的区域。在一个实施方式中,该挡板可经取向而使得至少一部分具有在垂直于竖轴或z轴的平面中的突出部。该PV窗可以在垂直于z轴的平面中。该挡板可被布置成从基部至PV窗的螺旋形件。该挡板可包括螺旋楼梯几何结构。等离子体可在该螺旋形件的挡板周围流动同时金属颗粒被阻挡。

[0555] 在一个实施方式中,池腔室5b3的顶部可包括PV窗,其中在反应池腔室5b31的顶部的气体流具有至少一个特性,诸如平行于窗的平面的大多数流、低轴向流动和低流动。在一个实施方式中,池腔室5b3包括渐缩壁、圆柱形对称性和诸如一系列螺旋形挡板409j之类的部件(图28)中的至少一者以引导反应池腔室5b31中的气体流从而形成气旋。渐缩壁池腔室5b3可包括在大直径端的PV窗,该大直径端被定位成使得PV窗在池的顶部上的取向。在一个实施方式中,反应池腔室5b31中的挡板可形成气旋,其中轴向气体流主要沿着池腔室5b3的渐缩部分到达小直径端或底部,其中气体流逆转以朝向中间区段流动。该气旋可再次迫使该流向下以在反应池腔室5b31的底部与中间区段之间形成轴向循环。

[0556] 在包括时变点燃电流(诸如AC电流)的实施方式中,挡板和PV窗中的至少一者包括圆周框架,该圆周框架由交流电充电而使得熔融金属被从PV窗附近排开以阻止PV窗被熔融金属涂覆。

[0557] 在一个实施方式中,**SunCell®**可包括诸如镓之类的熔融金属。**SunCell®**还可包括光伏(PV)转换器和将光传输至PV转换器的窗,并且还可包括点燃EM泵,诸如Mills先前专利申请中公开为电极EM泵或第二电极EM泵的点燃EM泵,诸如包括至少一组磁体以产生垂直于点燃电流的磁场从而产生洛伦兹力来限制等离子体和熔融金属以使得等离子体光可穿过所述窗传输至PV转换器的电极EM泵。点燃电流可沿x轴,磁场可沿y轴,洛伦兹力可沿负z轴。在另一个实施方式中,包括光伏(PV)转换器和用以使光透射至该PV转换器的窗的**SunCell®**还包括机械窗清洁器和气体射流或气刀中的至少一者以移除可在工作期间累积于窗表面上的熔融金属。所述气体射流或气刀的气体可包含反应池腔室气体,诸如反应物、氢、氧、水蒸气和稀有气体中的至少一者。在一个实施方式中,PV窗包括防止诸如镓之类的熔融金属粘附的涂层,诸如本公开中的一者,其中涂层厚度足够薄使其对将由PV转换为电的光高度透明。用于石英反应池腔室区段的示例性涂层为薄膜氮化硼和碳。石英自身可为充当反应池腔室壁和PV窗材料的适合材料。

[0558] 在另一个实施方式中,反应池腔室可包含溶剂或运输剂、运输反应物或运输化合物(诸如 GaX_3 ($\text{X}=\text{卤离子}$), 诸如 GaCl_3 或 GaBr_3)或从PV窗表面移除所沉积的镓金属和氧化镓中的至少一者的长链烃。该溶剂或运输剂可进行以下操作中的至少一者:溶解、悬浮和运输所沉积的镓金属和氧化镓中的至少一者以导致其移除。可通过气体射流或气刀增强该移除。在一个实施方式中,窗包含抵抗镓金属的润湿的材料,诸如石英和本公开的其他非润湿材料。溶剂或运输剂诸如 GaX_3 ($\text{X}=\text{卤离子}$)可溶解和移除氧化镓,使得剩余的纯化镓金属积聚成珠并且容易地通过重力、气体射流、以诸如刮刷器之类的部件以机械方式、振动和离心力移除。该移除可以通过诸如本公开的手段之类的手段。 Ga_2O_3 可通过与溶剂或运输剂诸如 GaX_3 ($\text{X}=\text{卤离子}$)反应而选择性地移除。反应产物可包含卤氧化物,诸如卤氧化镓。该卤

氧化物可以是挥发性的。可在一温度下操作PV窗以致使卤氧化物从PV窗的表面蒸发。

[0559] 在一个实施方式中,用以在反应池腔室5b31中形成分数氢的反应混合物包含 GaX_3 ($\text{X}=\text{卤离子}$)以形成气态分子以与 H_2O 二聚物反应从而产生可充当分数氢催化剂的新生 HOH 。 $\text{GaX}_3+\text{H}_2\text{O}$ 二聚物反应产物可以是氧化镓或卤氧化镓中的至少一者。使 H_2O 二聚物断裂以形成新生 HOH 催化剂可增加分数氢反应速率。在另一个实施方式中, GaX_3 (诸如 GaCl_3) 可与水反应以维持再生循环从而形成可充当催化剂以形成分数氢的新生 HOH 。再生反应混合物可包含 GaX_3 、 Ga 、 H_2O 和 H_2 中的至少两者。示例性的反应是 $2\text{Ga}+\text{GaCl}_3+3\text{H}_2\text{O}\rightarrow 3\text{GaOCl}+3\text{H}_2$ 和 $3\text{GaOCl}+3\text{H}_2\rightarrow 3\text{H}_2\text{O}(\text{新生})+\text{GaCl}_3+2\text{Ga}$ 。在一个实施方式中,**SunCell®**可包括冷阱、冷储罐或冷指(包括与反应池腔室5b31的气体连接)和温度控制器,其中可通过控制该冷阱的温度而控制卤化镓和卤氧化镓中的至少一者的蒸气压力。在一个示例性实施方式中,使氢流动至容纳氧源(诸如氧化镓和氯化镓或溴化镓)的反应池腔室中,其中通过控制处于气体连接中但在反应池腔室外部的用于卤化镓的冷储罐的温度而控制卤化镓的蒸气压力。

[0560] 在一个实施方式中,反应池腔室5b31和PV窗中的至少一者可包含溶剂,该溶剂可在PV窗的表面上或凝结在PV窗的表面上以使熔融金属溶解,该熔融金属可在工作期间积聚在PV窗上。例如,由于镓上的氧化镓涂层而粘附至PV窗或挡板的表面的镓可通过溶解该氧化镓涂层的溶剂来移除。该溶剂可包含氢氧化物,诸如氢氧化钠或氢氧化钾。该氢氧化物可是含水的。**SunCell®**可包括PV窗或挡板清洁系统,该PV窗或挡板清洁系统包括以下各项中的至少一者:用以移除窗的部件;用以清洁窗的腔室和部件;清洁溶液(诸如氢氧化物水溶液);和用以将镓和任何溶解的氧化镓与清洁溶液分开的部件;以及用以在清洁之后替换窗的部件。在一个实施方式中,PV窗或挡板清洁系统可用氢氧化物溶液诸如水溶液清洁窗,可将镓、氧化物溶解产物和溶液分开,并且可使镓和氧化物溶解产物中的至少一者返回至反应池腔室或镓再生系统。可在PV窗处于其永久位置中的情况下进行清洁,或可移除PV窗、对PV窗进行清洁并返回PV窗。PV窗或挡板清洁系统可包括多个窗,其中一个窗可充当作用窗,同时正在对至少一个其他窗进行清洁。清洁可在单独腔室中或在与反应池腔室连接的腔室中进行。用以移除和替换PV窗或挡板的部件可包括本领域已知的部件,诸如机械系统、电磁系统、气动系统或液压系统。用以将镓与溶剂分开的部件可以是本领域已知的部件,诸如过滤系统和离心系统。

[0561] 在一个实施方式中,将具有低沸点的诸如铯之类的金属作为运输剂添加至镓,该金属在第一温度下与镓形成合金,并在较高温度下分开地从该合金沸腾。诸如铯之类的金属在其沸点下选择性地沸腾并且作为液体凝结于PV窗上,该液体然后与沉积于窗上的镓形成合金以将其溶解。可通过流或通过诸如空气射流或机械刮刷器之类的手段进行的辅助移除而从窗移除合金。

[0562] 在一个实施方式中,熔融金属可包含比纯金属对挡板或PV窗润湿较少的合金。合金可包含镓和贵金属或未被 H_2O 氧化的金属,诸如Pt、Pd、Ir、Re、Ru、Rh、Au、Cu和Ni中的至少一者。在其中银改变镓的润湿行为以阻止粘附的示例性实施方式中,纯金属包含镓并且合金包含镓银合金,其中银抑制氧化镓涂层的形成,该氧化镓涂层原本会导致镓对挡板或窗材料(诸如石英、蓝宝石和 MgF_2 或本公开的另一者)的高润湿。

[0563] 在一个实施方式中,镓可响应于电场的施加,如Chrimes等人[<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26820807>]所报告的。反应池5b3可包括电场源和外部磁体

中的至少一者以在反应池腔室5b31中所容纳的等离子体中感应出电场以在所需方向上引导等离子体。该电场源可包括一个或多个感应线圈、电馈通件、电极、动力供应器和动力供应器控制器中的至少一者。对等离子体的方向控制可以是以下各项中的至少一者：将等离子体加热功率引导至反应池腔室中的所需区域；以及从PV窗引导镓金属颗粒流。方向控制可实现以下各项中的至少一者：阻止反应池5b3中热点的形成；以及阻止PV窗被金属化。

[0564] 在一个实施方式中，可通过外部场诸如磁场、电场或所感应的电场或磁场将等离子体引导至所需位置。等离子体引导可增强挡板减少PV窗的金属化的性能。在一个实施方式中，SunCell®包括用以将电荷施加至PV窗5b4的部件。该电荷可排斥反应池腔室5b31中的带类似电的金属颗粒以减少PV窗的金属化。在一个示例性实施方式中，可使反应池腔室5b31带负电，其中可通过与带负电的注入储罐的连接施加负电荷，并且可使PV窗5b4带负电以排斥反应池腔室5b31中的熔融金属颗粒（诸如镓颗粒或氧化镓颗粒中的至少一者）以减少PV窗的金属化。PV窗可包括在窗的内表面上的电导体（诸如至少一个电极，诸如金属网格）以充当用以将PV窗充电的部件。作为另一种选择，窗可包含导电材料或涂层（诸如氧化铟锡）以将窗充电，诸如使窗带负电。在窗内表面上的电导体（诸如金属网格）可与反应池腔室5b31接触以变得带电。在另一个实施方式中，PV窗可包括至少一个电导体，诸如穿透PV窗的至少一个销。SunCell®可包括动力源以将导体充电。

[0565] 在一个实施方式中，窗可包括排斥场（诸如排斥电场）的源。该源可包括最靠近于等离子体的内电极和最靠近于PV窗的外电极。该源可包括至少一个电势源。可使该内电极维持在一个电势，并且可使该外电极维持在另一电势，诸如较高电势，使得在所述电极之间存在电势差和相应的场。电极可以是至少部分开放的以允许辐射通过。示例性的电极包括金属网，诸如难熔金属网，诸如W网。在一个示例性实施方式中，该内电极维持在约100V，并且该外电极维持在约300V。

[0566] 在一个实施方式中，PV窗可包括至少一个透明压电晶体，诸如石英、磷酸镓、锆钛酸铅（PZT）或结晶硼硅酸盐（诸如电气石）。发生以下情形中的至少一者：可将机械应变施加至PV窗以产生电；以及可将电施加至与PV窗接触的电极以引起窗的机械运动。所产生的电和所引起的机械运动中的至少一者可致使金属化物从PV窗移除。在另一个实施方式中，来自分数氢反应的强烈等离子体可将PV窗的内表面加热并使金属化物蒸发。在一个实施方式中，PV窗或挡板包括压电直接放电（PDD）系统。高电压和通过PDD系统形成于反应池腔室的气体中的等离子体中的至少一者可实现以下各项中的至少一者：抑制粘附；以及利于将镓颗粒从PV窗移除。PDD系统可包括至少一个电晕电极，诸如不显著阻挡入射于PV窗或挡板上的分数氢反应等离子体光的电晕电极。电晕电极可包括至少一根线，诸如包含难熔金属（诸如钨、钽或铌）的线。在一个实施方式中，反应池腔室可包含氢，并且PPD系统可引起氢解离。所得的原子氢可使氧化镓还原以减少其对PV窗的润湿。

[0567] PV窗可在外表面上被冷却以防止热窗失效。PV窗可安装于反应池腔室延伸部上以将其放置于从最强烈加热区域移开的位置中。在一个实施方式中，压电PV窗的电极可包括允许光穿透窗的网格线。该电极可包括透明导体，诸如石墨烯、氧化铟锡（ITO）、掺铟氧化镉（ICdO）、掺铝氧化锌（AZO）、掺镓氧化锌（GZO）、掺铟氧化锌（IZO）、氧化铟钨（IW0）、ITO、ICdO、AZO、GZO、IZO或涂覆有氧化钨的IW0的表面涂层，或本领域技术人员已知的另一透明导体。在另一个实施方式中，该电极可以是沿着PV窗的边缘。PV转换器可进一步在PV窗与PV

转换器的PV池阵列之间包括腔室(诸如抽空的腔室)以阻止声波传播至PV池阵列。

[0568] 在一个实施方式中,PV窗可包含可变形且透明的材料,诸如玻璃、Pyrex或Guerilla玻璃。可变形窗可以机械方式激发或振动以移除或阻止金属化。机械PV窗激发部件可包括本领域技术人员已知的机械激发部件、气动激发部件、压电激发部件、液压激发部件和其他激发部件中的至少一者。PV窗-PV转换器可包括去磁器,诸如表面型去磁器,诸如工业磁学公司(Industrial Magnetics, Inc.)的DSC423-120。PV窗可包含至少一种铁磁材料(诸如Fe、Ni、Co、AlNiCo和稀土金属中的至少一者)和合金,其中可通过施加去磁器而使窗振动。铁磁材料可包括至少一个条带或线,该至少一个条带或线出现以下情形中的至少一者:束缚或固定至窗的至少一个表面;夹在窗层之间;以及嵌入于窗中。示例性的去磁器包括由AC场提供动力的螺线管型线圈,该AC场在xy平面中在PV窗的铁磁材料上沿着z轴产生交替向上和向下的磁力,从而致使PV窗交替地向上和向下偏转。振动会使粘附至PV窗表面的材料脱离。该去磁器可定位于PV池阵列的后面以防止其阻挡光穿过PV窗到达PV池。

[0569] 在一个实施方式中,PV窗可包括用于面向反应池腔室的表面的刮刷器。该刮刷器可包括柔软的耐化学和耐热的材料,诸如石墨烯。PV窗还可包括气刀。气体可包括回收的反应池气体。在一个实施方式中,PV窗还包括气体泵,和气体源或气体入口,以及至少一个气体喷口,该至少一个气体喷口包括至少一个喷嘴以用高速气体撞击内窗表面。PV窗可包括诸如穹顶形之类的几何结构以利于表面上方的气体流。气体可包含池气体,可通过泵使该池气体再循环穿过入口并离开所述至少一个喷嘴。用以从入口清除可阻碍入口流的任何金属或金属氧化物的控制器可周期性地使气体流逆转。在一个实施方式中,气体喷口的气体可包含颗粒以轰击PV窗上的金属并将其移除。可将颗粒回收至反应池腔室以及从反应池腔室回收或从反应池腔室外侧引入以供消耗。前一情形和后一情形的示例性实施方式分别是精细碳颗粒和冰晶。

[0570] 在一个实施方式中,SunCell®包括旋转以提供离心力的至少一个透明挡板。挡板可在PV窗前面并阻挡熔融镓和氧化镓中的至少一者沉积于窗上。在SunCell®的工作期间,离心力可移除沉积于挡板上的熔融镓和氧化镓。挡板可包含本公开的材料,诸如抵抗镓和氧化镓中的至少一者润湿的石英。反应池腔室5b31可包含溶剂和运输剂(诸如卤化镓或水)中的至少一者以利于挡板沉积物的移除。该运输剂可与氧化镓和镓中的至少一者反应以形成更容易地通过离心力移除的产物。卤化镓可以是反应池腔室内的回收的试剂。水可以被注入以提供H和HOH催化剂源中的至少一者以形成分数氢。可将气体射流施加至透明挡板以进一步利于沉积物的移除。示例性的透明挡板包括扁平圆盘,但其可包括其他形状和几何结构,诸如凹形或凸形圆盘、锥形形状或另一圆柱体对称的形状。挡板可包括附接至其中心的轴、在PV窗处具有密封轴承的密封轴穿透件以及在SunCell®的PV窗和反应池腔室外侧的轴驱动器、马达和控制器。在另一个实施方式中,可使挡板电动或气动旋转。可通过DC磁耦合或AC磁感应使圆盘转动。圆盘可包括至少一个DC磁体或感应线圈,其中至少一个DC磁体或感应线圈分别在PV窗和池的外部。可通过旋转部件使外部的DC磁体旋转。感应线圈可以时间方式和空间方式中的至少一者由感应动力源和控制器提供能量以引起挡板上的旋转力。在一个实施方式中,旋转挡板可包括PV窗。旋转挡板和旋转PV窗中的至少一者可包括适合于SunCell®的工作条件的商业设计的改型。具有可调适设计的示例性商业产品是由Cornell Carr制备的旋转视窗(Clear-View-Screens) (<http://www.cornell-carr.com/>)

products/clear-view-screens.html)或由Visiport制备的旋转窗系统(<http://www.visiport.com/>),将它们以引用方式并入本文中。在一个实施方式中,(i)密封件、轴承和框架包括抵抗与镓形成合金的材料,诸如不锈钢、钽和钨,(ii)窗包含抵抗镓润湿的材料,诸如石英或本公开的其他非润湿材料,并且(iii)密封件能够实现以下中的至少一者:真空和在升高温度下压力升高。

[0571] 在一个实施方式中,PV窗系统包括以下各项中的至少一者:在固定密封窗前面的透明旋转挡板,其两者皆在xy平面中以使光沿着z轴传播;和窗,其可在xy平面中旋转以使光沿着z轴传播。一个示例性实施方式包括旋转透明圆盘,诸如旋转视窗(https://en.wikipedia.org/wiki/Clear_view_screen),其可包括挡板和窗中的至少一者。在另一个实施方式中,PV窗系统可包括在xy平面中的窗并且还包括在该窗前面的桨-轮型或叶片-泵型的挡板,其中挡板包括刚性地附接至沿xy平面中的轴取向的旋转轴的多个透明叶片以使光沿着z轴传播。在另一个实施方式中,叶片-泵型PV窗包括刚性地附接至沿xy平面中的轴取向的旋转轴的多个透明叶片以使光沿着z轴传播。PV窗系统可包括叶片-泵型挡板和叶片-泵型PV窗两者。在一个实施方式中,旋转轴上的叶片间距使得在叶片相对于窗旋转时窗始终为连续叶片的组合所覆盖。在其中挡板和窗两者皆是旋转的叶片-泵型的实施方式中,每一旋转轴上的叶片间距和轴旋转在挡板与窗之间同步,使得在两组叶片旋转时窗始终为连续的挡板叶片的组合所覆盖。叶片可以是利于颗粒的阻挡、光的透射和移除的颗粒的泵送的直桨叶、弯曲桨叶或其他几何结构。透明叶片可包含抵抗被颗粒诸如镓颗粒润湿的本公开的材料。示例性的材料是石英和类金刚石(DLC)涂覆的玻璃、Pyrex或guerrilla玻璃。来自旋转叶片的离心力可致使沉积于叶片上的任何颗粒被移除。旋转速度可足以产生足够离心力来移除所沉积的颗粒。旋转速度可在大约1转/分钟至10,000转/分钟、10转/分钟至5,000转/分钟和100转/分钟至3,000转/分钟中的至少一个范围内。

[0572] 旋转圆盘、叶片-泵型挡板和叶片-泵型窗可各自包括驱动机构和控制器。驱动系统可包括气动驱动系统、机械驱动系统、液压驱动系统或电驱动系统,或本领域已知的另一系统。PV窗系统中的至少一者可安装于多个通道中的一个通道的顶部,所述多个通道各具有PV窗系统。通道还可包括至少一个气体喷口以致使颗粒流离开PV窗系统。通道可包括本公开的之字形通道。反应池腔室还可包括本公开的溶剂或运输剂以进一步从PV窗系统清洁可粘附至挡板和窗中的至少一者的颗粒。

[0573] 叶片-泵型挡板或窗可包括壳体,使得叶片-泵型挡板或窗的旋转将移除的颗粒泵回至反应池腔室中。在一个示例性实施方式中,PV窗系统包括挡板,包括具有透明石英或DLC涂覆的Pyrex叶片的叶片-泵型挡板,其中旋转轴是沿着水平轴,窗是在水平平面中,叶片间距使得连续叶片的组合在旋转期间始终覆盖窗,旋转速度足以移除所沉积的颗粒,挡板可安装于诸如之字形通道之类的通道中(其中窗在通道的顶部上),并且容纳于有利于将颗粒往泵回至反应池腔室中的壳体中。

[0574] 在一个实施方式中,旋转PV窗或挡板包括施用器(诸如刷)以施加非润湿材料的薄膜从而阻止颗粒沉积于PV窗或挡板上。在一个示例性实施方式中,施用器包含氮化硼、石墨和二硫化钼刷中的至少一者以用相应的非润湿薄膜连续地涂覆PV窗或挡板表面。

[0575] 在一个实施方式中,PV窗(诸如旋转圆盘)可包括涂层。该涂层可包含减少或阻止镓或氧化镓的粘附于窗上的材料。该涂层可与氧化镓反应以阻止镓的润湿,其中该窗包含

在不存在氧化镓的情况下抵抗镓润湿的材料。示例性的涂层和窗分别是NaOH和石英。涂层可包含水、酸性水、碱性水和有机化合物(诸如烷烃或醇如异丙醇)中的至少一者。可通过涂抹器施加该涂层。可通过窗或挡板的旋转动作实现涂层的施加。涂层可包含至少一种组份,该至少一种组份可进行以下中的至少一者:凝结至窗或挡板表面上;以及吸收至窗或挡板表面上。所述至少一种窗或挡板表面涂层组份的源可包含反应池腔室5b31气体。在一个实施方式中,反应池腔室包含水和包含酸酐的气体。可使窗或挡板维持在允许水凝结在表面上并且酸酐被吸收于水中的温度。在一个实施方式中,该酸性水阻止镓粘附至PV窗或挡板的表面。酸可与对于镓粘附至表面必要的氧化镓涂层发生反应。该表面涂层可与反应池腔室气体的至少一种物质处于热力学平衡或动态平衡。该表面涂层可包含水性酸(诸如 H_2SO_3 、 H_2SO_4 、 H_2CO_3 、 HNO_2 、 HNO_3 、 HClO_4 、 H_3PO_3 和 H_3PO_4)或酸源诸如酸酐或无水酸。后者可包含以下各项的群组中的至少一者: I_2O_4 、 I_2O_5 、 I_2O_9 、 SO_2 、 SO_3 、 CO_2 、 N_2O 、 NO 、 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_4 、 N_2O_5 、 Cl_2O 、 ClO_2 、 Cl_2O_3 、 Cl_2O_6 、 Cl_2O_7 、 PO_2 、 P_2O_3 和 P_2O_5 酸源可包含气体诸如 NO_2 、 NO 、 N_2O 、 CO_2 、 P_2O_3 、 P_2O_5 和 SO_2 [0576] 在另一个实施方式中,涂层可包含碱。涂层可包括至少一种组份,所述至少一种组份可进行以下中的至少一者:凝结至窗或挡板表面上;以及吸收至窗或挡板表面上。所述至少一种窗或挡板表面涂层组份的源包括反应池腔室5b31气体。在一个实施方式中,反应池腔室包含水和气体,该气体包含碱酐。可使窗或挡板维持在允许水凝结于表面上且碱酐被吸收于水中的温度。在一个实施方式中,碱性水阻止镓粘附至PV窗或挡板的表面。碱可与对于镓粘附至表面必要的氧化镓涂层发生反应。该表面涂层可与反应池腔室气体的至少一种物质处于热力学平衡或动态平衡。该表面涂层可包括碱水溶液,诸如来自碱性酐的碱,所述碱性酐为诸如 NH_3 、 M_2O (M =碱金属)、 $\text{M}'\text{O}$ (M' =碱土金属)、 ZnO 或其他过渡金属氧化物(CdO 、 CoO 、 SnO 、 AgO 、 HgO 或 Al_2O_3)。另外的示例性酐包含对于 H_2O 稳定的金属,诸如 Cu 、 Ni 、 Pb 、 Sb 、 Bi 、 Co 、 Cd 、 Ge 、 Au 、 Ir 、 Fe 、 Hg 、 Mo 、 Os 、 Pd 、 Re 、 Rh 、 Ru 、 Se 、 Ag 、 Tc 、 Te 、 Tl 、 Sn 、 W 、 Al 、 V 、 Zr 、 Ti 、 Mn 、 Zn 、 Cr 和 In 。酐可以是碱金属或碱土金属氧化物,并且水合化合物可包含氢氧化物。在另一个实施方式中,涂层可包括羟基氧化物,诸如 FeOOH 、 NiOOH 或 CoOOH 。碱源可包含气体,诸如对应于碱 NH_4OH 的 NH_3 。

[0577] 反应混合物可包含 H_2O 源和 H_2O 源中的至少一者。可通过水合反应和脱水反应可逆地形成酸、碱、羟基氧化物或相应的酐。可使窗或挡板维持在形成酸或碱的温度,其中反应池腔室温度高于酸或碱分解温度。分解产物可包含可回收至窗涂层的碱酐的相应酸。在其中硝酸镓($\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$)在高于 250°C 的温度下分解为 δ 氧化镓(Ga_2O_3)和 N_xO_y (x 和 y 为整数)的示例性实施方式中,使反应池腔室5b31维持高于 250°C ,并且使窗或挡板维持低于 250°C 。

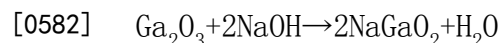
[0578] 在另一个实施方式中,涂层包含固态化合物,该固态化合物包含酸、酸酐、碱和碱酐中的至少一者。涂层可与氧化镓发生反应以阻止其粘附至窗或挡板。涂层可与水发生反应以在与氧化镓的反应之后再生。示例性的酸性固态化合物涂层是质子交换膜涂层,诸如Nafion。用以再生涂层的水源是反应池腔室气体。

[0579] 在一个实施方式中,SunCell®包括至少一种包含氮和氧的化合物诸如 N_xO_y (x 和 y 为整数)诸如 NO 或 NO_2 的源和 H_2O 源。在一个实施方式中,反应混合物包含可维持氧化镓(诸如 Ga_2O_3)与硝酸镓之间的再生循环的 N_xO_y 和 H_2O 。在一个示例性实施方式中, NO_2 气体与水反应而形成硝酸,该硝酸与氧化镓反应而形成水和硝酸镓(其分解为氧化镓和 NO_2)。该再生循环可进行以下操作中的至少一者:(i)通过减少镓润湿(通过氧化物移除)而支持从PV窗或挡

板移除镓;以及(ii)利于新生HOH的形成,该新生HOH可充当催化剂以通过与原子H的反应而形成分数氢。

[0580] 在一个实施方式中, NO_x (x =整数) 化学有利于以下中的至少一者:从PV窗移除氧化镓-镓颗粒以及通过以催化方式形成用于分数氢法HOH催化剂而加速分数氢反应速率。在一个实施方式中,**SunCell®**包括氮源(诸如 N_2 气)和用以可控制地将氮供应至反应池腔室5b31中的分数氢反应混合物的部件(诸如气体管线和流量控制器)。分数氢反应混合物可包含熔融镓、氧化镓、氢、稀有气体(诸如氩)、水蒸气、氧和氮中的至少一者。反应混合物可传播分数氢反应,该分数氢反应继而维持反应池腔室中的等离子体。该等离子体和反应池混合物可形成 NO_x (x =整数)。在一示例性化学实施方式中, Ga_2O_3 可与Ga和氢中的至少一者反应以形成 Ga_2O , Ga_2O 可与氢一起用作强力还原剂以形成 NH_3 , NH_3 可进一步与氧反应以形成NO和 NO_2 ,其中氧源可以是 O_2 和 H_2O 中的至少一者。反应池腔室可还包含氮化学催化剂(诸如贵金属,诸如Pt)以利于 NH_3 、NO和 NO_2 中的至少一者的形成。可保护氮化学催化剂在暴露于反应混合物的气体时免受熔融镓影响以避免与镓铸成合金。在一个实施方式中,反应池混合物的氮可与镓反应以形成氮化镓,该氮化镓可与水反应以形成可再生为Ga的诸如 Ga_2O_3 之类的产物。在一个实施方式中,GaN可充当利用分数氢等离子体光的光催化剂。光催化剂反应可用以形成至少一种分数氢反应的反应物,诸如原子H和HOH催化剂。钨**SunCell®**组件诸如电极可与氧和水中的至少一者发生反应以形成可充当光催化剂的 WO_3 。反应池腔室还可包括添加至包含光催化剂的反应混合物的物质。

[0581] 在一个实施方式中,与氧化镓反应的氢氧化物(诸如NaOH或KOH) 结晶而在PV窗或挡板的表面上形成涂层。晶体可以是透明的。氧化镓和氢氧化物的反应产物可包含该氢氧化物的金属和镓酸离子(GaO_2^-),诸如镓酸钠(NaGaO_2) 或镓酸钾(KGaO_2)。NaOH与 Ga_2O_3 之间的示例性反应为



[0583] 在包含反应池腔室气氛(其包含水蒸气)的实施方式中,可使水蒸气压力维持为低,诸如在约0.01托至50托、0.01托至10托、0.01托至5托和0.01托至1托中的至少一者的范围内的水蒸气压力。氢氧化物与氧化镓的反应可形成水作为产物。在一个实施方式中,可使PV窗上的氢氧化物涂层维持在升高的温度以维持所需量的所吸收或所保持的水。在一个示例性实施方式中,使PV窗维持在阻止水吸收或保持同时低于氢氧化物熔点(诸如NaOH的熔点(熔点=318℃)或KOH的熔点(熔点=360℃))的升高的温度。在一个实施方式中,作为日常维护,当已实质上消耗氢氧化物时可用氢氧化物替换或重新涂布PV窗。在一个实施方式中,PV窗(诸如旋转窗)、之字形通道和挡板的至少一个其他组件可涂覆有与氧化镓的反应物,诸如碱(诸如NaOH)。在一个实施方式中,涂层(诸如NaOH涂层)可包括可替换板,诸如包含嵌入于结构载体(诸如可以是透明的基质,诸如琼脂或其他此类聚合物、沸石、玻璃熔块以及本领域已知的其他透明载体和基质)中或浸透该结构载体的碱(诸如NaOH)的可替换板。可在日常维护期间替换该板。在一个实施方式中,与氧化镓的反应物(诸如碱,诸如NaOH)可以是固体、液体或熔融或水性中的至少一者,其中诸如NaOH之类的反应物可经吸收或以其他方式束缚至载体或基质以维持板的形式。在一个示例性实施方式中,板包括OH⁻导体膜,诸如**Neosepta®** AHA膜,其中可用碱(诸如1M KOH或NaOH溶液)处理该膜以允许用氢氧根离子(OH⁻)取代氯离子(Cl⁻)。

[0584] 在一个实施方式中, SunCell®包括PV窗或挡板电解系统,该PV窗或挡板电解系统包括阴极、阳极、透明窗和透明电解质。电解质可包含源自可供应至PV窗电解池的H₂O或H₂的以下离子中的一者的导体:H⁺、OH⁻和H⁻。电极可由PV窗分开,或两者都可在PV窗的正面(包括朝向反应池腔室的面)上。在一个实施方式中,电解质可包含氢负离子导体,诸如熔融盐(诸如低共熔盐混合物),并且电解质还可包括氢化物。所述盐可包含一种或多种卤化物,诸如可还包含诸如LiH之类的氢化物的混合物LiCl/KCl。除卤化物之外,可传导氢负离子的其他合适的熔融盐电解质还包括溶解于氢氧化物中的氢化物诸如KOH中的KH、NaOH中的NaH,或诸如金属有机系统,诸如NaAl(Et)₄中的NaH。电解质可包含两种或更多种卤化物(诸如碱金属卤化物和碱土金属卤化物的群组的至少两种化合物)的低共熔盐。示例性的盐混合物包括LiF-MgF₂、NaF-MgF₂、KF-MgF₂和NaF-CaF₂。其他适合的电解质是基于金属硼氢化物和金属铝氢化物的有机氯铝酸盐熔融盐和系统。表1中给出了可以是熔融混合物(诸如熔融低共熔混合物)的额外的合适电解质。

[0585] 表1. 熔融盐电解质.

[0586]	AlCl ₃ -CaCl ₂	AlCl ₃ -CoCl ₂	AlCl ₃ -FeCl ₂	AlCl ₃ -KCl	AlCl ₃ -LiCl
	AlCl ₃ -MgCl ₂	AlCl ₃ -MnCl ₂	AlCl ₃ -NaCl	AlCl ₃ -NiCl ₂	AlCl ₃ -ZnCl ₂
	BaCl ₂ -CaCl ₂	BaCl ₂ -CsCl	BaCl ₂ -KCl	BaCl ₂ -LiCl	BaCl ₂ -MgCl ₂
	BaCl ₂ -NaCl	BaCl ₂ -RbCl	BaCl ₂ -SrCl ₂	CaCl ₂ -CaF ₂	CaCl ₂ -CaO
	CaCl ₂ -CoCl ₂	CaCl ₂ -CsCl	CaCl ₂ -FeCl ₂	CaCl ₂ -FeCl ₃	CaCl ₂ -KCl
	CaCl ₂ -LiCl	CaCl ₂ -MgCl ₂	CaCl ₂ -MgF ₂	CaCl ₂ -MnCl ₂	CaCl ₂ -NaAlCl ₄
	CaCl ₂ -NaCl	CaCl ₂ -NiCl ₂	CaCl ₂ -PbCl ₂	CaCl ₂ -RbCl	CaCl ₂ -SrCl ₂
	CaCl ₂ -ZnCl ₂	CaF ₂ -KCaCl ₃	CaF ₂ -KF	CaF ₂ -LiF	CaF ₂ -MgF ₂
	CaF ₂ -NaF	CeCl ₃ -CsCl	CeCl ₃ -KCl	CeCl ₃ -LiCl	CeCl ₃ -NaCl
	CeCl ₃ -RbCl	CoCl ₂ -FeCl ₂	CoCl ₂ -FeCl ₃	CoCl ₂ -KCl	CoCl ₂ -LiCl
	CoCl ₂ -MgCl ₂	CoCl ₂ -MnCl ₂	CoCl ₂ -NaCl	CoCl ₂ -NiCl ₂	CsBr-CsCl
	CsBr-CsF	CsBr-CsI	CsBr-CsNO ₃	CsBr-KBr	CsBr-LiBr
	CsBr-NaBr	CsBr-RbBr	CsCl-CsF	CsCl-CsI	CsCl-CsNO ₃
	CsCl-KCl	CsCl-LaCl ₃	CsCl-LiCl	CsCl-MgCl ₂	CsCl-NaCl
	CsCl-RbCl	CsCl-SrCl ₂	CsF-CsI	CsF-CsNO ₃	CsF-KF
	CsF-LiF	CsF-NaF	CsF-RbF	CsI-KI	CsI-LiI

	CsI-NaI	CsI-RbI	CsNO ₃ -CsOH	CsNO ₃ -KNO ₃	CsNO ₃ -LiNO ₃
	CsNO ₃ -NaNO ₃	CsNO ₃ -RbNO ₃	CsOH-KOH	CsOH-LiOH	CsOH-NaOH
	CsOH-RbOH	FeCl ₂ -FeCl ₃	FeCl ₂ -KCl	FeCl ₂ -LiCl	FeCl ₂ -MgCl ₂
	FeCl ₂ -MnCl ₂	FeCl ₂ -NaCl	FeCl ₂ -NiCl ₂	FeCl ₃ -LiCl	FeCl ₃ -MgCl ₂
	FeCl ₃ -MnCl ₂	FeCl ₃ -NiCl ₂	K ₂ CO ₃ -K ₂ SO ₄	K ₂ CO ₃ -KF	K ₂ CO ₃ -KNO ₃
	K ₂ CO ₃ -KOH	K ₂ CO ₃ -Li ₂ CO ₃	K ₂ CO ₃ -Na ₂ CO ₃	K ₂ SO ₄ -Li ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄ - Na ₂ SO ₄
	KAlCl ₄ -NaAlCl ₄	KAlCl ₄ -NaCl	KBr-KCl	KBr-KF	KBr-KI
	KBr-KNO ₃	KBr-KOH	KBr-LiBr	KBr-NaBr	KBr-RbBr
	KCl-K ₂ CO ₃	KCl-K ₂ SO ₄	KCl-KF	KCl-KI	KCl-KNO ₃
	KCl-KOH	KCl-LiCl	KCl-LiF	KCl-MgCl ₂	KCl-MnCl ₂
	KCl-NaAlCl ₄	KCl-NaCl	KCl-NiCl ₂	KCl-PbCl ₂	KCl-RbCl
	KCl-SrCl ₂	KCl-ZnCl ₂	KF-K ₂ SO ₄	KF-KI	KF-KNO ₃
	KF-KOH	KF-LiF	KF-MgF ₂	KF-NaF	KF-RbF
	KFeCl ₃ -NaCl	KI-KNO ₃	KI-KOH	KI-LiI	KI-NaI
	KI-RbI	KMgCl ₃ -LiCl	KMgCl ₃ -NaCl	KMnCl ₃ -NaCl	KNO ₃ -K ₂ SO ₄
	KNO ₃ -KOH	KNO ₃ -LiNO ₃	KNO ₃ -NaNO ₃	KNO ₃ -RbNO ₃	KOH-K ₂ SO ₄
	KOH-LiOH	KOH-NaOH	KOH-RbOH	LaCl ₃ -KCl	LaCl ₃ -LiCl
[0587]	LaCl ₃ -NaCl	LaCl ₃ -RbCl	Li ₂ CO ₃ -Li ₂ SO ₄	Li ₂ CO ₃ -LiF	Li ₂ CO ₃ -LiNO ₃
	Li ₂ CO ₃ -LiOH	Li ₂ CO ₃ -Na ₂ CO ₃	Li ₂ SO ₄ -Na ₂ SO ₄	LiAlCl ₄ -NaAlCl ₄	LiBr-LiCl
	LiBr-LiF	LiBr-LiI	LiBr-LiNO ₃	LiBr-LiOH	LiBr-NaBr
	LiBr-RbBr	LiCl-Li ₂ CO ₃	LiCl-Li ₂ SO ₄	LiCl-LiF	LiCl-LiI
	LiCl-LiNO ₃	LiCl-LiOH	LiCl-MgCl ₂	LiCl-MnCl ₂	LiCl-NaCl
	LiCl-NiCl ₂	LiCl-RbCl	LiCl-SrCl ₂	LiF-Li ₂ SO ₄	LiF-LiI
	LiF-LiNO ₃	LiF-LiOH	LiF-MgF ₂	LiF-NaCl	LiF-NaF
	LiF-RbF	LiI-LiOH	LiI-NaI	LiI-RbI	LiNO ₃ -Li ₂ SO ₄
	LiNO ₃ -LiOH	LiNO ₃ -NaNO ₃	LiNO ₃ -RbNO ₃	LiOH-Li ₂ SO ₄	LiOH-NaOH
	LiOH-RbOH	MgCl ₂ -MgF ₂	MgCl ₂ -MgO	MgCl ₂ -MnCl ₂	MgCl ₂ -NaCl
	MgCl ₂ -NiCl ₂	MgCl ₂ -RbCl	MgCl ₂ -SrCl ₂	MgCl ₂ -ZnCl ₂	MgF ₂ -MgO
	MgF ₂ -NaF	MnCl ₂ -NaCl	MnCl ₂ -NiCl ₂	Na ₂ CO ₃ -Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃ -NaF
	Na ₂ CO ₃ -NaNO ₃	Na ₂ CO ₃ -NaOH	NaBr-NaCl	NaBr-NaF	NaBr-NaI
	NaBr-NaNO ₃	NaBr-NaOH	NaBr-RbBr	NaCl-Na ₂ CO ₃	NaCl-Na ₂ SO ₄
	NaCl-NaF	NaCl-NaI	NaCl-NaNO ₃	NaCl-NaOH	NaCl-NiCl ₂
	NaCl-PbCl ₂	NaCl-RbCl	NaCl-SrCl ₂	NaCl-ZnCl ₂	NaF-Na ₂ SO ₄
	NaF-NaI	NaF-NaNO ₃	NaF-NaOH	NaF-RbF	NaI-NaNO ₃
	NaI-NaOH	NaI-RbI	NaNO ₃ -Na ₂ SO ₄	NaNO ₃ -NaOH	NaNO ₃ -RbNO ₃
	NaOH-Na ₂ SO ₄	NaOH-RbOH	RbBr-RbCl	RbBr-RbF	RbBr-RbI
	RbBr-RbNO ₃	RbCl-RbF	RbCl-RbI	RbCl-RbOH	RbCl-SrCl ₂
[0588]	RbF-RbI	RbNO ₃ -RbOH	CaCl ₂ -CaH ₂		

[0589] 熔融盐电解质诸如表1中所给出的示例性盐混合物是H⁻离子导体。在实施方式中，在本公开中暗示，H⁻源（诸如碱金属氢化物，诸如LiH、NaH或KH）可添加至熔融盐电解质以改

善H⁻离子传导性。

[0590] 在一个实施方式中,H⁻是电解质的迁移离子。H⁻可在阴极处形成并迁移至阳极。电解质可以是氢负离子导体,诸如熔融盐,诸如低共熔混合物,诸如碱金属卤化物的混合物,诸如LiCl-KCl。阴极可以是氢渗透膜,诸如Ni(H₂)。阳极可将氧化镓和H⁻氧化为镓和H₂O,由此借助消耗润湿剂氧化镓来消除PV窗的镓润湿。在一个实施方式中,PV电解池可包括:熔融氢氧化物-卤化物电解质,其为H⁻导体;用以形成氢负离子的H源,诸如氢可渗透阴极,诸如Ni(H₂);和阳极,其将氧化镓和氢负离子选择性地氧化为镓和H₂O。该反应可以是

[0591] 阳极:

[0592] $6\text{H}^- + \text{Ga}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Ga} + 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{e}^-$

[0593] 阴极:

[0594] $3\text{H}_2 + 6\text{e}^- \rightarrow 6\text{H}^-$

[0595] 示例性的池是[Pt/MOH-M'X/M''(H₂)],其中阴极M可包含氢可渗透金属,诸如Ni、Ti、V、Nb、Pt和PtAg,电解质包含氢氧化物与卤化物的混合物,诸如MOH-M'X(M、M'=碱金属;X=卤离子),并且其他贵金属和载体可取代Pt阳极。电解质还可包括至少一种其他盐,诸如碱金属氢化物。在一备选实施方式中,电解质可包含氢负离子传导固态电解质,诸如CaCl₂-CaH₂。示例性的氢负离子传导固态电解质是CaCl₂-CaH₂(5摩尔%至7.5摩尔%)和CaCl₂-LiCl-CaH₂。

[0596] 在一备选实施方式中,SunCell®窗或挡板包括电解系统,该电解系统包括至少两个电极、电源和控制器以用于还原氧化镓以阻止氧化镓致使镓粘附至窗或挡板。窗或挡板可包括栅电极或图案化的透明导电薄膜,诸如包含氧化铟锡的者。至少一个电极可包括网格或筛网。在一个实施方式中,电解质可包含酸和碱中的至少一者。在一个示例性实施方式中,电解质可包含氢氧化物,诸如NaOH。在另一个实施方式中,电解质可包含固体,诸如β氧化铝,其可包含薄膜和透明物中的至少一者。电解电压可在约0.1V至50V、0.25V至5V和0.5V至2V中的至少一个范围内。

[0597] 窗或挡板可包括电解系统,该电解系统包括由电解质分开并由电力源提供动力的负电极和正电极,其中粘附至窗或挡板的表面的镓接触窗上的负电极,并且透过电解质将电流载运至分开的正电极以还原所粘附的镓的氧化镓。在用以还原氧化镓以阻止镓粘附至窗或挡板的表面的窗或挡板电解系统的实施方式中,窗或挡板可包括背电解电极或电极复合材料,诸如在窗或挡板的背表面(远离等离子体的一侧)上的阳极或阳极复合材料。为使遮蔽效应最小,背电解电极可以是以下各项中的至少一者:(i)周向地定位至窗或挡板,(ii)包括格栅线,以及(iii)包含透明的导体,诸如氧化铟锡。电解质可包括在窗或挡板的背表面上的透明层或薄膜。电解质可以是透明的并且包含碱(诸如MOH(M=碱金属),诸如NaOH或KOH)或水和氨中的至少一者,其中气态氨与溶剂化氨平衡,并且氨气可装在容纳阳极的透明腔室中。前表面可包括前电解电极或电极复合物,诸如在所述前表面的至少一部分上的阴极或阴极复合材料(其包括电连接件,诸如网格线或电极或导电层或薄膜)。该薄膜可以是可覆盖该表面或呈该复合材料的网格引线或电极的形式的透明导体,诸如氧化铟锡。该电极可包括透明导体,诸如石墨烯、氧化铟锡(ITO)、掺铟氧化镉(ICdO)、掺铝氧化锌(AZO)、掺镓氧化锌(GZO)、掺铟氧化锌(IZO)、氧化铟钨(IWO)、ITO、ICdO、AZO、GZO、IZO或涂覆有氧化钨的IWO的表面涂层,或本领域技术人员已知的另一透明导体。在涂层是电致变色

的情形中,可施加电流以通过还原其氧化物涂层而移除镓,并且可通过在间断再生周期内使电流逆转而再生无色PV涂层。在另一个实施方式中,接触镓的电解电极或电极复合材料可包含抵抗与镓形成合金的材料,诸如不锈钢(SS)、钨(W)或钽(TA)。电极可抵抗镓润湿,诸如SS、Ta或W。在酸性电解质诸如Nafion的情形中,该电极对于与电解质的反应是稳定的,诸如贵金属,诸如Pt、Ir、Rh、Re、Pd或Au。接触碱性电解质的电解电极或电极复合材料可包含抵抗用碱腐蚀的材料,诸如铜、不锈钢、镍、贵金属或碳。电极可包括诸如线之类的元件,所述线可构成栅格、网格或筛网。诸如线之类的元件可经成形以使对透过PV窗透射至PV转换器的光的遮蔽最小。示例性的形状是顶点朝向光源的锥体,其中光可被反射至PV窗或挡板的另一非遮蔽区域。窗或挡板可包括非导电的紧固件(诸如陶瓷或塑料螺栓)以附接至少一个电极。窗或挡板可包括在窗或挡板的至少一部分上方的至少一个穿透件(诸如多个小直径穿透件)以充当用于阳极与阴极之间的电解质的电接触的多个导管。

[0598] 在另一个实施方式中,电解系统组件从等离子体的方向依序可以是阳极、电解质和阴极,其中阳极和阴极是空间上分开的,阳极可在窗或挡板的周边,并且电解质可粘附至窗或挡板的表面。电解质可包含碱,诸如MOH(M=碱金属),诸如NaOH或KOH。窗或挡板可包括可辅助将电解质粘合至表面的粗糙表面。窗或挡板可包括吸湿涂层以结合电解质。电解质可具有低的水蒸气压力。电解质可包含高浓度碱和至少一种化合物(诸如吸湿化合物)中的至少一者以减小水蒸气压力。电解质可包含浆料或糊料,诸如NaOH或KOH中的一者。电解质可包含粘结化合物(诸如聚合物)或陶瓷氧化物(诸如MgO)或掺盐基质(诸如琼脂)或聚合物(诸如聚氧化乙烯)。

[0599] 电解质可包含固体电解质。电解质可包含适于所需的阳极氧化和阴极还原化学(其移除粘附至PV窗的颗粒)的离子导体。示例性的固体电解质是 Na^+ 导体 β 氧化铝固体电解质(BASE)、 Na^+ 或 OH^- 导体镓酸钠、 K^+ 或 OH^- 导体镓酸钾、氧离子导体钇稳定化氧化锆、钠离子导体NASICON($\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{P}_{12}\text{O}_{12}$)、 H^+ 导体Nafion,其中使氧化和还原反应与电解质匹配。固体电解质可包含 OH^- 导体、层状双氢氧化物(LDH)。在一个实施方式中,LDH包含阴离子粘土并且LDH的通式为 $[\text{M}^{\text{II}}_{1-x}\text{M}^{\text{III}}_x(\text{OH})_2][(\text{A}^{n-})_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}]$,其中 M^{II} 为二价阳离子,诸如 Ni^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 等,并且 M^{III} 为三价阳离子,诸如 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 等,且 A^{n-} 为阴离子,诸如 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 OH^- 等。为 OH^- 导体的示例性固体电解质是:层状双氢氧化物(LDH),诸如KOH-Al-Mg层状双氢氧化物 $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}$;离子交换膜,诸如Neosepta® AHA膜,其中可用碱(诸如1M KOH溶液)处理该膜以允许用氢氧根离子(OH^-)取代氯离子(Cl^-);和纳米颗粒,其由嵌入于聚砜基质中的 SiO_2 /致密季铵官能化聚苯乙烯(诸如(20至70重量%))以及氢氧化四乙铵(TEAOH)聚丙烯酰胺(PAM)构成。在其中熔融金属可包含银或合金(诸如镓-银)的实施方式中,电解质可包含用于银离子的高级超离子导体,诸如 RbAg_4I_5 、 KAg_4I_5 、 $\text{NH}_4\text{Ag}_4\text{I}_5$ 、 $\text{K}_{1-x}\text{Cs}_x\text{Ag}_4\text{I}_5$ 、 $\text{Rb}_{1-x}\text{Cs}_x\text{Ag}_4\text{I}_5$ 、 $\text{CsAg}_4\text{Br}_{1-x}\text{I}_{2+x}$ 、 $\text{CsAg}_4\text{ClBr}_2\text{I}_2$ 、 $\text{CsAg}_4\text{Cl}_3\text{I}_2$ 、 $\text{RbCu}_4\text{Cl}_3\text{I}_2$ 、 KCu_4I_5 和硫化银中的至少一者。

[0600] 在一个实施方式中,电解质诸如碱金属卤化物(诸如NaF)可具有大致中性的pH。该大致中性pH电解质可避免粘附至窗的镓上的氧化镓涂层的溶解。

[0601] 在一个实施方式中,补充PV窗电解质诸如NaOH,并且可在通过诸如电解之类的手段回收镓期间回收损失至反应混合物的电解质。

[0602] 用以还原氧化镓以阻止镓润湿的示例性电解系统包括:(i)在窗的背侧上的环状

SS阳极；(ii) 在窗的背面上的NaOH浆料电解质；(iii) 具有用于电解质的许多小通道的窗，和(iv) 在窗的前表面上的SS网格或筛网阴极，其接触该镓并将其还原。在一个实施方式中，其中(i) 镓不粘附至具有氧化物涂层的金属，诸如不锈钢、钽或钨，(ii) 包括氧化物涂层的金属构成阴极，并且(iii) 在工作期间该金属氧化物涂层被还原，可使电解池的极性周期性地逆转以在阴极的金属上再生氧化物涂层。

[0603] 在一个实施方式中，前电极可包括阳极，并且阴极可以是以下情形中的至少一者：位于PV窗的前面周边，或位于PV窗的后面。在后一情形中，PV窗可包括用于电解质的穿孔。在与粘附至PV窗的镓接触的前阳极上施加正电势并在阴极上施加负电势可致使镓迁移至阴极，其中可移除并回收所收集的镓。SunCell®可包括移除部件、运输部件(其还可包括相应的通道)和用于所收集的镓的回收部件。示例性的移除部件是机械部件，诸如刮削器、气体喷口、泵和本公开的其他移除部件。可移除镓并使用运输部件和相应的通道将镓运输至本公开的反应池腔室、储罐和镓再生系统中的至少一者。

[0604] 在一个实施方式中，窗或挡板包括等离子体放电系统以在窗或挡板的表面维持等离子体。该离子放电系统可包括：电极栅格线、网格或筛网，其在窗或挡板表面上或紧邻窗或挡板表面；对电极；和放电力源，诸如辉光放电源。在其他实施方式中，等离子体源包括其他已知的等离子体源，诸如微波、电感或电容耦合的RF放电、介质阻挡放电、压电直接放电和声学放电等离子体源。等离子体系统可经构造而使得相应等离子体还原氧化镓以致使粘附的镓颗粒从窗或挡板表面移除。作为另一种选择，等离子体可从氢源形成原子氢，其中原子氢使氧化镓还原为镓以致使其是非润湿性的。在另一个实施方式中，窗或挡板包括磁场源，诸如引导由临近窗或挡板的表面的分数氢反应维持的等离子体的永久磁体或电磁体。等离子体可从氢源形成原子氢，其中原子氢使氧化镓还原为镓以致使其是非润湿性的。在一个实施方式中，窗或挡板包括氢解离器，诸如本公开的氢解离器，诸如热丝或金属解离器，诸如铌、钽、铈、钛或本公开的另一者。反应腔室气体(诸如包含氢的反应混合物，诸如氩-氢-痕量H₂O气体混合物)可还原镓颗粒上的氧化物涂层并实现以下各项中的至少一者：阻止镓粘附至PV窗；以及从PV窗移除颗粒。窗或挡板可包括气体喷口，该气体喷口使氢在该丝上方流动以进一步致使原子氢流动至PV窗上。

[0605] 在一个实施方式中，挡板或PV窗还包括解离器腔室，该解离器腔室容纳：氢解离器，诸如在载体诸如碳或陶瓷珠粒诸如Al₂O₃、硅石或沸石珠粒上的Pt、Pd、Ir、Re或其他解离器金属；雷氏Ni或Ni、铈、钛或呈提供高表面积的形式(诸如粉末、垫、编织物或布)的本公开的其他解离器金属。解离器腔室可通过镓阻挡通道(诸如本公开的字形通道)在挡板或PV窗的位置处连接至反应池腔室，该镓阻挡通道抑制镓从反应池腔室流至解离器腔室同时允许气体交换。氢气可从反应池腔室流动至解离腔室中，其中氢分子解离为原子，并且原子氢可往回流动至反应池腔室中以充当反应物来还原PV窗上的氧化镓。在其他实施方式中，解离腔室可容纳本公开的等离子体解离器或丝解离器。在一个实施方式中，气体喷口使氢在解离器上方流动使得所得H原子流动以撞击挡板或PV窗的表面。

[0606] PV窗可包括至少一个压电变压器(PT)和任选至少一个相邻电极，诸如至少一个线电极，其中PT的固有机电共振用于产生电压放大，使得压电的表面展现出可在其角上或在相邻电极上产生电晕样放电的大表面电压。示例性的电压放大为低于7V至kV。所谓的压电直接放电的构造可用于产生称为离子风的大团气流，如由Johnson和Go [M. Johnson,

D.B.Go, "Piezoelectric transformers for low-voltage generation of gas discharges and ionic winds in atmospheric air", Journal of Applied Physics, 第118卷, 12月, (2015), 243304-1-243304-10页, doi:10.1063/1.493849]所报告的。在一个实施方式中, 压电直接放电包括用以产生离子风(其移除或减少镓颗粒粘附至PV窗)的电极构造。在一个实施方式中, 用以实现以下各项中的至少一者的气体喷口可包括再循环器, 诸如包括鼓风机和至少一个气体喷嘴的再循环器: 阻止镓颗粒粘附至PV窗; 以及从PV窗清洁粘附的镓颗粒。净化的再循环稀有气体和补充氢(包含添加至净化的再循环稀有气体并注入至反应池腔室中的氢)中的至少一者可引导至反应池腔室中的区域, 该区域此致使气体流进行以下操作中的至少一者: 迫使镓颗粒远离PV窗; 以及提供原子氢以还原镓颗粒上的任何氧化物涂层, 从而实现以下各项中的至少一者: 阻止颗粒粘附; 以及致使颗粒从PV窗移除。在后一情形中, 可使再循环的稀有气体和补充氢中的至少一者撞击在PV窗上, 其中可致使包含氢的气体在氢解离器诸如解离器金属、等离子体源或热丝的上方流动。在一个实施方式中, 反应池腔室气体、再循环气体和替换耗尽的反应物的补充气体中的至少一者可包括通过可包括至少一个相邻线电极的压电变压器产生的离子风。在一个实施方式中, PV窗可包括至少一种透明压电晶体, 诸如石英、磷酸镓、锆钛酸铅(PZT)、结晶硼硅酸盐(诸如电气石)或本领域已知的另一者。压电换能器的至少一个电极可包含透明导体, 诸如氧化铟锡(ITO)或本公开的另另一者。在另一个实施方式中, 压电换能器和相应压电直接放电可由障壁电极放电系统和障壁电极放电替换以阻止粘附或利于从PV窗移除氧化镓颗粒。

[0607] 在另一个实施方式中, 旋转挡板或旋转窗包括装置用以物理移除已在SunCell®操作期间沉积于挡板或窗上的颗粒。该装置可包括表面安装的磨削装置, 诸如刷或桨片, 诸如跨在挡板或窗的表面上的锋利边缘桨片。挡板或窗的表面可以是抛光的, 并且桨片可包括精密边缘以提供该边缘与表面之间的优化接触。桨片可具有等于挡板或窗的半径的长度, 使得在挡板或窗的每一旋转期间刮擦相应的表面。桨片可包括可控制装置以用于朝向表面对桨片施加可调整压力, 诸如机械、液压、气动或电磁压力施加装置。示例性的机械压力施加装置包括弹簧。

[0608] 在一个实施方式中, 挡板和PV窗中的至少一者包括至少一个熔融金属注射器以将熔融金属泵送至挡板和PV窗中的至少一者上以充当用以移除所沉积的颗粒(诸如金属的氧化物)的溶剂。在一个实施方式中, 挡板和PV窗中的至少一者包括抵抗熔融金属润湿的材料或表面。在一个示例性实施方式中, 熔融金属包含镓, 金属氧化物包含氧化镓, 材料或表面包含石英、BN、碳或者抵抗被镓润湿的另一材料或表面中的至少一者, 并且熔融金属注射器包括至少一个EM泵和至少一个射流喷嘴以将来自源(诸如储罐5c和反应池腔室5b31中的至少一者)的熔融镓注入至挡板和PV窗中的至少一者的表面上以充当氧化镓的溶剂从而将氧化镓从挡板和PV窗中的至少一者的表面移除。在另一个示例性实施方式中, 熔融金属包含银, 挡板或PV窗包含具有高熔点的透明材料, 诸如石英、蓝宝石或碱土金属卤化物晶体(诸如 MgF_2), 并且熔融金属注射器包括至少一个EM泵和至少一个射流喷嘴以将来自源(诸如储罐5c和反应池腔室5b31中的至少一者)的熔融银注入至挡板和PV窗中的至少一者的表面上以用于从挡板和PV窗中的至少一者的表面移除银颗粒(诸如银纳米颗粒)。挡板或PV窗还可包括透明牺牲层以保护挡板或窗免于因热银颗粒所导致的熔融而凹陷。

[0609] 在一个实施方式中, 挡板和PV窗中的至少一者还可包括至少一个部件诸如刮刷器

以移除镓和氧化物。刮刷器可包括至少一个刮刷器桨片和用以使刮刷器桨片在挡板和PV窗中的至少一者的表面上方移动的部件。用以使桨片移动的部件可包括机械部件、气动部件、液压部件、电磁部件或本领域已知的其他此类移动部件中的至少一者。作为另一种选择,挡板和PV窗中的至少一者可包括旋转挡板或PV窗和固定的刮刷器桨片。

[0610] 在一个示例性实施方式中,多个注射器射流诸如阵列以足够的速度和流量将熔融镓注入至旋转挡板和旋转PV中的至少一者的表面上以使可粘附至该挡板和PV窗中的至少一者的表面的氧化镓颗粒脱离,并且桨片可在挡板和PV窗中的至少一者旋转时从该挡板和PV窗中的至少一者移除所注入的镓和氧化物。在另一个实施方式中,通过单独使挡板和PV窗中的至少一者旋转的离心力移除镓和氧化镓。

[0611] 在另一个示例性实施方式中,窗或挡板包括高压射流(诸如由至少一个机械泵或EM泵供应的高压射流)的阵列以从不被镓润湿的表面(诸如涂覆有碱诸如NaOH或KOH的石英表面或透明表面)移除氧化镓。熔融金属射流阵列可将高速熔融镓注入至旋转窗上以清走所沉积的颗粒,诸如包含具有氧化镓的镓的颗粒。高速镓可充当液体清洁剂以移除氧化镓。由于氧化镓引起表面的镓润湿,因此其移除可消除被镓润湿,镓可积聚成珠并通过旋转窗的离心力而移除。

[0612] 在一个实施方式中,熔融金属包含研磨添加剂(诸如与熔融金属一起注入的小的硬颗粒)以辅助分离挡板和PV窗中的至少一者的表面的粘附材料。添加剂可包括磨料颗粒,诸如小陶瓷颗粒,诸如包含氧化铝、氧化锆、氧化铈或氧化钽的颗粒。颗粒大小可低于阻塞挡板或PV窗注射器的泵或者点燃注射泵的大小。

[0613] 在一个实施方式中,可将磁性颗粒(诸如磁性纳米颗粒)添加至熔融金属(诸如镓)以形成铁磁流体。纳米颗粒可以是铁磁体,诸如Fe、 Fe_2O_3 、Co、Ni、CoSm和AlNiCo纳米颗粒以及本领域已知的其他铁磁纳米颗粒中的至少一者。示例性的铁磁流体包含镓或镓合金作为磁性纳米颗粒(诸如钆纳米颗粒)的溶剂或悬浮介质,如Castro等人[I.A.de Castro等人,「A gallium-based magnetocaloric liquid metal ferrofluid」,Nano Lett.,(2017),第17卷,第12期,第7831-7838页]所给出的,将该文献以引用的方式全文并入本文。磁性纳米颗粒可涂覆有涂层以防止受反应池腔室气体腐蚀或与镓形成合金。该涂层可包含陶瓷,诸如硅石、氧化铝、氧化锆、氧化钪或本公开的另一者。挡板和PV窗中的至少一者可包括磁场梯度源以防止熔融金属涂覆挡板和PV窗中的至少一者。可使挡板和PV窗中的至少一者维持在低于磁性纳米颗粒的居里温度的温度范围内。该磁场梯度源可以是永久磁体和电磁体中的至少一者。在一个示例性实施方式中,挡板和PV窗中的至少一者可包括亥姆霍兹线圈电磁体,诸如在挡板和PV窗中的至少一者前面的反应池腔室周缘的超导线圈以提供从挡板和PV窗中的至少一者朝向线圈的磁体梯度。在一个实施方式中,挡板和PV窗中的至少一者可包括一系列线圈,诸如感应电磁泵的那些线圈,其中所述线圈产生磁性熔融金属的行进力以致使其从挡板和PV窗中的至少一者的表面泵送。在一个实施方式中,注射泵可包括机械泵和线性感应型中的至少一者,其中通过多个同步启动电磁体或移动永久磁体中的至少一者形成的行进磁场梯度产生用以泵送熔融金属的力。该同步可以是为在电动马达中使用且本领域已知的类型。由于磁场穿透诸如不锈钢之类的金属,因此除本公开的感应EM泵的陶瓷之外,EM泵管还可包含此类金属。

[0614] PV窗可抵抗诸如镓之类的熔融金属的润湿。窗可抵抗存在于反应池腔室中的化合

物(诸如金属氧化物,诸如在镓为熔融金属的情形中的氧化镓)的粘附。PV窗可包括透明涂层。在一个示例性实施方式中,PV窗和PV涂层中的至少一者包含石英、钻石、氮化镓(GaN)、磷酸镓(GaPO_4)、立方锆、蓝宝石、碱金属或碱土金属卤化物(诸如 MgF_2)、石墨烯、透明锂夹层多层石墨烯、碳(诸如石墨)薄层、特氟隆或其他非润湿性氟聚合物、聚乙烯、聚丙烯或其他非润湿性透明聚合物、氮化硼(六方或立方BN)薄层、透明六方氮化硼、透明氮化硅(诸如立方氮化硅)、薄膜透明非润湿性金属涂层(诸如W、Ta)或者薄膜金属氧化物或透明非润湿性金属氧化物(诸如五氧化二钽(Ta_2O_5)、氧化铟锡(其可进一步涂覆或掺杂有钨氧化物)或氧化铟钨(其可进一步涂覆或掺杂有钨氧化物))。PV窗可包括:石墨网格,其具有用于光的穿孔;或碳纤维栅格或筛网,其具有抵抗熔融金属的粘附同时允许光穿透的密堆积编织物。PV窗可包括类金刚石(DLC)或钻石涂层。结构材料诸如透明结构材料(诸如石英、Pyrex、蓝宝石、氧化锆、氧化钪或磷酸镓)可支承DLC或钻石涂层。PV窗可包括自清洁玻璃,诸如 TiO_2 涂覆或蜡或其他疏水表面涂覆的玻璃。PV窗可整个包含氮化镓(GaN)或包含其作为涂层。可经由在蓝宝石、氧化锌和碳化硅(SiC)上的金属-有机蒸汽相外延(MOVPE)将GaN沉积为GaN薄膜。

[0615] 在一个实施方式中,PV窗包含:能够在升高温度下操作的透明材料,诸如石英、熔融硅石、蓝宝石或 MgF_2 ;以及用以使PV窗维持在氧化镓涂覆的镓不粘附的高温下的部件,诸如热绝缘材料和加热器中的至少一者。示例性的温度范围为约 300°C 至 2000°C 中的一者。

[0616] 在一个实施方式中,PV窗和挡板中的至少一者可涂覆有 Ga_2O_3 。PV窗和挡板中的至少一者可包含 Ga_2O_3 ,诸如透明 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 。PV窗和挡板中的至少一者可包括透明 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 窗格,其可以是平坦的、穹顶形的或呈另一所需的几何形式。在另一个实施方式中,PV窗和挡板可各自在避免形成氧化镓的组合物或相(导致镓润湿)的条件下操作。在一个实施方式中,避免 Ga_2O 的表面涂层。在一个实施方式中,在导致 Ga_2O 分解的条件下操作窗。窗和挡板可各自在高于 Ga_2O 的分解温度(诸如高于 500°C)的温度下操作。

[0617] 在一个实施方式中,PV窗和挡板中的至少一者可涂覆有不与镓反应的金属的薄透明层。示例性的涂层可包含钨和钽中的至少一者。在一个实施方式中,可通过诸如溅镀之类的方法使金属表面纹理化以控制表面的非润湿性。在一个实施方式中,金属包括金属氧化物涂层以避免镓的润湿。

[0618] 可通过直接冷却和间接冷却中的至少一者使PV窗冷却。间接冷却可包括通过传热至PV池阵列冷却系统(诸如水冷热交换器)进行的次级冷却。该热交换器可包括至少一个多通道板。可通过冷却至低于窗的失效温度的一个范围(诸如低于窗的结构材料和涂层(若存在的话)中的至少一者的失效温度的温度)而控制PV窗温度。可使温度维持在约 50°C 至 1500°C 、 100°C 至 1000°C 和 100°C 至 500°C 中的至少一个范围内。

[0619] PV窗可包括通过最小化固体表面与液体金属之间的接触面积(其阻碍诸如镓之类的熔融或液体金属进行的表面润湿)而具有对抗液体镓的超疏液性质的涂层。该涂层可进一步妨碍具有氧化镓涂层的镓的表面润湿,该氧化镓涂层原本会增强润湿。示例性的超疏液涂层是具有图案化有聚二甲基硅氧烷(PDMS)微型柱阵列的多尺度表面的涂层和具有垂直对准的碳纳米管(具有分层微米/纳米尺度组合的结构)的涂层。碳纳米管可通过压印而转移至柔性PDMS上,使得甚至在机械变形诸如拉伸和弯曲下超疏液性质得以维持。作为另一种选择,可通过修饰液体金属自身的表面而操纵液体镓的氧化物涂层。例如,与HCl蒸气

的化学反应致使液体镓的氧化表面(主要为 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}$)转化为 GaCl_3 ,从而引起非润湿特性的恢复。在另一个实施方式中,可通过以下方式中的至少一者实现不为液体金属所润湿:用诸如Co、Ni、Fe或CoNiMnP之类的铁磁材料涂覆PV窗表面;以及施加磁场。

[0620] 在一个实施方式中,窗或挡板可包括未用镓润湿但可在通过与诸如氧气或水蒸气之类的氧源反应形成氧化镓时润湿的涂层。可使反应池腔室中的诸如 O_2 或 H_2O 蒸气之类的氧源的蒸气压维持在所需压力下,该压力低于导致形成足够的氧化物以引起镓润湿的压力。可使氧源的压力维持低于约10托、1托、0.1托和0.01托中的至少一个压力下。在其中水吸收于窗或挡板表面(诸如包含石英的窗或挡板表面)上的一个实施方式中,使窗或挡板温度维持在所需温度,该温度高于导致足够的水表面吸收以致使被镓润湿的温度。归因于水的镓润湿可由形成有利于润湿的足够氧化镓而导致。针对反应池腔室5b31中的水的蒸气压调整用以阻止所吸收的水集中(允许镓润湿)的所维持的所需温度。窗或挡板可包括加热器和控制器以维持所需温度从而阻止水的过吸收。作为另一种选择,窗或挡板可包括冷却器或冷冻器,诸如热交换器,其中减少热移除以实现可防止镓润湿的升高的所需温度。所需温度可高于约 50°C 、 100°C 、 150°C 、 200°C 、 300°C 、 400°C 和 500°C 中的至少一个温度。

[0621] PV窗可包括抗润湿剂的薄涂层(其可为非透明的),所述抗润湿剂为诸如包含氟的聚合物(诸如透明特氟隆、氟化乙烯丙烯(FEP)、聚四氟乙烯-全氟烷氧基共聚物(特氟隆-PFA))和基于氟、碳或硅的聚合物或共聚物(诸如烯丙基烷氧基硅烷、氟代脂族烷氧基硅烷、氟代脂族甲硅烷基醚和氟化三甲氧基硅烷)。薄涂层诸如长链烃(诸如凡士林或蜡)可以是半透明的。PV窗和PV窗涂层中的至少一者可包含透明热塑性塑料,诸如以下各项中的至少一者:聚碳酸酯(Lexan)、包含聚(甲基丙烯酸甲酯)(PMMA)的丙烯酸玻璃或Plexiglas(也称为亚克力或丙烯酸玻璃以及商标名Crylux、Plexiglas、Acrylite、Lucite和Perspex)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、非晶共聚酯(PETG)、聚氯乙烯(PVC)、液体硅橡胶(LSR)、环烯共聚物、聚乙烯、离聚物树脂、透明聚丙烯、氟化乙烯丙烯(FEP)、全氟烷氧基(PFA)、苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯(SMMA)、苯乙烯丙烯腈树脂(SAN)、聚苯乙烯(通用GPPS)和聚合甲基丙烯酸甲酯丙烯腈丁二烯苯乙烯(MABS(透明ABS))。

[0622] 之字形通道可防止具有将会损坏软涂层的高动能和高温度中的至少一者的颗粒直接轰击PV窗或挡板。在包括之字形通道的PV窗或挡板的一个实施方式中,PV窗或挡板可涂覆有非镓润湿性表面,诸如聚乙烯或特氟隆。

[0623] 在一个实施方式中,反应池腔室装有运输反应物,该运输反应物与镓和氧化镓中的至少一者反应以在第一温度下形成挥发性化合物,该挥发性化合物在第二高温下热分解。在一个实施方式中,该挥发性化合物在第一温度下形成于PV窗上并在以下位置中的一者或多者处分解:在反应池腔室壁上、在反应腔室气体中和在分数氢反应等离子体中。所形成的挥发性化合物用于在催化循环中清洁PV窗。运输反应物可在其从PV窗的表面移除镓和氧化镓中的至少一者时连续地被消耗和再生。运输反应物可形成具有 201°C 的沸点的挥发性卤化物,诸如 GaCl_3 。运输反应物可包含 HCl 、 Cl_2 或有机卤化物,诸如氯甲烷。运输反应物可形成具有 345°C 的沸点的挥发性卤化物,诸如 GaI_3 或 Ga_2I_6 。运输反应物可包含 HI 、 I_2 或有机卤化物,诸如碘甲烷。运输反应物可包含形成挥发性有机金属镓络合物或化合物的有机分子。有机运输化合物可包含N、O或S。在一个实施方式中,运输反应物包含与镓和氧化镓中的至少一者反应的卤化镓,诸如 GaCl_3 。产物可以是挥发性的。在一个示例性的实施方式中,

GaCl_3 与镓反应以形成四氯化二镓(Ga_2Cl_4)。由于熔点=164℃并且沸点=535℃,因此可在用以维持足够 Ga_2Cl_4 以清洁窗的温度诸如接近和高于沸点(BP)下操作窗。运输化合物可与 Ga_2O_3 反应以形成 Ga_2O ,其为挥发性的。运输化合物可包含 H_2 。 H_2 可由可进一步用于清洁PV窗的气体喷口供应。在一个实施方式中,运输化合物是原子、离子或元素。该元素可以是镓。镓可与 Ga_2O_3 反应以形成 Ga_2O ,其为挥发性的。用以形成氧化二镓的反应在较低的窗温度下是有利的。 Ga_2O 可在反应池腔室中在较高的等离子体温度下(诸如在超过660℃的温度下)分解成Ga和 Ga_2O_3 。在一个实施方式中,运输元素是添加至镓的铝。铝可形成气态 Al_2O 。在另一个实施方式中,可用铝取代镓。铝可构成熔融金属。可使运输反应物从热区流动,在该热区处通过气体射流系统使运输反应物形成至PV窗表面,其中运输反应物与PV窗表面上的镓和氧化镓中的至少一者发生反应。产物挥发以清洁窗。与运输化合物或溶剂接触的SunCell®组件(诸如反应池腔室和EM泵管)可包含抵抗运输剂或溶剂的腐蚀的材料,诸如 GaCl_3 或 GaBr_3 。SunCell®组件可包含抵抗卤化物的腐蚀的示例性材料石英或奥氏体不锈钢(诸如316或SS625)。包括石英EM泵管的实施方式可包括感应EM泵。

[0624] 在一个实施方式中,反应池腔室包含从PV窗移除所沉积的材料(诸如镓和氧化镓)的清洁化合物。该清洁化合物可包含用于镓和氧化镓中的至少一者的溶剂。该溶剂可包含在PV窗的工作温度下是液体的化合物。该清洁化合物可在反应池腔室的工作温度下包含气体。该清洁化合物可凝结于PV窗上。该清洁化合物可进行以下操作中的至少一者:溶解、悬浮和运输沉积于PV窗上的材料。SunCell®还可包括气体射流系统,诸如包括气体泵的气体射流系统,该气体泵具有气体入口和至少一个气体出口,该至少一个气体出口包括致使气体撞击至PV窗的内表面上的至少一个气体喷嘴,其中气体可具有用以使所沉积的材料从PV窗脱离的高速度。该气体射流系统可使反应池腔室气体再循环。还可通过气体射流移出具有悬浮或溶解的沉积材料的清洁化合物。该清洁化合物可包含无机化合物,诸如 GaX_3 ,其中X为卤离子(F、Cl、Br或I中的至少一者)。在一个示例性的实施方式中,镓金属在溴化镓(熔点=121.5℃,沸点=278.8℃)中的溶解度为14摩尔% [M.A.Bredig, "Mixtures of metals with molten salts", Oak Ridge National Laboratory, Chemistry Division, U.S. Atomic Energy Commission, 1963, <http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-3391.pdf>]。因此,溴化镓可溶解沉积于PV窗上的镓。可通过蒸发或通过流来移除该溶液。作为另一种选择,清洁化合物可包含有机化合物,诸如溶剂。示例性的溶剂是长链烃诸如壬烷(沸点=151℃)、癸烷(沸点=174℃)、十一烷(沸点=196℃)、十二烷(沸点=216℃)、六甲基磷酰胺、二甲基亚砷、N,N'-四烷基脲DMPU(二甲基丙烯脲)、DMI(1,3-二甲基-2-咪唑烷酮)、甲醇、异丙醇或其他溶剂,诸如具有来自以下列表的至少一种性质的溶剂:适当高的沸点,使沉积于PV窗上的物质溶解或悬浮的能力,以及低表面张力使得其润湿PV窗并置换所沉积的物质。清洁化合物可包含金属氢氧化物或金属氧化物,诸如碱金属氢氧化物或氧化物或者Mg、Zn、Co、Ni或Cu氢氧化物或氧化物以分别形成 MGaO_2 (其中M为Li、Na、K、Rb、Cs中的一者)或尖晶石(诸如 MgGa_2O_4)。清洁化合物可包括多种化合物,诸如金属氢氧化物或氧化物和金属氧化物与氧化镓的反应产物的溶剂(诸如水或乙醇)。在一个实施方式中,可通过以下方式中的至少一者来控制反应池腔室中的清洁化合物的蒸气压:限制清洁化合物的摩尔数;以及控制PV窗的温度。可通过与蒸气接触的最冷温度表面(诸如PV窗的表面)确定清洁化合物的蒸气压。蒸气压可以是PV窗的温度下的相应液体

的蒸气压力。

[0625] 在一个实施方式中,点燃电力源可包括至少一个电容器以穿过所注入的熔融金属提供高电流脉冲。高电流可导致强大冲击波,其可使所注入的熔融金属料流中断。

[0626] 在一个实施方式中,注射器管5k61包括在不同位置和角度的多个喷嘴以减少由分数氢反应冲击波对所注入的熔融金属料流的中断。在一个实施方式中,反应池腔室提供对分数氢反应所形成的压力波的约束。该约束可增加分数氢反应速率。

[0627] 在一个实施方式中,高点燃电流可致使等离子体和所注入的熔融金属料流中的至少一者不稳定。该不稳定可归因于洛仑兹偏转和高电流箍缩效应中的至少一者。可限制注入电流以避免该不稳定。作为另一种选择,注射器可包括喷嘴设计和多个喷嘴中的至少一者以避免该不稳定。例如,该多个喷嘴可分开电流以避免该不稳定。作为另一种选择,可沿着平行和反平行路径中的至少一者引导电流以消除该不稳定。在另一个实施方式中,可对熔融金属注入速率进行增加、减小和终止中的至少一者以实现以下各项中的至少一者:控制分数氢反应速率;抑制等离子体不稳定性;以及减少电流在熔融金属料流与等离子体之间的分配。在一个实施方式中,使电流流动穿过等离子体以增强分数氢反应是有利的。通过熔融金属料流使电流从等离子体分流可通过在起始等离子体后即减少或消除EM泵送而实现。在另一个实施方式中,可通过增加熔融金属注入速率(其可有利于离子复合)而增加分数氢反应速率。**SunCell®**可包括多个熔融金属注射器,诸如EM泵,其中至少一个泵注入至对电极并且至少一个注射器可注入进反应池腔室。该多个注射器可使熔融镓循环并从反应池腔室中的热点移除热以避免对**SunCell®**的损坏。另外,可通过控制点燃功率而控制分数氢反应速率,该点燃功率可经增加、减小或终止以控制相对于输入功率的功率输出和功率增益。分数氢反应速率可随输入功率增加而增加,但增益可能减少。

[0628] 在一个实施方式中,可初始使诸如电压、电流和功率之类的点燃等离子体参数中的至少一者维持在比在已形成等离子体且反应池腔室的温度已增加之后高的值。可使至少一个点燃功率参数诸如电压和电流维持在高的初始水平,然后在等离子体启动之后减小以改善相对于输入功率的输出功率增益。在一个实施方式中,一旦等离子体对于分数氢反应变得充分的热,便可终止点燃电流以在不存在点燃功率的情况下维持等离子体。为通过降低池电阻而降低点燃电压,**SunCell®**可包括以下各项中的至少一者:(i)用以直接将电力供应至储罐5c中的熔融金属的高度导电的汇流条,(ii)高度导电的对电极8或10,(iii)浸没式电极,(iv)具有大直径的喷嘴5q,和(v)较短的电极间距。在包含镓作为熔融金属的一个实施方式(其中点燃电流跨越注射器泵管)中,泵管可包含金属或涂层以避免通过与EM泵管的金属的反应而形成高电阻的镓合金层。示例性的金属和金属涂层为不锈钢、钽、钨和铼。在一个实施方式中,接触镓的至少一个**SunCell®**组件(诸如EM泵管5k6、注射器管5k61、镓储罐5c中的汇流条和电极8)可包括或涂覆有具有缓慢镓合金形成速率或镓合金形成是不利的金属,诸如不锈钢、铼(Re)、钽和钨(W)中的至少一者。

[0629] 在一个实施方式中,**SunCell®**包括真空系统,该真空系统包括通往真空管线的入口、真空管线、阱和真空泵。该真空泵可包括具有高泵送速度的真空泵(诸如根泵或卷动泵)并且还可包括可与该真空泵串联或并联连接(诸如在真空泵前面串联连接)的用于水蒸气的阱。该水阱可包含吸水材料,诸如固体干燥剂或低温冷阱。在一个实施方式中,泵可包括

低温泵、低温过滤器或冷却器中的至少一者以进行以下操作中的至少一者：使气体在进入泵之前冷却；以及使至少一种气体（诸如水蒸气）凝结。为增加泵送容量和速率，泵送系统可包括连接至反应池腔室的多个真空管线和连接至真空管线的真空歧管，其中该歧管连接至真空泵。在一个实施方式中，去往真空管线的入口包括用于使反应池腔室中的熔融金属颗粒停止进入真空管线的屏蔽件。示例性的屏蔽件可包括在入口上方但从入口的表面凸起的金属板或圆顶以为从反应池腔室进入真空管线的气体流提供选择性间隙。真空系统还可包括真空管线入口的颗粒流动限制器（诸如一组挡板）以允许气体流动同时阻挡颗粒流动。

[0630] 真空系统可具有以下能力中的至少一者：超高真空；以及使反应池腔室工作压力维持在至少一个低范围诸如约0.01托至500托、0.1托至50托、1托至10托和1托至5托内。可在以下各项中的至少一者的情形中使压力维持为低：(i) 添加 H_2 ，同时痕量的HOH催化剂作为痕量的水或作为与 H_2 反应以形成HOH的 O_2 提供；和(ii) 添加 H_2O 。在诸如氩之类的稀有气体也供应至反应混合物的情形中，可使压力维持在至少一个高工作压力范围内诸如约100托至100大气压、500托至10大气压和1大气压至10大气压，其中与其他反应池腔室气体相比较，氩可以是过量的。氩压力可增加HOH催化剂和原子H中的至少一者的寿命并且可阻止形成于电极处的等离子体快速扩散从而等离子体强度得以增加。

[0631] 在一个实施方式中，反应池腔室包括用以通过响应于反应池腔室中的压力改变而改变体积来将反应池腔室压力控制在所需范围内的部件。该部件可包括：压力传感器；可机械扩展的区段；致动器，其用以使该可扩展区段扩展和收缩；和控制器，其用以控制通过该可扩展区段的扩展和收缩而形成的差异体积。该可扩展区段可包括波纹管。该致动器可包括机械致动器、气动致动器、电磁致动器、压电致动器、液压致动器和本领域已知的其他致动器。

[0632] 在一个实施方式中，SunCell®可包括(i) 气体再循环系统，其具有气体入口和出口，(ii) 气体分离系统，诸如能够将稀有气体（诸如氩）、 O_2 、 H_2 、 H_2O 、诸如 GaX_3 （ X =卤离子）或 N_xO_y （ x, y =整数）之类的反应混合物的挥发性物质和分数氢气体中的至少两者的混合物的至少两种气体分开的气体分离系统，(iii) 至少一种稀有气体、 O_2 、 H_2 和 H_2O 分压传感器，(iv) 流量控制器，(v) 至少一个注射器，诸如微注射器，诸如注入水的微注射器，(vi) 至少一个阀，(vii) 泵，(viii) 排放气体压力和流量控制器，和(ix) 电脑，用以维持稀有气体（氩）、 O_2 、 H_2 、 H_2O 和分数氢气体压力中的至少一者。再循环系统可包括半渗透膜以允许至少一种气体（诸如分子分数氢气体）从循环的气体中移除。在一个实施方式中，可在反应混合物的至少一种气体可从出口流出并且可穿过排气口排放的同时使至少一种气体（诸如稀有气体）选择性地再循环。稀有气体可实现以下各项中的至少一者：增加分数氢反应速率；以及增加反应池腔室中的至少一种物质离开排气口的运输速率。稀有气体可增加过量水的排放速率以维持所需压力。稀有气体可增加排放分数氢的速率。在一个实施方式中，诸如氩之类的稀有气体可由类稀有气体替换，该类稀有气体是以下情形中的至少一者：可容易地从环境气氛中获得；以及容易地排放至环境气氛中。类稀有气体可具有与反应混合物的低反应性。类稀有气体可从大气获得并排放，而非由再循环系统再循环。类稀有气体可由可容易地从大气获得并可排放至大气的气体形成。类稀有气体可包含可在流动至反应池腔室中之前与氧分开的氮。作为另一种选择，空气可用作类稀有气体源，其中可使氧与来自源的碳反应以形成二氧化碳。氮和二氧化碳中的至少一者可充当类稀有气体。作为另一种选择，可通过与诸如

镓之类的熔融金属反应而移除氧。可在镓再生系统(诸如通过氢氧化钠水溶液与氧化镓反应形成镓酸钠并将镓酸钠电解为镓金属和氧(其被排放)的镓再生系统)中再生所得的氧化镓。

[0633] 在一个实施方式中,可在显著地关闭反应物 H_2 、 O_2 和 H_2O 中的至少一者的添加的情况下操作SunCell®,其中反应池腔室气氛包含反应物以及稀有气体(诸如氩)。可使稀有气体维持在升高的压力下诸如在10托至100大气压的范围内。气氛可以是以以下方式中的至少一者排放或通过再循环系统再循环:连续地和周期性地或间歇地。排放可移除过量的氧。与 H_2 一起添加反应物 O_2 可以是使得 O_2 是次要物质并且在 O_2 与过量 H_2 一起注入至反应池腔室中时基本上形成HOH催化剂。喷枪可注入 H_2 与 O_2 混合物,其立即反应而形成HOH催化剂和过量的 H_2 反应物。在一个实施方式中,可通过以下方式中的至少一者至少部分地从氧化镓释放过量的氧:氢还原、电解还原、热分解以及归因于 Ga_2O 的挥发性的蒸发和升华中的至少一者。在一个实施方式中,存在以下情况中的至少一者:可控制氧存量;以及可通过在存在氢的情况下使氧间断地流至反应池腔室中而至少部分地允许氧存量形成HOH催化剂。在一个实施方式中,可通过与所添加的 H_2 反应而使氧存量作为 H_2O 循环。在另一个实施方式中,过量氧存量可作为 Ga_2O_3 移除并且通过本公开的部件(诸如通过本公开的撇渣器和电解系统中的至少一者)而再生。过量氧的源可以是添加 O_2 和添加 H_2O 中的至少一者。

[0634] 在一个实施方式中,可通过控制泵送速率和再循环速率中的至少一者而至少部分地控制反应池腔室中的气体压力。可通过受压力传感器和控制器控制的阀来控制这些速率中的至少一者。用以控制气流的示例性阀是响应于较高和较低目标压力而打开和关闭的电磁阀以及可变流量限制阀(诸如受压力传感器和控制器控制以维持所需气体压力范围的蝶形阀和节流阀)。

[0635] 在一个实施方式中,可通过归因于 Ga_2O 挥发性的蒸发和升华中的至少一者而从反应池腔室移除氧化镓诸如 Ga_2O 。可通过使气体流过反应池腔室和维持低压力(诸如低于大气的压力)中的至少一个方法实现移除。可通过本公开的再循环器维持气体流。可通过本公开的真空泵送系统维持低压力。氧化镓可凝结在本公开的冷凝器中并返回至反应池腔室。作为另一种选择,可将氧化镓捕获于过滤器或阱(诸如低温冷阱)中,可通过本公开的系统和方法从该过滤器或阱中移出和再生该氧化镓。该阱可在再循环器的至少一个气体管线中。在一个实施方式中,可将 Ga_2O 捕获于真空系统的阱中,其中该阱可包括过滤器、低温冷阱和静电沉淀器中的至少一者。该静电沉淀器可包括高电压电极以维持等离子体以使 Ga_2O 颗粒带静电并捕获该带电颗粒。在一个示例性的实施方式中,至少一组电极中的每一组可包括线(其可产生使 Ga_2O 颗粒带负静电的电晕放电)和带正电的收集电极(诸如使带电颗粒从来自反应池腔室的气体料流沉淀的板式或管式电极)。可通过本领域已知的手段(诸如以机械方式)从每一收集器电极移除 Ga_2O 颗粒,并且可将 Ga_2O 转化为镓并回收。可通过本公开的系统和方法(诸如通过在NaOH溶液中的电解)从 Ga_2O 再生镓。

[0636] 静电沉淀器(ESP)还可包括用以使至少一种所需物质从来自反应池腔室的气体料流沉淀并使其返回至反应池腔室的部件。该沉淀器可包括运输部件(诸如本发明或本领域已知的螺旋钻、传送带、气动部件、机电部件或其他运输部件)以将沉淀器收集的颗粒往回运输至反应池腔室。沉淀器可安装于真空管线包括通过重力流使所需颗粒返回至反应池腔室的回流器的部分中,其中颗粒可通过重力流(诸如真空管线中的流)沉淀并回流至反应池

腔室。该真空管线可在至少一个部分中竖直取向,其允许所需的颗粒经历重力返回流动。

[0637] 在示例性的测试实施方式中,在具有4ml/分钟 H_2O 注入的情况下使反应池腔室维持在约1至2大气压的压力范围下。DC电压为约30V并且DC电流为约1.5kA。反应池腔室是6英寸直径不锈钢球体,诸如容纳3.6kg的熔融镓的图25中所示的不锈钢球体。电极包括DC EM泵的1英寸浸没式SS喷嘴和对电极,该对电极包括具有由BN基座覆盖的1cm直径引线的4cm直径、1cm厚W圆盘。EM泵速率为约30至40ml/s。借助浸没的喷嘴使镓极化为正,并且使W基座电极极化为负。通过EM泵注射器使镓良好混合。**SunCell®**输出功率为约85kW,其使用镓和SS反应器的质量、比热和温度升高的乘积测量。

[0638] 在另一测试实施方式中,使2500sccm的 H_2 和25sccm的 O_2 流动穿过保持于与 H_2 和 O_2 气体入口以及反应池腔室在一条线上该的外部腔室中的约2g的10%Pt/ Al_2O_3 珠粒。此外,在应用主动真空泵送的同时使氩以维持50托腔室压力的速率流动至反应池腔室中。DC电压为约20V并且DC电流为约1.25kA。**SunCell®**输出功率为约120kW,其使用镓和SS反应器的质量、比热和温度升高的乘积测量。

[0639] 在一个实施方式中,再循环系统或再循环器(诸如能够在低于大气压力、处于大气压力和高于大气压力中的一者或多者下操作的稀有气体再循环系统)可包括:(i) 气体推进器,诸如真空泵、压缩机和鼓风机中的至少一者,其用以使来自反应池腔室的至少一种气体再循环,(ii) 再循环气体管线,(iii) 分离系统,其用以移除排放气体诸如分数氢和氧,和(iv) 反应物供应系统。在一个实施方式中,气体推进器能够泵送来自反应池腔室的气体,推动该气体穿过分离系统以移出排放气体,并使再生的气体返回至反应池腔室。气体推进器可包括泵、压缩机和鼓风机中的至少两者作为同一单元。在一个实施方式中,泵、压缩机、鼓风机或它们的组合可包括低温泵、低温过滤器或冷却器中的至少一者以进行以下操作中的至少一者:使气体在进入气体推进器之前冷却;以及使至少一种气体(诸如水蒸气)凝结。再循环气体管线可包括从真空泵至气体推进器的管线、从气体推进器至用以移出排放气体的分离系统的管线,以及从用以移出排放气体的分离系统至可与反应物供应系统连接的反应池腔室的管线。示例性的反应物供应系统包括至少一个管套,其管线去往反应池腔室,该反应池腔室具有用于稀有气体(诸如氩)、氧、氢和水中的至少一者的至少一个反应混合物气体补充管线。与 H_2 一起添加反应物 O_2 可以是使得 O_2 是次要物质并且在 O_2 与过量 H_2 一起注入至反应池腔室中时基本上形成HOH催化剂。喷枪可注入 H_2 与 O_2 混合物,其立即反应而形成HOH催化剂和过量的 H_2 反应物。反应物供应系统可包括连接至反应混合物气体供应管线的气体歧管和通往反应池腔室的流出管线。

[0640] 用以移出排放气体的分离系统可包括低温过滤器或低温冷阱。用以从再循环气体移出分数氢产物气体的分离系统可包括半渗透膜以通过跨越薄膜从再循环气体扩散至大气或扩散至排放腔室或料流而选择性地排放分数氢。再循环器的分离系统可包括从再循环气体移出氧的氧清除器系统。清除器系统可包括容器和该容器中与氧发生反应的吸气剂或吸收剂(诸如金属,诸如碱金属、碱土金属或铁)中的至少一者。作为另一种选择,吸收剂(诸如活性炭或本领域已知的另一吸氧剂)可吸收氧。木炭吸收剂可包括可密封于气体可渗透的料筒(诸如可商购的气体可渗透的料筒)中的木炭过滤器。该料筒可以是可移除的。该清除器系统的吸氧剂可定期替换或通过本领域已知的方法再生。再循环系统的清除器再生系统可包括一个或多个吸收剂加热器和一个或多个真空泵中的至少一者。在一个示例性实施

方式中,对木炭吸收剂进行以下操作中的至少一者:通过加热器加热;以及经受真空泵所施加的真空以释放氧,该氧被排放或收集,并重新使用所得的再生木炭。可将来自 SunCell® 的热用于再生吸收剂。在一个实施方式中, SunCell® 包括至少一个热交换器、冷却剂泵和冷却剂流回路,该冷却剂流回路充当清除器加热器以再生诸如木炭之类的吸收剂。该清除器可包括大的体积和面积以有效地清除同时不显著地增加气流阻力。可通过连接至再循环管线的气体推进器维持流动。可使木炭冷却以更有效地吸收待从再循环气体(诸如包含稀有气体诸如氩的混合物)清除的物质。诸如木炭之类的吸氧剂还可清除或吸收分数氢气体。该分离系统可包括多个清除器系统,每一清除器系统包括(i)腔室,其能够维持气体密封,(ii)吸收剂,其用以移出排放气体诸如氧,(iii)入口和出口阀,其可隔离腔室与再循环气体管线且隔离再循环气体管线与腔室,(iv)通过控制器控制的部件诸如机器人机构,其用以将腔室与再循环管线连接和断开该连接,(v)用以再生吸收剂的部件,诸如加热器和真空泵,其中加热器和真空泵可以是通用的以使至少一个其他清除器系统在其再生期间再生,(v)控制器,其用以控制第n个清除器系统的断开连接、第n+1个清除器系统的连接,以及在第n+1个清除器系统充当现用清除器系统的同时第n个清除器系统再生,其中可使该多个清除器系统中的至少一者再生而同时至少一个其他清除器系统可活跃地清除或吸收所需的气体。清除器系统可允许在关闭排放条件下操作 SunCell®,其中周期性地控制排放或气体回收。在一个示例性的实施方式中,可通过加热至不同温度而从吸收剂(诸如活性炭)独立地收集氢和氧,在该不同温度下大致独立地释放相应的气体。

[0641] 在包含稀有气体、氢和氧的反应池腔室气体混合物的一个实施方式(其中反应池腔室气体的稀有气体的分压超过氢的分压)中,由于稀有气体诸如氩的反应物浓度稀释效应,可增加氧分压以补偿氢与氧之间的减小的反应速率从而形成HOH催化剂。在一个实施方式中,可在与诸如氩之类的稀有气体组合之前形成HOH催化剂。可通过复合器或燃烧器(诸如复合器催化剂)、等离子体源或热表面(诸如丝)致使氢和氧发生反应。复合器催化剂可包括:负载于陶瓷载体上的贵金属,诸如氧化铝、氧化锆、氧化钪、硅石或沸石粉末或珠粒上的Pt、Pd或Ir;本公开的另一负载型复合器催化剂;或解离器,诸如雷氏Ni、Ni、铌、钛或呈提供高表面积的形式(诸如粉末、垫、编织物或布)的本公开的其他解离器金属或本领域已知的解离器金属。示例性的复合器包括Al₂O₃珠粒上的10重量%Pt。等离子体源可包括辉光放电、微波等离子体、等离子体炬、电感或电容耦合的RF放电、介质阻挡放电、压电直接放电、声学放电或本公开或本领域已知的另一放电。热丝可包括热钨丝、Pt丝或Pt上Pd黑丝或本领域已知的另一催化丝。

[0642] 反应混合物物质诸如水、氢、氧和稀有气体中的至少一者的入口流可以是连续的或间断的。可控制入口流量以及排放或真空流量以实现所需的压力范围。入口流可以是间断的,其中可使流在所需范围的最大压力处停止并且在该所需范围的最小值处开始。在反应混合物气体包含诸如氩之类的高压力稀有气体的情形中,反应池腔室可抽空,用反应混合物填充,并在大致静止的排放流条件下操作,其中在连续或间断流条件下维持反应物(诸如水、氢和氧中的至少一者)的入口流以将压力维持在所需范围内。另外,可使稀有气体以经济上可行的流量和相应的排放泵送速率流动,或者可由再循环系统或再循环器使稀有气体再生或净化和再循环。

[0643] 反应池腔室5b31气体可包含H₂、稀有气体(诸如氩)、O₂和H₂O以及氧化物(诸如CO₂)

中的至少一者。在一个实施方式中,反应池腔室5b31中的压力可低于大气压。该压力可在约1毫托至750托、10毫托至100托、100毫托至10托和250毫托至1托中的至少一个范围内。**SunCell®**可包括水蒸气供应系统,该水蒸气供应系统包括:水储罐,其具有加热器和温度控制器;通道或管道;和阀。在一个实施方式中,反应池腔室气体可包含 H_2O 蒸气。可控制与反应池腔室连接的外部水储罐的温度由该水储罐穿过通道供应水蒸气,其中水储罐可以是水蒸气供应系统的最冷的组件。水储罐的温度可基于取决于温度的水分压来控制水蒸气压力。水储罐还可包括冷冻器以降低蒸气压力。水可包含添加剂,诸如溶解的化合物(诸如盐,诸如NaCl或其他碱金属或碱土金属卤化物)、吸收剂(诸如沸石)、形成水合物的材料或化合物或者本领域技术人员已知的可减小蒸气压的另一材料或化合物。用以降低蒸气压的示例性机制是通过依数性效应或键合相互作用。在一个实施方式中,水蒸气压力源可包括可容纳在储罐中并穿过管道供应至反应池腔室5b31的冰。该冰可具有高表面积以增加从冰形成HOH催化剂和H的速率以及分数氢反应速率中的至少一者。该冰可呈精细切片的形式以增加表面积。可使冰维持在低于0℃的所需温度以控制水蒸气压力。可使载气诸如 H_2 和氩中的至少一者流动穿过冰储罐并流入反应池腔室中。还可通过控制载气流量而控制水蒸气压力。

[0644] 液态 H_2O 中 H_2 的摩尔浓度当量为55摩尔/升,其中 H_2 气体在STP下占22.4升。在一个实施方式中,将 H_2 作为反应物供应至反应池腔室5b31以形成呈包含液态水和蒸气中的至少一者的形式的分数氢。**SunCell®**可包括液态水和蒸气中的至少一者的至少一个注射器。注射器可包括水和蒸气射流中的至少一者。进入反应池腔室中的注射器孔口可较小以防止回流。注射器可包含抗氧化的难熔材料诸如陶瓷或本公开的另一材料。**SunCell®**可包括水和蒸气中的至少一者的来源以及压力和流量控制系统。在一个实施方式中,**SunCell®**还可包括超声波发生器、雾化器、烟雾化器或喷雾器以产生小水滴,其可夹带于载气料流中并流入反应池腔室中。该超声波发生器可包括振动器和压电装置中的至少一者。可通过控制水蒸气源的温度或从该源至反应池腔室的流管道的温度来控制载气流中的水的蒸气压。在一个实施方式中,**SunCell®**还可包括氢源和氢复合器(诸如CuO复合器)以通过使氢流动穿过复合器(诸如加热的氧化铜复合器)而将水添加至反应池腔室5b31,使得所产生的水蒸气流入反应池腔室中。在另一个实施方式中,**SunCell®**还可包括蒸汽注射器。该蒸汽注射器可包括:控制阀和控制器中的至少一者,其用以控制蒸汽和池气体中的至少一者进入蒸汽注射器的流量;通往会聚喷嘴的气体入口;缩扩喷嘴;组合锥,其可与水源和溢流出口连接;水源;溢流出口;递送锥;和止回阀。控制阀可包括可由定时器、传感器(诸如池压力或水传感器)或手动激活器控制的电子螺线管或其他电脑控制的阀。在一个实施方式中,**SunCell®**还可包括泵以注入水。可穿过窄横截面管道(诸如细的皮下注射针)递送水,使得来自**SunCell®**的热量不使泵中的水沸腾。泵可包括注射泵、蠕动泵、计量泵或本领域已知的其他泵。注射泵可包括多个注射器,使得至少一个注射器可在另一注射器进行注入时进行再填充。注射泵可由于管道相对于注射器的活塞小得多的横截面而放大管道中的水的力。可对管道进行以下操作中的至少一者:散热和冷却以防止泵中的水沸腾。

[0645] 在一个实施方式中,通过以下方式控制反应池腔室反应池混合物:通过控制反应物的注入速率和控制从反应池腔室5b31排出反应混合物的过量反应物和产物的速率的至少一个部件而控制反应池腔室压力。在一个实施方式中,**SunCell®**包括压力传感器、真空

泵、真空管线、阀控制器和阀,诸如响应于处理由传感器测量的压力的控制器而对自反应池腔室至真空泵的真空管线打开和关闭的压力启动阀,诸如电磁阀或一节流阀。该阀可控制反应池腔室气体的压力。该阀可保持关闭直至池压力达到第一高设定点,然后该阀可启动以打开,直至通过真空泵使压力下降至第二低设定点,其可致使启动阀以关闭。在一个实施方式中,控制器可控制至少一个反应参数(诸如反应池腔室压力、反应物注入速率、电压、电流和熔融金属注入速率)以维持非脉冲或大致稳定的或连续的等离子体。

[0646] 在一个实施方式中, **SunCell®**包括压力传感器、反应混合物的至少一种反应物或物质的源(诸如 H_2O 、 H_2 、 O_2 和稀有气体(诸如氩)的源)、反应物管线、阀控制器和阀,诸如响应于处理由传感器测量的压力的控制器而对从反应混合物的至少一种反应物或物质的源以及反应池腔室的反应物管线打开和关闭的压力启动的阀,诸如电磁阀或节流阀。该阀可控制反应池腔室气体的压力。该阀可保持打开直至池压力达到第一高设定点,然后该阀可以启动以关闭直至通过真空泵使压力下降至第二低设定点,其可致使启动阀以打开。

[0647] 在一个实施方式中, **SunCell®**可包括注射器,诸如微型泵。该微型泵可包括机械或非机械装置。示例性的机械装置包括移动零件,该移动零件可包括致动膜和微阀膜以及阀瓣。可通过利用来自压电效应、静电效应、热-气动效应、气动效应和磁性效应的群组的至少一种效应而产生微型泵的驱动力。非机械泵可与电-流体动力机构、电渗机构、电化学机构、超声机构、毛细机构、化学机构和本领域已知的另一流产生机构中的至少一者联合。微型泵可包括压电微型泵、电渗微型泵、膜式微型泵、蠕动微型泵、注射器微型泵和无阀微型泵以及毛细和化学动力泵和本领域已知的另一微型泵中的至少一者。注射器诸如微型泵可连续地供应反应物诸如水,或者其可诸如以脉冲模式间断地供应反应物。在一个实施方式中,水注射器包括泵(诸如微型泵)、至少一个阀和水储罐中的至少一者,并且还可包括冷却器或延伸管道以使水储罐和用于反应池腔室的阀移开充分距离,以避免预注入水的过热或沸腾。

[0648] **SunCell®**可包括注入控制器和至少一个传感器,诸如记录压力、温度、等离子体电导率或其他反应气体或等离子体参数的传感器。可通过使用来自至少一个传感器的输入来递送所需功率同时避免由过功率引起的对**SunCell®**的损坏的控制器来控制注入序列。在一个实施方式中, **SunCell®**包括多个注射器(诸如水注射器)以注入进反应池腔室内的不同区域,其中由控制器启动注射器以使等离子体热点的位置即时交替以避免对**SunCell®**的损坏。注入可以是间断的、周期性间断的、连续的,或者包括实现所需功率、增益和性能优化的任何其他注入模式。

[0649] **SunCell®**可包括响应于泵的注入和填充而打开和关闭的阀,诸如泵入口阀和出口阀,其中打开或关闭的入口阀和出口阀状态可彼此 180° 异相。泵可形成比反应池腔室压力高的压力以实现注入。在泵注入易于受反应池腔室压力影响的事件中, **SunCell®**可包括反应池腔室与将水供应至泵的储罐之间的气体连接以使泵的排出压力与反应池腔室的压力动态地匹配。

[0650] 在其中反应池腔室压力低于泵压力的一个实施方式中,泵可包括至少一个阀以在泵闲置时实现去往反应池腔室的流的停止。泵可包括至少一个阀。在一个示例性的实施方式中,蠕动微型泵包括串联的至少三个微型阀。顺序地打开和关闭此三个阀以便在称为蠕

动的程序中将流体自入口拉提至出口。在一个实施方式中,阀可以是主动的,诸如螺线管形或压电止回阀,或其可被动地起作用,其中通过背压关闭阀,诸如止回阀(诸如球形、摆动、线图或鸭嘴形止回阀)。

[0651] 在其中待注入至反应池腔室中的水源与反应池腔室之间存在压力梯度的一个实施方式中,泵可包括可周期性地 180° 异相打开和关闭的两个阀,即储罐阀和反应池腔室阀。可通过具有所需注入体积的泵腔室将该阀分开。在反应池腔室阀关闭的情况下,储罐阀可对水储罐打开以填充泵腔室。在储罐阀关闭的情况下,反应池腔室阀可打开以致使将所需体积的水注入反应池腔室中。可通过压力梯度而驱动流入和流出泵腔室。可通过控制泵腔室的体积以及同步阀打开和关闭的周期而控制水流量。在一个实施方式中,水微量注射器可包括两个阀,即去往约 $10\mu\text{l}$ 至 $15\mu\text{l}$ 体积的微腔室的入口阀和出口阀,每一者以机械方式连接并且关于打开和关闭是 180° 异相。可由凸轮以机械方式驱动该阀。

[0652] 在另一个实施方式中,反应池混合物的另外的物质诸如 H_2 、 O_2 、稀有气体和水中的至少一者可替换水或者是水之外的附加。在流入反应池腔室中的物质在室温下是气体的情形中, SunCell®可包括质量流量控制器以控制气体的输入流。

[0653] 在其中待注入至反应池腔室中的水源与反应池腔室之间存在压力梯度的另一个实施方式中,可穿过诸如以下各项中的至少一者的流量控制器或限定器连续地供应入口水流:(i) 针型阀, (ii) 窄或小内径管, (iii) 吸湿材料, 诸如纤维素、棉花、聚乙二醇或本领域已知的另一吸湿材料, 和 (iv) 半渗透膜, 诸如陶瓷膜、熔块或本领域已知的另一半渗透膜。除诸如针型阀之类的另一限制器之外, 吸湿材料诸如棉花还可构成填充物并且可用于对流进行限制。SunCell®可包括用于吸湿材料或半渗透膜的保持器。流动限制器的流量可经校准, 并且真空泵和压力控制的排放阀可进一步维持所需的动态腔室压力和水流量。在另一个实施方式中, 反应池混合物的另外的物质诸如 H_2 、 O_2 、稀有气体和水中的至少一者可替换水或者是水之外的附加。在流入反应池腔室中的物质在室温下是气体的情形中, SunCell®可包括质量流量控制器以控制气体的输入流。

[0654] 在一个实施方式中, 在反应池腔室真空下操作的注射器可包括流动限制器, 诸如针型阀或窄管, 其中控制长度和直径以控制水流量。示例性的小直径管式注射器包括与用于ESI-ToF注入系统的注射器类似的注射器, 诸如具有在约 $25\mu\text{m}$ 至 $300\mu\text{m}$ 的范围内的内径的注射器。流动限制器可与至少一个其他注射器元件(诸如阀或泵)组合。在一个示例性的实施方式中, 借助诸如注射泵之类的泵控制小直径管的水排出压力。可借助从管至反应池腔室的阀进一步控制注入速率。可通过在水表面上方给气体加压而施加排出压力, 其中气体是可压缩的而水是不可压缩的。可通过泵施加气体加压。可通过管直径、长度、排出压力以及阀打开和关闭频率及占空比中的至少一者来控制水注入速率。管直径可在约 $10\mu\text{m}$ 至 10mm 的范围内, 长度可在约 1cm 至 1m 的范围内, 排出压力可在约1托至100大气压的范围内, 阀打开和关闭频率可在约 0.1Hz 至 1kHz 的范围内, 并且占空比可在约0.01至0.99的范围内。

[0655] 在一个实施方式中, SunCell®包括氢源(诸如氢气)和氧源(诸如氧气)。氢源和氧源中的至少一者包括至少一个或多个气体贮槽、流量调节器、压力计、阀和通往反应池腔室的气体的管线。在一个实施方式中, 由氢和氧的燃烧产生 HOH 催化剂。可使氢气和氧气流入反应池腔室中。反应物(诸如氢和氧中的至少一者)的入口流可以是连续的或间断的。可控制

流量以及排放或真空流量以实现所需压力。入口流可以是间断的,其中可使流在所需范围的最大压力处停止并且在该所需范围的最小值处开始。可控制 H_2 压力和流量以及 O_2 压力和流量中的至少一者以使HOH和 H_2 浓度或分压中的至少一者维持在所需的范围内以控制并优化来自分数氢反应的功率。在一个实施方式中,氢存量和流量中的至少一者可显著大于氧存量和流量。 H_2 对 O_2 的分压和 H_2 对 O_2 的流量中的至少一者的比率可在约1.1至10,000、1.5至1000、1.5至500、1.5至100、2至50和2至10中的至少一个范围内。在一个实施方式中,可使总压力维持在支持高浓度的新生HOH和原子H的范围内,诸如在约1毫托至500托、10毫托至100托、100毫托至50托和1托至100托中的至少一个压力范围内。在一个实施方式中,可使储罐和反应池腔室中的至少一者维持在一定工作温度,该工作温度比羟基氧化镓和氢氧化镓中的至少一者的分解温度高。该工作温度可以在约200℃至2000℃、200℃至1000℃和200℃至700℃中的至少一个范围内。在抑制羟基氧化镓和氢氧化镓形成的情形中,可将水存量控制在气体状态。

[0656] 在一个实施方式中, SunCell®包括气体混合器以混合流入反应池腔室中的至少两种气体,诸如氢和氧。在一个实施方式中,用于水的微量注射器包括混合氢与氧的混合器,其中该混合物在其进入反应池腔室时形成HOH。该混合器还可包括至少一个质量流量控制器,诸如用于每种气体或气体混合物(诸如预混合气体)的质量流量控制器。该预混合气体可以每种气体的所需摩尔比包含所述气体,诸如包含氢和氧的混合物。 H_2 - O_2 混合物的 H_2 摩尔百分比可显著过量,诸如在 O_2 的摩尔百分比的约1.5至1000倍的摩尔比范围内。质量流量控制器可控制氢和氧流量以及用以形成HOH催化剂的后续燃烧,使得进入反应池腔室的所得气流包含过量的氢和HOH催化剂。在一个示例性的实施方式中, H_2 摩尔百分比在HOH的摩尔百分比的约1.5至1000倍的范围内。该混合器可包括氢-氧炬。该炬可包括本领域已知的设计,诸如商业氢-氧炬。在示例性实施方式中,通过炬注射器混合 O_2 与 H_2 以致使 O_2 发生反应而在 H_2 料流内形成HOH从而避免氧与镓池组件或电解质发生反应以溶解氧化镓从而通过原位电解(诸如NaI电解质或本公开的另一者)利于其再生为镓。作为另一种选择,通过供应炬的单个流量控制器而非两个流量控制器使包含至少十倍摩尔过量的氢的 H_2 - O_2 混合物流入反应池腔室中。

[0657] 将氢作为 H_2 气供应至反应池腔室而非通过使 H_2O 与镓发生反应以形成 H_2 和 Ga_2O_3 而将水作为 H_2 源可减少所形成的 Ga_2O_3 量。包括气体混合器的水微量注射器可具有由于能够相比于液体流更精确地控制气体流而允许以非常低流量注入精确量的水的能力的有利特性。此外,与包含多个氢键合的水分子的体相水和蒸汽相比, O_2 与过量 H_2 的反应可形成约100%新生水作为初始产物。在一个实施方式中,使镓维持在低于100℃的温度,使得镓可具有低的通过形成氧化镓而消耗HOH催化剂的反应性。可通过冷却系统(诸如包括用于储罐和反应池腔室中的至少一者的热交换器或水浴的冷却系统)使镓维持在低温。在一个示例性实施方式中,在高流量 H_2 和痕量 O_2 流(诸如99% H_2 /1% O_2)的条件下操作SunCell®,其中可使反应池腔室压力维持为低,诸如在约1至30托的压力范围内,并且可控制流量以产生所需的功率,其中通过形成 H_2 (1/4)而产生的理论上最大功率可为约1kW/30sccm。可通过原位氢等离子体和电解还原来还原任何所得的氧化镓。在能够产生75kW的最大过量功率的示例性实施方式(其中真空系统能够实现超高真空)中,操作条件是大致无氧化物的镓表面、诸如大约1至5托的低工作压力和高 H_2 流量(诸如约2000sccm)以及作为穿过炬注射器的约10至20sccm

氧供应的痕量HOH催化剂。

[0658] 在一个实施方式中,衬里、反应池腔室壁和储罐壁中的至少一者包括是以下各项中的至少一者的材料:表现得与氢解离器一样;具有低的氢复合系数或低的复合容量;以及在 SunCell®的工作温度范围下(诸如在约25℃至3500℃、75℃至2000℃、100℃至1500℃、100℃至1000℃、100℃至600℃和100℃至400℃中的至少一个范围内)抵抗来自镓的攻击。由于不同材料具有随温度而改变的不同H原子复合速率,因此可在优化原子氢浓度的温度范围内操作 SunCell®。可充当 SunCell®组件(诸如反应池腔室壁、储罐和EM泵管中的至少一者)或者 SunCell®组件的涂层、电镀金属或包覆层的抵抗镓的攻击的示例性材料包含不锈钢、Inconel 625、Nb-5 Mo-1 Zr合金、锆705、SS(包含约0.04重量%C、0.4重量%Si、1.4重量%Mn、0.03重量%P、18重量%Cr、8.1重量%Ni和0.045%N)、347型Cr-Ni钢和430 Cr钢、Ta、W、铌、锆、铯、陶瓷(诸如BN、石英、氧化铝、氧化钨、氧化锆、硅石、莫来石、石墨和碳化硅)以及本领域已知的其他耐性材料,诸如以下文献中所给出的那些:L.R.Kelman, W.D.Wilkinson和F.L.Yagee, Resistance of Materials to Attack by Liquid Metals, Argonne National Laboratory Report#ANL-4417(1950); P.R.Luebbers, W.F.Michaud和O.K.Chopra, Compatibility of ITER Candidate Structural Material with Static Gallium, Argonne National Laboratory Report#ANL-93/31, 1993年12月,将这些文献以引用的方式并入本文。在一个实施方式中,对反应池腔室壁材料、壁涂层或衬里中的至少一者进行选择以用于通过增加解离和减少H复合成H₂分子中的至少一个机制而促进原子氢。在一个实施方式中,该材料可包括分子氢解离器,诸如贵金属(诸如雷氏镍、Pt、Pd、Ir、Ru、Rh或Re)、稀土金属、Co、石英负载的Co、雷氏Ni、Ni、Cr、Ti、Co、Nb或Zr。解离器金属可由陶瓷或另一金属(诸如在维度上稳定的阳极,诸如负载于钛上的铯或本领域已知的另一者)负载,该陶瓷或另一金属可实现以下各项中的至少一者:抵抗与镓形成合金;以及能够在反应池腔室(该陶瓷或另一金属安装于其中)的工作温度下操作。可构成衬里、反应池腔室壁和储罐壁(还可具有与镓形成合金的抗性)中的至少一者的示例性解离器是钽、钛、铌、铯、铬、不锈钢(SS)、347型SS、430型SS、具有高铬含量的马氏体不锈钢(诸如Fe-17Cr-1Mn-1Si-0.75Mo-1.1C)、具有高镍含量的不锈钢(SS)(诸如Inconel, 诸如Inconel 625)、SS 316、SS 625和Nb-5 Mo-1 Zr合金。

[0659] 在一个实施方式中,接触镓的 SunCell®组件或组件表面(诸如反应池腔室壁、反应池腔室的顶部、储罐的内侧壁和EM泵管的内侧壁中的至少一者)可涂覆有不容易与镓形成合金的涂层,诸如陶瓷(诸如莫来石、BN或本公开的另一者)或金属(诸如W、Ta、Nb、Zr、Mo、TZM或本公开的另一者)。在另一个实施方式中,该表面可包覆有不容易与镓形成合金的材料,诸如碳、陶瓷(诸如BN、氧化铝、氧化锆、石英或本公开的另一者)或金属(诸如W、Ta或本公开的另一者)。在一个实施方式中,可通过电沉积、蒸气沉积和化学沉积中的至少一者施加涂层。在后一情形中,可通过在表面上的六羰基钨的热分解施加钨涂层。可使用本领域已知的方法来电镀钨,诸如由Fink和Jones[C.Fink, F.Jones, "The Electrodeposition of Tungsten from Aqueous Solutions", Journal of the Electrochemical Society, (1931), 第461-481页]给出的那些方法,将该文献以引用方式并入。可通过诸如蒸气沉积之类的方法在 SunCell®组件(诸如与熔融镓接触的反应池腔室、储罐和EM泵管的壁)上涂覆W,其中W涂覆的组件包含Mo。在一个实施方式中,反应池腔室、储罐和EM泵管中的至少一者可

包含Nb、Zr、W、Ta、Mo或TZM。在一个实施方式中，SunCell®组件或组件的部分（诸如反应腔室、储罐和EM泵管）可包含不形成合金的材料，在接触镓的温度超过极值（诸如超过约400℃、500℃、600℃、700℃、800℃、900℃和1000℃的至少一个极值）时除外。可在一定温度下操作SunCell®，其中组件的部分未达到发生镓合金形成的温度。可在通过诸如热交换器或水浴之类的冷却部件以冷却来控制SunCell®工作温度。水浴可包括冲击水射流，诸如离开水歧管的射流，其中入射于反应腔室上的射流数目和每一射流的流量中的至少一者由控制器控制以将反应腔室维持在所需的工作温度范围内。在一个实施方式（诸如包括至少一个表面的水射流冷却的实施方式）中，SunCell®的至少一个组件的外部表面可包覆有诸如碳之类的绝缘材料以维持升高的内部温度同时允许操作性的冷却。可将高于在SunCell®操作期间实现的温度极值而形成镓合金的表面选择性地涂覆或包覆不容易与镓形成合金的材料。既接触镓又超过组件的材料（诸如不锈钢）的合金温度的SunCell®组件的部分可包覆有不容易与镓形成合金的材料。在一个示例性实施方式中，反应腔室壁可尤其在电极（其中反应腔室温度是最大的）附近的区域处包覆有W、Ta、Mo、TZM、铌或锆板，或陶瓷（诸如石英）。包覆层可包括反应腔室衬里5b31a。衬里可包括设置在的衬里与壁之间以防止镓渗漏至衬里后面的垫圈或其他不透镓材料，诸如陶瓷糊料。衬里可通过焊接、螺栓或本领域已知的另一紧固件或粘合剂中的至少一者附接至壁。

[0660] 在一个实施方式中，汇流条（诸如10、5k2中的至少一者）和从汇流条至点燃及EM泵动力供应器中的至少一者的相应电引线可充当从反应腔室5b31移除热量以用于施加的部件。SunCell®可包括热交换器以从汇流条和相应引线中的至少一者移除热量。在包括MHD转换器的SunCell®实施方式中，在汇流条及其引线上损失的热量可通过将热量从汇流条转移至熔融银（其通过EM泵从MHD转换器返回至反应腔室）的热交换器返回至反应腔室。

[0661] 在一个实施方式中，反应腔室的侧壁（诸如立方体反应腔室的四个垂直侧面）可包覆于诸如W或Ta之类的难熔金属中或由诸如W或Ta衬里之类的难熔金属覆盖。金属可抵抗与镓形成合金。反应腔室的顶部可包覆或涂覆有电绝缘体或者包括电绝缘衬里。示例性的包覆层、涂层和衬里材料是BN、石英、氧化钛、氧化铝、氧化钪、氧化钬、氧化锆、碳化硅或混合物（诸如 $\text{TiO}_2\text{-Yr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）中的至少一者。顶部衬里可具有用于基座5c1的穿透件（图25）。顶部衬里可阻止顶部电极8电短接至反应腔室的顶部。

[0662] 可使反应腔室壁和衬里中的至少一者的温度维持在一定温度范围，该温度范围可通过增加分子氢解离和减少原子氢复合中的至少一个机制优化原子氢的浓度。解离器的工作温度可高于金属可催化氢解离的温度并且低于发生与镓的实质性反应的温度。可以反应腔室壁和衬里冷却系统（诸如包括热交换器和冷冻器的冷却系统）中的至少一者维持该优化范围。在一个实施方式中，解离器可包括加热器，诸如电阻加热器、电感耦合加热器或本领域已知的另一加热器。在一个示例性实施方式中，在Ni或具有高Ni含量的不锈钢（SS）（诸如SS 316）的情形中使反应腔室壁维持在足以引起氢解离的温度，诸如在约 $440 \pm 100^\circ\text{C}$ 的范围内。

[0663] 在一个实施方式中，反应腔室还包括解离器腔室，该解离器腔室容纳：氢解离器，诸如在载体诸如碳或陶瓷珠粒（诸如 Al_2O_3 、硅石或沸石珠粒）上的Pt、Pd、Ir、Re或其他解离器金属；雷氏Ni或Ni、铌、钛或呈提供高表面积的形式（诸如粉末、垫、编织物或布）的本公

开的其他解离器金属。解离器腔室可通过镓阻挡通道(诸如本公开的字形通道)连接至反应池腔室,该镓阻挡通道可抑制从反应池腔室至解离器腔室的镓流动同时允许气体交换。氢气可从反应池腔室流动至解离腔室中,其中氢分子解离为原子,并且该原子氢可回流进反应池腔室中以充当用以形成分数氢的反应物。在其他实施方式中,解离腔室可容纳本公开的等离子体解离器或丝解离器。在一个实施方式中,在流入反应池腔室中之前形成HOH催化剂的复合器或燃烧器还可包括解离器腔室。输入至解离器腔室的气体可包含氢、氧和载气中的至少一者。载气可用于在其流入反应池腔室中时保存原子H和HOH中的至少一者。载气可包含稀有气体诸如氩。解离器可包括可与至少一个复合器或燃烧器腔室串联或并联流动的多个解离腔室。在一个实施方式中,使氢和氧以及最佳的是载气流入包括复合器、燃烧器或解离腔室的第一腔室中,其中氢气可超过氧气。HOH、过量氢和载气中的至少一者从第一腔室流动至第二腔室诸如解离腔室中以形成H原子,其中通过载气将H原子和HOH从第二腔室载运至反应池腔室中。可穿过进入第二腔室的单独输入管线独立于进入第一腔室的流而将载气引入至第二腔室中。

[0664] 在另一个实施方式中,氢源诸如 H_2 储槽可连接至歧管,该歧管可连接至至少两个质量流量控制器(MFC)。第一MFC可将 H_2 气体供应至第二歧管,该第二歧管接受 H_2 管线和来自稀有气体源(诸如氩储槽)的稀有气体管线。该第二歧管可向连接至壳体中的解离器(诸如催化剂,诸如Pt/ Al_2O_3 、Pt/C或本公开的另一者)的管线进行输出,其中该解离器的输出可以是通往反应池腔室的管线。第二MFC可将 H_2 气体供应至第三歧管,该第三歧管接受 H_2 管线和来自氧源(诸如 O_2 储槽)的氧管线。该第三歧管可向通往壳体中的复合器(诸如催化剂,诸如Pt/ Al_2O_3 、Pt/C或本公开的另一者)的管线进行输出,其中该复合器的输出可以是通往反应池腔室的管线。

[0665] 作为另一种选择,第二MFC可连接至由第一MFC供应的第二歧管。在另一个实施方式中,第一MFC可使氢直接流动至复合器或流动至复合器和第二MFC。氩可由第三MFC供应,该第三MFC从供应器诸如氩储槽接纳气体并将氩直接输出至反应池腔室中。

[0666] 在另一个实施方式中, H_2 可从其供应器(诸如 H_2 储槽)流动至向第一歧管进行输出的第一MFC。 O_2 可从其供应器(诸如 O_2 储槽)流动至向第一歧管进行输出的第二MFC。该第一歧管可向复合器/解离器进行输出,该复合器/解离器向第二歧管进行输出。诸如氩之类的稀有气体可从其供应器(诸如氩储槽)流动至向反应池腔室进行输出的第二歧管。其他的流方案在本公开的范畴内,其中所述流通过气体供应器、MFC、歧管和本领域已知的连接件以可能有序排列递送反应物气体。

[0667] 在一个实施方式中,将氢解离器添加至反应池腔室,该氢解离器具有不如镓致密、不被镓润湿并且不与镓形成合金的一个或多个特性。该解离器可以是导电的。催化剂可包括氢解离器,诸如镍、铌、钽、钛或贵金属(诸如Pt、Pd、Ru、Rh、Re、Ir或Au)。氢解离器可以是负载型的。催化剂可包括不如镓致密的载体,诸如碳、 Al_2O_3 、硅石或沸石。不如镓致密、不被镓润湿并且不与镓形成合金的示例性催化剂是Re/碳催化剂,诸如Riogen制备的10%Re/C(<https://shop.riogeninc.com/category.sc?categoryId=4>)。氢解离器可漂浮在镓的表面上。在其中载体不被镓润湿的一个实施方式中,通过非润湿性载体保护可与镓形成合金的解离器诸如镍免于接触镓使得不形成合金。示例性的解离器是Riogen制备的20%Ni/C。

[0668] 在一个实施方式中,除了还可在熔融镓表面上外,解离器(诸如可漂浮或悬浮于熔

融金属上的解离器)还可还原氧化镓。示例性的解离器诸如Re/C可包括氢溢流催化剂,其中原子氢可溢流至诸如碳之类的载体上并然后经历氧化镓的H还原反应。

[0669] 在一个实施方式中,解离器可包含由诸如碳、氧化铝或硅石之类的载体负载的贵金属(诸如Pt、Pd、Ir或铼),其中解离器可包括衬里或者解离器可包括悬于反应池腔室中的气体可渗透容器,该气体可渗透容器容纳解离器,诸如抵抗镓合金形成的解离器,诸如负载于诸如碳之类的载体上的抵抗被镓润湿的铼。该气体可渗透容器可包括用于解离器的网格、编织物、发泡体或其他开方壳体。该气体可渗透容器可包含抵抗镓合金形成的金属(诸如钨或钽)或者涂覆铼或陶瓷的金属。

[0670] 在一个实施方式中,熔融金属诸如镓、银、银铜合金或另一合金(诸如包含镓的合金,诸如镓银合金)中的至少一者充当氢解离器。对于氢解离有利的金属的特性是相应氢电极的高交换电流密度和与贵金属的金属-H键类似的金属-H键。Ni、Co、Cu、Fe和Ag的群组的金属具有合理的电流密度,但具有较低金属-H键能;而金属W、Mo、Nb和Ta具有较高金属-H键能。在一个实施方式中,熔融金属诸如镓或铟与至少一种其他金属(诸如Ni、Co、Cu、Fe、Ag、W、Mo、Nb、Ta和Zr中的至少一者)形成合金以增加解离速率。可通过使熔融金属的M-H结合能在适当方向上移动为更接近于贵金属的键能而增加该速率。用以增加熔融金属解离氢的速率的示例性合金是Ga-Nb、Ga-Ti和In-Ni-Nb系统中的至少一者。低熔点熔融金属和与该熔融金属形成合金以增加氢解离速率的金属由Datta等人[Ravindra Datta, Yi Hua Ma, Pei-Shan Yen, Nicholas D. Deveau, Ilie Fishtik Ivan Mardilovich, "Supported Molten Metal Membranes for Hydrogen Separation", 2014年2月20日, United States: N.p., 2013. Web. doi:10.2172/1123819]给出,将该文献以引用方式并入,尤其是章节2。

[0671] 在一个实施方式中, SunCell®包括以下各项中的至少一者:氢源,诸如水或氢气,诸如氢储槽;用以控制来自该源的流量的部件,诸如氢质量流量控制器;压力调节器;低于腔室中的熔融金属液位的管线,诸如来自该氢源至储罐或反应池腔室中的至少一者的氢气管线;和控制器。可将氢源或氢气直接引入熔融金属中,其中浓度或压力可大于通过引入至金属外部而实现的浓度或压力。较高浓度或压力可增加氢在熔融金属中的溶解度。氢可溶解为原子氢,其中熔融金属诸如镓或镓铟锡合金可充当解离器。在另一个实施方式中,氢气管线可包括氢解离器,诸如载体上的贵金属,诸如Al₂O₃载体上的Pt。可从反应池腔室中的熔融金属的表面释放原子氢以支持分数氢反应。气体管线可具有来自氢源的入口,该入口处于比进入熔融金属的出口高的海拔处以阻止熔融金属回流进质量流量控制器中。氢气管线可延伸至熔融金属中并且可还在端部处包括用以分配氢气的氢扩散器。管线诸如氢气管线可包括U形区段或阱。该管线可在熔融金属上方进入反应池腔室并且包括在熔融金属表面下面弯曲的区段。氢源(诸如氢储槽)、调节器和质量流量控制器中的至少一者可提供氢源或氢的足够压力以克服熔融金属在管线(诸如氢气管线)的出口处的排出压力以允许所需的氢源或氢气流动。

[0672] 在一个实施方式中, SunCell®包括氢源(诸如储槽)、阀、调节器、压力计、真空泵和控制器,并且还可包括至少一个部件以从氢源形成原子氢,诸如氢解离器(诸如本公开的氢解离器,诸如Re/C或Pt/C)和等离子体(诸如分数氢反应等离子体)源、可施加至 SunCell®电极以维持辉光放电等离子体的高电压动力源、RF等离子体源、微波等离子体源或本公开的用以维持反应池腔室中的氢等离子体的另一等离子体源中的至少一者。该氢源可供应加压

的氢。加压氢源可以以可逆方式和间断方式中的至少一种方式用氢给反应池腔室加压。加压氢可溶解进熔融金属诸如镓中。用以形成原子氢的部件可增加氢在熔融金属中的溶解度。反应池腔室氢压力可以在约0.01大气压至1000大气压、0.1大气压至500大气压和0.1大气压至100大气压中的至少一个范围内。可在允许吸收的保压时间之后通过抽空而移除氢。该保压时间可在约0.1秒至60分钟、1秒至30分钟和1秒至1分钟中的至少一个范围内。**SunCell®**可包括多个反应池腔室和控制器,可对该控制器进行以下操作中的至少一者:用原子氢间断地供应该控制器;以及以协调方式用氢对该控制器加压和减压,其中每反应池腔室可正在吸收氢,而正在对另一反应池腔室加压或供应原子氢、抽空或在操作中维持分数氢反应。用于致使氢吸收进熔融镓中的示例性系统和条件由Carreon[M.L.Carreon, "Synergistic interactions of H_2 and N_2 with molten gallium in the presence of plasma", *Journal of Vacuum Science&Technology A*, 第36卷, 第2期, (2018), 021303第1-8页; <https://doi.org/10.1116/1.5004540>]给出,将该文献以引用的方式并入本文。在一个示例性实施方式中,在高氢压力诸如0.5至10大气压下操作**SunCell®**,其中等离子体显示脉冲行为,其具有比连续的等离子体和点燃电流的情况下低得多的输入功率。然后,使压力维持在约1托至5托,其中在大于90℃下1500sccm H_2 +15sccm O_2 流过1g的Pt/ Al_2O_3 并然后进入反应池腔室,其中随着镓温度增加额外的 H_2 从镓脱气时形成高输出功率。可重复相应的 H_2 加载(镓吸收)和卸载(H_2 从镓脱气)。

[0673] 在一个实施方式中,可在将熔融金属推进至一对电极中的相对电极的方向上将氢源或氢气直接注入至熔融金属中,其中熔融金属浴充当电极。气体管线可充当注射器,其中氢源或氢注入诸如 H_2 气体注入可至少部分地充当熔融金属注射器。EM泵注射器可充当包括至少两个电极和电力源的点燃系统的额外熔融金属注射器。

[0674] 可通过本公开的至少一个方法和系统,诸如通过以下各项中的一者或多者使反应池腔室中的熔融金属表面维持在还原或清洁的金属状态:(i)通过撇渣器设备进行机械移除;以及(ii)通过电解和氢还原中的至少一者进行氧化物还原,以及通过诸如本公开的循环(诸如HCl循环)之类的手段进行氧化物移除。例如,HCl可将 Ga_2O_3 作为挥发性 $GaCl_3$ (沸点=201℃)选择性地移除;而银得以保留,这是因AgCl具有1547℃的沸点。在其中银以及镓合金的其他金属不可溶于碱(诸如NaOH)中的一个实施方式中,可在通过电解再生镓之前沉淀和收集该其他金属或其氧化物。在其中该其他金属或其氧化物是可溶的一个实施方式中,其可与镓一起电解以再生合金。在其中氧化镓比合金的其他金属的氧化物更稳定的实施方式中,仅需要通过手段诸如本发明中所给出的手段从氧化镓再生镓,其中任何未氧化的合金金属可作为还包含氧化镓的混合物的未氧化镓部分的一部分进行处置。与镓形成合金并且具有氧化物(与镓发生反应而形成氧化镓和相应的金属)的示例性金属是Ni、Co、Cu、Fe、Ag、W和Mo。相比之下,Nb、Ta和Zr的示例性氧化物比氧化镓更稳定。

[0675] 在一个实施方式中,**SunCell®**包括分子氢解离器。该解离器可容纳于反应池腔室中或容纳于与反应池腔室气体连通的单独腔室中。单独的壳体可防止解离器由于暴露于诸如镓之类的熔融金属而失效。解离器可包含解离材料,诸如负载型Pt,诸如氧化铝珠粒上的Pt或者本发明或本领域已知的另一者。作为另一种选择,解离器可包括热丝或等离子体放电电源,诸如辉光放电、微波等离子体、等离子体炬、电感或电容耦合的RF放电、介质阻挡放电、压电直接放电、声学放电或本发明或本领域已知的另一放电。该热丝可由动力源以电

阻方式加热,该动力源使电流流过穿透反应池腔室壁的电隔离的馈通件并然后通过该丝。

[0676] 在另一个实施方式中,可增加点燃电流以增加氢解离速率和等离子体离子-电子复合速率中的至少一者。在一个实施方式中,点燃波形可包括DC偏移(诸如在约1V至100V的电压范围内的DC偏移)以及在约1V至100V的范围内的叠加AC电压。DC电压可充分地增加AC电压以在分数氢反应混合物中形成等离子体,并且AC分量可在存在等离子体的情况下包含高电流诸如在约100A至100,000A的范围内。具有AC调制的DC电流可致使点燃电流以相应的AC频率(诸如在约1Hz至1MHz、1Hz至1kHz和1Hz至100Hz的至少一个范围内的AC频率)产生脉冲。在一个实施方式中,增加EM泵送以减少电阻并增加电流和点燃功率的稳定性。

[0677] 在一个实施方式中,可借助于微中空阴极放电来维持高压辉光放电。微中空阴极放电可保持在开口直径大致100微米两个紧密间隔的电极之间。示例性直流放电可维持至多约大气压。在一个实施方式中,高压下的大体积等离子体可通过叠加平行操作的独立辉光放电来维持。等离子体的电子密度可在给定电流下通过添加具有低电离电势的物质诸如金属(诸如铯)来增加。电子密度也可通过添加物质诸如从其热发射电子的丝状材料(诸如铯金属和其他电子枪热电子发射器中的至少一者,诸如含钍金属或铯处理的金属)来增加。在一个实施方式中,使等离子体电压升高使得等离子体电流的每电子通过与至少一个气体物质碰撞而产生多个电子。等离子体电流可为DC或AC中的至少一者。

[0678] 在一个实施方式中,通过供应比 H_2O 或 H_2 更容易解离的氢源而增加原子氢浓度。示例性的源是每个H原子具有较低焓和较低形成自由能中的至少一者的那些源,诸如甲烷、烃、甲醇、乙醇、包含H的另一有机分子。

[0679] 在一个实施方式中,解离器可包括电极8,诸如图25中所示的电极8。电极8可包括解离器,该解离器能够在高温(诸如高达3200℃的高温)下操作并且可还包含抵抗与诸如镓之类的熔融金属形成合金的材料。示例性的电极包含W和Ta中的至少一者。在一个实施方式中,汇流条10可包括附接的解离器,诸如叶片解离器,诸如平板。可通过沿着汇流条10的轴固定边缘的面而附接该板。该叶片可包括桨轮模式。叶片可通过从汇流条10的热传导而加热,汇流条10可通过以下中的至少一者来加热:点燃电流以电阻方式加热以及分数氢反应加热。诸如叶片之类的解离器可包含难熔金属,诸如Hf、Ta、W、Nb或Ti。

[0680] 在一个实施方式中,SunCell®包括大致单色光(例如,具有小于50nm或小于25nm或小于10nm或小于5nm的频谱带宽的光)的源和用于该大致单色光的窗。该光可入射于氢气(诸如反应池腔室中的氢气)上。 H_2 的基本振动频率是 4161cm^{-1} 。可能的多个频率中的至少一个频率可大致与 H_2 的振动能共振。大致共振的辐射可由 H_2 吸收以引起选择性的 H_2 键解离。在另一个实施方式中,光的频率可大致与以下各项中的至少一者共振:(i) H_2O 的OH键的振动能,诸如 3756cm^{-1} ,以及本领域技术人员已知的其他者,诸如由Lemus[R. Lemus, "Vibrational excitations in H_2O in the framework of a local model," J. Mol. Spectrosc., 第225卷, (2004), 第73-92页]给出的那些,将该文献以引用方式并入,(ii) 氢键合的 H_2O 分子之间的氢键的振动能,和(iii) 氢键合的 H_2O 分子之间的氢键能,其中光的吸收致使 H_2O 二聚物和其他 H_2O 多聚体解离成新生水分子。在一个实施方式中,分数氢反应气体混合物可包含额外的气体,诸如来自源的氨,该源能够与 H_2O 分子进行H键合以通过与水二聚物H键合竞争而增加新生HOH的浓度。新生HOH可充当分数氢催化剂。

[0681] 在一个实施方式中,分数氢反应形成来自功率、热力、等离子体、光、压力、电磁脉

冲和震波的群组的至少一个反应特征。在一个实施方式中, SunCell® 包括至少一个传感器和至少一个控制系统以监测所述反应特征并控制诸如反应混合物组成之类的反应参数以及诸如压力和温度之类的条件以控制分数氢反应速率。反应混合物可包含以下各项中的至少一者或以下各项的源: H_2O 、 H_2 、 O_2 、稀有气体(诸如氩)和 GaX_3 (X =卤离子)。在一个示例性实施方式中, 感测电磁脉冲(EMP)的强度和频率, 并且控制反应参数以增加EMP的强度和频率从而增加反应速率, 反之亦然。在另一个示例性实施方式中, 感测震波频率、强度和传播速度(诸如两个声探头之间的那些)中的至少一者, 并且控制该反应参数以增加震波频率、强度和传播速度中的至少一者从而增加反应速率, 反之亦然。

[0682] H_2O 可与诸如镓之类的熔融金属反应以形成 H_2 (g) 以及诸如 Ga_2O_3 和 Ga_2O 之类的相应氧化物、诸如 GaO (OH) 之类的羟基氧化物以及诸如 Ga (OH)₃ 之类的氢氧化物中的至少一者。可控制镓温度以控制与 H_2O 的反应。在一个示例性实施方式中, 可使镓温度维持低于 100°C 以实现以下各项中的至少一者: 防止 H_2O 与镓反应; 以及致使以缓慢动力学发生 H_2O -镓反应。

[0683] 在另一个示例性实施方式中, 可使镓温度维持高于约 100°C 以致使以快速动力学发生 H_2O -镓反应。 H_2O 与镓在反应池腔室 5b31 中的反应可有利于形成至少一种分数氢反应物诸如 H 或 HOH 催化剂。在一个实施方式中, 水可注入反应池腔室 5b31 中并且可与可维持在高于 100°C 的温度的镓发生反应以实现以下各项中的至少一者: (i) 形成 H_2 以用作 H 源, (ii) 致使 H_2O 二聚物形成 HOH 单体或新生 HOH 以充当催化剂, 以及 (iii) 减少水蒸气压力。

[0684] 在一个实施方式中, GaOOH 可充当固体燃料分数氢反应物以形成 HOH 催化剂和 H (充当形成分数氢的反应物) 中的至少一者。在一个实施方式中, 诸如 Ga_2O_3 或 Ga_2O 之类的氧化物、诸如 Ga (OH)₃ 之类的氢氧化物和诸如 GaOOH 、 AlOOH 或 FeOOH 之类的羟基氧化物中的至少一者可充当用以结合诸如 H_2 (1/4) 之类的分数氢的基质。在一个实施方式中, 将 GaOOH 和金属氧化物(诸如不锈钢和不锈钢-镓合金的那些)中的至少一者添加至反应池腔室以充当用于分数氢的吸气剂。可将吸气剂加热至高温(诸如在约 100°C 至 1200°C 的范围内的高温)以释放诸如 H_2 (1/4) 之类的分子分数氢气体。

[0685] 可将通过熔融镓与水和氧中的至少一者反应而形成于反应池腔室中的氧化镓还原为镓金属。可通过使氧化镓与分子氢和原子氢中的至少一者反应而实现还原。可以诸如 O_2 或 H_2O 之类的形式移除氧。氧化镓可在反应池腔室 5b31 中还原, 并且可从反应池腔室移出包含氧的 Ga_2O_3 还原反应产物。作为另一种选择, 可从反应池腔室移出 Ga_2O_3 并在外部还原, 其中镓金属返回至反应池腔室 5b31。氧化镓(熔点 = 1900°C)可在高温(诸如高于其熔点的高温)下分解。可通过诸如真空泵之类的部件从反应池腔室抽空所释放氧。在一个实施方式中, 可使储罐的表面维持高于氧化镓的分解温度。熔融金属上的镓和氧化镓表面可充当正电极以利于高温的维持。可选择熔融金属的表面积以使等离子体充分地集中以实现所需表面温度从而引起氧化镓的分解。在一个实施方式中, 表面积可以是可调整的。调整部件可包括可移动的池壁。在一个实施方式中, 可使池压力维持为低(诸如在 0.01 托至 50 托的范围内)以允许由分数氢反应产生的高能量光分解氧化镓。在一个实施方式中, Ga_2O_3 与镓反应以形成可热分解的 Ga_2O 。反应温度可以是约 700°C , 因此可使镓表面温度维持在大于 700°C 的温度。另外, 可使反应池腔室、储罐和基座(其中可存在 Ga_2O)中的至少一者的温度维持高于 500°C , 这是因 Ga_2O 可在 500°C 下开始分解。

[0686] 可将诸如氢气之类的还原剂添加至反应池腔室以利于氧化镓诸如 Ga_2O_3 和 Ga_2O 中

的至少一者的还原和分解中的至少一者。氢还原反应温度可以是约700℃,因此可使镓表面温度维持在大于700℃的温度。在另一个实施方式中,可使反应池腔室、储罐和基座(其中可存在Ga₂O)中的至少一者的温度维持低于约600℃,这是因为低于约600℃时Ga₂O可经历氢还原,而不是经历Ga₂O→Ga+Ga₂O₃的反应。在一个实施方式中,汇流条10和电极8中的至少一者可包括解离器,诸如Ta或W。基座2c1(图25)可缩短以部分地暴露汇流条以利于原子氢的产生从而还原氧化镓。在一个实施方式中,汇流条10可包括附接的解离器,诸如叶片解离器,诸如平面板。可通过沿着汇流条10的轴固定边缘的面而附接该板。该叶片可包括桨轮模式。叶片可通过从汇流条10的热传导而加热,汇流条10可通过以下中的至少一者来加热:点燃电流以电阻方式加热以及分数氢反应加热。诸如叶片之类的解离器可包含难熔金属,诸如Hf、Ta、W、Nb或Ti。除氢之外,还可添加稀有气体。稀有气体和氢的摩尔百分比可以是任何所需的比率。示例性的气体混合物包含在约80至99摩尔百分比的范围内的氩和在约1至20摩尔百分比的范围内的氢。可使反应池腔室的压力维持为低以利于氧化镓的分解。在另一个实施方式中,可使氢压力维持为高以有利于氧化镓的氢还原。可将物质的另一物种、化合物、元素或组合物诸如碱(诸如NaOH)添加至反应池腔室以与氧化镓形成产物(诸如镓酸钠)以增加氧化镓的热分解和还原中的至少一者的速率。

[0687] 在另一个实施方式中,反应池腔室中的反应混合物包含熔融金属添加剂(诸如材料或化合物,诸如无机化合物,诸如碱金属卤化物,诸如NaCl)以对抗氧化使镓稳定化。在另一个实施方式中,该熔融金属添加剂包含金属,诸如与熔融金属形成合金以对抗氧化而使其稳定化的金属。在包含熔融金属镓的示例性实施方式中,将银添加至镓以增强氧化镓薄膜的热分解以及热还原、氢还原和电解还原中的至少一者。在一个示例性实施方式中,将约5.6重量%银添加至镓以形成在约30℃至40℃下熔融的合金。镓-Ag可抑制镓氧化。

[0688] 在一个实施方式中,将卤化物(诸如添加剂)源,诸如HCl、金属卤化物、13、14、15或16族卤化物或卤素气体添加至反应混合物以与氧化镓形成反应产物,诸如挥发性产物,其可通过蒸发和凝结而从反应池腔室移除。添加剂的产物可包含卤化镓,诸如GaCl₃(熔点=77.9℃,沸点=201℃)。该卤化镓在SunCell®工作温度和压力下可以是挥发性的。可使诸如卤化镓之类的挥发性产物中的至少一者流入冷凝器中并使其凝结。可通过诸如电解之类的手段再生镓金属。在一个实施方式中,添加剂与氧化镓形成至少一种产物,可通过诸如挥发之类的手段并且通过用以移除氧化镓的本公开的部件(诸如包括撇渣器的部件)而从反应池腔室移除该产物。本公开的固体燃料和本领域已知的其他固体燃料的反应还包括用以移除通过镓与所添加的氧中的至少一者反应而形成的反应池腔室的氧化物存量的反应。

[0689] 在一个示例性实施方式中,包含卤化物源的添加剂是ZnCl₂,其与所注入的水反应以形成无水HCl和氢氧化锌或氧化锌。HCl和ZnCl₂中的至少一者可与Ga₂O₃反应以形成GaCl₃(熔点=77.9℃,沸点=201℃)。可通过用以移除氧化镓的本公开的手段选择性地从池移除锌产物。可从池排放GaCl₃并使GaCl₃凝结。然后可使该GaCl₃与水反应以形成HCl以及Ga(OH)Cl、GaO(OH)、Ga(OH)₃和Ga₂O₃中的至少一者。可通过蒸馏或蒸发将HCl与水分离,并且可在碱性水溶液中(诸如在NaOH电解质中)将包括镓和氧的产物电解为镓金属。可回收该镓金属。可使HCl与氧化锌和氢氧化锌中的至少一者反应以形成可回收的氯化锌。

[0690] 在另一个示例性实施方式中,FeCl₂是与所注入的水和O₂反应而形成HCl和Fe₂O₃的添加剂。HCl和FeCl₂中的至少一者可与Ga₂O₃反应以形成GaCl₃。可通过用以移除氧化镓的本

公开的手段从池选择性地移除 Fe_2O_3 。可从池排放 GaCl_3 并使 GaCl_3 凝结。然后可使该 GaCl_3 与水反应以形成 HCl 以及 $\text{Ga}(\text{OH})\text{Cl}$ 、 $\text{GaO}(\text{OH})$ 、 $\text{Ga}(\text{OH})_3$ 和 Ga_2O_3 中的至少一者。可通过蒸馏或蒸发将 HCl 与水分离,并且可在碱性水溶液中(诸如在 NaOH 电解质中)将包括镓和氧的产物电解为镓金属。可回收该镓金属。可使 HCl 与 Fe_2O_3 反应以形成可回收的 FeCl_2 。

[0691] 在另一个示例性实施方式中,磺酰氯(SO_2Cl_2)是与所注入的水反应而形成 HCl 和 SO_3 的添加剂。 HCl 和 SO_2Cl_2 中的至少一者可与 Ga_2O_3 反应以形成 GaCl_3 。可从池排放 GaCl_3 和 SO_3 两者并选择性地使 GaCl_3 和 SO_3 两者凝结。可通过将 GaCl_3 熔体电解为 Ga 和 Cl_2 而从 GaCl_3 再生镓。可通过将 SO_3 分解为 SO_2 接着使 SO_2 与 Cl_2 反应为 SO_2Cl_2 而从 SO_3 再生 SO_2Cl_2 。还可通过本领域已知的其他方法再生 Ga 和 SO_2Cl_2 。

[0692] 在另一个示例性实施方式中,卤化物添加剂可包含磷而非硫,其中 PX_3 或 PX_5 (X 为卤离子)诸如 PCl_3 或 PCl_5 与所注入的水反应以形成 HCl 和 PO_2 。 HCl 和 PCl_3 或 PCl_5 中的至少一者与 Ga_2O_3 反应以形成 GaCl_3 。可从池排放 GaCl_3 和 PO_2 两者并选择性地使 GaCl_3 和 PO_2 两者凝结。可通过将 GaCl_3 熔体电解为 Ga 和 Cl_2 而从 GaCl_3 再生镓。可通过还原 PO_2 接着使 P_4 与 Cl_2 反应为 PCl_3 或 PCl_5 而从 PO_2 再生 PCl_3 或 PCl_5 。

[0693] 在 HCl 添加的情形中,使 HCl 与氧化镓薄膜选择性地反应。**SunCell®**可包括诸如耐腐蚀调向喷嘴(诸如氧化铝喷嘴)之类的部件以将 HCl 选择性地施加至氧化镓薄膜。可在 HCl 与氧化镓薄膜和镓上的任何涂层反应期间终止熔融金属注射器以使镓与 HCl 的反应最少。 HCl 可与氧化镓反应以形成挥发性 GaCl_3 和 H_2O 。可从反应池腔室排放 GaCl_3 。可原位回收 H_2O 。所排放的任何 H_2O 可由 H_2O 源(诸如液体水)或来自 H_2 气体源和 O_2 气体源的 H_2 和 O_2 气体替换。卤化镓产物可凝结并可溶解于水中以形成 HCl 、 $\text{Ga}(\text{OH})\text{Cl}$ 、 $\text{GaO}(\text{OH})$ 、 $\text{Ga}(\text{OH})_3$ 和 Ga_2O_3 中的至少一者。可进一步通过阳极处的电解产生 HCl 。在一个实施方式中,可通过在水电解期间使用析氧催化剂(诸如 $\text{Mn}_{0.84}\text{Mo}_{0.16}\text{O}_{2.23}$ 析氧电极)对包含水性氯离子的溶液进行水电解而在阳极形成 HCl ,如Lin等人[“Direct anodic hydrochloric acid and cathodic caustic production during water electrolysis”,Scientific reports, (2016) ;6:20494,doi:10.1038/srep20494]所述,将该文献以引用的方式并入。可将 HCl 作为气体移除。可通过 $\text{Ga}(\text{OH})\text{Cl}$ 、 $\text{GaO}(\text{OH})$ 、 $\text{Ga}(\text{OH})_3$ 和 Ga_2O_3 中的至少一者的电解在电解池的阴极产生镓金属,其中电解质可包含 NaOH 。可回收再生的产物诸如 Ga 、金属卤化物和 HCl 。

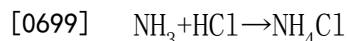
[0694] 在一个实施方式中,卤化物源包含化合物,该化合物包含卤化物以及是以下情况中的至少一者的物质:包括 H^+ 源;以及在反应池腔室的工作温度下与氧化镓反应而形成卤化镓(其可蒸发)和气体。卤化物源可包含卤化铵盐,诸如通过使铵化合物(诸如胺或氨)与卤化氢(诸如 HCl)反应而形成的卤化铵盐。在一个实施方式中,将 Ga_2O_3 作为 GaCl_3 移除、再生 Ga 以及回收 Ga 的方法包括 NH_4Cl 循环。在一个示例性实施方式中,可使氨与 HCl 反应以形成 NH_4Cl 。氧化镓可与卤化物源(诸如 NH_4Cl)反应以形成卤化镓(诸如 GaCl_3),其可通过蒸发而从反应池腔室移除。可使诸如 GaCl_3 之类的卤化镓选择性地凝结于冷凝器(诸如在通往真空泵的管线中的冷凝器,诸如冷阱)中。根据示例性的反应,可通过熔体的直接电解将所凝结的 GaCl_3 转化为镓:

[0695] 2GaCl_3 (熔融) 电解为 $2\text{Ga}\downarrow$ (阴极) + $3\text{Cl}_2\uparrow$ (阳极)

[0696] 可使用UV光辐射或通过 Cl_2 与 H_2 在 HCl 炉中反应而使氯气与 H_2 反应:

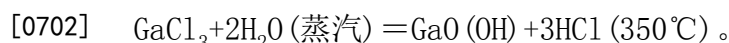
[0697] $\text{Cl}_2 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{HCl}$

[0698] 可使氨与HCl反应以形成氯化铵



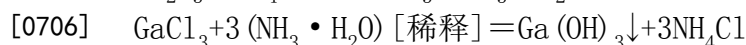
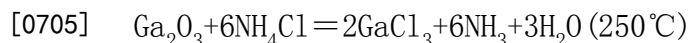
[0700] 在另一个实施方式中,可将HCl而非 NH_4Cl 直接添加至反应池腔室中的镓的表面上的氧化镓。可使 NH_4Cl 的递送位点维持在大于 GaCl_3 的沸点(在STP下沸点=201℃)并且低于 NH_4Cl 的分解温度(338℃)的温度范围内。作为另一种选择,可使反应池腔室维持在大于 NH_4Cl 的分解温度的温度,其中所释放的HCl可与氧化镓反应。

[0701] 根据示例性的反应,添加HCl以形成 GaCl_3 的备选回收路径是将 GaCl_3 添加至水以释放HCl:

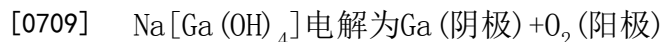
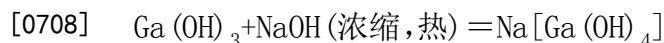


[0703] 可析出HCl气体并回收,并且可在诸如NaOH溶液之类的碱水溶液中电解羟基氧化镓。在一个实施方式中,可通过在水电解期间使用析氧催化剂(诸如 $\text{Mn}_{0.84}\text{Mo}_{0.16}\text{O}_{2.23}$ 析氧电极)对包含水性氯离子的溶液进行水电解而在阳极形成HCl,如Lin等人[“Direct anodic hydrochloric acid and cathodic caustic production during water electrolysis”, Scientific reports, (2016); 6:20494, doi:10.1038/srep20494]所述,将该文献以引用的方式并入。

[0704] 作为另一种选择,通过示例性的反应,可使通过氧化镓与氯化铵反应而形成的卤化镓(诸如 GaCl_3)和氨中的至少一者与水反应以形成羟基氧化镓或氢氧化镓:



[0707] 可通过诸如滗析出水性液体或过滤并收集固体之类的手段而将 $\text{Ga}(\text{OH})_3$ 沉淀物与氢氧化镓和氯化铵的混合物分开。可将分离的氢氧化镓溶解于碱水溶液(诸如NaOH水溶液)中并电解以在阳极释放氧且在阴极沉积镓金属。可回收该镓金属。示例性的反应是



[0710] 可通过蒸发来使在分离氢氧化镓后留下的 NH_4Cl 浓缩,让其在合适的条件(诸如降低的温度,诸如接近0℃的温度)下结晶,并通过过滤收集,或者可在水溶剂蒸发之后收集 NH_4Cl 。可回收 NH_4Cl 。可在避免 NH_4Cl 在其接触氧化镓之前在约337.6℃下分解的温度和注入速度的条件下将其添加至反应池腔室。可以连续工艺或分批工艺执行这些反应的 NH_4Cl 循环。

[0711] 来自HCl源的HCl可以是无水的。HCl可在递送进反应池腔室中之后保持为无水的,其中反应池腔室中的任何水存量可以是气态水。在一个实施方式中, SunCell® 包括抵抗与镓形成合金和与HCl、盐酸或 NH_4Cl 发生反应中的至少一者的组件。在一个示例性实施方式中,倒置的电极可包含钽,并且反应池腔室可包含不锈钢、镍、镍合金、铅、钽和镍钽合金(诸如B-2和B-3®)中的至少一者。作为另一种选择,反应池腔室可包括石英、陶瓷衬里或者涂覆有陶瓷涂层,诸如氧化铝、莫来石或硅石。在一个实施方式中,HCl气体储槽、阀、管线、压力调节器和反应池腔室中的至少一者可涂覆有本领域已知的耐HCl腐蚀性涂层,诸如SilcoNert®。示例性的耐HCl金属是蒙乃尔合金,诸如蒙乃尔400。

[0712] 在一个实施方式中, SunCell® 包括可变传热夹套。可调整该可变绝缘材料以允许反应池腔室5b31在所需温度诸如允许以下各项中的一者或多者的所需温度下操作:(i)分

解可形成的任何氧化镓,诸如 Ga_2O_3 或 Ga_2O , (ii) 通过与镓反应将 Ga_2O_3 转化为 Ga_2O ,以及 (iii) 通过氢还原氧化镓。包括可变传热夹套的 **SunCell®** 可通过热交换器诸如水浴 (**SunCell®** 沉没于其中) 冷却。热可变传热夹套可包括介于热交换器与反应池腔室的外侧之间的至少一个腔室,其可以实现真空。可变传热夹套可包括泵送系统以可逆地且可控制地将热传递冷却剂 (诸如气体或流体冷却剂) 添加至该腔室。该泵送系统可包括冷却剂源,诸如储槽、泵和控制器。该泵送系统可响应于反应池腔室温度而增加或减少冷却剂的量以通过控制相应的热传递而将其控制在所需的范围内。冷却剂可包含稀有气体 (诸如氦)、熔融盐 (诸如本公开的熔融盐) 和熔融金属 (诸如镓) 中的至少一者。

[0713] 在一备选的实施方式中, **SunCell®** 包括冷却剂流热交换器 (包括泵送系统), 借此通过流动冷却剂使反应池腔室冷却, 其中可使流量变化以控制反应池腔室在所需的温度范围内操作。热交换器可包括具有通道的板, 诸如微通道板。在一个实施方式中, **SunCell®** 包括池, 该池包括反应池腔室 531、储罐 5c、基座 5c1 和与分数氢反应等离子体接触的所有组件, 其中一个或多个组件可包括池区带。在一个实施方式中, 热交换器 (诸如包含流动冷却剂的热交换器) 可包括组织于池区带中的多个热交换器以将相应的池区带维持在独立的所需温度。

[0714] 在一个实施方式 (诸如图30中所示的实施方式) 中, **SunCell®** 包括固定在反应池腔室 5b31 的内侧上处于熔融镓液位处的热绝缘材料或衬里 5b31a 以防止热镓直接接触腔室壁。该热绝缘材料可包含热绝缘体、电绝缘体和抵抗被诸如镓之类的熔融金属润湿的材料中的至少一者。绝缘材料可实现以下各项中的至少一者: 允许镓的表面温度增加; 以及减少反应池腔室的壁上的可使壁熔融的局部热点的形成。另外, 氢解离器 (诸如本公开的氢解离器) 可包覆于衬里的表面上。在另一个实施方式中, 存在以下情形中的至少一者: 增加壁厚度; 以及热扩散器诸如铜块包覆于壁的外部表面上以分散壁内的热力以防止局部壁熔融。较高温度可有利于以下各项中的至少一者: (i) Ga_2O_3 或 Ga_2O 的热分解, (ii) Ga 与 Ga_2O_3 反应以形成 Ga_2O , (iii) Ga_2O_3 和 Ga_2O 中的至少一者的氢还原, 以及归因于 Ga_2O 的挥发性的蒸发和蒸馏中的至少一者。热绝缘材料可包含陶瓷, 诸如 BN、SiC、碳、莫来石、石英、熔融硅石、氧化铝、氧化锆、氧化钪、本公开的其他者和本领域技术人员已知的材料。可选择绝缘材料的厚度以实现熔融金属和氧化镓表面涂层的所需面积, 其中较小面积可通过分数氢反应等离子体的浓缩而增加温度。由于较小面积可降低电子-离子复合速率, 因此该面积可经优化以有利于氧化镓薄膜的消除同时优化分数氢反应功率。在包括矩形反应池腔室的一个示例性实施方式中, 将矩形 BN 块螺栓连接至带螺纹螺柱上, 该带螺纹螺柱在熔融镓的表面的液位处焊接至反应池腔室的内侧壁。BN 块在此位置处在反应池腔室的内侧上形成连续凸起表面。

[0715] 在一个实施方式中, 分数氢反应等离子体在反应池腔室内以大致对称的分布维持。该对称分布可避免在反应池腔室壁上形成局部热点。可通过所注入的熔融金属沿着具有圆柱对称性的元件的反应池腔室的中心对称轴笔直对准来实现对称的等离子体分布。相应的点燃电流对准可导致所需箍缩类型磁场而不具有扭结, 由于不平衡的洛伦兹力扭结会导致等离子体不稳定性。

[0716] 由于镓上的氧化物涂层等离子体可优先接触反应腔室壁而不是熔融镓表面。壁的位置可由增加电阻的氧化物涂层的厚度确定。在一个实施方式中, 通过至少一种手段诸如机械磨削 (诸如珠光处理和丝刷清理) 以及通过化学蚀刻 (诸如弱酸蚀刻) 来移除壁上的氧

化物涂层。在另一个实施方式中,储罐可包括至少一个电引线,诸如穿透储罐上的底部的底板并延伸至熔融金属液位上方的电引线。该电引线可连接至点燃电流源。该电引线可包括点燃电流的备选路径,该替代路径除了去往注射器的点燃电流以外还包括第二电流。该第二电流可通过提供第二电路中的至少一者和通过提供由第二电流产生的磁场而维持反应池腔室中对称的等离子体分布。在一个实施方式中,反应池腔室包括至少一个电流连接件,该至少一个电流连接件可具有将反应池腔室连接至接地和点燃动力供应器中的至少一者的相应开关。该开关可闭合以致使点燃电流至少部分地流过该电流连接件,其中电流流过反应池腔室壁(开关连接于此处)。该电流流动可致使等离子体至少部分地被引导至电流流动的区域。该至少一个电流连接件的开关可由控制器控制以维持对称的等离子体分布。该控制器可接收来自至少一个等离子体分布传感器(诸如至少一个热电偶)的输入。在另一个实施方式中,反应池腔室可包括额外的反应混合物入口端口以平衡燃料注入并在反应池腔室中实现对称的等离子体分布。

[0717] 在一个实施方式(图25和图30)中, **SunCell®**包括在储罐5c的底部穿过EM泵的底板的汇流条5k2a1。该汇流条可连接至点燃电流动力供应器。该汇流条可延伸至熔融金属液位上方。除诸如镓之类的熔融金属之外,该汇流条还可充当正电极。熔融金属可使汇流条散热以使其冷却。在熔融金属包含镓的情形中该汇流条可包含不与熔融金属形成合金的难熔金属诸如W或Ta。从镓表面突出的汇流条(诸如W杆)可使等离子体集中在镓表面。注射器喷嘴(诸如包含W的注射器喷嘴)可浸没于储罐中的熔融金属中以保护其免受热损坏。

[0718] 在一个实施方式(图25),诸如其中熔融金属充当电极的实施方式中,可使充当熔融电极的横截面面积最小以增加电流密度。熔融金属电极可包括注射器电极。注入喷嘴可以是浸没的。熔融金属电极可以是正极性。熔融金属电极的面积可以大致为对电极的面积。可使熔融金属表面的面积最小以充当具有高电流密度的电极。该面积可在约 1cm^2 至 100cm^2 、 1cm^2 至 50cm^2 和 1cm^2 至 20cm^2 中的至少一个范围内。反应池腔室和储罐中的至少一者可渐缩至熔融金属液位处的较小横截面面积。反应池腔室和储罐中的至少一者的至少一部分可在熔融金属的液位处包含难熔材料,诸如钨、钽或陶瓷(诸如BN)。在一个示例性实施方式中,可使反应池腔室和储罐中的至少一者在熔融金属液位处的面积最小以充当具有高电流密度的正电极。在一个示例性实施方式中,反应池腔室可以是圆柱形的并且还可包括通往储罐的减径管、锥形区段或过渡区,其中诸如镓之类的熔融金属将储罐填充至一定液位,使得相应熔融金属表面处的镓横截面面积是小的以集中电流并增加电流密度。在一个示例性实施方式(图31)中,反应池腔室和储罐中的至少一者可包括沙漏形状或双曲面体的一块片材,其中熔融金属液位在约最小横截面面积的水平处。该区可包含难熔材料或包括难熔材料(诸如碳)、难熔金属(诸如W或Ta)或陶瓷(诸如BN、SiC或石英)的衬里5b31a。在示例性实施方式中,反应池腔室可包含不锈钢诸如347SS并且衬里可包含W或BN。

[0719] 在一个实施方式中, **SunCell®**包括可逆绝缘材料(诸如多个热绝缘颗粒,诸如珠粒,诸如氧化铝珠粒)和绝缘体容器或壳体,其中颗粒处于容器中,该容器在待热绝缘的**SunCell®**组件(诸如反应池腔室和储罐中的至少一者)的周缘。该容器可包括入口和出口端口以分别用于填充和清空珠粒容器,并且还可包括用以将珠粒运进和运出容器的部件,诸如机械输送机,诸如螺旋钻。在一个实施方式中,珠粒可通过重力而从容器流出。

[0720] 在一个实施方式中,间断地充分增加点燃电流和电压中的至少一者持续足够的时间

间以引起以下各项中的至少一者：(i) 分解可形成于反应池腔室或储罐中的任何氧化镓，诸如 Ga_2O_3 或 Ga_2O ，(ii) 通过与镓反应而将 Ga_2O_3 转化为 Ga_2O ，以及(iii) 通过氢还原氧化镓。氧化镓薄膜可包含镓金属和氧化镓颗粒的混合物，其中形成混合物薄膜，因氧化镓被镓金属润湿并且氧化镓不如镓致密。由于氧化镓是电绝缘体而镓金属是电导体，因此该薄膜的电阻随着氧化镓含量增加而增加，其中迫使点燃电流穿过面积减小和长度增加的镓通道。间断的脉冲点燃电流可选择性地将这些高电阻金属镓通道的镓加热以致使镓和混入的氧化镓被加热。点燃电流和电压中的至少一者的间断增加可包括所施加的功率的脉冲。点燃功率的间断脉冲的占空比可在约1%至99%、1%至75%、1%至50%、1%至25%和1%至10%中的至少一者的范围内。可使电压增加至约1000V、100V、75V和50V中的至少一者，或增加至预增加电压的约10倍、5倍、2倍、1.5倍或1.25倍。可使电流增加至约100kA、50kA、10kA、5kA、1kA和500A中的至少一者，或增加至预增加安培的约10倍、5倍、2倍、1.5倍或1.25倍。在一个实施方式中，分数氢反应在点燃电极对中的正电极处是有利的，使得通过分数氢反应的加热选择性地发生在正电极处。构成氧化镓薄膜的镓可经正偏压以通过分数氢反应选择性地加热氧化镓薄膜。在一个实施方式中，SunCell®的阴极和阳极包括基座电极（诸如倒置基座5c2）和相对的注射器喷嘴5q，诸如图25中所示的各者。倒置电极（诸如包含钨的倒置电极）可包括被分数氢反应选择性地加热至非常高的温度（诸如在约1000°C至3000°C的温度范围内）的正电极，并且经加热的电极将氧化镓薄膜加热。可通过AC点燃电力源使电极的极性交替以避免对倒置电极的过度加热，由此防止其熔融。倒置电极对膜的加热可通过减小其与镓表面的间距而增加。反应池腔室可包括陶瓷衬里5b31a（诸如BN、石英或熔融硅石衬里）以将分数氢反应等离子体聚焦于电极上。加热可有利于以下各项中的至少一者：(i) 分解可形成于反应池腔室或储罐中的任何氧化镓，诸如 Ga_2O_3 或 Ga_2O ，(ii) 通过与镓反应将 Ga_2O_3 转化为 Ga_2O ，以及(iii) 通过氢还原氧化镓。

[0721] 在一个实施方式中，SunCell®包括用以将氧化镓转化为镓的镓再生系统，该镓再生系统包括电解系统，该电解系统包括阴极、阳极、动力供应器（诸如DC动力供应器）以及包含氧化镓的电解质，其直接在储罐和反应池腔室的熔融金属中的至少一者的表面处将氧化镓或包含氧化镓的物质（诸如镓酸钠）电解为镓金属。电解质可包含熔融氧化镓，其中离子包含镓和氧化物离子。电解质可包含氧化物，诸如是以下情形中的至少一者的氧化物：(i) 在SunCell®操作条件下稳定，诸如氧化铝或碱金属或碱土金属氧化物，(ii) 形成具有低于单独氧化镓的熔点的混合物，以及(iii) 比氧化镓更热力学稳定，使得可选择性地使熔融薄膜的氧化物和镓离子电解为镓金属和氧气，其中该熔融盐混合物构成电解质。电解质可包含离子源，诸如碱（诸如NaOH，诸如熔融NaOH、 Na_2O 、LiOH或 Li_2O ）、金属卤化物（诸如碱金属卤化物，诸如在镓的表面上的NaF或CsF电解质）或本领域已知的另一稳定的电解质。电解质可包含盐的混合物，该盐可降低作为混合物的氧化镓的熔点。电解质可包含溶解于盐或盐混合物中的氧化镓，诸如包含镓、铝和卤化物（诸如NaF、LiF、KF、CsF、NaI（熔点=661°C）、卤化物盐混合物、 AlF_3 、冰晶石（ Na_3AlF_6 ）或 Na_3GaF_6 ）中的至少一者的盐或盐混合物。溶剂盐（诸如碱金属卤化物，诸如NaI）对于反应池混合物中的镓和 H_2O 可以是热力学稳定的。溶解 Ga_2O_3 并且充当将氧化镓以电解方式还原为镓的电解质的电解质可包含氧化物、氢氧化物、卤化物和混合物（诸如NaOH-NaCl）中的至少一者。电解质可包含盐或盐混合物，诸如溶解氧化镓并对于氧化镓稳定的低共熔盐混合物。示例性的低共熔混合物是(i) 三元低共熔金属氟化物

混合物LiF-NaF-KF,诸如比率为46.5-11.5-42摩尔%的FLiNaK,其具有454℃的熔点和1570℃的沸点,(ii)比率为57.5-13.3-29.2摩尔%的三元低共熔金属氯化物混合物LiCl-KCl-CsCl,其具有265℃的熔点,(iii)NaI/(CsI+NaI)的摩尔比=0.484的CsI-NaI,其具有420℃的熔点,(iv)LiI/(KI+LiI)的摩尔比=0.635的KI-LiI,其具有283℃的熔点,以及(v)LiI/(CsI+LiI)的摩尔比=0.657的CsI-LiI,其具有209℃的熔点。包含氟离子的另外的示例性电解质盐为2LiF-BeF₂、LiF-BeF₂-ZrF₄ (64.5-30.5-5)、NaF-BeF₂ (57-43)、LiF-NaF-BeF₂ (31-31-38)、LiF-ZrF₄ (51-49)、NaF-ZrF₄ (59.5-40.5)、LiF-NaF-ZrF₄ (26-37-37)、KF-ZrF₄ (58-42)、RbF-ZrF₄ (58-42)、LiF-KF (50-50)、LiF-RbF (44-56)、LiF-NaF-KF (46.5-11.5-42)和LiF-NaF-RbF (42-6-52)。在一个实施方式中,电解质摩尔数与氧化镓摩尔数的比率在约0.1至1000、0.5至100、0.5至50、0.75至10、0.75至5和0.75至2中的至少一个范围内。在一个示例性实施方式中,其中NaI为电解质并且Ga₂O₃的稳态摩尔数对应于产生3.44g Ga₂O₃ (MW=188)的1ml的H₂O或氧当量,NaI (MW=150) 电解质摩尔数与Ga₂O₃摩尔数的比率为1对应于添加至反应池腔室的2.74g的NaI。还原每1ml的H₂O或氧当量需要由180A的点燃电流提供的电解电流。

[0722] 在电解质的阴离子(诸如卤离子,诸如I⁻)相较于O²⁻在电解阳极被氧化的情形中,可选择该阴离子,比O²⁻对氧化更稳定。CsF(熔点=682℃)是具有F⁻作为稳定的卤素阴离子的示例性盐。在一个实施方式中,反应池腔室可包含分子氢和原子氢中的至少一者,其中由于该氧产物与分子氢和原子氢中的至少一者反应而形成水的反应使阳极处的O²⁻电解氧化在热力学上更有利。阳极反应可包括O²⁻+2H→H₂O+2e⁻。在电解质的阴离子(诸如卤离子,诸如I⁻)被氧化或者在升高的温度下发生反应的情形中,发生以下各项中的至少一者:可在低于阴离子反应或分解温度(诸如在碘化物的情形中小于约700℃)下操作反应池腔室;以及阴离子可选择为在升高温度下是稳定的。F⁻是示例性的更稳定的卤素阴离子。在其中通过诸如电解之类的手段通过点燃电流以及以热方式氧化阴离子的一个实施方式中,可通过卤素回收器回收所得的气体、液体或固体。该卤素回收器可包括冷凝器。该冷凝器可与真空系统的真空管线共线。真空系统还可包括真空管线入口的颗粒流动限制器(诸如一组挡板)以允许气体流动同时阻挡颗粒流动。在一个示例性实施方式中,卤离子为氧化为I₂(熔点=113.7℃,沸点=184.3℃)的I⁻,I₂凝结在冷凝器中并通过重力回流至反应池腔室中,或由运输机(诸如用于固态碘的输送机或用于液体碘的泵)主动地运输凝结的碘以接触熔融金属。在一个示例性实施方式中,可周期性地让反应池腔室冷却,使得碘可作为液体回流以接触熔融金属并与钠反应而再生NaI。

[0723] SunCell®可包括抵抗电解质(诸如包含至少一种碱金属卤化物诸如FLiNaK的电解质)腐蚀的组件,诸如反应池腔室。反应池腔室可包括衬里5b31a,诸如陶瓷衬里,诸如BN、石英、熔融硅石、MgO、HfO₂、ZrO₂、Al₂O₃。反应池腔室可包含耐腐蚀金属(诸如蒙乃尔金属,诸如蒙乃尔400)、耐腐蚀不锈钢(诸如Hastelloy N或Inconel)、碳复合材料、钼合金(诸如由0.5%钛和0.08%锆(其余为钼)构成的钛-锆-钼合金(TZM))、碳化物和基于难熔金属的或氧化物弥散强化合金(ODS)合金。在一个实施方式中,诸如镓之类的熔融金属润湿反应池腔室的壁,这与电解质的较低密度相结合可防止电解质与该壁接触以保护壁免受电解质腐蚀。

[0724] SunCell®可包括用于从反应池腔室或镓再生系统排放的卤素或卤化氢气体的阱。

包含碱(诸如NaOH)的示例性阱可与挥发性HF反应以形成被捕获的NaF。该阱可连接在真空泵之后。在一个实施方式中,氧化镓可转化为被电解的另一氧化物,诸如 Ga_2O_3 转化为被电解为Al的 Al_2O_3 ,其中电解质可包含冰晶石。示例性的迁移离子可包含氧化物、过氧化物、超氧化物、 OH^- 、碱金属离子(诸如 Na^+)、氢氧化物络合物(诸如 $\text{Ga}(\text{OH})_4^-$)和卤氧化合物络合物(诸如 $\text{GaF}(\text{OH})_3^-$ 或 $\text{GaFO}(\text{OH})^-$)中的至少一者。

[0725] 在一个实施方式中,其中以电解方式形成镓金属的阴极包括熔融金属表面。电解质可包括以下各项中的至少一者:(i)氧化镓,(ii)羟基氧化镓,(iii)氢氧化镓,(iv)氧化镓、羟基氧化镓和氢氧化镓中的至少一者以及至少一种所添加的离子源,诸如NaOH、KOH、金属卤化物和混合物,诸如氢氧化物-卤化物盐混合物,诸如NaOH-NaCl。阳极可包括在熔融金属表面上的氧化镓薄膜的表面上的导体。电解质可包含氢氧根离子导体,诸如镓酸钠,或其可包含镓酸钾,该镓酸钾可构成 K^+ 离子导体。在一个实施方式中,电解质可包含添加剂,该添加剂包含氧化物、氢氧化物和羟基氧化物中的至少一者。诸如氧化铝之类的添加剂氧化物可比氧化镓更稳定,其中该添加剂氧化物与氧化镓表面膜之间形成盐混合物,其中该混合物可具有比氧化镓低的熔点。该薄膜的氧化物和镓离子可选择性地电解为镓金属和氧气,其中该熔融盐混合物包含电解质。在一个实施方式中,**SunCell®**操作条件诸如反应池腔室温度、压力、电压、电流和水注入速率中的至少一者支持羟基氧化镓的形成,其中氢氧化物可充当迁移电解质离子。在一个实施方式中,可控制水注入速率和位置以维持羟基氧化镓的稳态浓度。在一个实施方式中,可将水注入引导至熔融镓表面以支持氢氧根离子的形成,该氢氧根离子可充当电解质的迁移离子。点燃系统可将正或负偏压提供至充当镓再生系统的电极的熔融金属。在一个示例性实施方式中,阴极的负偏压可由点燃系统提供,其中注射器可包括负电极并且可浸没于熔融镓金属表面下面。阳极可包含漂浮于熔融镓的表面上的导体,诸如碳或不锈钢。作为另一种选择,电解池可包括碳阳极,其通过与来自氧化镓和水中的至少一者的氧反应以形成由诸如真空泵之类的部件排放的CO和 CO_2 中的至少一者而消耗。

[0726] 在一个实施方式中,电解系统阴极和阳极可包括点燃系统电极。反应池腔室中的等离子体可包含电解质,其在电极之间运输离子,同时电子在电极与用于点燃的电力源之间的外部电路中携带点燃电流。在一个实施方式中,等离子体可构成与在反应池腔室和储罐中的熔融镓的表面中的至少一者上的氧化镓薄膜接触的电解电极,并且支撑氧化镓薄膜的镓可构成对电极。点燃电流可以是DC、AC或DC与AC的任何组合,并且可包括有利于氧化镓薄膜的电解还原的任何波形。在一个实施方式中,可调整电极间距以实现以下各项中的至少一者:增加电压以辅助氧化镓薄膜的电解反应;以及增加等离子体反应体积并由此增加**SunCell®**功率输出。

[0727] 在一个实施方式中,**SunCell®**包括:真空系统,其包括通往反应池腔室的真空管线;和真空泵,其用以在间断或连续地从反应池腔室抽空气体。在一个实施方式中,**SunCell®**包括冷凝器以使至少一种分数氢反应反应物或产物凝结。该冷凝器可与真空泵共线或包括与真空泵的气体管道连接件。真空系统还可包括冷凝器以使从反应池腔室流动的至少一种反应物或产物凝结。该冷凝器可致使凝结物(所凝结的反应物或产物)选择性地流回反应池腔室中。可使该冷凝器维持在一温度范围内以致使凝结物选择性地流回反应池腔室。该流动可以是主动或被动运输手段,诸如分别通过泵送或通过重力流。在一个实施方式

中,冷凝器可包括用以防止颗粒流(诸如镓或氧化镓纳米颗粒)从反应池腔室进入真空系统的部件,诸如过滤器、之字形通道和静电沉淀器中的至少一者。

[0728] 在一个实施方式中,电解质包含碱,该碱与氧化镓反应以形成镓离子和包含氧的离子(诸如氧离子或氢氧根离子),其能够迁移并参与电解反应以将氧化镓还原为镓金属。可选择碱而使得存在如下情形中的至少一者:(i) 该碱的熔点低于反应池腔室的工作温度,(ii) 该碱的沸点高于真空系统的工作温度,(iii) 该碱的熔点低于该碱的任何相应金属的沸点,(iv) 该碱的任何相应金属能够与 H_2O 或氧反应以再生该碱,(v) 该碱的熔点高于水的沸点,(vi) 该碱的任何相应金属的沸点高于水的沸点。在一个示例性实施方式中,电解质包含具有 $323^{\circ}C$ 的熔点和 $1388^{\circ}C$ 的沸点的 $NaOH$,并且与 $100^{\circ}C$ 的水沸点相比较,相应金属(钠)具有 $97.8^{\circ}C$ 的熔点和 $883^{\circ}C$ 的沸点。冷凝器可使 $NaOH$ 和 Na 凝结并使这些凝结物返回至反应池腔室同时允许从反应池腔室抽空挥发性更强的气体(诸如过量水蒸气)。返回的 Na 可与反应池腔室中或冷凝器中的 H_2O 或氧中的至少一者反应以实现再生和回收中的至少一者,其中可使冷凝器维持在 $324^{\circ}C$ 至 $882^{\circ}C$ 的温度范围内。可使冷凝器维持在约大于 $324^{\circ}C$ 至小于 $882^{\circ}C$ 的温度范围内以使钠以熔融金属钠和熔融 $NaOH$ 中的至少一种形式选择性地返回至反应池腔室。

[0729] 在一个实施方式中,镓再生系统还可包括盐桥,该盐桥横过熔融金属表面并穿透至熔融金属中以将阳极与阴极电分开,通过该盐桥进行离子传导除外。该盐桥可包括本公开的盐桥,诸如 β 固体氧化铝电解质(BASE)或镓酸钾。

[0730] 在一个实施方式中,将熔融镓金属表面进行负偏压以提供还原电势给熔融镓从而抑制其氧化反应,诸如其与水的反应。负偏压可由点燃系统提供,其中注射器可构成负电极并且可浸没于熔融镓金属表面下面。

[0731] 在一个实施方式中,反应池腔室包括电绝缘壁或涂覆电绝缘体的壁以致使点燃电流至少部分地流过氧化镓涂层。壁或涂层可还抵抗被镓的润湿。示例性的壁或涂层包含 BN 、蓝宝石、 MgF_2 、 SiC 或石英。在另一个实施方式中,电极与壁之间有足够的距离,使得点燃电流倾向于电极之间的避开壁的路径。点燃电流可流过反应池腔室中的等离子体到达氧化镓表面,其中基座5c1的电极8和等离子体可充当电解阳极,氧化物涂层下方的熔融镓金属和注射器(其可以是浸没的)可构成电解阴极,并且点燃电流可至少部分地充当电解电流以在阴极处使氧化镓还原为镓。作为另一种选择,可使极性反转,并且在阳极处释放的氧可透过氧化镓扩散以与池气体一起排放。可使点燃电流维持在足以将因加水而形成的氧化镓电解为镓的水平。在一个实施方式中,反应池腔室可包括吸气剂,诸如用于氧的碳。在一个示例性实施方式中,每添加 $1ml/分钟H_2O$ 会每分钟形成 $3.44g$ 或 $0.533ml$ 的 Ga_2O_3 ,此需要 $180A$ 的电流来将氧化镓还原为镓。可将电解质离子源诸如离子化合物添加至反应池腔室以提供离子迁移从而闭合电解电路。该离子化合物可包含碱(诸如 $NaOH$)或碱金属卤化物(诸如 NaF)。在一个实施方式中,可减少或终止注入电流以利于穿过氧化镓的电流。可控制水注入速率或模式以控制氧化镓形成速率,使得氧化镓还原速率可足以维持所需的等离子体条件,诸如连续的离子体对间断的等离子体。在一个示例性实施方式中,间断地注入水以允许氧化镓大致在注入之间还原。在一个实施方式中,添加氢以催化氧化镓表面薄膜的电解还原和热分解中的至少一者。分数氢反应等离子体可提供活性 H 以增强氧化镓至镓的反应。

[0732] 在具有电绝缘壁的另一实施方式中,使高电流流动穿过氧化镓层以使其超热并

致使氧化镓经历以下各项中的至少一者：用所添加的 H_2 进行氢还原；和热分解。可关小或关断注射泵诸如EM注射泵以增加穿过氧化镓的电流。可针对可能归因于传导率的相应减小的减少泵送或泵出条件而调整等离子体的电压。在一个示例性实施方式中，使电压增加约5至10V以维持与在泵减少或终止之前大致相同的电流。除了由所注入的熔融金属提供的传导率或代替该传导率，可将银添加至镓以形成银纳米颗粒，该银纳米颗粒维持高的气体传导率和相应的高离子-电子复合速率以维持高分数氢反应速率。在一个实施方式中，可将氢解离器（诸如贵金属、Ni、Ti、Nb，碳、陶瓷或沸石负载的贵金属、稀土金属，以及本领域已知的另一氢解离器）添加至反应池腔室以提供原子H作为氢的活性形式来还原氧化镓。在另一个实施方式中，分数氢反应等离子体可提供原子氢以还原氧化镓。可使氢压力维持在约0.1托至10大气压、0.5托至5大气压和0.5托至1大气压中的至少一个范围内。可使氢流动，并且速率可在约0.1标准立方厘米/分钟（sccm）至100升/分钟、1sccm至10升/分钟和10sccm至1升/分钟中的至少一个范围内。

[0733] 在示例性的测试实施方式中，当每分钟使10sccm的 H_2 流动并注入4ml的 H_2O 同时施加主动真空泵送时，反应池腔室维持在约1托至20托的压力范围。DC电压为约28V并且DC电流为约1kA。反应池腔室是具有长9英寸的边的SS立方体，其容纳47kg的熔融镓。电极包括DC EM泵的1英寸浸没式SS喷嘴和对电极，该对电极包括具有由BN基座覆盖的1cm直径引线的4cm直径、1cm厚W圆盘。EM泵速率为约30至40ml/s。使镓极化为正并使W基座电极极化为负。SunCell®输出功率为约150kW，其使用镓和SS反应器的质量、比热和温度升高的乘积测量。

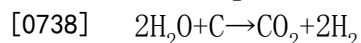
[0734] 在包括用作相反极性的电极的两个储罐和注射器的 SunCell®（诸如图5和图9中所示的 SunCells®）的一个实施方式中，可减少或终止第注射器的泵送，而充分地维持第二注射器的泵送以将熔融金属泵送至第一注射器的储罐中，使得可通过电流流动穿过膜而消除第一注射器中的任何氧化镓涂层。相反地，可减少或终止第二注射器的泵送，而充分地维持第一注射器的泵送以将熔融金属泵送至第二注射器的储罐中，使得可通过电流流动穿过膜而消除第二注射器中的任何氧化镓涂层。作为另一种选择，可减少或终止两个注射器的泵送，使得电流流动穿过具有分数氢反应等离子体的储罐中的至少一者的氧化镓薄膜，从而至少部分地提供电极之间的电流连接。可将电解质添加至氧化镓薄膜以促进氧化镓薄膜的还原。

[0735] 在一个实施方式中，EM泵注射器包括浸没于熔融镓金属表面下面的多个喷嘴，该熔融镓金属表面包括氧化镓表面薄膜。该多个浸没式喷嘴可位于储罐中的不同位置处和相对于熔融金属表面的不同角度处以打破氧化镓薄膜，这是因对应所注入流在点燃期间穿透氧化物膜。在一个实施方式中，SunCell®包括多个熔融金属注射泵和可以是浸没的对应喷嘴，其中所注入熔融金属可打破表面氧化镓薄膜。浸没深度可经调整以优化氧化镓薄膜的打破。在一个实施方式中，至少一个非浸没式喷嘴可包括经引导朝向对电极的至少一个出口，和经引导朝向氧化镓表面以辅助打破氧化物膜的至少一个其他出口。

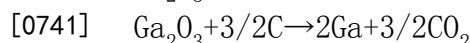
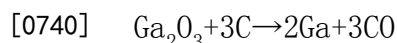
[0736] 在一个实施方式中，将反应物添加至储罐和反应池腔室中的至少一者以与可形成于熔融金属上的任何电绝缘膜发生反应，其中反应产物是不太电绝缘以及不太易于形成连续电绝缘膜中的至少一者。在一个实施方式中，将诸如NaOH之类的碱添加至储罐和反应池腔室中的至少一者以与氧化镓反应而形成诸如 $NaGaO_2$ 之类的产物从而减少或消除熔融氧

化镓上的任何连续电绝缘表面层表面。在一个示例性实施方式中,NaOH与氧化镓的反应可打破熔融镓上的电绝缘 Ga_2O_3 薄膜。在另一个实施方式中,调整泵注入喷嘴直径和深度以及增加的EM泵送速率中的至少一者以充分地打破熔融镓上的电绝缘膜(诸如熔融镓的表面上的氧化镓覆盖层)从而阻止其干扰等离子体点燃电流。

[0737] 在一个实施方式中, SunCell®包括碳源,诸如碳粉,诸如石墨、焦炭或木炭粉。该碳源可包括碳储罐、阀和碳储罐与反应池腔室之间的连接件或管道,并且除重力流或进料之外还可包括用以将所述碳以机械方式运输至反应池腔室的部件。碳可涂覆镓表面以减少分数氢反应混合物的任何氧化性物质(诸如氧和水中的至少一者)与镓形成氧化镓的反应。作为用以移除熔融镓上的氧化镓表面涂层的NaOH添加、氢还原、电解还原、热分解或者蒸发和升华(归因于 Ga_2O_3 的挥发性)中的至少一者的备选方案,反应池腔室中的反应混合物包含来自源的碳。碳可与所添加的 H_2O 和 Ga_2O_3 中的至少一者反应以形成可通过真空泵排放的CO和 CO_2 中的至少一者。碳反应可包括水合成气反应、水-气体变换反应以及氧化镓至镓金属和可排放的CO和 CO_2 的碳热还原反应中的至少一者。示例性的反应是



[0739] 以及氧化镓的碳还原反应



[0742] 在另一个实施方式中,氧化镓的碳热还原可与另一反应联合以构成反应组合,诸如将氧化镓还原至镓的碳热反应的组合。

[0743] 在一个实施方式中, SunCell®包括用以将 Ga_2O_3 还原至镓金属同时排放 Ga_2O_3 还原产物(诸如包含氧的 Ga_2O_3 还原产物)并使镓金属返回至反应池腔室的系统。在一个实施方式中, SunCell®包括:用以从反应池腔室移除 Ga_2O_3 薄膜或层的部件;镓再生系统;从反应池腔室5c1至镓再生系统的氧化镓通道;用以将氧化镓从反应池腔室5b31运输至镓再生系统的运输机;用以排出因从氧化镓再生镓而产生的其他产物(诸如氧)的部件;用于所再生的镓的储罐;从镓再生储罐至反应池腔室的镓通道、管道或管;从用于所再生的镓的储罐至储罐5c或反应池腔室5b31的镓运输机;以及用于所述部件中的每一者的控制系统。(i)用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件,(ii)用以在其通道中运输氧化镓的运输机,以及(iii)用以在其通道中运输镓的运输机中的至少一者可包括机械型、电磁型、液压型或气动型推进器或撇渣器、泵(诸如机械或EM泵)、喷口(诸如至少一个气体喷口、熔融金属喷口、水喷口)、至少一个螺旋钻、摇动器或振动器(诸如电磁或压电振动器)和至少一个输送机(诸如运送带或网格)中的至少一者。在一个实施方式中,用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的射流(诸如熔融金属射流)可以一定角度冲击于表面上,该角度有利于选择性地移动熔融镓表面上的氧化镓。在一个示例性实施方式中,射流可从镓表面下面冲击。

[0744] 在一个实施方式中,用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件包括使机械表面撇渣器或刮刀移动的致动器,该机械表面撇渣器或刮刀可用在池外部的至少一个磁体(诸如电磁体或经冷却的永久磁体)操纵或驱动,其中该致动器可包含具有高居里温度的铁磁材料,诸如铁或钴。在另一个实施方式中,撇渣器可包括能够真空密封的穿透件和外部驱动机构(诸如本领域已知的外部驱动机构)。

[0745] 在一个实施方式中, SunCell®可包括表面机械波产生器以在氧化镓中产生波而从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面推动 Ga_2O_3 薄膜并致使氧化物流入氧化镓通道中。源,诸如声波源,诸如声纳装置,诸如电磁驱动声纳源,诸如声纳放大器(boomer)。源可位于以下中的至少一者上:储罐和反应池腔室的一个或多个外壁以及储罐和反应池腔室中的至少一者的内侧。在一个实施方式中, SunCell®还可包括过滤器或筛,该过滤器或筛接纳从熔融镓表面移除的氧化镓和一些熔融镓中的至少一者并选择性地保留氧化镓同时使镓返回至其源(诸如储罐或反应池腔室)。该过滤器或筛可包括可从表面升高的槽。该槽可通过表面波源的活动接纳氧化镓和镓中的至少一者。该槽可沿着反应池腔室的一个侧伸展。该槽可在底部中具有允许镓往回排至其源的穿孔。该槽可还包括运输机,诸如螺旋钻。该螺旋钻可包括能够真空密封的穿透件或磁性耦合器以及外部驱动机构(诸如本领域已知的外部驱动机构)。该螺旋钻可将氧化镓运输至从反应池腔室5c1至镓再生系统的氧化镓通道。

[0746] 在一个实施方式中,用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件包括将电力递送至表面氧化物的一系列电极。该电极可将具有时间延迟的顺序高电压脉冲的氧化镓推动至氧化物覆盖的表面中以在储罐表面上形成电弧电流行波以及相应的行进热波。该热波继而产生将氧化镓推动进氧化物通道中的力波。用以移除氧化镓表面的机制可包括热泳。

[0747] 在一个实施方式中,从反应池腔室5c1至镓再生系统的运输机可包括在反应池腔室5c1与镓再生系统之间维持密封(诸如包括熔融金属柱的密封件)的泵,诸如电磁泵。在一个实施方式中,从镓再生系统至反应池腔室5c1的运输机可包括在镓再生系统与反应池腔室5c1之间维持密封(诸如包括熔融金属柱的密封件)的泵,诸如电磁泵。该密封件可允许反应池腔室5c1和镓再生系统的气体 and 压力中的至少一者的分开。在另一个实施方式中,从反应池腔室5c1至镓再生系统的运输机可包括被动装置,诸如允许重力流的通道。通道(诸如包括P阱的通道)可在反应池腔室5c1与镓再生系统之间维持密封(诸如包括熔融金属柱的密封件)。通道还可包括回热器或热交换器以实现以下各项中的至少一者:从所运输的镓回收热量;以及使镓冷却。

[0748] 用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件可致使熔融金属和氧化物流动至从反应池腔室5c1至镓再生系统的氧化镓通道或管道中。熔融金属流可足以将氧化物冲刷至通道或管道中并且在不堵塞的情况下允许其由运输机运输至再生系统。再生系统可包括电解系统(诸如包括碱水溶液电解质的电解系统)、两个电极(诸如不锈钢电极)和电解池,该电解池具有朝向阴极倾斜的底板以及从镓再生储罐至反应池腔室的镓通道、管道或管的入口。用以冲刷氧化物的熔融金属可沿着倾斜底板流动并流入镓通道的入口中并且可运输至储罐或反应池腔室。该运输可以是与再生的镓一起。在一个示例性实施方式中,用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件包括可由电磁泵供应的熔融金属射流,其中熔融金属供应器可包括再生系统和储罐中的至少一者。可由控制器基于冲刷氧化镓所需要的量而调整熔融金属泵送至喷口的速率。冲刷氧化镓所需要的量可取决于所形成的量。输入至控制器的关于所形成的氧化镓量的参数包括水注入速率。在一备选的实施方式中,用以从液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件包括振动台, SunCell®安装于该振动台上。振动台的摇摆动作可迫使氧化镓进入从反应池腔室5c1至镓再生系统的氧化镓通道中。在另一个实施方式中,用以从液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄

膜的部件可包括旋转平台, SunCell®安装于该旋转平台上,其中因该台的旋转产生的离心力迫使氧化镓进入从反应池腔室5c1至镓再生系统的氧化镓通道中。

[0749] 在一个实施方式中,从反应池腔室5c1至镓再生系统的运输机可包括从用于再生的镓的储罐至储罐5c或反应池腔室5b31的镓运输机。后一运输机可在氧化镓通道中形成抽吸。在一个示例性实施方式中,由相应EM泵运输机泵送来自再生镓储罐的镓会沿着氧化镓通道形成局部真空以致使氧化镓从储罐5c或反应池腔室5b31抽吸至镓再生系统。连接SunCell®组件(包括反应池腔室或储罐和再生系统)的至少一个管道中的流动阻力可足以维持相应腔室之间的密封。

[0750] 在包含可氧化的熔融金属的一个实施方式中,等离子体反应有利于金属表面(相对于不太导电的氧化的金属表面而言)。例如,电弧电流形成(其有利于离子-电子复合,伴随分数氢反应动力学的大幅增加)偏好金属镓表面而非氧化镓表面,该氧化镓表面是由于所添加的水蒸气与金属镓反应随着时间推移而形成。为从氧化镓更新镓表面, SunCell®可包括用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件。用以移除氧化物表面涂层的示例性部件包括:(i)收集器,诸如倾斜的带穿孔平台,诸如在反应池腔室内侧处于储罐的镓液体液位处的倾斜平面筛网;和(ii)惰性气体或熔融镓喷口,其在反应池腔室的相对侧上以迫使氧化镓至筛网上,该筛网选择性地收集氧化镓同时镓流动穿过筛网并返回至储罐。可进一步通过运输机将所收集的氧化镓运输至镓再生系统。

[0751] 在一个实施方式中,用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件包括熔融金属喷口。在一个实施方式中,至少一个熔融金属喷口可包括将至少一个所注入的熔融金属料流施加至储罐金属(诸如熔融镓)上的氧化物表面涂层的熔融金属泵(诸如电磁泵)的出口喷嘴。所注入料流的力可将氧化物涂层推动至所需位置,诸如通往镓再生系统的运输机。熔融金属射流泵的入口可与储罐的熔融金属和镓再生系统的熔融金属中的至少一者连续。在一个示例性实施方式中,熔融金属射流迫使包含 Ga_2O_3 、 Ga_2O 和Ga中的至少一者的储罐的表面层通往镓再生系统(其可包含碱性电解质,诸如含水NaOH)和电解系统的管道中。可通过与在电解系统的阳极处析出的氧反应将 Ga_2O 氧化为 Ga_2O_3 , Ga_2O_3 可形成相应的镓酸盐,诸如镓酸钠, Ga可流入至阴极处的储罐中,镓可以是以下情形中的至少一者:运输至储罐和反应池腔室;以及流入熔融金属射流泵的入口中。在一个实施方式中,可将诸如NaOH之类的化学品添加至储罐和反应池腔室中的至少一者以与氧化镓反应而形成诸如镓酸钠之类的产物,通过用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件更容易地将该产物从储罐熔融金属的表面移除。

[0752] 在一个实施方式中,可使 Ga_2O_3 还原至更小的氧化物(诸如 Ga_2O),通过用以从储罐5c或反应池腔室5b31中的液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件更容易地将该较小氧化物从熔融金属的表面移除。可通过以下各项中的一者或多者将 Ga_2O_3 转化为另一氧化物,诸如 Ga_2O :(i)任何氧化镓的热分解,诸如 $Ga_2O_3 \rightarrow Ga_2O$, (ii)通过与镓反应而将 Ga_2O_3 转化为 Ga_2O , (iii)通过氢还原 Ga_2O_3 , (iv)通过碳热还原来还原 Ga_2O_3 , (v)通过原位电解还原 Ga_2O_3 ,以及通过本公开的其他方法还原 Ga_2O_3 ,其中将相应的还原剂诸如氢、碳和电解电解质以及电解电流添加至反应池腔室并使温度维持在允许进行所需还原反应和热分解中的至少一者的温度。在一个实施方式中, Ga_2O 可形成嵌入于熔融镓的表面上的 Ga_2O_3 薄膜中的颗粒。在通过用以从液体镓的表面移除 Ga_2O_3 薄膜的部件运输 Ga_2O 颗粒时, Ga_2O 颗粒可一起携带着 Ga_2O_3 薄

膜。在一个示例性实施方式中,嵌入于熔融镓的表面上的 Ga_2O_3 薄膜中的 Ga_2O 颗粒致使该薄膜与 Ga_2O 颗粒一起通过由至少一个EM泵形成的射流或流进行运输。可使用于引起射流或流的任何镓金属与氧化镓分开并再循环。

[0753] 用以移除氧化镓薄膜的泵可对氧化镓施加抽吸并选择性地移除氧化镓表面层(由于其较低的密度)。示例性的机械撇渣器是包括轴以及机械联动装置和具有动力供应器和控制器的外部驱动马达的机械撇渣器。另一示例性的撇渣器实施方式包括在反应池腔室内侧的搅拌棒,通过与内部搅拌棒同相的外部旋转磁体使该搅拌棒旋转。搅拌棒可包含具有高居里温度的磁性或铁磁性材料,诸如钴或铁。反应池腔室可包括至少一个平坦竖直壁,诸如立方体形或矩形反应池腔室的壁中的一者,其中搅拌棒在平行于该壁的平面上操作。该搅拌棒可将 Ga_2O_3 推进至通往镓再生系统的其通道中。在另一个示例性实施方式中,**SunCell®**包括气体喷口以跨越储罐5c中的液体金属的表面提供至少一水平力分量。在一个实施方式中,通过气体射流(诸如反应池腔室5b31气体的气体射流)迫使在储罐5c中的镓的顶部上漂浮的氧化镓层进入通往镓再生系统(诸如电解系统)的通道中。气体喷口可包括气体入口、气体出口、至少一个喷嘴(其中喷嘴的方向可以是可控制的)以及气体流和喷嘴方向中的至少一者的控制系统。在另一个实施方式中,**SunCell®**包括用以在漂浮的氧化镓层处引起离心力以致使氧化镓层圆周地流动并流入通往电解系统的通道中的部件。**SunCell®**可包括旋转部件,诸如旋转台,**SunCell®**安装于该旋转台上。镓再生系统可包括电解池。该电解池可包括至少两个电极、电解质、电解动力供应器、电解控制器和用于镓金属的储罐、包括来自和去往储罐和反应池腔室中的至少一者的通道的入口与出口通道。

[0754] 镓再生系统可包括 Ga_2O_3 还原系统。镓再生系统可包括 Ga_2O_3 电解池,诸如水性或熔融盐电解池。 Ga_2O_3 可经历在阴极处电解为镓金属以及在阳极处电解为 O_2 、 H_2O 或另一氧化物(诸如挥发性或气态氧化物,诸如 CO_2)中的至少一者,其可从 Ga_2O_3 电解池选择性地排出。在后一情况下,至少一个电极(诸如阳极)可包含碳。可选择性地排出 O_2 、 H_2O 或另一氧化物(诸如挥发性或气态氧化物,诸如 CO_2)。用以排出其他产物(诸如由氧化镓再生镓而产生的氧)的部件可包括通往至少部分地覆盖阳极的储槽或排气口和壳体(其允许气体收集并流入排气管中)的排气管。该壳体可包括电解质离子流可渗透的至少一个区段,诸如可包括钟形罩的开放下端的选择性盐桥。在一个实施方式中,用氢氧化物(诸如碱金属氢氧化物,诸如氢氧化钠溶液)处理 Ga_2O_3 以形成镓酸钠,通过阴极(诸如不锈钢阴极)处的镓酸钠溶液的电解可将其在阴极处还原为镓金属。在一个实施方式中,至少一个电极可包含不锈钢、镍、碳、贵金属(诸如Pd、Pt、Au、Ru、Rh、Ir)、维度稳定化的电极和本领域技术人员已知的在碱中稳定的其他阳极中的至少一者。在一个示例性实施方式中,可通过选择性地返回泵送镓金属的EM泵使镓金属返回至储罐5c和反应池腔室5b31中的至少一者。

[0755] 用以使氧化镓移动的示例性撇渣器系统可包括跨越积聚氧化镓的熔融金属表面的横截面的带穿孔的可移动板并且还可包括横向运输机以使氧化镓在大致垂直于撇渣器使氧化镓移动的方向的方向上移动。该撇渣器可以是非导电的以避免短接点燃电流或等离子体,诸如陶瓷撇渣器,诸如BN撇渣器或陶瓷涂覆的金属撇渣器,诸如莫来石、氧化铝或BN涂覆的不锈钢、钨或钽撇渣器。EM泵可充当避免非焊接穿透的液压撇渣器驱动器。该EM泵可驱动作为致动器的液压活塞或驱动液压马达。该撇渣器可由可逆马达(诸如液压马达,诸如包括EM泵的马达)驱动。该撇渣器可将氧化镓推动至一个壁并然后使方向逆转并将氧化镓

推动至相对的壁。该撇渣器可沿着至少一个壁包括横向运输机,以使经撇取的氧化镓在垂直于撇渣器方向的方向上移动。运输机可包括部分地悬于液体镓的螺杆或开式螺旋钻,该螺杆或开式螺旋钻将氧化物选择性地推动至角落同时允许液体镓在螺旋钻周围流动。撇渣器系统可包括介于撇渣器与至少一个横向运输机之间的至少一个机械联动装置,使得可通过同一驱动器(诸如EM泵液压马达)驱动横向运输机。在一个实施方式中,撇渣器包括螺旋钻,诸如开式螺旋钻。横向运输机可包括本公开的撇渣器,该撇渣器包括横向撇渣器。横向撇渣器的运动可与撇渣器的运动同步,使得其处于恰当位置中以从撇渣器接纳氧化物并在两个撇渣器之间没有干扰的情况下将氧化物移入氧化物通道中。

[0756] 在一个实施方式中,撇渣器可包括轮毂和轮辐氧化镓薄膜撇渣器,其中可透过开式轮毂发生注入。撇渣器可由马达诸如液压马达(诸如EM泵驱动的马达)提供动力围绕轮毂旋转。撇渣器可跨越圆柱形反应池腔室的表面,该表面可包括一周边的氧化镓通道,氧化镓撇取至该通道。旋转可以高速度进行,以形成离心力而致使所撇取的氧化镓沿着撇渣器的轮辐流动至氧化镓通道中。

[0757] 在一个实施方式中,**SunCell®**包括氧化镓储存储罐,氧化镓运输至其中,并且**SunCell®**可还包括补充镓储储罐以补给在操作期间形成氧化镓的镓。**SunCell®**可在氧化镓储存储罐的底部包括镓返回运输机以使积聚在此储储罐中的任何镓返回至反应器储储罐5c或反应池腔室5b31。该镓返回运输机可包括诸如EM泵之类的泵,该泵还可包括入口过滤器以阻挡氧化镓。可在本公开的再生系统(诸如镓酸钠电解系统)中批量再生随着时间推移而收集于氧化镓储存储罐中的氧化镓。**SunCell®**还可包括储槽排放运输机(诸如本公开的储槽排放运输机)以将氧化镓从氧化镓储存储罐运输至镓再生系统中。在一个示例性实施方式中,每分钟所注入的每毫升水(对应于约50kW的理论分数氢功率)的氧化镓的积聚速率为3.4g/分钟(0.54ml/分钟)。

[0758] 在一个实施方式中,撇渣器可包括输送机,诸如包括至少一根皮带或一组线缆或一组链条701的输送机,该输送机具有附接至该皮带或介于该线缆或链条之间的至少一个穿孔的斗或桨叶702(图32)。该斗充当撇渣器和斗式提升机中的至少一者,该斗式提升机用以将所撇取的氧化镓举升至氧化镓储存储罐5b33中。该斗可包含不与镓形成合金或反应的难熔材料,诸如陶瓷、W或Ta。钽和陶瓷BN是可机械加工的示例性材料。所述皮带或对的相对构件的每一线缆或链条可在链轮、齿轮或皮带轮703中的至少一者上被驱动和被导引,其中通过马达诸如电动、气动、液压或电磁泵马达使链轮、齿轮或皮带轮中的至少一者转动。该传送带、线缆或链条可致使至少一个斗沿着熔融镓表面从反应池腔室5b31或储储罐的第一壁行进至相对壁,然后沿着斜面向上到达输送机的顶部,其中将所撇取的氧化镓倾倒入氧化镓储存储罐5b33中。输送机可使斗返回至第一壁以重复撇取循环。熔融金属注射器(诸如包括喷嘴5q的熔融金属注射器)可充分地浸没于反应池腔室5b31或储储罐5c的熔融镓中以允许斗浸没于较小深度处并越过喷嘴5q。反应池腔室可包括用于输送机的倾斜区段或斗式提升机区段和氧化镓储存储罐5b33的壳体5b32。氧化镓储存储罐5b33可包括在顶部处的开口以接纳来自输送机的斗式提升机区段的氧化镓。反应池腔室5b31或储储罐的相对壁可包括斗形通路704,斗形通路704包括开口以允许斗形撇渣器通过同时部分地阻挡反应池腔室或储储罐中的熔融镓。氧化镓储存储罐5b33的顶部开口的高度可足以阻止可能会由于熔融镓中产生的任何机械波而通过该斗式通路的任何流动的熔融镓朝向斗式提升机突破其壁。氧化镓

储存储罐5b33可包括凸缘5b33a和配接凸缘板5b33b,配接凸缘板5b33b是可移除的以移除氧化镓储存储罐5b33,使得可移出并再生所收集的氧化镓,其中对空的氧化镓储存储罐5b33进行重新组装。

[0759] 在一个实施方式中,氧化镓薄膜的形成可增加点燃电流电阻,使得点燃电流在恒定点燃电压下减小或点燃电压增加以维持点燃电流恒定。在一个实施方式中,撇渣器包括控制器,该控制器监测电流、点燃电压和点燃电流电阻中的至少一个点燃参数并启动撇渣器以移除氧化物涂层以使点燃参数维持在所需范围内。

[0760] 在一个实施方式中,可使储罐和反应池腔室中的至少一者维持在一定工作温度,该工作温度比羟基氧化镓和氢氧化镓中的至少一者的分解温度高。该工作温度可以在约200℃至2000℃、200℃至1000℃和200℃至700℃中的至少一个范围内。在抑制羟基氧化镓和氢氧化镓形成的情形中,待撇取的物质可局限于氧化镓。

[0761] 反应混合物可包含能够与原位存在(即,在反应腔室中)的氧或水中的一些发生反应以便从该反应混合物移除这些组份的一部分的添加剂。在一些实施方式中,该添加剂可用于将这些组份运输至再生系统。最终,可经由再生系统排放(即,从整个系统排出)与添加剂发生反应的氧和水。在特定实施方式中,该添加剂能够由氧和/或水氧化。例如,经氧化的添加剂(例如,金属氧化物,诸如氧化镓)可因将添加剂添加至反应腔室(例如,银熔融金属中的镓添加剂)而形成于反应腔室中。在其产生之后,可将该经氧化的添加剂运输至再生系统(例如,还原系统)。一旦运输至再生系统,便可还原该氧化的添加剂,从而产生再生的添加剂和先前存在于反应腔室中的氧和/或水。然后可使该添加剂返回至反应腔室以供进一步使用,并且可排出先前存在于反应腔室中的氧和/或水。

[0762] 在一个实施方式中,反应混合物可包含添加剂,该添加剂包含诸如与氧和水中的至少一者反应的金属或化合物之类的物质。可再生该添加剂。可通过SunCell®的至少一个系统实现再生。再生系统可包括热系统、等离子体系统和电解系统中的至少一者。可将该添加剂添加至包含熔融银的反应混合物。在一个实施方式中,该添加剂可包含可添加至熔融银(构成熔融金属)的镓。在一个实施方式中,可将水供应至反应池腔室。可由注射器供应水。镓可与供应至反应混合物的水反应以形成氢和镓。氢可与充当分数氢催化剂的某些残余HOH反应。可通过本公开的电解系统再生氧化镓。可将通过电解系统产生的镓金属和氧分别往回泵送至反应池腔室和排放以用于池。

[0763] 在一个实施方式中,用以对 Ga_2O_3 进行电解的电解质包含碱金属卤化物和卤化镓(诸如 GaF_3)。电解质可包含熔融盐,诸如冰晶石的类似物,其中Ga取代Al,诸如 Na_3GaF_6 。在一个实施方式中,可使 Ga_2O_3 与HX($x=\text{卤离子}$)诸如HCl反应以形成 GaCl_3 。 GaCl_3 的熔体可经电解以在阴极处形成Ga金属并在阳极处形成 Cl_2 气体。可使氯气与来自源的氢(诸如来自水电解的 H_2)反应而形成HCl。

[0764] 在一个实施方式中,SunCell®包括用以使 Ga_2O_3 与至少一种反应物反应以形成挥发性产物的系统、挥发性产物冷凝器、镓再生系统(诸如电解池)以及用以分别将挥发性产物和所再生的镓运输至镓再生系统以及从镓再生系统运输的通道和运输机。反应物可包含酸,诸如HX($X=\text{卤离子}$)。可使 Ga_2O_3 与酸诸如HX($X=\text{卤离子}$)反应以形成 GaX_3 ,其可以是挥发性的。气态 GaX_3 可凝结于冷凝器中,该冷凝器可包括镓再生系统的组件。诸如 GaCl_3 或 GaBr_3 之类的 GaX_3 可经电解以在阴极处形成Ga金属并且在阳极处形成 X_2 气体。可使 X_2 气体与来自

源的氢(诸如来自 H_2O 电解的 H_2)发生反应以形成HX。**SunCell®**还可包括镓再生储罐,其中 Ga_2O_3 经运输并与HX反应而形成镓金属。可将HX气体释放至储罐、反应池腔室和再生储罐中的至少一者中以形成 GaX_3 和 H_2O 。

[0765] 在一个实施方式中,熔融金属可包含任何熔融金属。在熔融金属通过与分数氢反应混合物的组份发生反应而形成产物(诸如金属氧化物产物)的情形中,熔融金属可包含能够再生的熔融金属。在一个实施方式中,**SunCell®**包括用以再生和回收熔融金属的部件。在一个实施方式中,熔融金属可包括形成可通过氢还原和电解中的至少一者而再生的氧化物的熔融金属,其中金属再生部件包括电解池和氢还原反应器中的至少一者。用以再生金属的系统可包括本公开的电解再生系统,该电解再生系统还可包括氢源用以将金属氧化物还原至金属并再循环或回收所再生的熔融金属。可通过氢还原而再生的示例性金属是铜和镍。在一个实施方式中,可用氢还原腔室替换电解腔室。在另一个实施方式中,可由铝替换镓,并且再生系统可包括氧化铝电解池,诸如包括碳电极和熔融盐电解质(诸如冰晶石(Na_3AlF_6))的氧化铝电解池。

[0766] 在一个实施方式中,可将氢气添加至反应混合物以避免通过所注入的水与镓反应形成氧化镓薄膜。在另一个实施方式中,可添加添加剂气体诸如稀有气体(诸如氩)、氮、 CO_2 、烃(诸如甲烷或丙烷)或本公开的另一气体以帮助消除氧化镓薄膜。添加剂气体可增加因 $H_2O+Ga \rightarrow Ga_2O_3+H_2$ 反应而产生的原子H。诸如氩之类的添加剂气体可增加分数氢反应速率,其中所释放的高能量促进氧化镓薄膜的分解。添加剂气体可与反应池腔室中的物质(诸如 H_2O 、 OH^- 、 Ga_2O_3 、 OH 和 Ga_2O 中的至少一者)反应而形成增强氧化镓薄膜的电解还原的电解质。诸如稀有气体之类的添加剂气体可增加等离子体的电离分数以增加其传导率以及增加流动穿过氧化镓的还原电流。添加剂气体可由于诸如较高质量之类的性质而在反应池腔室中具有相对于其他气体较长的半衰期。所添加的氢或添加剂气体可以是实现氧化镓薄膜的还原的任何所需量。反应池腔室中的氢或添加剂气体中的至少一者可在约0.1托至100大气压、1托至1大气压和1托至10托中的至少一个压力范围内。可以在约0.001sccm至10升/分钟、0.001sccm至10升/分钟和0.001sccm至10升/分钟中的至少一个范围内的每升反应池腔室体积的速率使氢或添加剂气体中的至少一者流入反应池腔室中。

[0767] 在一个实施方式中, H_2O 注射器可将 H_2O 注入至反应池腔室的分数氢等离子体区域中,诸如电极之间的区域中。等离子体注入可在正电极附近,其中分数氢等离子体是最强烈的。将 H_2O 注入至等离子体中可实现以下各项中的至少一者:增强所释放的功率;阻止水与镓形成氧化物;以及促进氧化镓还原或分解。注射器可包括在反应池腔室壁处的孔口或在反应池腔室内侧的喷嘴,该孔口或喷嘴可将水引导至所需位置诸如在熔融金属注射器上方处于镓表面上。喷嘴可以一定位置和角度进入以实现至所需位置的所需递送。在示例性实施方式中,喷嘴可位于池的顶部并将所注入的水向下引导至镓表面处的等离子体的中心,或者难熔喷嘴可包括穿过熔融镓的管道并且还包括弧以将水引导至镓表面。喷嘴可包括小孔隙、缩扩喷嘴或本领域已知的其他喷嘴以将水引导至所需位置。喷嘴可包括诸如加热器和热交换器之类的部件以将液体加热并将液体转化为至少一些气态的水。转化为气态水可引起压力增加,该压力增加可充当将水注入至所需位置的推进剂。在一个实施方式中,所注入的水微滴或颗粒可通过手段诸如以静电方式而带电,诸如带负电。可通过以下各项中的至少一者而使颗粒带电:喷嘴出口处的电极;颗粒在注入时所穿过的电晕放电;以及颗粒与

充电材料或结构(诸如喷嘴)的摩擦。镓带可相反的电,诸如带正电,使得将所注入的水吸引至镓表面。可将所注入的颗粒引导至大致沿电极的轴的区域。

[0768] 在一个实施方式中,氢可充当催化剂。供应 nH (n 为整数)作为催化剂和 H 原子以形成分数氢的氢源可包含 H_2 气,使用质量流量控制器来控制来自高压水电解器的氢流量,透过EM泵管5k4壁中的氢渗透膜(诸如Pd或Pd-Ag如23%Ag/77%Pd合金膜)可供应 H_2 气。使用氢作为催化剂作为 HOH 催化剂的替代物可避免至少一个池组件(诸如碳反应池腔室5b31)的氧化反应。反应池腔室中所维持的等离子体可解离 H_2 以提供 H 原子。碳可包含热解碳以遏制碳与氢之间的反应。

[0769] 固体燃料SunCell®

[0770] 在一个实施方式中,SunCell®包括发生反应以形成至少一种用以形成分数氢的反应物的固体燃料。分数氢反应物可包含用以形成分数氢的原子 H 和催化剂。该催化剂可包含新生水、 HOH 。可在SunCell®中至少部分地原位再生该反应物。可通过反应池腔室5b31中的等离子体或热驱动的反应而再生固体燃料。可通过在反应池腔室5b31中维持和释放的等离子体和热力中的至少一者实现再生。可通过供应在分数氢或包含分数氢的产物(诸如物质的低能氢化合物和组合物)的形成中消耗的元素源而再生固体燃料反应物。SunCell®可包含 H 和氧的源中的至少一者以替换在SunCell®中的分数氢反应的传播期间固体燃料所损失的任何 H 和氧。 H 和 O 中的至少一者的源可包含 H_2 、 H_2O 和 O_2 中的至少一者。在示例性的再生实施方式中,通过添加 H_2 和 H_2O 中的至少一者而替换被消耗用于形成 H_2 (1/4)的 H_2 ,其中 H_2O 可进一步充当 HOH 催化剂和 O_2 中的至少一者的源。最佳地, CO_2 和诸如氩之类的稀有气体中的至少一者可以是反应混合物的组份,其中 CO_2 可充当用以形成 HOH 催化剂的氧源。

[0771] 在一个实施方式中,SunCell®还包括电解池以由形成于反应池腔室中的任何产物再生至少一种起始材料中的至少一些。起始材料可包含固体燃料的反应物中的至少一者,其中可通过用以形成分数氢反应物的固体燃料反应形成产物。起始材料可包含熔融金属,诸如镓或银。在一个实施方式中,熔融金属与熔融金属是非反应性的。示例性的非反应性熔融金属包含银。电解池可包括储罐5c、反应池腔室5b31和在储罐5c和反应池腔室5b31中的至少一者外部的单独腔室中的至少一者。电解池可至少包括:(i)两个电极,(ii)用于单独腔室的入口和出口通道以及运输机,(iii)电解质,其可包含以下中的至少一者:熔融金属,以及在储罐、反应池腔室和单独腔室中的至少一者中的反应物和产物,(iv)电解动力供应器,以及(v)用于电解的控制器以及用于在适用情况下进入和离开电解池的运输机的控制器和动力源。运输机可包括本公开的运输机。

[0772] 在一个实施方式中,固体燃料反应形成 H_2O 和 H 作为产物或中间反应产物。 H_2O 可充当用以形成分数氢的催化剂。反应物包含至少一种氧化剂和一种还原剂,并且反应包含至少一种氧化-还原反应。还原剂可包含金属诸如碱金属。反应混合物可还包含氢源和 H_2O 源,并且可任选包含载体,诸如碳、碳化物、硼化物、氮化物、甲腈(诸如TiCN)或腈类。该载体可包含金属粉末。 H 源可选自碱金属氢化物、碱土金属氢化物、过渡金属氢化物、内过渡金属氢化物、稀土氢化物和本公开的氢化物的群组。氢源可以是氢气,该氢气还可包括解离器,诸如本公开的那些解离器,诸如载体(诸如碳或氧化铝和本公开的其他者)上的贵金属。水源可包含脱水的化合物,诸如氢氧化物或氢氧化物络合物,诸如Al、Zn、Sn、Cr、Sb和Pb的那些。

水源可包含氢源和氧源。氧源可包含含有氧的化合物。示例性的化合物或分子是 O_2 、碱金属或碱土金属氧化物、过氧化物或超氧化物、 TeO_2 、 SeO_2 、 PO_2 、 P_2O_5 、 SO_2 、 SO_3 、 M_2SO_4 、 $MHSO_4$ 、 CO_2 、 $M_2S_2O_8$ 、 $MMnO_4$ 、 $M_2Mn_2O_4$ 、 $M_xH_yPO_4$ ($x, y = \text{整数}$)、 $POBr_2$ 、 $MCIO_4$ 、 MNO_3 、 NO 、 N_2O 、 NO_2 、 N_2O_3 、 Cl_2O_7 和 O_2 ($M = \text{碱金属}$; 并且碱土金属或其他阳离子可取代 M)。其他示例性反应物包括选自以下各项的群组的试剂: Li 、 LiH 、 $LiNO_3$ 、 $LiNO$ 、 $LiNO_2$ 、 Li_3N 、 Li_2NH 、 $LiNH_2$ 、 LiX 、 NH_3 、 $LiBH_4$ 、 $LiAlH_4$ 、 Li_3AlH_6 、 $LiOH$ 、 Li_2S 、 $LiHS$ 、 $LiFeSi$ 、 Li_2CO_3 、 $LiHCO_3$ 、 Li_2SO_4 、 $LiHSO_4$ 、 Li_3PO_4 、 Li_2HPO_4 、 LiH_2PO_4 、 Li_2MoO_4 、 $LiNbO_3$ 、 $Li_2B_4O_7$ (四硼酸锂)、 $LiBO_2$ 、 Li_2WO_4 、 $LiAlCl_4$ 、 $LiGaCl_4$ 、 Li_2CrO_4 、 $Li_2Cr_2O_7$ 、 Li_2TiO_3 、 $LiZrO_3$ 、 $LiAlO_2$ 、 $LiCoO_2$ 、 $LiGaO_2$ 、 Li_2GeO_3 、 $LiMn_2O_4$ 、 Li_4SiO_4 、 Li_2SiO_3 、 $LiTaO_3$ 、 $LiCuCl_4$ 、 $LiPdCl_4$ 、 $LiVO_3$ 、 $LiIO_3$ 、 $LiBrO_3$ 、 $LiXO_3$ ($X = F, Br, Cl, I$)、 $LiFeO_2$ 、 $LiIO_4$ 、 $LiBrO_4$ 、 $LiIO_4$ 、 $LiXO_4$ ($X = F, Br, Cl, I$)、 $LiScO_n$ 、 $LiTiO_n$ 、 $LiVO_n$ 、 $LiCrO_n$ 、 $LiCr_2O_n$ 、 $LiMn_2O_n$ 、 $LiFeO_n$ 、 $LiCoO_n$ 、 $LiNiO_n$ 、 $LiNi_2O_n$ 、 $LiCuO_n$ 和 $LiZnO_n$ (其中 $n = 1, 2, 3$ 或 4)、含氧阴离子、强酸的含氧阴离子、氧化剂、分子氧化剂 (诸如 V_2O_3 、 I_2O_5 、 MnO_2 、 Re_2O_7 、 CrO_3 、 RuO_2 、 AgO 、 PdO 、 PdO_2 、 PtO 、 PtO_2 和 NH_4X , 其中 X 是硝酸根或CRC中给出的其他合适阴离子) 和还原剂。另一碱金属或其他阳离子可取代 Li 。另外的氧源可选自以下各项的群组: $MCoO_2$ 、 $MGaO_2$ 、 M_2GeO_3 、 MMn_2O_4 、 M_4SiO_4 、 M_2SiO_3 、 $MTaO_3$ 、 MVO_3 、 MIO_3 、 $MFeO_2$ 、 MIO_4 、 $MCIO_4$ 、 $MScO_n$ 、 $MTiO_n$ 、 MVO_n 、 $MCrO_n$ 、 MCr_2O_n 、 MMn_2O_n 、 $MFeO_n$ 、 $MCoO_n$ 、 $MNiO_n$ 、 MNi_2O_n 、 $MCuO_n$ 和 $MZnO_n$ (其中 M 为碱金属并且 $n = 1, 2, 3$ 或 4)、含氧阴离子、强酸的含氧阴离子、氧化剂、分子氧化剂诸如 V_2O_3 、 I_2O_5 、 MnO_2 、 Re_2O_7 、 CrO_3 、 RuO_2 、 AgO 、 PdO 、 PdO_2 、 PtO 、 PtO_2 、 I_2O_4 、 I_2O_5 、 I_2O_9 、 SO_2 、 SO_3 、 CO_2 、 N_2O 、 NO 、 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_4 、 N_2O_5 、 Cl_2O 、 ClO_2 、 Cl_2O_3 、 Cl_2O_6 、 Cl_2O_7 、 PO_2 、 P_2O_3 和 P_2O_5 。反应物可呈形成分数氢的任何所需比率。示例性的反应混合物是 $0.33g LiH$ 、 $1.7g LiNO_3$ 以及 $1g MgH_2$ 与 $4g$ 活性C粉末的混合物。表2、3和4中给出了用以形成 H_2O 催化剂和 H_2 中的至少一者的另外的合适示例性反应。

[0773] 表2. 关于 H_2O 催化剂和 H_2 的热可逆反应循环. [L.C.Brown, G.E.Besenbruch, K.R.Schultz, A.C.Marshall, S.K.Showalter, P.S.Pickard和J.F.Funk, Nuclear Production of Hydrogen Using Thermochemical Water-Splitting Cycles, 2002年6月13日至19日在佛罗里达州好莱坞举行的国际先进核电站大会 (International Congress on Advanced Nuclear Power Plants, ICAPP) 上提交的论文的预印本并发表在会议论文集上。]

循环名称	T/E*	T (°C)	反应
1	Westinghouse	T 850	$2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		E 77	$\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{a}) \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4(\text{a}) + \text{H}_2(\text{g})$
2	Ispra Mark 13	T 850	$2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		E 77	$2\text{HBr}(\text{a}) \rightarrow \text{Br}_2(\text{a}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T 77	$\text{Br}_2(\text{l}) + \text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{HBr}(\text{g}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{a})$
3	UT-3 Univ. of Tokyo	T 600	$2\text{Br}_2(\text{g}) + 2\text{CaO} \rightarrow 2\text{CaBr}_2 + \text{O}_2(\text{g})$
		T 600	$3\text{FeBr}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HBr} + \text{H}_2(\text{g})$
		T 750	$\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + 2\text{HBr}$
		T 300	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{HBr} \rightarrow \text{Br}_2 + 3\text{FeBr}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$
4	Sulfur-Iodine	T 850	$2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 450	$2\text{HI} \rightarrow \text{I}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T 120	$\text{I}_2 + \text{SO}_2(\text{a}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HI}(\text{a}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{a})$
5	Julich Center EOS	T 800	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{FeSO}_4 \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{SO}_2 + \text{O}_2(\text{g})$
		T 700	$3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2(\text{g})$
		T 200	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{FeO} + \text{FeSO}_4$
[0774]	6 Tokyo Inst. Tech.Ferrite	T 1000	$2\text{MnFe}_2\text{O}_4 + 3\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Na}_3\text{MnFe}_2\text{O}_6 + 3\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T 600	$4\text{Na}_3\text{MnFe}_2\text{O}_6 + 6\text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{MnFe}_2\text{O}_4 + 6\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{O}_2(\text{g})$
7	Hallett Air Products 1965	T 800	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		E 25	$2\text{HCl} \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
8	Gaz de France	T 725	$2\text{K} + 2\text{KOH} \rightarrow 2\text{K}_2\text{O} + \text{H}_2(\text{g})$
		T 825	$2\text{K}_2\text{O} \rightarrow 2\text{K} + \text{K}_2\text{O}_2$
		T 125	$2\text{K}_2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{KOH} + \text{O}_2(\text{g})$
9	Nickel Ferrite	T 800	$\text{NiMnFe}_4\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NiMnFe}_4\text{O}_8 + 2\text{H}_2(\text{g})$
		T 800	$\text{NiMnFe}_4\text{O}_8 \rightarrow \text{NiMnFe}_4\text{O}_6 + \text{O}_2(\text{g})$
10	Aachen Univ Julich 1972	T 850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 170	$2\text{CrCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CrCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T 800	$2\text{CrCl}_3 \rightarrow 2\text{CrCl}_2 + \text{Cl}_2(\text{g})$
11	Ispra Mark 1C	T 100	$2\text{CuBr}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{CuO} + 2\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O}$
		T 900	$4\text{CuO}(\text{s}) \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 730	$\text{CaBr}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HBr}$
		T 100	$\text{Cu}_2\text{O} + 4\text{HBr} \rightarrow 2\text{CuBr}_2 + \text{H}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
12	LASL- U	T 25	$3\text{CO}_2 + \text{U}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{UO}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2(\text{g})$

		T 250 $3\text{UO}_2\text{CO}_3 \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{UO}_3$
		T 700 $6\text{UO}_3(\text{s}) \rightarrow 2\text{U}_3\text{O}_8(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$
13	Ispra Mark 8	T 700 $3\text{MnCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2(\text{g})$
		T 900 $3\text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g})$
		T 100 $4\text{HCl} + \text{Mn}_3\text{O}_4 \rightarrow 2\text{MnCl}_2(\text{a}) + \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
14	Ispra Mark 6	T 850 $2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 170 $2\text{CrCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CrCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T 700 $2\text{CrCl}_3 + 2\text{FeCl}_2 \rightarrow 2\text{CrCl}_2 + 2\text{FeCl}_3$
		T 420 $2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
15	Ispra Mark 4	T 850 $2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 100 $2\text{FeCl}_2 + 2\text{HCl} + \text{S} \rightarrow 2\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{S}$
		T 420 $2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T 800 $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{H}_2(\text{g})$
16	Ispra Mark 3	T 850 $2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 170 $2\text{VOCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{VOCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T 200 $2\text{VOCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{VOCl}_2$
17	Ispra Mark 2 (1972)	T 100 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}(\text{a}) + \text{MnO}_2$
		T 487 $4\text{MnO}_2(\text{s}) \rightarrow 2\text{Mn}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 800 $\text{Mn}_2\text{O}_3 + 4\text{NaOH} \rightarrow 2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + \text{H}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
18	Ispra CO/Mn3O4	T 977 $6\text{Mn}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g})$
		T 700 $\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T 700 $\text{CO}(\text{g}) + 2\text{Mn}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{C} + 3\text{Mn}_2\text{O}_3$
19	Ispra Mark 7B	T 1000 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{FeCl}_3 + 3\text{O}_2(\text{g})$
[0775]		T 420 $2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T 650 $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2(\text{g})$
		T 350 $4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3$
		T 400 $4\text{HCl} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}$
20	Vanadium Chloride	T 850 $2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 25 $2\text{HCl} + 2\text{VCl}_2 \rightarrow 2\text{VCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T 700 $2\text{VCl}_3 \rightarrow \text{VCl}_4 + \text{VCl}_2$
		T 25 $2\text{VCl}_4 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{VCl}_3$
21	Ispra Mark 7A	T 420 $2\text{FeCl}_3(\text{l}) \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T 650 $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T 350 $4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3$
		T 1000 $6\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{FeCl}_3(\text{g}) + 3\text{O}_2(\text{g})$
		T 120 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl}(\text{a}) \rightarrow 2\text{FeCl}_3(\text{a}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$
22	GA Cycle 23	T 800 $\text{H}_2\text{S}(\text{g}) \rightarrow \text{S}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T 850 $2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 700 $3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \text{SO}_2(\text{g})$
		T 25 $3\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{a}) + \text{S}$
		T 25 $\text{S}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{SO}_2(\text{g})$
23	US -Chlorine	T 850 $2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 200 $2\text{CuCl} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CuCl}_2 + \text{H}_2(\text{g})$
		T 500 $2\text{CuCl}_2 \rightarrow 2\text{CuCl} + \text{Cl}_2(\text{g})$
24	Ispra Mark	T 420 $2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T 150 $3\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 12\text{HCl} \rightarrow 6\text{FeCl}_3 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2(\text{g})$
		T 650 $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2(\text{g})$
25	Ispra Mark 6C	T 850 $2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T 170 $2\text{CrCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CrCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T 700 $2\text{CrCl}_3 + 2\text{FeCl}_2 \rightarrow 2\text{CrCl}_2 + 2\text{FeCl}_3$
		T 500 $2\text{CuCl}_2 \rightarrow 2\text{CuCl} + \text{Cl}_2(\text{g})$
[0776]		T 300 $\text{CuCl} + \text{FeCl}_3 \rightarrow \text{CuCl}_2 + \text{FeCl}_2$

[0777] *T=热化学,E=电化学。

[0778] 表3.关于H₂O催化剂和H₂的热可逆反应循环.[C.Perkins和A.W.Weimer,Solar-Thermal Production of Renewable Hydrogen,AIChE Journal,55(2),(2009),第286-293页。]

循环	反应步骤
高温循环	
Zn/ZnO	$\text{ZnO} \xrightarrow{1600-1800\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Zn} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
	$\text{Zn} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{400\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{ZnO} + \text{H}_2$
FeO/Fe ₃ O ₄	$\text{Fe}_3\text{O}_4 \xrightarrow{2000-2300\text{ }^{\circ}\text{C}} 3\text{FeO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
	$3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{400\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$
碳酸铬	$\text{CdO} \xrightarrow{1450-1500\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Cd} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
	$\text{Cd} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \xrightarrow{350\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{CdCO}_3 + \text{H}_2$
	$\text{CdCO}_3 \xrightarrow{500\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{CO}_2 + \text{CdO}$
	$\text{CdO} \xrightarrow{1450-1500\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Cd} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
[0779] 混合铬	$\text{Cd} + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{25\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ 电化学}} \text{Cd}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$
	$\text{Cd}(\text{OH})_2 \xrightarrow{375\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{CdO} + \text{H}_2\text{O}$
锰钠	$\text{Mn}_2\text{O}_3 \xrightarrow{1400-1600\text{ }^{\circ}\text{C}} 2\text{MnO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
	$2\text{MnO} + 2\text{NaOH} \xrightarrow{627\text{ }^{\circ}\text{C}} 2\text{NaMnO}_2 + \text{H}_2$
	$2\text{NaMnO}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{25\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Mn}_2\text{O}_3 + 2\text{NaOH}$
铁酸M (M = Co、Ni、Zn)	$\text{Fe}_{3-x}\text{M}_x\text{O}_4 \xrightarrow{1200-1400\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Fe}_{3-x}\text{M}_x\text{O}_{4-\delta} + \frac{\delta}{2} \text{O}_2$
	$\text{Fe}_{3-x}\text{M}_x\text{O}_{4-\delta} + \delta\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{1000-1200\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Fe}_{3-x}\text{M}_x\text{O}_4 + \delta\text{H}_2$
低温循环	
硫-碘	$\text{H}_2\text{SO}_4 \xrightarrow{850\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
	$\text{I}_2 + \text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{100\text{ }^{\circ}\text{C}} 2\text{HI} + \text{H}_2\text{SO}_4$
	$2\text{HI} \xrightarrow{300\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{I}_2 + \text{H}_2$
混合硫	$\text{H}_2\text{SO}_4 \xrightarrow{850\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
	$\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{77\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ 电化学}} \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$
混合氯化铜	$\text{Cu}_2\text{OCl}_2 \xrightarrow{550\text{ }^{\circ}\text{C}} 2\text{CuCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
	$2\text{Cu} + 2\text{HCl} \xrightarrow{425\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{H}_2 + 2\text{CuCl}$
	$4\text{CuCl} \xrightarrow{25\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ 电化学}} 2\text{Cu} + 2\text{CuCl}_2$
	$2\text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{325\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{Cu}_2\text{OCl}_2 + 2\text{HCl}$

[0781]

表4. 关于H₂O催化剂和H₂的热可逆反应循环. [S. Abanades, P. Charvin, G. Flamant, P. Neveu, Screening of Water-Splitting Thermochemical Cycles Potentially Attractive for Hydrogen Production by Concentrated Solar Energy, Energy, 31, (2006), 第2805-2822页。]

Id号	循环 的名称	元素 列表	化学步 骤数目	最高 温度(°C)	反应	
6	ZnO/Zn	Zn	2	2000	$\text{ZnO} \rightarrow \text{Zn} + 1/2\text{O}_2$	(2000 °C)
7	Fe ₃ O ₄ /FeO	Fe	2	2200	$\text{Zn} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZnO} + \text{H}_2$ $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 3\text{FeO} + 1/2\text{O}_2$	(1100 °C) (2200 °C)
194	In ₂ O ₃ /In ₂ O	In	2	2200	$3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$ $\text{In}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{In}_2\text{O} + \text{O}_2$	(400 °C) (2200 °C)
194	SnO ₂ /Sn	Sn	2	2650	$\text{In}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{In}_2\text{O}_3 + 2\text{H}_2$ $\text{SnO}_2 \rightarrow \text{Sn} + \text{O}_2$	(800 °C) (2650 °C)
83	MnO/MnSO ₄	Mn, S	2	1100	$\text{Sn} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SnO}_2 + 2\text{H}_2$ $\text{MnSO}_4 \rightarrow \text{MnO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$	(600 °C) (1100 °C)
84	FeO/FeSO ₄	Fe, S	2	1100	$\text{MnO} + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{MnSO}_4 + \text{H}_2$ $\text{FeSO}_4 \rightarrow \text{FeO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$	(250 °C) (1100 °C)
86	CoO/CoSO ₄	Co, S	2	1100	$\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2$ $\text{CoSO}_4 \rightarrow \text{CoO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$	(250 °C) (1100 °C)
200	Fe ₃ O ₄ /FeCl ₂	Fe, Cl	2	1500	$\text{CoO} + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CoSO}_4 + \text{H}_2$ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{FeCl}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2$	(200 °C) (1500 °C)
14	FeSO ₄ Julich	Fe, S	3	1800	$3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2$ $3\text{FeO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2$	(700 °C) (200 °C)
85	FeSO ₄	Fe, S	3	2300	$\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{FeSO}_4 \rightarrow 3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{SO}_2(\text{g}) + 1/2\text{O}_2$ $3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{SO}_2 \rightarrow 3\text{FeSO}_4 + 3\text{FeO}(\text{s})$	(800 °C) (1800 °C)
109	C7 IGT	Fe, S	3	1000	$3\text{FeO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2$ $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 3\text{SO}_3(\text{g}) \rightarrow 3\text{FeSO}_4 + 1/2\text{O}_2$ $\text{FeSO}_4 \rightarrow \text{FeO} + \text{SO}_3$	(200 °C) (300 °C) (2300 °C)
21	Shell Process	Cu, S	3	1750	$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 2\text{SO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeSO}_4(\text{s}) + \text{H}_2$ $2\text{FeSO}_4(\text{s}) \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{SO}_2(\text{g}) + \text{SO}_3(\text{g})$ $\text{SO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{SO}_2(\text{g}) + 1/2\text{O}_2(\text{g})$ $6\text{Cu}(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Cu}_2\text{O}(\text{s}) + 3\text{H}_2$ $\text{Cu}_2\text{O}(\text{s}) + 2\text{SO}_2 + 3/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CuSO}_4$	(125 °C) (700 °C) (1000 °C) (500 °C) (300 °C)

[0782]

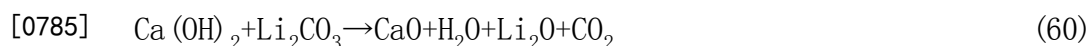
87	CuSO ₄	Cu, S	3	1500	$2\text{Cu}_2\text{O(s)} + 2\text{CuSO}_4 \rightarrow 6\text{Cu} + 2\text{SO}_2 + 3\text{O}_2$ (1750 °C) $\text{Cu}_2\text{O(s)} + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow \text{Cu(s)} + \text{Cu(OH)}_2$ (1500 °C) $\text{Cu(OH)}_2 + \text{SO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{H}_2$ (100 °C) $\text{CuSO}_4 + \text{Cu(s)} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O(s)} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$ (1500 °C) $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{BaMoO}_4 \rightarrow \text{BaSO}_3 + \text{MoO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (300 °C) $\text{BaSO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{BaSO}_4 + \text{H}_2$ $\text{BaSO}_4(\text{s}) + \text{MoO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{BaMoO}_4(\text{s}) + \text{SO}_2(\text{g}) + 1/2\text{O}_2$ (1300 °C) $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2$ (680 °C) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 3/2\text{Cl}_2 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2$ (900 °C) $3\text{FeCl}_3 \rightarrow 3\text{FeCl}_2 + 3/2\text{Cl}_2$ (420 °C) $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl} + 1/2\text{O}_2$ (1000 °C) $2\text{HCl} + 2\text{FeCl}_2 \rightarrow 2\text{FeCl}_3 + \text{H}_2$ (600 °C) $2\text{FeCl}_3 \rightarrow 2\text{FeCl}_2 + \text{Cl}_2$ (350 °C) $2\text{CrCl}_2(\text{s}, T_f = 815\text{ °C}) + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CrCl}_3(\text{s}) + \text{H}_2$ (200 °C) $2\text{CrCl}_3(\text{s}, T_f = 1150\text{ °C}) \rightarrow 2\text{CrCl}_2(\text{s}) + \text{Cl}_2$ (1600 °C) $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl} + 1/2\text{O}_2$ (1000 °C) $6\text{MnCl}_2(\text{l}) + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Mn}_3\text{O}_4 + 12\text{HCl} + 2\text{H}_2$ (700 °C) $3\text{Mn}_3\text{O}_4(\text{s}) + 12\text{HCl} \rightarrow 6\text{MnCl}_2(\text{s}) + 3\text{MnO}_2(\text{s}) + 6\text{H}_2\text{O}$ (100 °C) $3\text{MnO}_2(\text{s}) \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{O}_2$ (1000 °C) $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl} + 1/2\text{O}_2$ (1000 °C) $2\text{TaCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{TaCl}_3 + \text{H}_2$ (100 °C) $2\text{TaCl}_3 \rightarrow 2\text{TaCl}_2 + \text{Cl}_2$ (2200 °C) $\text{Cl}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow 2\text{HCl(g)} + 1/2\text{O}_2(\text{g})$ (1000 °C) $2\text{VOCl}_2(\text{s}) + 2\text{HCl(g)} \rightarrow 2\text{VOCl}_3(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$ (170 °C) $2\text{VOCl}_3(\text{g}) \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{VOCl}_2(\text{s})$ (200 °C) $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl} + 1/2\text{O}_2$ (1000 °C) $2\text{BiCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{BiCl}_3 + \text{H}_2$ (300 °C) $2\text{BiCl}_3(T_f = 233\text{ °C}, T_{\text{ab}} = 441\text{ °C}) \rightarrow 2\text{BiCl}_2 + \text{Cl}_2$ (1700 °C) $3\text{Fe(s)} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 4\text{H}_2$ (700 °C) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{FeCl}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2$ (1800 °C) $3\text{FeCl}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 3\text{Fe(s)} + 6\text{HCl}$ (1300 °C) $3/2\text{FeO(s)} + 3/2\text{Fe(s)} + 2.5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 2.5\text{H}_2$ (1000 °C) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{FeCl}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2$ (1800 °C)
110	LASL BaSO ₄	Ba, Mo, S	3	1300	
4	Mark 9	Fe, Cl	3	900	
16	Euratom 1972	Fe, Cl	3	1000	
20	Cr, Cl Julich	Cr, Cl	3	1600	
27	Mark 8	Mn, Cl	3	1000	
37	Ta Funk	Ta, Cl	3	2200	
78	Mark 3 Euratom JRC Ispra (Italy)	V, Cl	3	1000	
144	Bi, Cl	Bi, Cl	3	1700	
146	Fe, Cl Julich	Fe, Cl	3	1800	
147	Fe, Cl Cologne	Fe, Cl	3	1800	

[0783]

25	Mark 2	Mn, Na	3	900	$3\text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + 3/2\text{H}_2 \rightarrow 3/2\text{FeO}(\text{s}) + 3/2\text{Fe}(\text{s}) + 6\text{HCl}$ $\text{Mn}_2\text{O}_3(\text{s}) + 4\text{NaOH} \rightarrow 2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ $2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{NaOH} + 2\text{MnO}_2(\text{s})$ $2\text{MnO}_2(\text{s}) \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3(\text{s}) + 1/2\text{O}_2$ $6\text{LiOH} + 2\text{Mn}_3\text{O}_4 \rightarrow 3\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Mn}_2\text{O}_3 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ $3\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Mn}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{LiOH} + 3\text{Mn}_2\text{O}_3$ $3\text{Mn}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Mn}_3\text{O}_4 + 1/2\text{O}_2$ $2\text{MnO} + 2\text{NaOH} \rightarrow 2\text{NaMnO}_2 + \text{H}_2$ $2\text{NaMnO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 + 2\text{NaOH}$ $\text{Mn}_2\text{O}_3(\text{l}) \rightarrow 2\text{MnO}(\text{s}) + 1/2\text{O}_2$ $2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{MOH} \rightarrow 3\text{MFeO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ $3\text{MFeO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{MOH} + 3\text{Fe}_2\text{O}_3$ $3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 1/2\text{O}_2$ $\text{Sn}(\text{l}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SnO}_2 + 2\text{H}_2$ $2\text{SnO}_2(\text{s}) \rightarrow 2\text{SnO} + \text{O}_2$ $2\text{SnO}(\text{s}) \rightarrow \text{SnO}_2 + \text{Sn}(\text{l})$ $\text{CoO}(\text{s}) + x\text{Ba}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightarrow$ $\text{Ba}_x\text{CoO}_y(\text{s}) + (y-x-1)\text{H}_2 + (1+2x-y)\text{H}_2\text{O}$ $\text{Ba}_x\text{CoO}_y(\text{s}) + x\text{H}_2\text{O} \rightarrow x\text{Ba}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{CoO}(y-x)(\text{s})$ $\text{CoO}(y-x)(\text{s}) \rightarrow \text{CoO}(\text{s}) + (y-x-1)/2\text{O}_2$ $2\text{CeO}_2(\text{s}) + 3\text{TiO}_2(\text{s}) \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2 + 1/2\text{O}_2$ $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2 + 6\text{NaOH} \rightarrow 2\text{CeO}_2 + 3\text{Na}_2\text{TiO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ $\text{CeO}_2 + 3\text{NaTiO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CeO}_2(\text{s}) + 3\text{TiO}_2(\text{s}) + 6\text{NaOH}$ $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl} + 1/2\text{O}_2$ $2\text{CeO}_2 + 8\text{HCl} \rightarrow 2\text{CeCl}_3 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2$ $2\text{CeCl}_3 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CeO}_2 + 6\text{HCl} + \text{H}_2$	(700 °C) (900 °C) (100 °C) (600 °C) (700 °C) (80 °C) (1000 °C) (800 °C) (100 °C) (1500 °C) (500 °C) (100 °C) (1300 °C) (400 °C) (1700 °C) (700 °C) (850 °C) (100 °C) (1000 °C) (800–1300 °C) (800 °C) (150 °C) (1000 °C) (250 °C) (800 °C)
28	Li, Mn LASL	Mn, Li	3	1000		
199	Mn PSI	Mn, Na	3	1500		
178	Fe, M ORNL	Fe, (M = Li, K, Na)	3	1300		
33	Sn Souriau	Sn	3	1700		
177	Co ORNL	Co, Ba	3	1000		
183	Ce, Ti ORNL	Ce, Ti, Na	3	1300		
269	Ce, Cl GA	Ce, Cl	3	1000		

[0784] 用以形成H₂O催化剂的反应物可包含O(诸如O物质)源和H源。O物质源可包含以下的至少一者:O₂、空气以及包含O的化合物的配混物或共混物。包含氧的化合物可包含氧化剂。包含氧的化合物可包含氧化物、羟基氧化物、氢氧化物、过氧化物和超氧化物中的至

少一者。合适的示例性金属氧化物是：碱金属氧化物，诸如 Li_2O 、 Na_2O 和 K_2O ；碱土金属氧化物，诸如 MgO 、 CaO 、 SrO 和 BaO ；过渡金属氧化物，诸如 NiO 、 Ni_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 和 CoO ；以及内过渡和稀土金属氧化物，以及其他金属和类金属的那些，诸如 Al 、 Ga 、 In 、 Si 、 Ge 、 Sn 、 Pb 、 As 、 Sb 、 Bi 、 Se 和 Te 的那些，以及包含氧的这些元素和其他元素的混合物。氧化物可包含：氧化物阴离子，诸如本公开的那些，诸如金属氧化物阴离子；和阳离子，诸如碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属阳离子，以及其他金属和类金属的那些，诸如 Al 、 Ga 、 In 、 Si 、 Ge 、 Sn 、 Pb 、 As 、 Sb 、 Bi 、 Se 和 Te 的那些，诸如 $\text{MM}'_{2x}\text{O}_{3x+1}$ 或 $\text{MM}'_{2x}\text{O}_4$ （ M =碱土金属， M' =过渡金属，诸如 Fe 或 Ni 或 Mn ， x =整数）和 $\text{M}_2\text{M}'_{2x}\text{O}_{3x+1}$ 或 $\text{M}_2\text{M}'_{2x}\text{O}_4$ （ M =碱金属， M' =过渡金属，诸如 Fe 或 Ni 或 Mn ， x =整数）。合适的示例性金属羟基氧化物是 $\text{AlO}(\text{OH})$ 、 $\text{ScO}(\text{OH})$ 、 $\text{YO}(\text{OH})$ 、 $\text{VO}(\text{OH})$ 、 $\text{CrO}(\text{OH})$ 、 $\text{MnO}(\text{OH})$ （ α - $\text{MnO}(\text{OH})$ 锰榴石和 γ - $\text{MnO}(\text{OH})$ 水锰矿）、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\text{CoO}(\text{OH})$ 、 $\text{NiO}(\text{OH})$ 、 $\text{RhO}(\text{OH})$ 、 $\text{GaO}(\text{OH})$ 、 $\text{InO}(\text{OH})$ 、 $\text{Ni}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{O}(\text{OH})$ 和 $\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}(\text{OH})$ 。合适的示例性氢氧化物是诸如碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属之类的金属的那些氢氧化物以及诸如 Al 、 Ga 、 In 、 Si 、 Ge 、 Sn 、 Pb 、 As 、 Sb 、 Bi 、 Se 和 Te 之类的其他金属和类金属的那些氢氧化物以及混合物。合适的络离子氢氧化物是 $\text{Li}_2\text{Zn}(\text{OH})_4$ 、 $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{OH})_4$ 、 $\text{Li}_2\text{Sn}(\text{OH})_4$ 、 $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_4$ 、 $\text{Li}_2\text{Pb}(\text{OH})_4$ 、 $\text{Na}_2\text{Pb}(\text{OH})_4$ 、 $\text{LiSb}(\text{OH})_4$ 、 $\text{NaSb}(\text{OH})_4$ 、 $\text{LiAl}(\text{OH})_4$ 、 $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ 、 $\text{LiCr}(\text{OH})_4$ 、 $\text{NaCr}(\text{OH})_4$ 、 $\text{Li}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ 和 $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ 。额外的示例性的合适氢氧化物是来自 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 、其他过渡金属氢氧化物、 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Sn}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Pb}(\text{OH})_2$ 的至少一者。合适的示例性过氧化物是 H_2O_2 、有机化合物的过氧化物和金属的过氧化物诸如 M_2O_2 （其中 M 为碱金属，诸如 Li_2O_2 、 Na_2O_2 、 K_2O_2 ）、其他离子过氧化物（诸如碱土金属过氧化物的那些，诸如 Ca 、 Sr 或 Ba 过氧化物）、其他正电性金属的那些（诸如镧系元素的过氧化物）和共价金属过氧化物（诸如 Zn 、 Cd 和 Hg 的过氧化物）。合适的示例性超氧化物是金属的超氧化物（ MO_2 ，其中 M 为碱金属，诸如 NaO_2 、 KO_2 、 RbO_2 和 CsO_2 ）以及碱土金属超氧化物。在一个实施方式中，固体燃料包含碱金属过氧化物和氢源（诸如氢化物、烃或储氢材料，诸如 BH_3NH_3 ）。反应混合物可包含：氢氧化物，诸如碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属以及 Al 、 Ga 、 In 、 Sn 、 Pb 和可形成氢氧化物的其他元素的氢氧化物；以及氧源，诸如包含至少一个含氧阴离子的化合物，诸如碳酸盐，诸如包含碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属以及 Al 、 Ga 、 In 、 Sn 、 Pb 以及本公开的其他者的一者。包含氧的其他合适化合物是以下各项的群组的含氧阴离子化合物中的至少一者：铝酸盐、钨酸盐、钼酸盐、钛酸盐、硫酸盐、磷酸盐、碳酸盐、硝酸盐、铬酸盐、二铬酸盐和锰酸盐、氧化物、羟基氧化物、过氧化物、超氧化物、硅酸盐、钛酸盐、钨酸盐和本公开的其他者。氢氧化物和碳酸盐的示例性反应由下式给出：



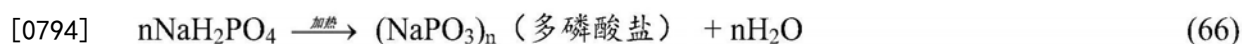
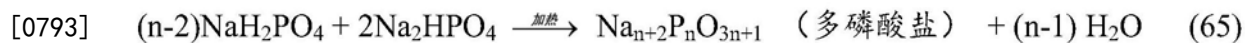
[0786] 在其他实施方式中，氧源是气态的或者容易形成气体诸如 NO_2 、 NO 、 N_2O 、 CO_2 、 P_2O_3 、 P_2O_5 和 SO_2 。可通过与氧或其源一起燃烧而将因形成 H_2O 催化剂而产生的还原的氧化物产物（诸如 C 、 N 、 NH_3 、 P 或 S ）再次转换回氧化物，如 Mills 先前专利申请中所给出。池可产生可用于加热应用的过量热量，或者可通过诸如兰金或布雷顿系统之类的部件将该热量转换为电。作为另一种选择，可将池用于合成低能氢物质，诸如分子分数氢和分数氢氢负离子以及相应的化合物。

[0787] 在一个实施方式中，用以形成分数氢以实现产生低能氢物质和化合物和产生能量中的至少一者的反应混合物包含原子氢源和催化剂源，其包含 H 和 O 中的至少一者，诸如本

公开的那些,诸如 H_2O 催化剂。反应混合物可还包含酸(诸如 H_2SO_3 、 H_2SO_4 、 H_2CO_3 、 HNO_2 、 HNO_3 、 HClO_4 、 H_3PO_3 和 H_3PO_4)或酸源(诸如酸酐或无水酸)。后者可包含以下各项的群组中的至少一者: SO_2 、 SO_3 、 CO_2 、 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_5 、 Cl_2O_7 、 PO_2 、 P_2O_3 和 P_2O_5 。反应混合物可包含以下中的至少一者:碱和碱酐诸如 M_2O (M =碱金属)、 $\text{M}'\text{O}$ (M' =碱土金属)、 ZnO 或其他过渡金属氧化物、 CdO 、 CoO 、 SnO 、 AgO 、 HgO 或 Al_2O_3 。另外的示例性酐包含对于 H_2O 稳定的金属,诸如 Cu 、 Ni 、 Pb 、 Sb 、 Bi 、 Co 、 Cd 、 Ge 、 Au 、 Ir 、 Fe 、 Hg 、 Mo 、 Os 、 Pd 、 Re 、 Rh 、 Ru 、 Se 、 Ag 、 Tc 、 Te 、 Tl 、 Sn 、 W 、 Al 、 V 、 Zr 、 Ti 、 Mn 、 Zn 、 Cr 和 In 。酐可以是碱金属或碱土金属氧化物,并且水合化合物可包含氢氧化物。反应混合物可包含羟基氧化物,诸如 FeOOH 、 NiOOH 或 CoOOH 。反应混合物可包含 H_2O 源和 H_2O 中的至少一者。可在存在原子氢的情况下通过水合反应和脱水反应可逆地形成 H_2O 。用以形成 H_2O 催化剂的示例性反应是

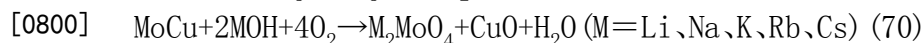


[0792] 在一个实施方式中,通过至少一种化合物的脱水而形成 H_2O 催化剂,该至少一种化合物包含:磷酸盐,诸如磷酸盐、磷酸氢盐和二氢磷酸盐,诸如阳离子(诸如包含诸如碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属之类的金属的阳离子)的那些,以及其他金属和类金属的那些(诸如 Al 、 Ga 、 In 、 Si 、 Ge 、 Sn 、 Pb 、 As 、 Sb 、 Bi 、 Se 和 Te 的那些);以及混合物,其用以形成凝结的磷酸盐,诸如多磷酸盐(诸如 $[\text{P}_n\text{O}_{3n+1}]^{(n+2)-}$)、长链偏磷酸盐(诸如 $[(\text{PO}_3)_n]^{n-}$)、环偏磷酸盐(诸如 $[(\text{PO}_3)_n]^{n-}$,其中 $n \geq 3$)和过磷酸盐(诸如 P_4O_{10})中的至少一者。示例性的反应是



[0795] 脱水反应的反应物可包含 R-Ni ,其可包含 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 Al_2O_3 中的至少一者。反应物可还包含金属 M (诸如本公开的那些,诸如碱金属)、金属氢化物 MH 、金属氢氧化物(诸如本公开的那些,诸如碱金属氢氧化物)和氢源(诸如 H_2 以及本质氢)。

[0796] 示例性的反应是



[0801] 反应产物可包含合金。可通过再水化而再生 R-Ni 。用以形成 H_2O 催化剂的反应混合物和脱水反应可包括和涉及羟基氧化物,诸如本公开的那些,如示例性反应中所给出的:



[0803] 可通过解离由 H_2 气形成原子氢。氢解离器可以是本公开的那些氢解离器中的一者,诸如 R-Ni 或在载体上的贵金属或过渡金属,诸如碳或 Al_2O_3 上的 Ni 或 Pt 或 Pd 。作为另一种选择,原子 H 可以是来自透过膜(诸如本公开的那些)的 H 渗透。在一个实施方式中,池包括膜(诸如陶瓷膜)以允许 H_2 选择性地扩散通过同时阻止 H_2O 扩散。在一个实施方式中,通过包含

氢源的电解质(诸如包含 H_2O 的水性或熔融电解质)的电解将 H_2 和原子H中的至少一者供应至池。在一个实施方式中,通过使酸或碱脱水为酐形式而可逆地形成 H_2O 催化剂。在一个实施方式中,通过改变池pH或活性、温度和压力中的至少一者而传播用以形成催化剂 H_2O 和分数氢的反应,其中可通过改变温度来改变压力。可通过添加盐来改变诸如酸、碱或酐之类的物质的活性,如本领域技术人员已知的。在一个实施方式中,反应混合物可包含诸如碳之类的材料,该材料可吸收气体诸如 H_2 或酸酐气体或者是这些气体的源,所述气体用于用以形成分数氢的反应。反应物可呈任何所需的浓度和比率。反应混合物可以是熔融的或包含水性浆料。

[0804] 在另一个实施方式中, H_2O 催化剂的源是酸与碱之间的反应,诸如氢卤酸、硫酸、硝酸和亚硝酸中的至少一者与碱之间的反应。其他合适的酸反应物为 H_2SO_4 、 HCl 、 HX (X =卤离子)、 H_3PO_4 、 $HClO_4$ 、 HNO_3 、 HNO 、 HNO_2 、 H_2S 、 H_2CO_3 、 H_2MoO_4 、 $HNbO_3$ 、 $H_2B_4O_7$ (M =四硼酸盐)、 HBO_2 、 H_2WO_4 、 H_2CrO_4 、 $H_2Cr_2O_7$ 、 H_2TiO_3 、 $HZrO_3$ 、 $MAIO_2$ 、 HMn_2O_4 、 HIO_3 、 HIO_4 、 $HClO_4$ 或有机酸(诸如甲酸或醋酸)的水溶液。合适的示例性碱为氢氧化物、羟基氧化物或氧化物,其包含碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属或稀土金属,或者Al、Ga、In、Sn或Pb。

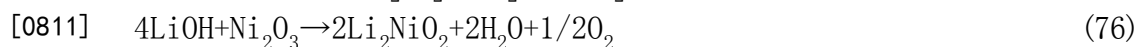
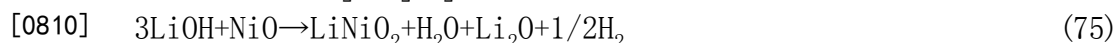
[0805] 在一个实施方式中,反应物可包含分别与碱酐或酸酐反应的酸或碱,以分别形成 H_2O 催化剂以及该碱的阳离子和该酸酐的阴离子或者该碱酐的阳离子和该酸的阴离子的化合物。酸酐 SiO_2 与碱NaOH的示例性反应是



其中相应酸的脱水反应是

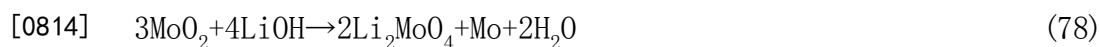


[0808] 其他合适的示例性酐可包含元素、金属、合金或混合物,诸如来自以下各项的群组的元素、金属、合金或混合物:Mo、Ti、Zr、Si、Al、Ni、Fe、Ta、V、B、Nb、Se、Te、W、Cr、Mn、Hf、Co和Mg。相应的氧化物可包含以下各项中的至少一者: MoO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 NiO 、 Ni_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 TaO_2 、 Ta_2O_5 、 VO 、 VO_2 、 V_2O_3 、 V_2O_5 、 B_2O_3 、 NbO 、 NbO_2 、 Nb_2O_5 、 SeO_2 、 SeO_3 、 TeO_2 、 TeO_3 、 WO_2 、 WO_3 、 Cr_3O_4 、 Cr_2O_3 、 CrO_2 、 CrO_3 、 MnO 、 Mn_3O_4 、 Mn_2O_3 、 MnO_2 、 Mn_2O_7 、 HfO_2 、 Co_2O_3 、 CoO 、 Co_3O_4 、 Co_2O_3 和 MgO 。在一个示例性实施方式中,碱包含氢氧化物,诸如碱金属氢氧化物,诸如 MOH (M =碱),诸如 $LiOH$,其可形成相应的碱性氧化物(诸如 M_2O ,诸如 Li_2O)和 H_2O 。碱性氧化物可与酐氧化物反应以形成产物氧化物。在 $LiOH$ 与酐氧化物的示例性反应(其中释放 H_2O)中,产物氧化物化合物可包含 Li_2MoO_3 或 Li_2MoO_4 、 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 、 Li_2SiO_3 、 $LiAlO_2$ 、 $LiNiO_2$ 、 $LiFeO_2$ 、 $LiTaO_3$ 、 $LiVO_3$ 、 $Li_2B_4O_7$ 、 Li_2NbO_3 、 Li_2SeO_3 、 Li_3PO_4 、 Li_2SeO_4 、 Li_2TeO_3 、 Li_2TeO_4 、 Li_2WO_4 、 Li_2CrO_4 、 $Li_2Cr_2O_7$ 、 Li_2MnO_4 、 Li_2HfO_3 、 $LiCoO_2$ 和 MgO 。其他合适的示例性氧化物是以下各项的群组中的至少一者: As_2O_3 、 As_2O_5 、 Sb_2O_3 、 Sb_2O_4 、 Sb_2O_5 、 Bi_2O_3 、 SO_2 、 SO_3 、 CO_2 、 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_5 、 Cl_2O_7 、 PO_2 、 P_2O_3 和 P_2O_5 ,以及本领域技术人员已知的其他类似氧化物。另一实例由式(91)给出。金属氧化物的合适反应是

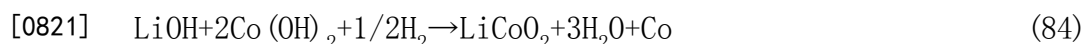


[0813] 其他过渡金属(诸如Fe、Cr和Ti)、内过渡和稀土金属以及其他金属或类金属(诸如

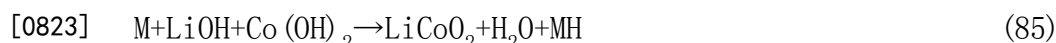
Al、Ga、In、Si、Ge、Sn、Pb、As、Sb、Bi、Se和Te)可取代Ni,并且其他碱金属(诸如Li、Na、Rb和Cs)可取代K。在一个实施方式中,氧化物可包含Mo,其中在用以形成H₂O的反应期间,可形成进一步发生反应以形成分数氢的新生H₂O催化剂和H。示例性的固体燃料反应和可能的氧化还原路径是



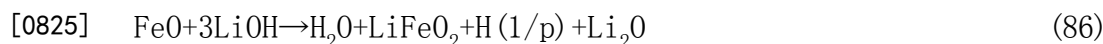
[0820] 反应还可包括氢源(诸如氢气)和解离器(诸如Pd/Al₂O₃)。氢可以是气、氘或氚或它们的组合中的任一者。用以形成H₂O催化剂的反应可包括两种氢氧化物反应以形成水。氢氧化物的阳离子可具有不同的氧化态,诸如碱金属氢氧化物与过渡金属或碱土金属氢氧化物的反应的那些。该反应混合物和反应可还包含以及涉及来自源的H₂,如示例性反应中所给出的:



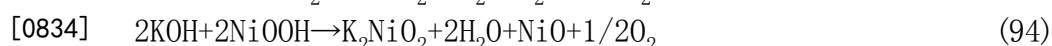
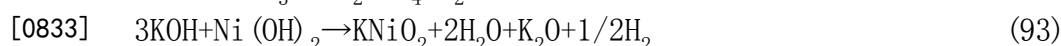
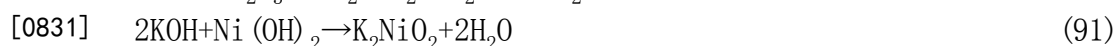
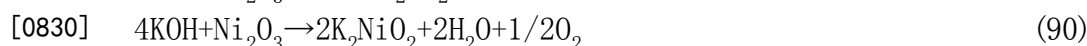
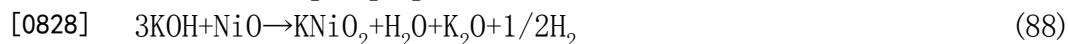
[0822] 该反应混合物和反应可还包含以及涉及金属M,诸如碱金属或碱土金属,如示例性反应中所给出的:



[0824] 在一个实施方式中,该反应混合物包含金属氧化物和可充当H源的氢氧化物以及任选的另一H源,其中该金属氧化物的金属(诸如Fe)可具有多个氧化态使得其在反应期间经历氧化-还原反应以形成H₂O以充当与H反应形成分数氢的催化剂。实例为FeO,其中Fe²⁺可在反应期间经历氧化至Fe³⁺以形成催化剂。示例性的反应是



[0826] 在一个实施方式中,至少一种反应物诸如金属氧化物、氢氧化物或羟基氧化物中充当氧化剂,其中诸如Fe、Ni、Mo或Mn之类的金属原子可处于比另一可能的氧化态高的氧化态。用以形成催化剂和分数氢的反应可致使原子经历向至少一个较低氧化态的还原。用以形成H₂O催化剂的金属氧化物、氢氧化物和羟基氧化物的示例性反应是



[0837] 其他过渡金属(诸如Ni、Fe、Cr和Ti)、内过渡和稀土金属以及其他金属或类金属

(诸如Al、Ga、In、Si、Ge、Sn、Pb、As、Sb、Bi、Se和Te)可取代Ni或Fe,并且诸如Li、Na、K、Rb和Cs之类的其他碱金属可取代K或Na。在一个实施方式中,反应混合物包含对H₂O稳定的金属(诸如Cu、Ni、Pb、Sb、Bi、Co、Cd、Ge、Au、Ir、Fe、Hg、Mo、Os、Pd、Re、Rh、Ru、Se、Ag、Tc、Te、Tl、Sn、W、Al、V、Zr、Ti、Mn、Zn、Cr和In)的氧化物和氢氧化物中的至少一者。另外,反应混合物包含氢源(诸如H₂气体)和任选的解离器(诸如载体上的贵金属)。在一个实施方式中,固体燃料或高能材料包含金属卤化物(诸如过渡金属卤化物,诸如溴化物,诸如FeBr₂)以及金属(其形成羟基氧化物、氢氧化物或氧化物)和H₂O中的至少一者的混合物。在一个实施方式中,固体燃料或高能材料包含金属氧化物、氢氧化物和羟基氧化物(诸如过渡金属氧化物诸如Ni₂O₃中的至少一者)和H₂O中的至少一者的混合物。

[0838] 碱性酐NiO与酸HCl的示例性反应是



其中相应碱的脱水反应是



[0841] 反应物可包含路易斯酸或碱以及勃朗斯台-洛瑞酸或碱中的至少一者。反应混合物和反应可还包含以及涉及含氧化合物,其中酸与含氧化合物反应而形成水,如示例性反应中所给出的:



[0843] (X=卤离子)。与POX₃类似的化合物是适合的,诸如其中由S替代P的那些。其他合适的示例性酐可包含:可溶于酸中的元素、金属、合金或混合物的氧化物,诸如氢氧化物、羟基氧化物,或者包含碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属或稀土金属或Al、Ga、In、Sn或Pb(诸如来自Mo、Ti、Zr、Si、Al、Ni、Fe、Ta、V、B、Nb、Se、Te、W、Cr、Mn、Hf、Co和Mg的群组的一者)的氧化物。相应氧化物可包含MoO₂、TiO₂、ZrO₂、SiO₂、Al₂O₃、NiO、FeO或Fe₂O₃、TaO₂、Ta₂O₅、VO、VO₂、V₂O₃、V₂O₅、B₂O₃、NbO、NbO₂、Nb₂O₅、SeO₂、SeO₃、TeO₂、TeO₃、WO₂、WO₃、Cr₃O₄、Cr₂O₃、CrO₂、CrO₃、MnO、Mn₃O₄、Mn₂O₃、MnO₂、Mn₂O₇、HfO₂、Co₂O₃、CoO、Co₃O₄、Co₂O₃和MgO。其他合适的示例性氧化物是以下各项的群组的那些氧化物:Cu、Ni、Pb、Sb、Bi、Co、Cd、Ge、Au、Ir、Fe、Hg、Mo、Os、Pd、Re、Rh、Ru、Se、Ag、Tc、Te、Tl、Sn、W、Al、V、Zr、Ti、Mn、Zn、Cr和In。在一个示例性实施方式中,酸包含氢卤酸并且产物为H₂O和氧化物的金属卤化物。反应混合物还包含氢源(诸如H₂气体)和解离器(诸如Pt/C),其中H和H₂O催化剂发生反应以形成分数氢。

[0844] 在一个实施方式中,固体燃料包含H₂源(诸如渗透膜或H₂气体)和解离器(诸如Pt/C)以及H₂O催化剂源(包括还原为H₂O的氧化物或氢氧化物)。氧化物或氢氧化物的金属可形成充当H源的金属氢化物。碱金属氢氧化物和氧化物(诸如LiOH和Li₂O)的示例性反应是

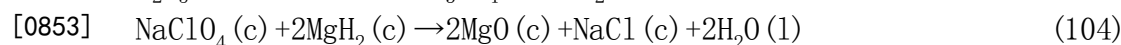
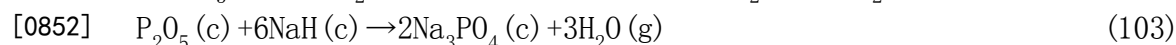
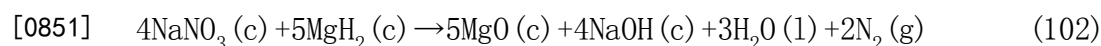


[0847] 反应混合物可包含:金属的氧化物或氢氧化物,其经历氢还原为H₂O,诸如Cu、Ni、Pb、Sb、Bi、Co、Cd、Ge、Au、Ir、Fe、Hg、Mo、Os、Pd、Re、Rh、Ru、Se、Ag、Tc、Te、Tl、Sn、W、Al、V、Zr、Ti、Mn、Zn、Cr和In的那些;和氢源,诸如H₂气;以及解离器,诸如Pt/C。

[0848] 在另一个实施方式中,反应混合物包含H₂源(诸如H₂气)和解离器(诸如Pt/C)以及过氧化物化合物(诸如H₂O₂,其分解为H₂O催化剂和包含氧的其他产物诸如O₂)。H₂和分解产物(诸如O₂)中的某些可发生反应以还形成H₂O催化剂。

[0849] 在一个实施方式中,用以形成 H_2O 作为催化剂的反应包括有机脱水反应,诸如醇(诸如多元醇,诸如糖)生成醛和 H_2O 的有机脱水反应。在一个实施方式中,脱水反应涉及从端醇释放 H_2O 以形成醛。该端醇可包括释放可充当催化剂的 H_2O 的糖或其衍生物。合适的示例性醇为内赤藓醇、半乳糖醇或卫矛醇以及聚乙烯醇(PVA)。示例性的反应混合物包含糖+氢解离器,诸如 $Pd/Al_2O_3+H_2$ 。作为另一种选择,反应包括金属盐(诸如具有至少一个水合水的金属盐)的脱水。在一个实施方式中,脱水包括从诸如水合离子和盐水合物(诸如 $BaI_2 \cdot 2H_2O$ 和 $EuBr_2 \cdot nH_2O$)之类的水合物失去用以充当催化剂的 H_2O 。

[0850] 在一个实施方式中,用以形成 H_2O 催化剂的反应包括以下各项的氢还原:包含氧的化合物,诸如 CO ;含氧阴离子,诸如 MNO_3 (M =碱金属);金属氧化物,诸如 NiO 、 Ni_2O_3 、 Fe_2O_3 或 SnO ;氢氧化物,诸如 $Co(OH)_2$;羟基氧化物,诸如 $FeOOH$ 、 $CoOOH$ 和 $NiOOH$;以及含氧物质的化合物、含氧阴离子、氧化物、氢氧化物、羟基氧化物、过氧化物、超氧化物和其他组合物,诸如可氢还原至 H_2O 的本公开的那些。包含氧或含氧阴离子的示例性化合物是 $SOCl_2$ 、 $Na_2S_2O_3$ 、 $NaMnO_4$ 、 $POBr_3$ 、 $K_2S_2O_8$ 、 CO 、 CO_2 、 NO 、 NO_2 、 P_2O_5 、 N_2O_5 、 N_2O 、 SO_2 、 I_2O_5 、 $NaClO_2$ 、 $NaClO$ 、 K_2SO_4 和 $KHSO_4$ 。用于氢还原的氢源可以是 H_2 气体和氢化物(诸如金属氢化物,诸如本公开的那些)中的至少一者。反应混合物可还包含可形成包含氧的化合物或离子的还原剂。含氧阴离子的阳离子可形成包含另一阴离子诸如卤化物、其他硫属元素化物、磷化物、其他含氧阴离子、氮化物、硅化物、砷化物或本公开的其他阴离子的产物化合物。示例性的反应是





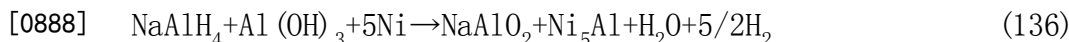
[0875] 反应混合物可包含阴离子的源或阴离子以及氧源或氧(诸如包含氧的化合物),其中用以形成 H_2O 催化剂的反应包括阴离子-氧交换反应,其中任选地,来自源的 H_2 与氧反应而形成 H_2O 。示例性的反应是



[0880] 在另一个实施方式中,反应混合物包含硫属元素化物之间的交换反应,诸如包含O和S的反应物之间的交换反应。示例性的硫属元素化物反应物诸如四面体四硫代钼酸铵含有 $([\text{MoS}_4]^{2-})$ 阴离子。用以形成新生 H_2O 催化剂和任选的新生H的示例性反应包括在存在氨的情况下钼酸盐 $[\text{MoO}_4]^{2-}$ 与硫化氢的反应:



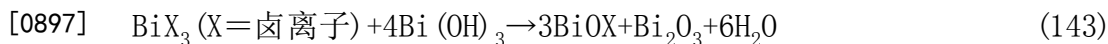
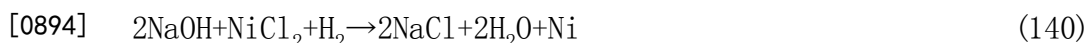
[0882] 在一个实施方式中,反应混合物包含氢源、含氧化合物以及能够与反应混合物的至少一种其他元素形成合金的至少一种元素。用以形成 H_2O 催化剂的反应可包括包含氧的化合物与能够与该氧化合物的阳离子形成合金的元素的氧交换反应,其中氧与来自该源的氢反应而形成 H_2O 。示例性的反应是



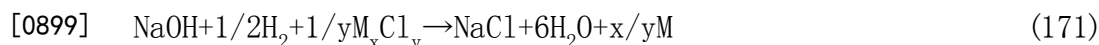
[0889] 在一个实施方式中,反应混合物包含:含氧化合物,诸如羟基氧化物;和形成氧化物的还原剂,诸如金属。用以形成 H_2O 催化剂的反应可包括羟基氧化物与金属形成金属氧化物和 H_2O 的反应。示例性的反应是



[0893] 在一个实施方式中,反应混合物包含:含氧化合物,诸如氢氧化物;氢源;和至少一种其他化合物,其包含不同的阴离子诸如卤离子或另一元素。用以形成 H_2O 催化剂的反应可包括氢氧化物与其他化合物或元素的反应,其中阴离子或元素与氢氧化物交换以形成该阴离子或元素的另一化合物,并且以该氢氧化物与 H_2 反应而形成 H_2O 。阴离子可包含卤离子。示例性的反应是



[0898] 可选择氢氧化物和卤化物化合物使得用以形成 H_2O 和另一卤化物的反应是热可逆的。在一个实施方式中,通用交换反应是

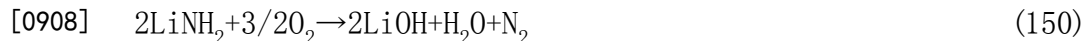


其中示例性的化合物 M_xCl_y 是 $AlCl_3$ 、 $BeCl_2$ 、 $HfCl_4$ 、 $KAgCl_2$ 、 $MnCl_2$ 、 $NaAlCl_4$ 、 $ScCl_3$ 、 $TiCl_2$ 、 $TiCl_3$ 、 UCl_3 、 UCl_4 、 $ZrCl_4$ 、 $EuCl_3$ 、 $GdCl_3$ 、 $MgCl_2$ 、 $NdCl_3$ 和 YCl_3 。在升高的温度下,式(171)的反应诸如在约 $100^\circ C$ 至 $2000^\circ C$ 的范围内具有约 $0kJ$ 的焓和自由能量中的至少一者并且是可逆的。依据每个反应的相应热力学参数计算该可逆温度。代表性的温度范围是在约 $800K$ 至 $900K$ 下的 $NaCl-ScCl_3$ 、在约 $300K$ 至 $400K$ 下的 $NaCl-TiCl_2$ 、在约 $600K$ 至 $800K$ 下的 $NaCl-UCl_3$ 、在约 $250K$ 至 $300K$ 下的 $NaCl-UCl_4$ 、在约 $250K$ 至 $300K$ 下的 $NaCl-ZrCl_4$ 、在约 $900K$ 至 $1300K$ 下的 $NaCl-MgCl_2$ 、在约 $900K$ 至 $1000K$ 下的 $NaCl-EuCl_3$ 、在约 $>1000K$ 下的 $NaCl-NdCl_3$ 以及在约 $>1000K$ 下的 $NaCl-YCl_3$ 。

[0900] 在一个实施方式中,反应混合物包含:氧化物,诸如金属氧化物,诸如碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属氧化物以及其他金属和类金属的那些氧化物,诸如 Al 、 Ga 、 In 、 Si 、 Ge 、 Sn 、 Pb 、 As 、 Sb 、 Bi 、 Se 和 Te 的那些氧化物;过氧化物,诸如 M_2O_2 ,其中 M 为碱金属,诸如 Li_2O_2 、 Na_2O_2 和 K_2O_2 ;和超氧化物,诸如 MO_2 ,其中 M 为碱金属,诸如 NaO_2 、 KO_2 、 RbO_2 和 CsO_2 ;以及碱土金属超氧化物;以及氢源。离子过氧化物可还包含 Ca 、 Sr 或 Ba 的那些离子过氧化物。用以形成 H_2O 催化剂的反应可包含氧化物、过氧化物或超氧化物的氢还原以形成 H_2O 。示例性的反应是



[0904] 在一个实施方式中,反应混合物包含:氢源,诸如 H_2 、氢化物(诸如碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属氢化物中的至少一者)和本公开的那些中的至少一者;以及氢或包含可燃烧氢的其他化合物的源,诸如金属酰胺;以及氧源(诸如 O_2)。用以形成 H_2O 催化剂的反应可包括 H_2 、氢化物或氢化合物(诸如金属酰胺)氧化以形成 H_2O 。示例性的反应是

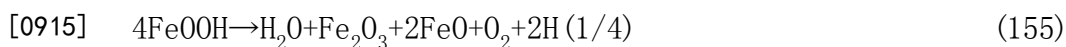


[0909] 在一个实施方式中,反应混合物包含氢源和氧源。用以形成 H_2O 催化剂的反应可包括分解氢源和氧源中的至少一者以形成 H_2O 。示例性的反应是

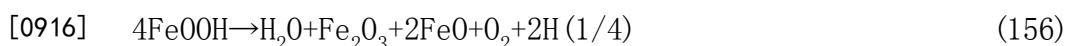


[0914] 本文中所公开的反应混合物还包含氢源以形成分数氢。该源可以是原子氢源(诸如氢解离器)和 H_2 气或金属氢化物,诸如本公开的解离器和金属氢化物。用以提供原子氢的氢源可以是包含氢的化合物,诸如氢氧化物或羟基氧化物。发生反应以形成分数氢的 H 可以

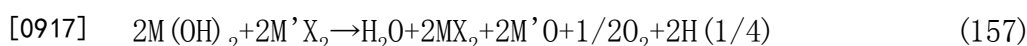
是通过一种或多种反应物的反应而形成的新生H,其中至少一者包含氢源,诸如氢氧化物与氧化物的反应。反应还可形成H₂O催化剂。氧化物和氢氧化物可包含相同化合物。例如,羟基氧化物诸如FeOOH可脱水以提供H₂O催化剂并且还在脱水期间提供用于分数氢反应的新生H:



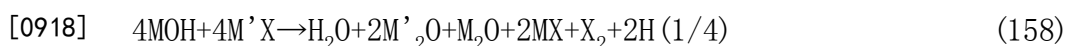
其中在反应期间形成的新生H发生反应以形成分数氢。其他示例性的反应是氢氧化物与羟基氧化物或氧化物(诸如NaOH+FeOOH或Fe₂O₃)的那些反应以形成碱金属氧化物诸如NaFeO₂+H₂O,其中在反应期间形成的新生H可形成分数氢,其中H₂O充当催化剂。氧化物和氢氧化物可包含相同化合物。例如,羟基氧化物诸如FeOOH可脱水以提供H₂O催化剂并且还在脱水期间提供用于分数氢反应的新生H:



其中在反应期间形成的新生H发生反应以形成分数氢。其他示例性反应是氢氧化物与羟基氧化物或氧化物(诸如NaOH+FeOOH或Fe₂O₃)的那些反应以形成碱金属氧化物诸如NaFeO₂+H₂O,其中在反应期间形成的新生H可形成分数氢,其中H₂O充当催化剂。氢氧根离子在形成H₂O和氧离子中既被还原也被氧化。氧离子可与H₂O反应而形成OH⁻。可以诸如如下的氢氧化物-卤化物交换反应获得相同路径



其中示例性的M和M'金属分别为碱土金属和过渡金属,诸如Cu(OH)₂+FeBr₂、Cu(OH)₂+CuBr₂或Co(OH)₂+CuBr₂。在一个实施方式中,固体燃料可包含金属氢氧化物和金属卤化物,其中至少一种金属是Fe。可添加H₂O和H₂中的至少一者以再生反应物。在一个实施方式中,M和M'可选自以下各项的群组:碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属、Al、Ga、In、Si、Ge、Sn、Pb、第13族元素、第14族元素、第15族元素和第16族元素,以及氢氧化物或卤化物的其他阳离子,诸如本公开的那些。用以形成HOH催化剂、新生H和分数氢中的至少一者的示例性反应是

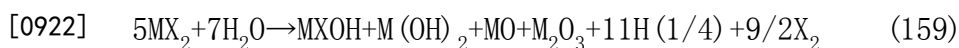


[0919] 在一个实施方式中,反应混合物包含氢氧化物和卤化物化合物(诸如本公开的那些)中的至少一者。在一个实施方式中,卤化物可用于促进新生HOH催化剂和H中的至少一者的形成和维持中的至少一者。在一个实施方式中,混合物可用于降低反应混合物的熔点。

[0920] 酸-碱反应是形成H₂O催化剂的另一方法。示例性的卤化物和氢氧化物混合物是Bi、Cd、Cu、Co、Mo和Cd的那些以及Cu、Ni、Pb、Sb、Bi、Co、Cd、Ge、Au、Ir、Fe、Hg、Mo、Os、Pd、Re、Rh、Ru、Se、Ag、Tc、Te、Tl、Sn、W和Zn的群组的具有低水反应性的金属的氢氧化物和卤化物的混合物。在一个实施方式中,反应混合物还包含可充当H和催化剂(诸如新生H₂O)中的至少一者的源的H₂O。水可以是水合物的形式,该水合物在反应期间分解或以其他方式发生反应。

[0921] 在一个实施方式中,固体燃料包含形成新生H和新生H₂O的H₂O与无机化合物的反应混合物。该无机化合物可包含卤化物,诸如与H₂O反应的金属卤化物。反应产物可以是氢氧化物、羟基氧化物、氧化物、卤氧化物、羟基卤化物和水合物中的至少一者。其他产物可包含含有氧和卤素的阴离子,诸如XO⁻、XO₂⁻、XO₃⁻和XO₄⁻(X=卤素)。产物还可以是还原的阳离子和卤素气体中的至少一者。卤化物可以是金属卤化物,诸如碱金属、碱土金属、过渡金属、

内过渡金属和稀土金属以及Al、Ga、In、Sn、Pb、S、Te、Se、N、P、As、Sb、Bi、C、Si、Ge和B以及形成卤化物的其他元素的金属卤化物。所述金属或元素可另外为形成氢氧化物、羟基氧化物、氧化物、卤氧化物、羟基卤化物、水合物中的至少一者的金属或元素,以及形成具有包含氧和卤素的阴离子(诸如 XO^- 、 XO_2^- 、 XO_3^- 和 XO_4^- (X=卤素))的化合物的金属或元素。适合的示例性金属和元素是碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和稀土金属以及Al、Ga、In、Sn、Pb、S、Te、Se、N、P、As、Sb、Bi、C、Si、Ge和B中的至少一者。示例性反应是



其中M为金属,诸如过渡金属(诸如Cu),并且X为卤素(诸如Cl)。

[0923] 在一个实施方式中,固体燃料或高能材料包含单线态氧的源。用以产生单线态氧的示例性反应是



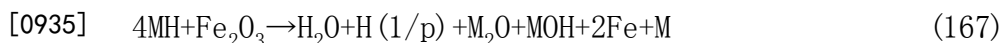
[0925] 在另一个实施方式中,固体燃料或高能材料包含芬顿反应的源或试剂,诸如 H_2O_2 。

[0926] 固体燃料和反应可以是通过至少一种SunCell®等离子体或热力和本文中以及诸如以下各项的Mills先前专利申请中所公开的方法可再生和可逆中的至少一者:Hydrogen Catalyst Reactor(氢催化剂反应器),PCT/US08/61455,2008年4月24日提交的PC;Heterogeneous Hydrogen Catalyst Reactor(非均相氢催化剂反应器),PCT/US09/052072,2009年7月29日提交的PCT;Heterogeneous Hydrogen Catalyst Power System(非均相氢催化剂动力系统),PCT/US10/27828,2010年3月18日提交的PCT;Electrochemical Hydrogen Catalyst Power System(电化学氢催化剂动力系统),PCT/US11/28889,2011年3月17日提交的PCT; H_2O -Based Electrochemical Hydrogen-Catalyst Power System(基于 H_2O 的电化学氢催化剂动力系统),PCT/US12/31369,2012年3月30日提交;以及CIHT Power System(CIHT动力系统),PCT/US13/041938,13年5月21提交,将这些专利申请全文以引用方式并入本文中。

[0927] 在一个实施方式中,氢氧化物和卤化物化合物混合物(诸如 $Cu(OH)_2 + CuBr_2$)的再生反应可以是通过添加至少一种 H_2 和 H_2O 。示例性的热可逆固体燃料循环是



[0934] 在一个实施方式中,其中碱金属M(诸如K或Li)以及 nH (n =整数)、 OH 、 O 、 $2O$ 、 O_2 和 H_2O 中的至少一者充当催化剂,H源是以下各项中的至少一者:金属氢化物,诸如MH;以及用以形成H的金属M和金属氢化物MH中的至少一者与H源的反应。一种产物可以是氧化的M,诸如氧化物或氢氧化物。用以形成原子氢和催化剂中的至少一者的反应可以是电子转移反应或氧化-还原反应。反应混合物可还包含 H_2 、 H_2 解离器(诸如SunCell®和本公开的那些中的至少一者,诸如Ni筛网或R-Ni)和导电载体(诸如这些解离器和其他解离器)以及本公开的载体(诸如碳)以及碳化物、硼化物和碳氮化物中的至少一者。M或MH的示例性氧化反应是



其中 H_2O 和 M 中的至少一者可充当催化剂以形成 $\text{H}(1/\text{p})$ 。

[0936] 在一个实施方式中,氧源是具有与水相似生成热的化合物,使得以最少能量释放发生氧源化合物的还原产物与氢之间的氧交换。适合的示例性氧源化合物是 CdO 、 CuO 、 ZnO 、 SO_2 、 SeO_2 和 TeO_2 。诸如金属氧化物之类的其他者还可以是酸或碱的酐,所述酸或碱可在 H_2O 催化剂源是 MnO_x 、 AlO_x 和 SiO_x 时经历脱水反应。在一个实施方式中,氧化物层氧源可覆盖氢源,诸如金属氢化物,诸如氢化钡。可通过将氧化物涂覆的氢源(诸如金属氧化物涂覆的氢化钡)加热而起始用以形成 H_2O 催化剂和原子 H (其进一步发生反应以形成分数氢)的反应。在一个实施方式中,用以形成分数氢催化剂的反应和再生反应包含分别在氧源化合物与氢之间以及水与还原的氧源化合物之间的氧交换。合适的经还原氧源是 Cd 、 Cu 、 Zn 、 S 、 Se 和 Te 。在一个实施方式中,氧交换反应可包含用于热形成氢气的那些氧交换反应。示例性的热方法为氧化铁循环、氧化铈(IV)-氧化铈(III)循环、锌氧化锌循环、硫-碘循环、氯化铜循环和混合硫循环以及本领域技术人员已知的其他热方法。在一个实施方式中,用以形成分数氢催化剂的反应和再生反应诸如氧交换反应同时发生在同一反应容器中。可控制诸如温度和压力之类的条件以实现反应的同时性。作为另一种选择,可在至少一个其他的单独容器中移除和再生产物,此可发生在不同于如本公开和Mills先前专利申请中所给出的功率形成反应的那些条件下。

[0937] 固体燃料可包含不同离子,诸如碱金属阳离子、碱土金属阳离子和其他阳离子以及阴离子,诸如卤离子及含氧阴离子。固体燃料的阳离子可包括以下各项中的至少一者:碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属、稀土金属、 Li 、 Na 、 K 、 Rb 、 Cs 、 Mg 、 Ca 、 Sr 、 Ba 、 Ga 、 Al 、 V 、 Zr 、 Ti 、 Mn 、 Zn 、 Li 、 Na 、 K 、 Rb 、 Cs 、 Mg 、 Ca 、 Sr 、 Ba 、 Al 、 V 、 Zr 、 Ti 、 Mn 、 Zn 、 Cr 、 Sn 、 In 、 Cu 、 Ni 、 Pb 、 Sb 、 Bi 、 Co 、 Cd 、 Ge 、 Au 、 Ir 、 Fe 、 Hg 、 Mo 、 Os 、 Pd 、 Re 、 Rh 、 Ru 、 Se 、 Ag 、 Tc 、 Te 、 Tl 、 W ,以及本领域已知的形成离子化合物的其他阳离子。阴离子可包括以下各项中的至少一者:氢氧化物、卤化物、氧化物、硫属元素化物、硫酸盐、磷酸盐、磷化物、硝酸盐、氮化物、碳酸盐、铬酸盐、硅化物、砷化物、硼化物、过氯酸盐、过碘酸盐、氧化钴镁、氧化镍镁、氧化铜镁、铝酸盐、钨酸盐、锆酸盐、钛酸盐、锰酸盐、碳化物、金属氧化物、非金属氧化物;碱金属、碱土金属、过渡金属、内过渡金属和土金属以及 Al 、 Ga 、 In 、 Sn 、 Pb 、 S 、 Te 、 Se 、 N 、 P 、 As 、 Sb 、 Bi 、 C 、 Si 、 Ge 和 B 以及可形成氧化物或含氧阴离子的其他元素的氧化物; LiAlO_2 、 MgO 、 CaO 、 ZnO 、 CeO_2 、 CuO 、 CrO_4 、 Li_2TiO_3 或 SrTiO_3 ,包含 Mo 、 Ti 、 Zr 、 Si 、 Al 、 Ni 、 Fe 、 Ta 、 V 、 B 、 Nb 、 Se 、 Te 、 W 、 Cr 、 Mn 、 Hf 和 Co 的群组的元素、金属、合金或混合物的氧化物; MoO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 NiO 、 FeO 或 Fe_2O_3 、 TaO_2 、 Ta_2O_5 、 VO 、 VO_2 、 V_2O_3 、 V_2O_5 、 B_2O_3 、 NbO 、 NbO_2 、 Nb_2O_5 、 SeO_2 、 SeO_3 、 TeO_2 、 TeO_3 、 WO_2 、 WO_3 、 Cr_3O_4 、 Cr_2O_3 、 CrO_2 、 CrO_3 、 MnO 、 Mn_3O_4 、 Mn_2O_3 、 MnO_2 、 Mn_2O_7 、 HfO_2 、 CoO 、 Co_2O_3 、 Co_3O_4 、 Li_2MoO_3 或 Li_2MoO_4 、 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 、 Li_2SiO_3 、 LiAlO_2 、 LiNiO_2 、 LiFeO_2 、 LiTaO_3 、 LiVO_3 、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、 Li_2NbO_3 、 Li_2PO_4 、 Li_2SeO_3 、 Li_2SeO_4 、 Li_2TeO_3 、 Li_2TeO_4 、 Li_2WO_4 、 Li_2CrO_4 、 $\text{Li}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 Li_2MnO_3 、 Li_2MnO_4 、 Li_2HfO_3 、 LiCoO_2 、 Li_2MoO_4 、 MoO_2 、 Li_2WO_4 、 Li_2CrO_4 和 $\text{Li}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 S 、 Li_2S 、 MoO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 NiO 、 FeO 或 Fe_2O_3 、 TaO_2 、 Ta_2O_5 、 VO 、 VO_2 、 V_2O_3 、 V_2O_5 、 P_2O_3 、 P_2O_5 、 B_2O_3 ,以及本领域已知的形成离子化合物的其他阴离子。

[0938] 在一个实施方式中,酰胺诸如 LiNH_2 的 NH_2 基团充当催化剂,其中势能为约81.6eV或约 $3 \times 27.2\text{eV}$ 。类似于酸或碱与酐之间的可逆 H_2O 消除或加成反应(反之亦然),酰胺与酰亚胺或氮化物之间的可逆反应致使形成 NH_2 催化剂, NH_2 催化剂进一步与原子 H 反应而形成分数

氢。酰胺与酰亚胺和氮化物中的至少一者之间的可逆反应也可充当氢源,诸如原子H。

[0939] 固体燃料熔体和电解池

[0940] 在一个实施方式中,用以形成热力和低能氢物质(诸如 $H(1/p)$ 和 $H_2(1/p)$,其中p是整数)的反应器包含充当H和HOH催化剂中的至少一者的源的熔融盐。该熔融盐可包含盐混合物,诸如低共熔混合物。该混合物可包含氢氧化物和卤化物中的至少一者,诸如碱金属和碱土金属氢氧化物和卤化物(诸如LiOH-LiBr或KOH-KCl)中的至少一者的混合物。该反应器还可包括加热器、加热器动力供应器和温度控制器以将盐维持在熔融状态。H和HOH催化剂中的至少一者的源可包含水。水可在熔融盐中解离。熔融盐可还包含添加剂,诸如氧化物和金属(诸如氢解离器金属,诸如包含Ti、Ni和贵金属(诸如Pt或Pd)的至少一者)中的至少一者以提供H和HOH催化剂中的至少一者。在一个实施方式中,可通过存在于熔融盐中的氢氧化物、卤化物和水中的至少一者的反应来形成H和HOH。在一个示例性实施方式中,可通过 $MOH(M=\text{碱金属})$ 的脱水来形成H和HOH中的至少一者: $2MOH \rightarrow M_2O + HOH$; $MOH + H_2O \rightarrow MOOH + 2H$; $MX + H_2O(X=\text{卤离子}) \rightarrow MOX + 2H$,其中可由MX催化脱水和交换反应。在固体燃料公开内容中给出了熔融盐的的其他实施方式,其中这些反应可包括SunCell®固体燃料反应物以及反应。

[0941] 在一个实施方式中,用以形成热力和低能氢物质(诸如 $H(1/p)$ 和 $H_2(1/p)$,其中p是整数)的反应器包括电解系统,该电解系统包括至少两个电极和电解动力供应器、电解控制器、熔融盐电解质、加热器、温度传感器以及用以维持所需温度的加热器控制器以及H和HOH催化剂中的至少一者的源。该电极可在电解质中是稳定的。示例性的电极为镍电极和贵金属电极。可将水供应至池并且可将电压诸如DC电压施加至该电极。氢可在阴极处形成而氧可在阳极处形成。氢可与也形成于池中的HOH催化剂反应以形成分数氢。HOH催化剂可来自所添加的水。由形成分数氢而产生的能量可在池中产生热量。池可以是良好绝缘的,使得来自分数氢反应的热量可减少加热器维持熔融盐所需的功率量。绝缘材料可包括真空夹套或本领域已知的其他热绝缘材料,诸如陶瓷纤维绝缘材料。该反应器还可包括热交换器。该热交换器可移出待递送至外部负载的过量热量。

[0942] 熔融盐可包含氢氧化物和至少一种其他盐(诸如选自一种或多种其他氢氧化物、卤化物、硝酸盐、硫酸盐、碳酸盐和磷酸盐的一者)。在一个实施方式中,盐混合物可包含金属氢氧化物和具有本公开的另一阴离子的相同金属,诸如卤化物、硝酸盐、硫酸盐、碳酸盐和磷酸盐。熔融盐可包含选自以下各项的至少一种盐混合物: $CsNO_3$ -CsOH、CsOH-KOH、CsOH-LiOH、CsOH-NaOH、CsOH-RbOH、 K_2CO_3 -KOH、KBr-KOH、KCl-KOH、KF-KOH、KI-KOH、 KNO_3 -KOH、KOH- K_2SO_4 、KOH-LiOH、KOH-NaOH、KOH-RbOH、 Li_2CO_3 -LiOH、LiBr-LiOH、LiCl-LiOH、LiF-LiOH、LiI-LiOH、 $LiNO_3$ -LiOH、LiOH-NaOH、LiOH-RbOH、 Na_2CO_3 -NaOH、NaBr-NaOH、NaCl-NaOH、NaF-NaOH、NaI-NaOH、 $NaNO_3$ -NaOH、NaOH- Na_2SO_4 、NaOH-RbOH、RbCl-RbOH、 $RbNO_3$ -RbOH、LiOH-LiX、NaOH-NaX、KOH-KX、RbOH-RbX、CsOH-CsX、 $Mg(OH)_2$ - MgX_2 、 $Ca(OH)_2$ - CaX_2 、 $Sr(OH)_2$ - SrX_2 或 $Ba(OH)_2$ - BaX_2 ,其中X=F、Cl、Br或I,以及LiOH、NaOH、KOH、RbOH、CsOH、 $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 、 $Sr(OH)_2$ 或 $Ba(OH)_2$ 中的一者或多者,其中X=F、Cl、Br或I。熔融盐可包含盐混合物电解质的阴离子共同的阳离子;或者阴离子是阳离子共同的,并且氢氧化物对混合物的其他盐是稳定的。混合物可以是低共熔混合物。池可在大约低共熔混合物的熔点的温度下操作,但可在更高温度下操作。电解电压可以是约1V至50V、2V至25V、2V至10V、2V至5V和2V至3.5V中的至少一个范

围。电流密度可在约 $10\text{mA}/\text{cm}^2$ 至 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 至 $75\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 至 $50\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 至 $20\text{A}/\text{cm}^2$ 和 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 至 $10\text{A}/\text{cm}^2$ 中的至少一个范围内。

[0943] 在另一个实施方式中,电解热力系统还包括氢电极,诸如氢可渗透电极。氢电极可包含渗透过金属膜的 H_2 气体,所述金属膜为诸如由 $\text{Ni}(\text{H}_2)$ 、 $\text{V}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Ti}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Nb}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Pd}(\text{H}_2)$ 、 $\text{PdAg}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Fe}(\text{H}_2)$ 或430SS(H_2)表示的 Ni 、 V 、 Ti 、 Nb 、 Pd 、 PdAg 或 Fe 。碱金属电解质的合适的氢可渗透电极包含 Ni 和合金(诸如 LaNi_5)、贵金属(诸如 Pt 、 Pd 和 Au)以及镍或贵金属涂覆的氢可渗透金属,诸如 V 、 Nb 、 Fe 、 Fe-Mo 合金、 W 、 Mo 、 Rh 、 Zr 、 Be 、 Ta 、 Rh 、 Ti 、 Th 、 Pd 、 Pd 涂覆的 Ag 、 Pd 涂覆的 V 、 Pd 涂覆的 Ti 、稀土、其他难熔金属、诸如430SS之类的不锈钢(SS)和本领域技术人员已知的其他此类金属。表示为 $\text{M}(\text{H}_2)$ (其中 M 为 H_2 所渗透过的金属)的氢电极可包括 $\text{Ni}(\text{H}_2)$ 、 $\text{V}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Ti}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Nb}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Pd}(\text{H}_2)$ 、 $\text{PdAg}(\text{H}_2)$ 、 $\text{Fe}(\text{H}_2)$ 和430SS(H_2)中的至少一者。氢电极可包括可喷洒 H_2 的多孔电极。氢电极可包含氢化物诸如选自 R-Ni 、 LaNi_5H_6 、 $\text{La}_2\text{Co}_1\text{Ni}_9\text{H}_6$ 、 $\text{ZrCr}_2\text{H}_{3.8}$ 、 $\text{LaNi}_{3.55}\text{Mn}_{0.4}\text{Al}_{0.3}\text{Co}_{0.75}$ 、 $\text{ZrMn}_{0.5}\text{Cr}_{0.2}\text{V}_{0.1}\text{Ni}_{1.2}$ 的氢化物,以及能够储存氢的其他合金, AB_5 型(LaCePrNdNiCoMnAl)或 AB_2 型(VTiZrNiCrCoMnAlSn),其中“ AB_x ”名称是指A型元素(LaCePrNd 或 TiZr)与B型元素(VNiCrCoMnAlSn)的比率, AB_5 型: $\text{MmNi}_{3.2}\text{Co}_{1.0}\text{Mn}_{0.6}\text{Al}_{0.11}\text{Mo}_{0.09}$ (Mm =混合稀土金属:25重量% La 、50重量% Ce 、7重量% Pr 、18重量% Nd), AB_2 型: $\text{Ti}_{0.51}\text{Zr}_{0.49}\text{V}_{0.70}\text{Ni}_{1.18}\text{Cr}_{0.12}$ 合金;基于镁的合金, $\text{Mg}_{1.9}\text{Al}_{0.1}\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}$ 合金、 $\text{Mg}_{0.72}\text{Sc}_{0.28}(\text{Pd}_{0.012}+\text{Rh}_{0.012})$ 和 $\text{Mg}_{80}\text{Ti}_{20}$ 、 $\text{Mg}_{80}\text{V}_{20}$ 、 $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_{2.4}\text{Co}_{2.5}\text{Si}_{0.1}$ 、 $\text{LaNi}_{5-x}\text{M}_x$ ($\text{M}=\text{Mn}$ 、 Al)、($\text{M}=\text{Al}$ 、 Si 、 Cu)、($\text{M}=\text{Sn}$)、($\text{M}=\text{Al}$ 、 Mn 、 Cu)以及 LaNi_4Co 、 $\text{MmNi}_{3.55}\text{Mn}_{0.44}\text{Al}_{0.3}\text{Co}_{0.75}$ 、 $\text{LaNi}_{3.55}\text{Mn}_{0.44}\text{Al}_{0.3}\text{Co}_{0.75}$ 、 MgCu_2 、 MgZn_2 、 MgNi_2 ;AB化合物, TiFe 、 TiCo 和 TiNi ;AB_n化合物($n=5$ 、2或1),AB₃₋₄化合物,AB_x($A=$

[0944] La 、 Ce 、 Mn 、 Mg ; $B=\text{Ni}$ 、 Mn 、 Co 、 Al); ZrFe_2 、 $\text{Zr}_{0.5}\text{Cs}_{0.5}\text{Fe}_2$ 、 $\text{Zr}_{0.8}\text{Sc}_{0.2}\text{Fe}_2$ 、 YNi_5 、 LaNi_5 、 $\text{LaNi}_{4.5}\text{Co}_{0.5}$ 、(Ce 、 La 、 Nd 、 Pr) Ni_5 、混合稀土金属-镍合金、 $\text{Ti}_{0.98}\text{Zr}_{0.02}\text{V}_{0.43}\text{Fe}_{0.09}\text{Cr}_{0.05}\text{Mn}_{1.5}$ 、 $\text{La}_2\text{Co}_1\text{Ni}_9$ 、 FeNi 和 TiMn_2 。在一个实施方式中,电解阴极包括 H_2O 还原电极和氢电极中的至少一者。在一个实施方式中,电解阳极包括 OH^- 氧化电极和氢电极中的至少一者。

[0945] 在本公开的一个实施方式中,电解热力系统包括以下各项中的至少一者:

[0946] $[\text{M}''/\text{MOH}-\text{卤化M}'/\text{M}''(\text{H}_2)]$ 、 $[\text{M}''/\text{M}(\text{OH})_2-\text{卤化M}'/\text{M}''(\text{H}_2)]$ 、 $[\text{M}''(\text{H}_2)/\text{MOH}-\text{卤化M}'/\text{M}'']$ 和 $[\text{M}''(\text{H}_2)/\text{M}(\text{OH})_2-\text{卤化M}'/\text{M}'']$,其中 M 为碱金属或碱土金属, M' 为具有氢氧化物和氧化物的金属,该氢氧化物和氧化物是以下情形中的至少一者:不如碱金属或碱土金属的那些氢氧化物或氧化物稳定或者具有与水的低反应性, M'' 为氢可渗透金属,并且 M'' 为导体。在一个实施方式中, M' 为金属,诸如选自 Cu 、 Ni 、 Pb 、 Sb 、 Bi 、 Co 、 Cd 、 Ge 、 Au 、 Ir 、 Fe 、 Hg 、 Mo 、 Os 、 Pd 、 Re 、 Rh 、 Ru 、 Se 、 Ag 、 Tc 、 Te 、 Tl 、 Sn 、 W 、 Al 、 V 、 Zr 、 Ti 、 Mn 、 Zn 、 Cr 、 In 、 Pt 和 Pb 的金属。作为另一种选择, M 和 M' 可以是金属,诸如独立地选自 Li 、 Na 、 K 、 Rb 、 Cs 、 Mg 、 Ca 、 Sr 、 Ba 、 Al 、 V 、 Zr 、 Ti 、 Mn 、 Zn 、 Cr 、 Sn 、 In 、 Cu 、 Ni 、 Pb 、 Sb 、 Bi 、 Co 、 Cd 、 Ge 、 Au 、 Ir 、 Fe 、 Hg 、 Mo 、 Os 、 Pd 、 Re 、 Rh 、 Ru 、 Se 、 Ag 、 Tc 、 Te 、 Tl 和 W 的金属。其他示例性系统包含 $[\text{M}''/\text{MOH M}''\text{X}/\text{M}'(\text{H}_2)]$ 和 $[\text{M}'(\text{H}_2)/\text{MOH M}'\text{X}/\text{M}'']$,其中 M 、 M' 、 M'' 和 M'' 为金属阳离子或金属, X 为阴离子,诸如选自氢氧根、卤离子、硝酸根、硫酸根、碳酸根和磷酸根的阴离子,并且 M' 为 H_2 可渗透的。在一个实施方式中,氢电极包含金属,诸如选自 V 、 Zr 、 Ti 、 Mn 、 Zn 、 Cr 、 Sn 、 In 、 Cu 、 Ni 、 Pb 、 Sb 、 Bi 、 Co 、 Cd 、 Ge 、 Au 、 Ir 、 Fe 、 Hg 、 Mo 、 Os 、 Pd 、 Re 、 Rh 、 Ru 、 Se 、 Ag 、 Tc 、 Te 、 Tl 、 W 和贵金属的至少一者。在一个实施方式中,电化学动力系统包括:氢源;能够提供或形成原子 H 的氢电极;电极,其能够形成 H 、 H_2 、 OH 、 OH^- 和 H_2O 催化剂中的

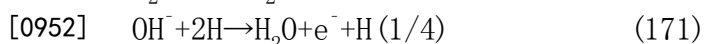
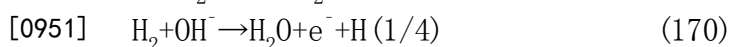
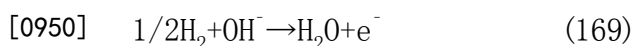
至少一者; O_2 和 H_2O 中的至少一者的源;阴极,其能够还原 H_2O 和 O_2 中的至少一者;碱金属电解质;以及用以收集和再循环 H_2O 蒸气、 N_2 以及 O_2 和 H_2 中的至少一者的系统。 H_2 、水和氧的源可包括本公开的各者。

[0947] 在一个实施方式中,供应至电解系统的 H_2O 可充当将在阴极处形成的H原子催化为分数氢的H₂OH催化剂。由氢电极提供的H还可充当H反应物以形成分数氢,诸如H(1/4)和 H_2 (1/4)。在另一个实施方式中,可通过阳极处的OH⁻氧化和与来自源的H的反应而形成催化剂 H_2O 。H源可来自电解质(诸如包括氢氧化物和 H_2O 中的至少一者的电解质)的电解和氢电极中的至少一者。H可从阴极扩散至阳极。示例性的阴极和阳极反应是:

[0948] 阴极电解反应



阳极电解反应



[0953] 关于在阳极用以形成H₂OH催化剂的OH⁻氧化反应,可通过在阴极还原氧源(诸如 O_2)来替代OH⁻。在一个实施方式中,熔融电解质的阴离子可充当阴极处的氧源。合适的阴离子是氧阴离子,诸如 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 。阴离子诸如 CO_3^{2-} 可形成碱性溶液。示例性的阴极反应是

[0954] 阴极



该反应可涉及可逆半电池氧化-还原反应,诸如



将 H_2O 还原为OH⁻+H可引起阴极反应以形成分数氢,其中 H_2O 充当催化剂。在一个实施方式中,可将 CO_2 、 SO_2 、NO、 NO_2 、 PO_2 和其他类似反应物作为氧源添加至池。

[0957] 除熔融电解池之外,还可能在熔融或含水碱性或碳酸盐电解池中生成 H_2O 催化剂,其中在阴极上产生H。通过将 H_2O 还原为OH⁻+H而在阴极形成的H的电极交叉可引起式(171)的反应。作为另一种选择,存在可产生 H_2O 催化剂的涉及碳酸盐的数个反应,诸如涉及可逆内部氧化-还原反应的那些反应,诸如



[0959] 以及半电池反应,诸如



[0962] 分数氢化合物或物质的组合物

[0963] 包含低能氢物质(诸如分子分数氢)的分数氢化合物可通过以下各项来鉴别:

[0964] (i) 飞行时间次级离子质谱(ToF-SIMS)和电喷雾飞行时间次级离子质谱(ESI-ToF),其可记录独特金属氢化物、氢负离子以及具有束缚 H_2 (1/4)的无机离子的簇,诸如呈M

+2单体或多聚体单元的形式,诸如 $K^+[H_2(1/4):K_2CO_3]_n$ 和 $K^+[H_2(1/4):KOH]_n$,其中n为整数;

(ii) 傅里叶变换红外光谱 (FTIR), 其可记录处于约 1940cm^{-1} 的 $H_2(1/4)$ 旋转能量和在指纹区域中的振动谱带中的至少一者,其中可缺乏其他的已知官能基的高能量特征, (iii) 质子魔角自旋核磁共振谱 (^1H MAS NMR), 其可记录高场基质峰, 诸如在-4ppm至-6ppm区域中的高场基质峰, (iv) X射线衍射 (XRD), 其可记录由于可包含聚合结构的独特组合物而导致的新颖峰, (v) 热重分析 (TGA), 其可记录氢聚合物在非常低温度下 (诸如在 200°C 至 900°C 的区域中) 的分解并且提供独特的氢化学计量或组成, 诸如 FeH 或 $K_2CO_3 H_2$, (vi) 电子束激发发射光谱, 其可记录包括以 0.25eV 间隔开的峰的 260nm 区域中的 $H_2(1/4)$ 振转谱带; (vii) 光致发光拉曼光谱, 其可记录包括以 0.25eV 间隔开的峰的 260nm 区域中的二阶 $H_2(1/4)$ 振转谱带; (viii) 由电子束激发发射光谱记录的包括以 0.25eV 间隔开的峰的 260nm 区域中的一阶 $H_2(1/4)$ 振转谱带和由光致发光拉曼光谱记录的二阶 $H_2(1/4)$ 振转谱带中的至少一者的强度可在由低温冷却器热冷却时随温度可逆地减小; (ix) 振转发射光谱, 其中 $H_2(1/p)$ 诸如 $H_2(1/4)$ 的振转谱带可由高能量光 (诸如至少振转发射的能量的光) 激发; (x) 拉曼光谱, 其可记录由于顺磁位移和纳米颗粒位移中的至少一者导致的在 40 至 8000cm^{-1} 的范围内的连续拉曼光谱以及在 1500 至 2000cm^{-1} 的范围内的峰中的至少一者; (xi) 关于用诸如氩或氦等离子体 (诸如微波、RF或辉光放电等离子体) 之类的等离子体激发的处于气相中或嵌入于液体或固体 (诸如结晶基质, 诸如包含 KCl 的结晶基质) 中的 $H_2(1/4)$ 的振转谱带的光谱; (xii) 拉曼光谱, 其可记录在大约 $1940\text{cm}^{-1}\pm 10\%$ 和 $5820\text{cm}^{-1}\pm 10\%$ 中的一者或多者处的 $H_2(1/4)$ 旋转峰, (Xiii) X射线光电子能谱 (XPS), 其可记录在大约 495 至 500eV 处的 $H_2(1/4)$ 的总能量, (xiv) 气相色谱, 其可记录负峰, 其中该峰可具有比氩或氦快的迁移时间, (xv) 电子顺磁共振 (EPR) 谱, 其可记录具有约 $2.0046\pm 20\%$ 的g因子的 $H_2(1/4)$ 峰和约 $1.6\times 10^{-2}\text{eV}\pm 20\%$ 的质子分裂 (诸如质子-电子偶极分裂) 能以及包含氢分子二聚物 $[H_2(1/4)]_2$ 的氢产物中的至少一者, 其中EPR谱显示约 $9.9\times 10^{-5}\text{eV}\pm 20\%$ 的电子-电子偶极分裂能和约 $1.6\times 10^{-2}\text{eV}\pm 20\%$ 的质子-电子偶极分裂能, (xvi) 四极矩测量, 诸如磁化率和g因子测量, 其记录约 $\frac{1.70127a_0^2}{p^2}$ 的 $H_2(1/p)$ 四极矩/e, 以及 (xvii) 高压液相色谱 (HPLC), 其采用溶剂 (诸如包含水

或水-甲醇-甲酸的溶剂) 和洗脱液 (诸如梯度水+醋酸铵+甲酸以及乙腈/水+醋酸铵+甲酸), 使用有机柱, 显示出具有比载体空体积时间更长的保留时间的色谱峰, 其中通过质谱诸如ESI-ToF的检测峰显示出至少一个离子化合物或无机化合物的碎片, 诸如来自通过将来自SunCell®的 Ga_2O_3 溶解于 NaOH 中而制备的样品的 NaGaO_2 型碎片。分数氢分子可形成二聚物和固体 $H_2(1/p)$ 中的至少一者。在一个实施方式中, $H_2(1/4)$ 二聚物 ($[H_2(1/4)]_2$) 和 $\text{D}_2(1/4)$ 二聚物 ($[\text{D}_2(1/4)]_2$) 的整数J至J+1跃迁的翻滚旋转能分别是约 $(J+1) 44.30\text{cm}^{-1}$ 和 $(J+1) 22.15\text{cm}^{-1}$ 。在一个实施方式中, $[H_2(1/4)]_2$ 的至少一个参数是 (i) 约 $1.028\text{\AA}$ 的 $H_2(1/4)$ 分子之间的间距, (ii) 约 23cm^{-1} 的 $H_2(1/4)$ 分子之间的振动能, 以及 (iii) 约 0.0011eV 的 $H_2(1/4)$ 分子之间的范德华能。在一个实施方式中, 固体 $H_2(1/4)$ 的至少一个参数是 (i) 约 $1.028\text{\AA}$ 的 $H_2(1/4)$ 分子之间的间距, (ii) 约 23cm^{-1} 的 $H_2(1/4)$ 分子之间的振动能, 以及 (iii) 约 0.019eV 的 $H_2(1/4)$ 分子之间的范德华能。旋转光谱和振动光谱中的至少一者可通过FTIR和拉曼光谱中的至少一者记录, 其中键解离能和间距也可从光谱确定。分数氢产物的参数的解析在Mills

GUTCP[其以引用的方式并入本文中,可得自<https://brilliantlightpower.com>]中给出,诸如在第5-6、11-12和16章中给出。

[0965] 在一个实施方式中,收集呈气态、物理吸收态、液化态或呈其他状态的分子分数氢的设备包括:包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的源、容纳包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的腔室、热解腔室中的包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的部件和收集从包含低能氢物质的大聚集体或聚合物释放的气体的部件。分解部件可包括加热器。加热器可将第一腔室加热至高于包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的分解温度的温度,诸如在约10℃至3000℃、100℃至2000℃和100℃至1000℃中的至少一个范围内的温度。收集来自包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的分解的气体的部件可包括第二腔室。该第二腔室可包括气泵、气阀、压力计和质量流量控制器中的至少一者以进行以下中的至少一者:储存和转移所收集的分子分数氢气体。该第二腔室还可包括吸收分子分数氢气体的吸气剂或用以液化分子分数氢的冷却器诸如超低温系统。冷却器可包括超低温泵或杜瓦,该超低温泵或杜瓦容纳有超低温液体诸如液氢或液氮。

[0966] 用以形成包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的部件还可包括场源,诸如电场或磁场中的至少一者的源。电场源可包括至少两个电极和一电压源以将电场施加至反应腔室,在其中形成聚集体或聚合物。作为另一种选择,电场源可包含带静电材料。该带静电材料可构成反应池腔室诸如包含碳的腔室,诸如Plexiglas腔室。本公开的爆轰可使反应池腔室带静电。磁场源可包括至少一个磁体诸如永久磁体、电磁体或超导磁体以将磁场施加至反应腔室,在其中形成聚集体或聚合物。

[0967] 本文中形式为(#.#)的EPR计算的方程式和所引用的章节对应于MILLS GUT的那些。分子分数氢 $H_2(1/p)$ 包含(i)两个电子,其束缚在构成分子轨道(MO)的最小能量、等电势、长椭球形、二维电流膜中,(ii)两个 $Z=1$ 核,诸如在长椭球的两个焦点处的两个质子,以及(iii)光子,其中每一状态的光子方程不同于氢分子的激发态(Excited States of the Hydrogen Molecule)章节中所给出的激发 H_2 状态的光子方程,这是因光子使中心场增加一整数而非使中心长椭球场减小至以椭球的焦点为中心的每一核的基本电荷的倒数整数(reciprocal integer),并且 $H_2(1/p)$ 的电子在同一壳层中在相同位置 ξ 处而非在单独 ξ 位置处成对。分数氢状态光子电场与每电子的相互作用会产生非辐射径向单极,使得该状态是稳定的。相比之下,通过相同机制,激发的 H_2 状态光子在外层激发态电子处产生辐射径向偶极,从而致使该状态对辐射是不稳定的。对于激发态,光子电场在空间和时间上包括长椭球谐波,其调制同相的外层电子的恒定长椭球电流。前者对应于轨道角动量而后者对应于自旋角动量。由于在单MO中包含两个非辐射电子的分子分数氢的独特稳定状态,捕获光子场的性质、充当谐振腔的分子分数氢内侧的矢量光子传播的性质和电子电流的性质是独特的。

[0968] 考虑由两个非辐射 $n=1$ 状态H原子形成非辐射状态 H_2 分子,从而需要通过第三体碰撞来移除结合能:



[0970] 其中 M^* 表示高能态的第三体。分子分数氢可通过相同的非辐射机制形成,其中分子分数氢原子和分子分数氢分子包含由于等价于分别在原点处和在长椭球MO的每一焦点处的质子的中心场的整数倍数而非非辐射性的中心场的额外光子分量。将两个电子组合至单分子轨

道中同时维持无辐射整数光子中心场会引起在分子分数氢中出现双重MO态而非单线态的特殊情形。单重态是非磁性的;然而,双重态具有一波尔磁子 μ_B 的净磁矩。

[0971] 具体而言,每一氢型原子的电流的基元是一个大圆,如“原子轨道-CVFS的产生(Generation of the Atomic Orbital-CVFS)”章节中所示的,并且该大圆电流基元跃迁至氢类型分子中的椭圆电流基元,如“氢型分子的力平衡(Force Balance of Hydrogen-Type Molecules) 章节”中所示的。如“原子轨道(Atomic Orbital)”章节内的“电场的方程式(Equation of the Electric Field)”中所示,(i) 光子携带电场并且包括封闭场力线回路,(ii) 分数氢或分子分数氢各自包含捕获的光子,其中光子场力线回路各自沿着配对大圆或椭圆电流回路基元在相同向量方向上行进,(iii) 每一场力线的方向随着狭义相对论所要求的相对运动而在垂直于传播方向的方向上增加,并且(iv) 由于每一点沿着捕获的光子的场力线回路的线性速度是光速 c ,因此相对于实验室参考系的电场方向纯粹垂直于其配对电流回路并且其仅在 $\delta(r-r_n)$ 处存在。氢分子轨道的成对电子包括不具有净磁矩的单重态。然而,在形成分子分数氢期间叠加的两个分数氢原子的光子场力线可仅在一个方向上传播以避免对消并且产生中心场以提供离心力与中心力之间的力平衡(式(11.200))。此特殊情形产生分子分数氢中的双重态。

[0972] 可将MO视为包括每个电子的电流密度函数的大椭圆的线性组合,如“轨道球-CVFS的产生(Generation of the Orbitsphere-CVFS)”章节和“氢型分子的力平衡(Force Balance of Hydrogen-Type Molecules)”章节中所给出的。为满足光子在方向上与电子电流匹配并且电子角动量为 $\hbar$ 的边界条件,电子1的一半和电子2的一半可自旋向上并与两个光子匹配,而电子1的另一半可自旋自旋向上并且电子2的另一半可自旋向下,使得电流的一半是成对的并且电流的一半是不成对的。假设每个电子的不可分割性和MO包含两个相同电子的条件,将两个光子的力转移至包含两个完全相同电子的电子MO的总体以满足式(11.200)。未成对电流密度的所得角动量和磁矩分别为 $\hbar$ 和波尔磁子 μ_B 。

[0973] 如“电子g因子(Electron g Factor)”章节中所给出的,由未成对电子以量子化单位的磁通量子或磁通量子 $\frac{h}{2e}$ 来连接通量。沿由式(1.226至1.227)给出的原子轨道而行的磁通量子的电能、磁能和耗散能为

$$[0974] \quad \Delta E_{mag}^{spin} = 2 \left[1 + \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{2}{3} \alpha^2 \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right) - \frac{4}{3} \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right)^2 \right] \mu_B B = g \mu_B B \quad (16.217)$$

[0975] 在分子分数氢的情形中,未成对电子是MO的两个电子的线性组合,其中电流密度的一半是成对的并且一半是未成对的。磁通量子连接两个联锁电子,使得磁链项的贡献是双倍的。对应的g因子为

$$[0976] \quad g = 2 \left[1 + 2 \left(\frac{\alpha}{2\pi} + \frac{2}{3} \alpha^2 \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right) - \frac{4}{3} \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right)^2 \right) \right] = 2.0046386 \quad (16.218)$$

[0977] 所施加的磁场中的未成对电子的平行水平与反平行水平之间的能量为

$$[0978] \quad \Delta E_{mag}^{spin} = g \mu_B B = 2.0046386 \mu_B B \quad (16.219)$$

[0979] 确认了式(16.218)的预测,其中观察到电子顺磁共振峰,g因子为2.0047。

[0980] 与其他分子分数氢电子磁矩和分子的质子的核磁矩的相互作用导致由对应于该相互作用的能量分裂量子化的能级(式(16.219))。如由式(16.220)所示出的,在同轴施加的或相互作用的磁通量平行于磁矩的情形中电子的能量减小,并且在磁通量反平行于磁矩的情形中电子的能量增加。可通过考虑分数氢二聚物的第一 $H_2(1/4)$ 分子的磁矩与第二共线 $H_2(1/4)$ 分子的磁矩的相互作用能量来计算分子分数氢二聚物 $[H_2(1/p)]_2$ 诸如 $[H_2(1/4)]_2$ 的能移,该相互作用具有在“由于 H_2 二聚物、 $H_2(1/p)$ 二聚物、固体 H_2 和固体 $H_2(1/p)$ 的分子间范德华内聚能而引起的几何参数和能量(Geometrical Parameters and Energies due to the Intermolecular van der Waals Cohesive Energies of H_2 Dimer, $H_2(1/p)$ Dimer, Solid H_2 , and Solid $H_2(1/p)$)”章节中计算的参数。一般而言,以距离 $|r|$ 间隔开的两个量子化磁偶极子 m_1 和 m_2 的相互作用势能 $E_{\text{mag dipole}}$ 由下式给出

$$[0981] \quad E_{\text{mag dipole}} = -\frac{\mu_0}{4\pi|r|^3} \left(3(\mathbf{m}_1 \cdot \hat{\mathbf{r}})(\mathbf{m}_2 \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2 \right) \quad (16.220)$$

[0982] 其中 μ_0 为自由空间 $\hat{\mathbf{r}}$ 的磁导率并且是平行于结合两个偶极子的中心的线的单位向量。考虑与 $H_2(1/4)$ 二聚物的两个轴向对准磁矩的相互作用的分裂能。在将每一轴向对准的磁矩的波尔磁子 μ_B 和由式(16.202)针对 $|r|$ 给出的 $H_2(1/4)$ 二聚物间距代入式(16.220)中,用以使 $[H_2(1/4)]_2$ 的两个电子磁矩的自旋方向翻转的能量 $E_{\text{mag e-dipole}}$ 为

$$[0983] \quad \begin{aligned} E_{\text{mag e-dipole}} &= -\frac{2\mu_0\mu_B^2}{4\pi r^3} \\ &= -\frac{\mu_0(9.27400949 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1})^2}{2\pi(1.028 \times 10^{-10} \text{ m})^3} \\ &= -1.584 \times 10^{-23} \text{ J} = -9.885 \times 10^{-5} \text{ eV} = 23.90 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (16.221)$$

[0984] 由式(16.221)给出的磁能也由给定 $H_2(1/4)$ 的质子核磁矩分裂,其中核磁矩可平行或反平行于电子磁矩。椭圆 MO , $\mathbf{H}_x$ (式(12.31))内的磁场为:

$$[0985] \quad B_x^- = \mu_0 \frac{e\hbar}{2m_e} \frac{1}{a^3 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)^{3/2}} \left(2\sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} + \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}} \right) \quad (16.222)$$

[0986] 将 $H_2(1/4)$ 半长轴 a (式(11.202))和 $H_2(1/4)$ 半短轴 b (式(11.205))代入式(16.222)给出

$$[0987] \quad B_x^- = 4.52 \times 10^4 \text{ T} \quad (16.223)$$

[0988] 使质子磁矩翻转的相应能量 $E_{\text{mag N-dipole}}$ 由下式给出

$$[0989] \quad E_{\text{mag N-dipole}} = (2) \mu_B = 4(1.4106 \times 10^{-26} \text{ JT}^{-1})(4.52 \times 10^4 \text{ T})$$

$$[0990] \quad = 2.55 \times 10^{-21} \text{ J} = 1.59 \times 10^{-2} \text{ eV} = 3851 \text{ GHz} = 128 \text{ cm}^{-1} \quad (16.224)$$

[0991] 能量(式(16.219))可进一步受级数大于二的多聚体(诸如三聚物、四聚物、五聚

物、六聚物)的存在并且受分数氢化合物的内部整体磁性影响。可通过由式(16.220)给出的叠加磁偶极子相互作用的向量相加以及相应的距离和角度来确定归因于多个多聚体的能移。当多个分数氢分子的磁矩协同地相互作用时,分子分数氢可产生非零或有限的整体磁性,诸如顺磁性、超顺磁性以及甚至铁磁性。通过振动样品磁力测定来确认超顺磁性。当分子分数氢大聚集体另外包含诸如铁之类的铁磁原子时,超顺磁性和铁磁性是有利的。超过室温而是稳定的大聚集体可通过磁性组装和键合而形成。磁能变得接近 0.01eV ,与周围实验室热能相当。已通过傅里叶变换红外线 (FTIR) 光谱和拉曼光谱确认了约 100cm^{-1} 的区域中的相应红外吸收谱带。

[0992] 可通过电子顺磁共振谱 (EPR) 以及电子核双共振谱 (ENDOR) 独特地鉴别分子分数氢。在一个实施方式中,低能氢产物可包含处于反磁性化学态的金属,诸如金属氧化物,并且另外不存在任何自由的非分数氢自由基物质,其中由于存在 $\text{H}_2(1/p)$ 诸如 $\text{H}_2(1/4)$ 而观察到电子顺磁共振 (EPR) 谱峰。包括用以使线爆轰以充当反应物源中的至少一者的部件以及用以传播分数氢反应以形成以下各项中的至少一者的部件的分数氢反应池腔室构成了图33中所示的线爆轰系统: $\text{H}_2(1/4)$ 分子;无机化合物,诸如金属氧化物、氢氧化物;水合的无机化合物,诸如水合的金属氧化物和氢氧化物,其还包含 $\text{H}_2(1/p)$, 诸如 $\text{H}_2(1/4)$;以及大聚集体或聚合物,其包含低能氢物质,诸如分子分数氢。在示例性实施方式中,包括低能氢物质(诸如通过使99.999% Sn和Zn线在包含空气中的水蒸气的气氛中爆轰而形成以及通过球磨包含 H_2O (其充当用以形成 $\text{H}_2(1/4)$ 的H和HOH催化剂源) 的NaOH-KCl而形成的分子分数氢) 的反应产物的EPR谱各自显示出g因子约为2的EPR峰,其中没有常规的EPR物质可存在。在线爆轰样品的情形中,观察到在潮湿空气中爆轰之后的30分钟周期内形成网状产物。在不存在水蒸气的情况下未观察到网状产物。将网状化合物收集并悬浮于甲苯中,并且在普林斯顿大学的具有 9.368GHz (3343G) 的微波频率的仪器上进行EPR。NaOH-KCl以无溶剂运行。在 $g=2.0045$ 处的EPR峰匹配针对 $\text{H}_2(1/4)$ 而预测的峰。Sn、SnO、Zn、ZnO、NaOH和KCl并非EPR活性的。图34中示出了包含低能氢的分数氢反应产物的电子顺磁共振谱 (EPR) 谱图,该低能氢包含通过如下方式而形成的白色聚合化合物:将从SunCell® 中的分数氢反应运行收集的 Ga_2O_3 溶解于KOH水溶液中,让纤维生长并漂浮至表面,在该表面处通过过滤收集该纤维。在 $g=2.0045$ 处的EPR峰匹配针对 $\text{H}_2(1/4)$ 而预测的峰。对照氧化镓和氢氧化钾是反磁性并且据观察是EPR非活性的。通过将市售试剂 Ga_2O_3 溶解于KOH水溶液中并在真空下对水进行旋转蒸发而制备对照 $\text{KGa}(\text{OH})_4$ 。该对照的EPR谱不存在在区域0至6000G区中的任何特征。单峰是有机自由基的典型特征并且不是过渡金属特征性的。由于观察到化合物在浓碱($\text{pH}=14$) 和浓HCl ($\text{pH}\sim 0$) 中是稳定的,从而消除了任何自由基存在的可能性。

[0993] 包含分子分数氢诸如 $[\text{H}_2(1/4)]$ 的化合物可在极低能量指纹区域中产生宽IR谱带或拉曼谱带。如Mills GUTCP中所示的, $[\text{H}_2(1/4)]_2$ 具有低振动能和翻滚旋转能,在作为涉及作为大聚集体的 $[\text{H}_2(1/4)]_2$ 二聚物总体的模式激发时,叠加的能量产生IR或拉曼吸收谱带,如图35A和图35B中所观察到的。Zn线在包含水蒸气的气氛中爆轰的产物的FTIR光谱是值得注意的,这是因其不存在任何官能基特征(图35A)。在通过以下方式形成的白色聚合化合物的拉曼光谱的情形中观察到相同特征(图35B):将从SunCell® 中的分数氢反应运行收集的 Ga_2O_3 溶解于KOH水溶液中,让纤维生长并漂浮至表面,在该表面处通过过滤收集该纤维。用325nm激光在高波数下观察到拉曼连续谱,如图35C和图35D中所示的。连续拉曼光谱可归因

于光子的磁位移、纳米颗粒效应以及归因于通过磁性分子分数氢连接进行随机聚集的无序。将在 1602cm^{-1} 下的峰归属于具有顺磁位移和纳米颗粒位移的 H_2 (1/4) 旋转。分子分数氢具有未成对电子;因此,预测有超精细结构。在一个实施方式中,在分数氢分子自旋(磁性地)耦合时观察到超精细结构能量的整数(诸如1、2、3、4)倍。与式(16.224)一致,图35C和图35D的关于分子分数氢化合物的 785nm 激光拉曼中观察到峰的 $n \times 128\text{cm}^{-1}$ 峰值。

[0994] 多个分数氢分子诸如 H_2 (1/4) 的电子磁矩可引起永久磁化。当多个分数氢分子的磁矩协同地相互作用时,分子分数氢可产生整体磁性,并且其中可出现多聚物诸如二聚物。包含分子分数氢的二聚物、聚集体或聚合物的磁性可因协同对准的磁矩的相互作用引起。如果磁性是由于具有至少一个未配对电子的额外物质(诸如铁原子)的永久电子磁偶极矩的相互作用,则磁性可大得多。

[0995] 分子分数氢的磁性特征通过质子魔角旋转核磁共振谱(^1H MAS NMR)证明,如由Mills等人在称作CIHT池的产生分数氢的电化学池的情形中所示的[R.Mills,X Yu,Y.Lu,G Chu,J.He,J.Lotoski,“Catalyst induced hydrino transition (CIHT) electrochemical cell,” (2012), Int.J.Energy Res., (2013), DOI:10.1002/er.3142]。分子分数氢存在于可还包含一些水合水的固体基质诸如碱金属氢氧化物-碱金属卤化物基质中,由于分子分数氢的顺磁基质效应而产生高场 ^1H MAS NMR峰,通常在-4至-5ppm;而不含分数氢的初始基质则显示出+4.41ppm处的已知低场位移基质峰。将从不锈钢SunCell®收集的 $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{H}_2$ (1/4) 溶解于NaOH中,过滤,并将包含不锈钢氧化物和GaOOH的滤液在压力容器中加热至 900°C 并使分解气体流过装填于连接至该压力容器的管中的水合KCl吸气剂。暴露于分数氢气体的KCl吸气剂相对于外部TMS的 ^1H MAS NMR谱显示出由于分子分数氢的磁性而导致的处于-4.6ppm的高场位移基质峰(图36)。

[0996] 用以产生分子分数氢的简便方法是通过在存在充当分数氢催化剂和H源的 H_2O 的情况下进行线爆轰。在包含水蒸气的气氛中的线爆轰产生磁性直链,该磁性直链包含分数氢(诸如分子分数氢),具有可聚集形成网的金属原子或离子。顺磁材料线性地响应感应磁性;而所观测到的“S”形为超顺磁性(铁磁性与顺磁的混合体)的特征。在一个实施方式中,聚合物网状化合物诸如通过在含水蒸气的空气中使钼线爆轰而形成的化合物是超顺磁性的。振动样品磁化率计记录可显示如图37中所示的S形曲线。例外的是,感应的磁性在5K0e下达到峰值并且在较高的施加场下降低。超顺磁性分数氢化合物可包含可在磁场中取向的磁性纳米颗粒。

[0997] 除了范德华力以外,自组装机理还可包括磁排序。众所周知的是,施加外部磁场会致使悬浮于诸如甲苯之类的溶剂中的胶态磁性纳米颗粒诸如磁铁(Fe_2O_3) 组装成线性结构。由于小的质量和高的磁矩,分子分数氢甚至在不存在磁场的情况下进行磁性自组装。在增强自组装以及控制分数氢产物的备选结构形成的实施方式中,将外部磁场施加于分数氢反应,诸如线爆轰。磁场可通过将至少一个永磁体置放在反应腔室中来施加。作为另一种选择,爆轰线可包含充当磁性粒子源的金属诸如磁铁以驱动分子分数氢的磁性自组装,其中所述源可为水蒸气中的线爆轰或另外的源。

[0998] 在一个实施方式中,分数氢产物诸如分数氢化合物或大聚集体可包含至少一种非氢的元素周期表中的其他元素。分数氢产物可包含分数氢分子和至少一种其他元素,诸如金属原子、金属离子、氧原子和氧离子中的至少一者。示例性的分数氢产物可包含 H_2 (1/p)

诸如 $H_2(1/4)$ 以及Sn、Zn、Ag、Fe、SnO、ZnO、AgO、FeO和 Fe_2O_3 中的至少一者。

[0999] 用以在室温至高温下形成固体的分子分数氢分子 $H_2(1/4)$ 的结合是由于范德华力形成的,分子分数氢的范德华力由于尺寸减小和更紧实(如Mills GUTCP中所示)而比分子氢的范德华力大得多。由于分子分数氢的固有磁矩和范德华力,分子分数氢可自组装成大聚集体。在一个实施方式中,分数氢诸如 $H_2(1/p)$ (诸如 $H_2(1/4)$)可形成聚合物、管、链、立方体、富勒烯和其他宏观结构,诸如具有式 H_n 的结构,其中 n 为大于已知氢形式的整数的整数。在一个示例性实施方式中,通过本公开中所给出的方法在因Zn线在包含水蒸气的空气气氛中的高电压爆轰而产生的丝状产物的TOF-SIMS中观察到具有 $m/e=60.35$ 的绝对质量的 H_{60} 。在一个实施方式中,分子分数氢诸如 $H_2(1/4)$ 可通过磁偶极子力以及范德华力结合而组装成直链。在另一个实施方式中,分子分数氢可组装成三维结构诸如在八个顶点每一者处具有 $H_2(1/p)$ 诸如 $H_2(1/4)$ 的立方体。在一个实施方式中,八个 $H_2(1/p)$ 分子诸如 $H_2(1/4)$ 分子结合成立方体,其中每个分子的中心在该立方体的八个顶点中的一者处,并且每个核间轴平行于以顶点为中心的立方体边。

[1000] H_{16} 可充当通过自组装而形成的更复杂宏观结构的单元或部分。在另一个实施方式中,可将在正方形的四顶点中的每一者处包含 $H_2(1/p)$ 诸如 $H_2(1/4)$ 的 H_8 单元可添加至长方体 H_{16} 以构成 H_{16+8n} ,其中 n 为整数。示例性的另外的大聚集体是 H_{16} 、 H_{24} 和 H_{32} 。氢大聚集体中性物和离子可与诸如O、OH、C和N之类的其他物质复合为中性物或离子。在一个实施方式中,所得的结构在飞行时间次级离子质谱(ToF-SIMS)中产生 H_{16} 峰,其中可观测到质量对应于从 H_{16} 损失整数个H的碎片,诸如 H_{16} 、 H_{14} 、 H_{13} 和 H_{12} 。由于H的质量为 $1.00794u$,相应的+1或-1离子峰具有以下质量:16.125、15.119、14.111、13.103、12.095...氢大聚集体离子诸如 H_{16}^- 或 H_{16}^+ 可包含介稳态物。通过ToF-SIMS在正和负谱中的16.125处观测到具有宽峰的介稳特征的氢大聚集体离子 H_{16}^- 和 H_{16}^+ 。在负ToF-SIMS谱的15.119处观测到 H_{15}^- 。分别在正和负ToF-SIMS谱中观测到 H_{24} 介稳物质 H_{23}^+ 和 H_{25}^- 。

[1001] 在一个实施方式中,包含低能氢物质诸如分子分数氢的物质(“分数氢化合物”)的组合物可以磁性方式分离。可使分数氢化合物冷却以进一步增强磁性,然后以磁性方式分离。磁性分离方法可包括将含有所需分数氢化合物的化合物混合物移动通过磁场,使得分数氢化合物的移动性相对于混合物的其余物质来说优选被阻滞,或者在混合物上移动磁体以使分数氢化合物从混合物中分离。在一个示例性的实施方式中,通过将爆轰产物材料浸入液氮中并利用磁性分离,分数氢化合物可与线爆轰的非分数氢产物分离,其中低温可增加分数氢化合物产物的磁性。可在液氮的沸腾表面增强分离。

[1002] 除带负电之外,在一个实施方式中,分数氢氢负离子 $H^-(1/p)$ 还包括具有不成对电子的双重态,该不成对电子产生一玻尔磁子的磁矩。分数氢氢负离子分离器可包括电场源和磁场源中的至少一者以基于差异的和选择性的力(基于分数氢氢负离子的电荷和磁矩中的至少一者而维持于分数氢氢负离子上)而将分数氢氢负离子从离子混合物分开。在一个实施方式中,分数氢氢负离子可在电场中加速并且基于分数氢氢负离子的独特质荷比而偏转至收集器。分离器可包括半球形分析器或飞行时间分析器型装置。在另一个实施方式中,可通过磁分离来收集分数氢氢负离子,其中通过磁体将磁场施加至样品,分数氢氢负离子

则选择性地粘至磁体以待分离。分数氢负离子可与反离子一起分离。

[1003] 在一个实施方式中,通过H与OH和H₂O催化剂中的至少一者反应合成诸如原子分数氢、分子分数氢或分数氢负离子之类的分数氢物质。在一个实施方式中,用以形成分数氢的SunCell®反应和高能反应(诸如包括本公开的喷丸或线点燃的反应)中的至少一者的产物是分数氢化合物或物质,其包含与以下各项中的至少一者络合分数氢物质诸如H₂(1/p):

(i) 除氢以外的元素, (ii) 普通氢物质, 诸如H⁺、普通H₂、普通H⁻和普通H₃⁺中的至少一者; 有机分子物质, 诸如有机离子或有机分子, 以及 (iv) 无机物质, 诸如无机离子或无机化合物。分数氢化合物可包含含氧阴离子化合物, 诸如碱金属或碱土金属碳酸盐或氢氧化物、羟基氧化物(诸如GaOOH、AlOOH和FeOOH)或本公开的其他此类化合物。在一个实施方式中, 产物包含M₂CO₃·H₂(1/4)和MOH·H₂(1/4)(M=碱金属或本公开的其他阳离子)络合物中的至少一者。产物可通过ToF-SIMS或电喷雾飞行时间次级离子质谱(ESI-ToF)鉴别为在正谱中的一系列离子, 分别包含 $M\left(M_2CO_3 \cdot H_2(1/4)\right)_n^+$ 和 $M\left(MOH \cdot H_2(1/4)\right)_n^+$, 其中n为整数并且可用

整数p>1取代4。在一个实施方式中, 包含硅和氧的化合物(诸如SiO₂或石英)可充当用于H₂(1/4)的吸气剂。用于H₂(1/4)的吸气剂可包含过渡金属、碱金属、碱土金属、内过渡金属、稀土金属、金属组合、合金(诸如Mo合金, 诸如MoCu)和储氢材料, 诸如本公开的那些。

[1004] 通过本公开的方法合成的包含分数氢物质的化合物可具有式MH、MH₂或M₂H₂, 其中M为碱金属阳离子, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式MH_n, 其中n为1或2, M为碱土金属阳离子, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式MHX, 其中M为碱金属阳离子, X为诸如卤素原子之类中性原子、分子或诸如卤素阴离子之类的带单个负电荷的阴离子中的一者, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式MHX, 其中M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式MHX, 其中M为碱土金属阳离子, X为带双负电荷的阴离子, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式M₂HX, 其中M为碱金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式MH_n, 其中n为整数, M为碱金属阳离子, 并且该化合物的氢内容物H_n包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式M₂H_n, 其中n为整数, M为碱土金属阳离子, 并且该化合物的氢内容物H_n包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式M₂XH_n, 其中n为整数, M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 并且该化合物的氢内容物H_n包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式M₂X₂H_n, 其中n为1或2, M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 并且该化合物的氢内容物H_n包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式M₂X₃H, 其中M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式M₂XH_n, 其中n为1或2, M为碱土金属阳离子, X为带双负电荷的阴离子, 并且该化合物的氢内容物H_n包含至少一种分数氢物质。化合物可具有式M₂XX'H, 其中M为碱土金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, X'为带双负电荷的阴离子, 并且H为分数氢物质。该化合物可具有式MM'H_n, 其中n为1至3的整数, M为碱土金属阳离子, M'为碱金属阳离子, 并且该化合物的氢内容物H_n包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式MM'XH_n, 其中n为1或2, M为碱土金属阳离子, M'为碱金属阳离子, X为带单个负电荷的阴离子, 并且该化合物的氢内容物H_n包含至少一种分数氢物质。化合物可具有式MM'XH, 其中M为碱土金属阳离子, M'为碱金属阳离子, X为带双负电荷的阴离子, 并且H为分数氢

物质。该化合物可具有式 $MM'XX'H$,其中M为碱土金属阳离子,M'为碱金属阳离子,X和X'为带单个负电荷的阴离子,并且H为分数氢物质。化合物可具有式 $MXX'H_n$,其中n为1至5的整数,M为碱金属或碱土金属阳离子,X为带单或双负电荷的阴离子,X'为金属或类金属、过渡元素、内过渡元素或稀土元素,并且该化合物的氢内容物 H_n 包含至少一种分数氢物质。化合物可具有式 MH_n ,其中n为整数,M为诸如过渡元素、内过渡元素或稀土元素之类的阳离子,并且该化合物的氢内容物 H_n 包含至少一种分数氢物质。化合物可具有式 MXH_n ,其中n为整数,M为诸如碱金属阳离子、碱土金属阳离子之类的阳离子,X为另一阳离子诸如过渡元素、内过渡元素或稀土元素阳离子,并且该化合物的氢内容物 H_n 包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式 $(MH_mMCO_3)_n$,其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子,m和n各为整数,并且该化合物的氢内容物 H_m 包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式 $(MH_mMNO_3)_n^+ nX^-$,其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子,m和n各为整数,X为带单个负电荷的阴离子,并且该化合物的氢内容物 H_m 包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式 $(MHMNO_3)_n$,其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子,n为整数,并且该化合物的氢内容物H包含至少一种分数氢物质。该化合物可具有式 $(MHMOH)_n$,其中M为碱金属阳离子或其他+1阳离子,n为整数,并且该化合物的氢内容物H包含至少一种分数氢物质。包括阴离子或阳离子的化合物可具有式 $(MH_mM'X)_n$,其中m和n各为整数,M和M'各为碱金属或碱土金属阳离子,X为带单或双负电荷的阴离子,并且该化合物的氢内容物 H_m 包含至少一种分数氢物质。包括阴离子或阳离子的化合物可具有式 $(MH_mM'X')_n^+ nX^-$,其中m和n各为整数,M和M'各为碱金属或碱土金属阳离子,X和X'为带单或双负电荷的阴离子,并且该化合物的氢内容物 H_m 包含至少一种分数氢物质。阴离子可包含本公开的那些阴离子中的一者。合适的示例性带单个负电荷的阴离子为卤离子、氢氧根离子、碳酸氢根离子或硝酸根离子。合适的示例性带双负电荷的阴离子为碳酸根离子、氧离子或硫酸根离子。

[1005] 在一个实施方式中,分数氢化合物或混合物包含嵌入于晶格诸如晶体晶格中诸如金属或离子晶格中的至少一种分数氢物质诸如分数氢原子、分数氢氢负离子和双分数氢分子。在一个实施方式中,所述晶格不与分数氢物质反应。基质可以是质子惰性的,诸如在嵌入的分数氢氢负离子的情况下。该化合物或混合物可包含嵌入于盐晶格诸如碱金属或碱土金属盐诸如卤化物中的 $H(1/p)$ 、 $H_2(1/p)$ 和 $H^-(1/p)$ 中的至少一者。示例性的碱金属卤化物为KCl和KI。就嵌入的 $H^-(1/p)$ 而言所述盐可不存在 H_2O 。其他适合的盐晶格包含本公开的盐晶格。

[1006] 本公开的分数氢化合物的纯度优选大于0.1原子%。更优选地,化合物的纯度大于1原子%。甚至更优选地,化合物的纯度大于10原子%。最优选地,化合物的纯度大于50原子%。在另一个实施方式中,化合物的纯度大于90原子%。在另一个实施方式中,化合物的纯度大于95原子%。

[1007] 在一个实施方式中,分数氢化合物可通过在合适的溶剂中再结晶来纯化。作为另一种选择,在包含分子分数氢的气体的情形中可通过色谱诸如高效液相色谱(HPLC)或气相色谱来纯化化合物。在一个实施方式中,可通过低温过滤来纯化分子分数氢。纯化系统可包括用于分子分数氢的选择性吸收剂,诸如活性炭或沸石。吸收剂可容纳于容器中,该容器经

加热以致使杂质从吸收剂脱气。可在真空下移除杂质。可将经脱气吸收剂冷却至低的温,诸如低温温度,诸如液氮的低温温度。可将该容器浸没于诸如液氮之类的冷冻剂的杜瓦中。可使包含分子分数氢的气体混合物流动穿过冷吸收剂,使得选择性地吸收分子分数氢。可加热吸收剂以致使纯化的分子分数氢气体从吸收剂流出以供收集。

[1008] 超顺磁分数氢化合物可包含可在磁场中取向的磁性纳米颗粒。磁性分数氢化合物诸如包含分子分数氢和分数氢氢负离子中的至少一者的磁性分数氢化合物的应用包括:磁性存储材料,诸如计算机硬盘的记忆存储材料、磁共振成像中的造影剂、铁磁流体(诸如具有可调粘度的铁磁流体)、磁性细胞分离(诸如细胞、DNA或蛋白质分离或RNA捕捞(RNA fishing))和处理(诸如靶向药物递送、磁热疗(magnetic hyperthermia)和磁转染)。在一个实施方式中,包含分子分数氢的化合物的磁特性、光吸收特性、光散射性质可用于隐形涂层、光传感器、太阳能电池、磁性分离、MRI成像作为造影剂和热疗处理。

[1009] 在分数氢氢化物以若干单位的磁通量量子来连接通量(类似于超导量子干涉装置(SQUID)的行为)的一个实施方式中,诸如磁力计、逻辑门、传感器或开关之类的电子装置包含至少一种分数氢氢负离子以及输入电流与输入电压电路和输出电流与输出电压电路中的至少一者以进行以下操作中的至少一者:感测和改变至少一种分数氢氢负离子的磁链状态。

[1010] 在一个实施方式中,形成分数氢产物的功率和光发射池包括至少一个超声换能器、用以形成空泡的液体介质、HOH催化剂源和H源。该液体介质可包含以下各项中的至少一者:烃,诸如十二烷;酸,诸如硫酸;和水,其可进一步充当HOH和H中的至少一者的源。液体可包含稀有气体(诸如氩或氙)并且可还包含氧源、氧、氢源和氢中的至少一者。稀有气体可使液体饱和。稀有气体可充当电子源。可使液体维持在低的温度,诸如接近该液体冰点的低温。可通过以下方式形成H:使碳与水反应以形成CO和CO₂中的至少一者。可通过以下方式形成H:通过电子源(诸如稀有气体)还原H⁺。碳源可以是烃和碳中的至少一者,该碳可以是以下情形中的至少一者:悬浮于水中;以及涂覆超声换能器。由超声换能器对液体介质进行超声处理可致使水氢键断裂并且可进一步致使碳源或碳与水反应以形成CO和H,H进一步与HOH反应以形成分数氢。用以形成分数氢的相应反应可致使释放热和光(诸如可处于可见区中的黑体辐射)中的至少一者。

[1011] 在一个实施方式中,通过升华将诸如H₂(1/p)之类的分数氢物质与包含该分数氢物质的化合物或材料分离,该分数氢物质束缚于该化合物或材料诸如金属氧化物、碱金属卤化物、碱金属卤化物-碱金属氢氧化物混合物以及碳酸盐诸如K₂CO₃中。可通过将该化合物或材料冷却至低温(诸如超低温)并维持真空而实现升华。

[1012] 在一个实施方式中,混合物(诸如液体或气体混合物,诸如包含氩的混合物)的分子分数氢可通过跨越诸如金属、玻璃或陶瓷膜之类的选择性渗透膜扩散而被纯化。渗透物可进入收集腔中。在一个示例性实施方式中,渗透膜可包括可浸没于液态氩中以允许分子分数氢扩散至腔中的薄壁中空的抽空腔体、腔室或管子。可通过使气体低温凝结而增加所收集的气体的压力和量。在一个示例性实施方式中,该腔体可悬于液态氩杜瓦中,然后可将凝结的气体转移至较小体积气体瓶并让其蒸发。

[1013] 在一个实施方式中,诸如H₂(1/4)之类的分子分数氢气体可溶于凝结的气体诸如稀有气体诸如液氩、液氮、液态CO₂或固态气体诸如固态CO₂中。通过观察对蒸发的液态氩气

所记录的 H_2 (1/4) 的振转谱带 (图41至图42) 确认了该溶解性。 H_2 和 O_2 也以痕量存在,从而也确认这些气体在液态氩中的溶解性。在分数氢比氢更易溶的情形中,液态氩可用于选择性地收集并富集来自源 (诸如包含 H_2 与分子分数氢气体的混合物的源诸如来自 SunCell® 的气体) 的分子分数氢气体。在一个实施方式中,使来自 SunCell® 的气体鼓泡穿过液态氩,其由于分子分数氢在该液态氩中的溶解性而充当吸气剂。在另一个实施方式中,固体材料吸气剂可单独使用或浸没于诸如液态氩之类的液体气体中。示例性的固体吸气剂可包括炭、沸石、KCl、KOH、RbCl、 K_2CO_3 、LiBr、FeOOH、In箔、MoCu箔、硅片、其他氧化物、碱金属卤化物和碱金属氢氧化物中的至少一者。可通过诸如冷冻剂之类的手段冷却吸气剂。该冷冻剂可构成低温冷阱。在一个示例性实施方式中,将低温冷阱冷却至液氮温度。为从吸气剂释放分数氢,包含分数氢的吸气剂可以是以下情形中的至少一者:加热以释放分数氢气体;以及溶解于溶剂诸如水、酸、碱或有机溶剂中以释放分数氢气体。在一个实施方式中,可使分数氢气体鼓泡至溶剂诸如超低温液体诸如液态稀有气体诸如氩或液氮、超临界 CO_2 、液态氧、液态氮、液态 O_2/N_2 混合物、本领域已知的另一超临界液体或另一液体 (诸如水、酸、碱或有机溶剂,诸如氟烃) 中。在一个实施方式中,溶剂可以是磁性的,诸如顺磁性的,使得分子分数氢由于分子分数氢的磁性而具有某些吸收相互作用。示例性的溶剂是液态氧和溶解于诸如水之类的另一液体中的氧。作为另一种选择,可使分数氢气体鼓泡穿过固态溶剂 (诸如在室温下是气体的固体,诸如固态 CO_2)。可直接收集分数氢气体。作为另一种选择,可将所得溶液过滤、撇取、倾析或离心以收集包含分数氢的不可溶化合物诸如分数氢大聚集体。

[1014] 在一个实施方式中, H_2O 可构成分子分数氢溶剂。可将 H_2O 置于阱中,其中使来自分数氢反应的气体产物鼓泡穿过该水以致使分子分数氢溶解于水中。可通过将该水加热而释放分子分数氢气体。加热可达到诸如低于 $100^\circ C$ 之类的温度,该温度相对于水蒸气选择性地释放分数氢。可使所释放的气体通过冷阱 (诸如 CO_2 超低温冷阱) 以使气体混合物的水蒸气相对于分子分数氢气体选择性凝结。可通过气相色谱和电子束激发光谱中的至少一者鉴别分子分数氢气体。

[1015] 在用以分离和鉴别分子分数氢气体中的至少一者的一个示例性实施方式中,可将分数氢吸气剂 (诸如来自 SunCell® 的氧化镓) 溶解于水 (诸如浓缩的碱水溶液诸如NaOH水溶液) 中,使得所捕获的分子分数氢然后处于气相或液相中。可使用氢作为载气将该气体注入于气相色谱柱上或鼓泡通过液态氩以溶解分子分数氢,并然后可将氩-分数氢气体与氩载气一起引入至气相色谱柱上,其中液态氩用于相对于正常氢而富集分子分数氢。可采用分析方法对该水进行分析。可将其加热至低于沸点以选择性地释放分子分数氢气体,其中水蒸气可通过低温冷阱 (诸如 CO_2 阱) 选择性地凝结以移除水从而将分子分数氢气体选择性地引入气相色谱柱。

[1016] 在一个实施方式中,使直接从SunCell®收集的气态产物或从SunCell®的固态产物释放的气态产物中收集的气态产物流穿复合器诸如CuO复合器以移除氢气,并且富集的分数氢气体凝结于低温泵的低温指形件或冷载台上的带阀的可密封冷冻腔室中。分子分数氢气体可与至少一种其他气体共同凝结或吸收于共凝结气体 (诸如可充当溶剂的氩、氮和氧中的一者或多者) 中。当积聚足够液体时,可密封该冷冻腔室并让其升温以蒸发所凝结的液体。所得气体可用于工业或分析目的。例如,可穿过腔室阀将气体注入至气相色谱仪中或注入至用于电子束发射光谱的池中。在一备选实施方式中,可使分子分数氢气体直接流入低

温指形件腔室中并凝结,其中可在高于20.3K (H_2 在大气压力下的沸点)的温度下操作该低温指形件使得氢不共同凝结。

[1017] H_3^+ 的两个不同核自旋组态是可能的,称为正(ortho)和仲(para)。正 H_3^+ 的所有三个质子自旋平行,从而产生总的核自旋为3/2。仲 H_3^+ 的两个质子自旋平行而另一质子自旋是反平行的,从而产生总的核自旋为1/2。类似地, H_2 也具有正态和仲态,其中正 H_2 具有的总核自旋为1而仲 H_2 具有的总核自旋为0。当正 H_3^+ 与仲 H_2 碰撞时,可发生质子自旋改变,从而替代地产生仲 H_3^+ 和正 H_2 。在一个实施方式中,通过手段诸如氢等离子体以及任选的磁场源制备正 H_3^+ 以增加正 H_3^+ 的自旋极化产率。可使正 H_3^+ 与分子分数氢气体碰撞而产生正 H_2 (1/p),其为NMR活性的。可通过形成正 H_3^+ 和 H_2 (1/p)的射束或通过混合气体而实现碰撞。可通过质子NMR鉴别正 H_2 (1/p)。

[1018] 在一个实施方式中,可对于从SunCell®中撇取的并溶解于碱(诸如NaOH)中的氧化镓分离大聚集体分数氢化合物。该化合物可构成高温超导体。

[1019] 在一个实施方式中,将来自SunCell的氧化镓溶解于碱诸如NaOH中。可将非可溶材料过滤以充当分数氢气体源。作为另一种选择,可倾析出溶液以隔离非可溶颗粒来充当分数氢气体源。可将该溶液过滤并可让滤液静置以形成,通过手段诸如过滤、离心和干燥中的至少一者收集该白色棉样分数氢产物。

[1020] 在另一个实施方式中,可在色谱柱上纯化分数氢气体。在载气构成包含分数氢的混合物(诸如氩/ H_2 (1/4)混合物)的情形中,可通过使该混物流过冷却至超低温(诸如液态氮或氩温度)的色谱柱(诸如HayeSep®D柱)来富集分数氢气体。氩可部分地液化以允许流动的分数氢气体富集。可通过本公开的分析手段(诸如气相色谱和电子束激发发射光谱)来分析分数氢气体。在一个实施方式中,可通过超低温液相色谱将具有另一气体(诸如氩)的混合物的分子分数氢从该混合物分离并富集。在一个实施方式中,可通过气相色谱使用氩或氢载气鉴别分子分数氢,其中分子分数氢可更容易地在这些载气中形成色谱带。检测器可包括热导检测器。在另一个实施方式中,可使用超流体 CO_2 作为载液来以色谱方式富集或纯化分子分数氢。在另一个实施方式中,可通过在超低温下进行差异液化来富集或纯化分子分数氢。可通过火焰燃烧而从 H_2 -分子分数氢混合物中移除氢,可通过使氢-分子分数氢气体混物流过 H_2 - O_2 气体炬的 H_2 入口而实现该火焰燃烧。作为另一种选择,可通过复合器诸如CuO复合器或通过氧的催化复合而移除氢。示例性的催化复合器是在固体载体(诸如氧化铝、硅石或碳)上的贵金属(诸如Pt或Pd)。

[1021] 在一个实施方式中,通过以下各项中的至少一种方法增加分子分数氢气体的压力:(i)凝结为液体(诸如超低温凝结)接着加热以致使在压力容器中蒸发,(ii)吸收于吸收剂(诸如碳或沸石或本公开的其他吸气剂)中接着加热以致使在压力容器中蒸发,以及(iii)将包含分子分数氢的气体收集于压力容器中接着进行机械压缩或液力压缩。可用能够实现足以使分数氢冷凝的温度的低温冷阱或低温泵在凝结容器中实现超低温凝结。可通过液态氩、液态氮和液态氢温度中的至少一者实现超低温凝结。在一个实施方式中,可将磁场施加至凝结容器以提升凝结温度。可用可设置于凝结容器内侧或外侧的电磁体和永久磁体(诸如钕或钴钕磁体)中的至少一者施加磁场。可通过将液体(诸如不可压缩液体,诸如

水)泵送至容器中以置换体积并压缩分子分数氢气体而实现液力压缩。分子分数氢可具有在该液体中的低溶解度。可将该液体泵送至容器的基部中以避免分子分数氢气体穿过液体递送系统(诸如通往容器的管道和泵)的扩散损失。在包含分数氢气体的压缩气体包含至少一种其他非所需的气体的情形中,可通过手段诸如使混合物流过色谱柱(诸如HayeSep®D柱)来移除该非所需的气体。在一个示例性实施方式中,通过在超低温下(诸如在液态氩温度下)使混合物流过HayeSep®D柱而将分子分数氢与氩分离。

[1022] 在一个实施方式中,通过使用复合催化剂使氩中的氢和氧与气态或液态的反应物复合来以催化方式形成分数氢。示例性的复合催化剂是可负载于载体诸如陶瓷上的贵金属(诸如Pt或Pd)。陶瓷载体可包含氧化铝,诸如氧化铝珠粒。分数氢可与共同凝结的氧一起形成于液态氩中,然后通过存在复合催化剂(诸如Pd或Pt)的情况下添加H₂来移除该共同凝结的氧。

[1023] 包含分数氢诸如H₂(1/4)的氩可用作燃料来形成分数氢H(1/p)和H₂(1/p)(其中p>4),其中使包含H₂(1/4)的氩作为反应物流入SunCell®的反应池腔室中。维持在反应池腔室中的分数氢等离子体可使H₂(1/4)的键断裂以形成H(1/4),其可充当催化剂和反应物以形成低能分数氢状态

[1024] 在一个实施方式中,进入水中的高压放电(诸如具有大于1kV的电压的电弧放电)致使形成分数氢物质,诸如H₂(1/4)。分数氢物质可进行以下操作中的至少一者:与水相互作用;以及互相相互作用。相互作用可在水上形成表面涂层,其可改变水的表面张力。该表面涂层可充当表面活性剂。该表面活性剂可降低水的表面张力。该表面涂层可表现为水在两个经置换的水储罐之间形成桥的能力。例如,肥皂可减小水的表面张力并致使在两个水储罐之间形成可变形桥。

[1025] 在一个实施方式中,高能分数氢等离子体可驱动H₂O和H₂中的至少一者与碳、CO和CO₂中的至少一者反应以形成甲烷。原子分数氢和分子分数氢中的至少一者可催化H₂O和H₂中的至少一者与碳、CO和CO₂中的至少一者反应而形成甲烷。高能分数氢等离子体可驱动H₂O→H₂+1/2O₂的反应以形成氢气。氢气与氧气可经分离和收集以用作工业气体。可将分数氢反应的功率转换成其他形式的燃料,诸如H₂、甲烷和烃中的至少一者。

[1026] 在一个实施方式中,观察到具有甲烷的分子分数氢气体色谱峰,诸如H₂(1/4)的分子分数氢气体色谱峰(图52A),使得通过手段诸如XRD、EDS、NMR和质谱鉴别甲烷或碳构成了用以筛选包含分子分数氢的样品的手段。待筛选的示例性样品是来自SunCell®的氧化镓和经NaOH水溶液处理的氧化镓样品。在一个实施方式中,可将碳添加至分数氢反应混合物以捕获分子分数氢。甲烷也可在反应中形成,其可通过甲烷嵌插来进一步辅助分数氢的碳捕获,甲烷嵌插可增强碳-分子分数氢键合。在一个实施方式中,分子分数氢所独特的另外的特征(诸如本公开的EPR、FTIR、拉曼、XPS和其他分子分数氢特征)可用于针对分子分数氢的存在来筛选样品。

[1027] 在一个实施方式中,用以形成低能氢物质(诸如H(1/p)和H₂(1/p),其中p是整数)的反应器包含熔融盐,该熔融盐充当H和HOH催化剂中的至少一者的源。该熔融盐可包含盐混合物,诸如低共熔混合物。该混合物可包含氢氧化物和卤化物中的至少一者,诸如碱金属和碱土金属氢氧化物和卤化物(诸如LiOH-LiBr或KOH-KCl)中的至少一者的混合物。该反应

器还可包括加热器、加热器动力供应器和温度控制器以将盐维持在熔融状态。该反应器还可包括电解系统,该电解系统包括至少两个电极和动力供应器。该电极在电解质中可以是稳定的。示例性的电极为镍电极和贵金属电极。可将水供应至池并且可将电压诸如DC电压施加至该电极。可在阴极处形成氢,而可在阳极处形成氧。氢可与也形成于池中的HOH催化剂反应以形成分数氢。由形成分数氢而产生的能量可在池中产生热量。池可以是良好绝缘的,使得来自分数氢反应的热量可减少加热器维持熔融盐所需的功率量。该反应器还可包括热交换器。该热交换器可移出待递送至外部负载的过量热量。

[1028] 实验

[1029] SunCell®动力产生系统通常包括光伏功率转换器,其被构造为捕获通过燃料点燃反应产生的等离子体光子并将其转换为可用的能量。在一些实施方式中,可能需要高转换效率。反应器可在多个方向(例如,至少两个方向)上排出等离子体,并且反应半径可为大约数毫米至数米的尺度,例如,半径为约1mm至约25cm。另外,通过燃料点燃产生的等离子体光谱可类似于由太阳产生的等离子体光谱和/或可包含另外的短波长辐射。图38示出了点燃包含所吸收的H₂O的80mg喷丸的处于5nm至450nm区域的绝对光谱的示例性实施方式,包含所吸收的H₂O的喷丸来自于随银冷却成喷丸时添加水至熔融银,该绝对光谱显示出基本上全部处于紫外和极紫外光谱区中的1.3MW的平均光学功率。使用Taylor-Winfield ND-24-75型点焊机以低电压、高电流实现点燃。整个喷丸内的压降小于1V并且电流约为25kA。高强度UV发射具有约1ms的持续时间。对照光谱在UV区中是平坦的。固体燃料的辐射(诸如谱线辐射和黑体辐射中的至少一种)的强度可以在以下范围的至少一者中:约2sun至200,000sun、10sun至100,000sun、100sun至75,000sun。在一个实施方式中,可以增加焊机点燃电路的电感,以增加点燃后的电流衰减时间。较长的衰减时间可以维持分数氢等离子体反应以增加能量产生。具有所预测的10.1nm截止的连续辐射可确认H(1/4)的产生。

[1030] 在爆轰之前和之后对电极执行XPS和拉曼分析。爆轰后电极都显示出一极大1940cm⁻¹拉曼峰,诸如图46和图47B中示出的峰。爆轰后XPS显示出大的496eV峰诸如图48A-B中所示的峰,其匹配H₂(1/4)总能量。不存在具有唯一备选归属的其他主要元素峰(Na、Sn或Zn),从而确认H₂(1/4)为异常高能反应的产物。未观测到爆轰前电极分别在拉曼谱中1940cm⁻¹区的拉曼峰或XPS谱中496eV区中的XPS峰。

[1031] UV和EUV光谱可转化为黑体辐射。可通过使池气氛对于UV和EUV光子中的至少一者的传播变得光学上较稠厚而实现该转换。可通过使金属诸如燃料金属在池中蒸发而增加光学厚度。光学上较厚的等离子体可以包含黑体。黑体温度可由于分数氢反应的超高功率密度容量和分数氢反应发射的光子的高能量而较高。图39中示出了在具有约1托的环境H₂O蒸汽压的氩气氛中泵送至W电极中的熔融银的点燃的光谱(由于蓝宝石光谱仪窗而在180nm处具有截止的100nm至500nm区域)。电力源2包括两组串联双电容器(MaxwellTechnologies K2超级电容器2.85V/3400F),该两组并联连接以在约1kHz至2kHz的频率下提供约5V至6V和300A的恒定电流,具有达到5kA的叠加电流脉冲。至W电极(1cm×4cm)的平均输入功率约为75W。当气氛在通过分数氢反应功率使银蒸发的情况下对UV辐射变得光学上较厚时,初始UV线发射跃迁至5000K黑体辐射。蒸发银的发射率为0.15的5000K黑体辐射器的功率密度为5.3MW/m²。所观察到的等离子体的面积为约1m²。黑体辐射可加热池26的组件,诸如可在本公开的热光伏实施方式中充当至PV转换器26a的黑体辐射器的顶盖5b4。

[1032] 包含氧源的熔体的示例性测试包括在氩/5摩尔% H_2 气氛中点燃80mg银/1重量%硼砂无水喷丸,其光学功率通过绝对光谱测定。使用焊机(Acme 75 KVA点焊机)在约1V的压降下施加约12kA的高电流,观察到250kW的功率,持续时间约1ms。包含氧源的熔体的示例性测试包括在氩/5摩尔% H_2 气氛中点燃80mg银/2摩尔% Na_2O 无水喷丸,其光学功率通过绝对光谱测定。使用焊机(Acme 75 KVA点焊机)在约1V的压降下施加约12kA的高电流,观察到370kW的功率,持续时间约1ms。包含氧源的熔体的示例性测试包括在氩/5摩尔% H_2 气氛中点燃80mg银/2摩尔% Li_2O 无水喷丸,其光学功率通过绝对光谱测定。使用焊机(Acme 75 KVA点焊机)在约1V的压降下施加约12kA的高电流,观察到500kW的功率,持续时间约1ms。

[1033] 基于Edgertronics高速摄像机记录的等离子体大小,分数氢反应和功率取决于反应体积。该体积可能需要尽可能小以优化反应功率和能量,诸如约0.5至10升用于点燃约30mg至100mg的喷丸,诸如银丸以及H和HOH催化剂源(诸如水合物)。从喷丸点燃开始,在非常高的银压力下,分数氢反应速率很高。在一个实施方式中,分数氢反应可以在高等离子体压力下具有高动力学。基于高速光谱数据和Edgertronics数据,当等离子体体积最低并且Ag蒸气压最高的初始时,分数氢的反应速率最高。当熔融($T=1235K$)时,点燃1mm直径的Ag喷丸。80mg(7.4×10^{-4} 摩尔)喷丸的初始体积为 5.2×10^{-7} 升。相应的最大压力约为 1.4×10^5 大气压。在示例性实施方式中,观察到反应在约声速(343m/s)下膨胀,反应持续时间为约0.5ms。最终直径为约17cm。在没有任何背压的情况下最终体积约为20升。最终的Ag分压约为 3.7×10^{-3} 大气压。由于反应在较高压力下可具有较高的动力学,因此可通过施加电极压力并允许等离子体垂直于电极间轴线膨胀,进行电极限定以增加反应速率。

[1034] 测量在97%氩/3%氢气氛的存在下通过向以2.5ml/s注入SunCell®点燃电极的熔融银中加入1摩尔%或0.5摩尔%氧化铋引起的分数氢反应所释放的功率。在添加对应于氧化物添加的分数氢反应功率贡献之前和之后的时间反应池水冷却剂温度的斜率的相对变化乘以用作内标的恒定初始输入功率。对于重复运行,在添加氧源之后的具有分数氢功率贡献的总池输出功率由对应于7540W、8300W、8400W、9700W、8660W、8020W和10,450W的总输入功率的97、119、15、538、181、54和27的时间冷却剂温度响应的斜率比率的乘积确定。热爆发功率分别为731,000W、987,700W、126,000W、5,220,000W、1,567,000W、433,100W和282,150W。

[1035] 测量在97%氩/3%氢气氛的存在下通过向以2.5ml/s注入SunCell®点燃电极的熔融银中加入1摩尔%氧化铋(Bi_2O_3)、1摩尔%钒酸锂($LiVO_3$)或0.5摩尔%钒酸锂引起的分数氢反应所释放的功率。在添加对应于氧化物添加的分数氢反应功率贡献之前和之后的时间反应池水冷却剂温度的斜率的相对变化乘以用作内标的恒定初始输入功率。对于重复运行,在添加氧源之后的具有分数氢功率贡献的总池输出功率由对应于6420W、9000W和8790W的总输入功率的497、200和26的时间冷却剂温度响应的斜率比率的乘积确定。热爆发功率分别为3.2MW、1.8MW和230,000W。

[1036] 在示例性实施方式中,点燃电流从约0V升高到2000A,对应于电压在约0.5内从约0V增长至1V,在该电压下点燃等离子体。然后将电压一步增加到约16V并保持约0.25s,其中约1kA流过熔体并且1.5kA通过除电极8之外的另一个接地回路串联流过等离子体本体。对于包含Ag(0.5摩尔% $LiVO_3$)和氩- H_2 (3%)(以9升/秒的流速)的SunCell®,输入功率为约25kW,功率输出为超过1MW。点燃序列以约1.3Hz的频率重复。

[1037] 在示例性实施方式中,点燃电流为约500A恒定电流,并且电压为约20V。对于包含Ag (0.5摩尔%LiVO₃) 和氩-H₂ (3%) (以9升/秒的流速)的SunCell®,输入功率为约15kW,功率输出为超过1MW。

[1038] 在一个实施方式中,优化操作参数,诸如气流、气体组成(诸如氩-氢混合物的组成)、气体流量、尺度、几何结构、EM泵送速率、工作温度以及点燃波形、电流、电压和功率。以25至30V的DC点燃电压和1500A至3000A的电流测试一组实验SunCell®,其中各自包括(i)倒置基座,诸如图25中所示的倒置基座,其中基座电极为正,(ii)以200g/s泵送的作为熔融金属的镓,(iii)在混合于炬中的情况下以3000sccm流动的H₂和以30sccm流动的O₂,作为反应池腔室中的HOH催化剂和H源在超过90℃下流过1g的10%Pt/Al₂O₃。发现最佳尺寸等级顺序是6英寸直径球体>8英寸直径球体>12英寸直径球体,以及4英寸边立方体>6英寸边立方体>9英寸边立方体。

[1039] 在包含作为熔融金属的镓铟锡合金的6英寸直径球形池的一个实施方式中,用750sccm H₂和30sccm O₂供应分数氢反应,该H₂和O₂混合于氢氧炬中并且在大于90℃下流过包含1g 10%Pt/Al₂O₃的复合器腔室,然后流入池中。另外,向反应池腔室供应1250sccm的H₂,该H₂在大于90℃下流过包含1g 10%Pt/Al₂O₃的第二复合器腔室,然后流入池中。通过相应的质量流量控制器控制三个气体供应器中的每一者。H₂与O₂的组合流提供HOH催化剂和原子H,并且第二H₂供应器提供额外的原子H。以约30至35V和约1000A的DC输入维持分数氢反应等离子体。通过VI积分测得的输入功率为34.6kW,并且通过熔融金属浴量热法测得129.4kW的输出功率,其中储罐和反应池腔室中的镓充当金属浴。

[1040] 在预加载有2500sccm H₂和70sccm O₂并且在反应池腔室的壁上包括Ta衬里的具有4英寸边的池的一个实施方式中,由充电至50V的电容器组供应在3000A至1500A的范围内的电流。该电容器组包括串联的18个电容器(Maxwell Technologies K2超电容器2.85V/3400F)组成的3个并联组,此提供51.3V的总组电压容量和566.7法拉的总组电容。输入功率为83kW,而输出功率为338kW。在用4000sccm H₂和60sccm O₂供应的6英寸直径球形池的一个实施方式中,由充电至50V的电容器组供应在3000A至1500A的范围内的电流。输入功率为104kW,而输出功率为341kW。

[1041] 根据所观测到的图40中所示的1.3nm的H α 线的极端斯塔克增宽,在2升Pyrex SunCell®中运行的分数氢反应所产生的异常功率密度显而易见。该增宽对应于 $3.5 \times 10^{23}/\text{m}^3$ 的电子密度。基于800托的氩-H₂压力和3000K的温度,SunCell®气体密度计算为 2.5×10^{25} 个原子/ m^3 。相应的电离分数为约10%。在氩和H₂具有约15.5eV的电离能和在高压下小于100us的复合寿命的条件下,用以维持电离的功率密度为

$$P = \left(\frac{3.5 \times 10^{23} \text{ 个电子}}{\text{m}^3} \right) (15.5 \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{\text{eV}} \right) \left(\frac{1}{10^{-4} \text{ s}} \right) = \frac{8.7 \times 10^9 \text{ W}}{\text{m}^3}.$$

[1042] 在图34中所示的实施方式中,用以形成包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的系统500包括腔室507(诸如Plexiglas腔室)、金属线506、具有可由高压DC动力供应器503充电的接地连接件504的高电压电容器505以及开关诸如12V电开关502和触发式火花隙开关501,该开关闭合从电容器至腔室507内部的金属线506的电路以致使金属线爆轰。该腔室可包含水蒸气和气体诸如大气空气或稀有气体。

[1043] 用以形成包含低能氢物质的大聚集体或聚合物的示例性系统包括：具有46cm的长度和12.7cm的宽度和高度的封闭的长方体Plexiglas腔室；10.2cm长、0.22~0.5mm直径金属线，其用不锈钢螺母以距腔室底部9cm的距离安装在两个不锈钢杆之间；15kV电容器（Westinghouse 5PH349001AAA型，55uF），其充电至约4.5kV，对应于557J；给该电容器充电的35kV DC动力供应器；以及带有触发式火花隙开关的12V开关（Information Unlimited公司，型号Trigatron10,3kj），其用于闭合从电容器到腔室内的金属线的电路，以引起金属线爆轰。该线可包含Mo（钼规格，20目，来自0.305mm直径线，99.95%，Alpha Aesar）、Zn（0.25mm直径，99.993%，Alpha Aesar）、Fe-Cr-Al合金（73%-22%-4.8%，31规格，0.226mm直径，KD Cr-Al-Fe合金线部件No#1231201848，Hyndman Industrial Products Inc.）或Ti（0.25mm直径，99.99%，Alpha Aesar）线。在示例性运行中，腔室容纳有包含约20托水蒸气的空气。在闭合触发开关之前关闭高压DC动力供应器。在峰电流为5kA下，约4.5kV的峰值电压作为阻尼谐振子在约300 μ s内放电。在线爆轰之后约3-10分钟内形成包含低能氢物质的大聚集体或聚合物。从腔室底部和壁以及放置在腔室中的Si片上收集分析样品。分析结果与本公开的分数的氢特征匹配。

[1044] 在图41中所示的一个实施方式中，通过混合物气体的电子束激发来观察分数的氢振转光谱，该混合物气体包含惰性气体（诸如氩气）以及通过H与O复合作为原子氢的HOH催化剂源而形成的H₂（1/4）（OH谱带309nm, O 130.4nm, H 121.7nm）。氩可在约100托至10大气压的压力范围内。水蒸气可在约1微托至10托的范围内。电子束能量可在约1keV至100keV的范围内。在145-300nm区域中观测到来自包含H₂（1/4）的大气压氩等离子体的旋转谱线，所述等离子体由透过氮化硅窗入射腔室中的气体的12keV至16keV电子束激发。通过MgF₂观察反应气体室的另一个窗的发射。能量间距为氢的能量间距的4²倍将核间距离确定为H₂和所鉴别的H₂（1/4）的核间距离的1/4（式（29至31））。该系列匹配H₂（1/4）振动跃迁 $v=1 \rightarrow v=0$ 的H₂（1/4）的P分支，该分支分别包括在154.8、160.0、165.6、171.6和177.8nm处观测到的P（1）、P（2）、P（3）、P（4）和P（5）。在另一个实施方式中，使包含分数的氢的物质的组合物（诸如本公开的组合物）热解，并将包含分数的氢诸如H₂（1/4）的分解气体引入反应气体腔室中，其中用电子束激发分数的氢气体并记录旋转振动发射谱。

[1045] 通过氢与氧在负载型贵金属催化剂上在氩气氛中的复合而形成的氩/H₂（1/4）混合物的H₂（1/4）气体是通过使该混物流过在液态氩中冷却至超低温度的35m长2.5mm内径的HayeSep®D色谱柱而富集。使氩部分地液化以准许流动的分子分数的氢气体富集，如由如图42中所示的电子束激发发射光谱所观察到的H₂（1/4）的旋转振动P分支的显著增加所指示。

[1046] 用热的钛带处理该氩气，这可移除杂质。用纯化的氩气重复该电子束谱，未观测到H₂（1/4）的P分支。在用于移除H₂（1/4）气体的Ti带上进行拉曼光谱分析，在1940cm⁻¹处观测到峰，其匹配H₂（1/4）的旋转能，从而确认其为图41中所示的150-180nm区域中的系列谱线的来源。1940cm⁻¹峰匹配图46中所示的峰。

[1047] 在另一个实施方式中，使分数的氢气体诸如H₂（1/4）吸收于吸气剂诸如碱金属卤化物或碱金属卤化物碱金属氢氧化物基质中。可通过在真空中电子束激发吸气剂来观测旋转振动谱（图43）。电子束能量可在约1keV至100keV的范围内。峰之间的旋转能量间距可通过式（30）给出。由式（29）给出的振动能可由于结晶基质造成的较高有效质量而可偏移至较低

能量。在一个示例性的实验实例中,吸气剂的晶格中捕获的 $H_2(1/4)$ 的旋转振动发射在约 5×10^{-6} 托的压力范围内由具有10-20 μA 的电子束电流的入射6keV电子枪激发,并且通过无窗UV光谱记录。Mills等人的5W CIHT池堆叠件(R.Mills,X Yu,Y.Lu,G Chu,J.He,J.Lotoski,“Catalyst induced hydrino transition(CIHT)electrochemical cell,”(2012),Int.J.Energy Res.,(2013),DOI:10.1002/er.3142,其以引用的方式并入)中在充当吸气剂的UV透明基质KCl中的 $H_2(1/4)$ 的解析振转谱(所谓的260nm谱带)包括在258nm处具有最大值的峰,其中峰的代表性位置在222.7、233.9、245.4、258.0、272.2和287.6nm处,具有0.2491eV的相等间距。一般而言,能量与峰数关系的曲线图得到由 $y = -0.249eV + 5.8eV$ 给定的线, $R^2 = 0.999$ 或更好,其与 $H_2(1/4)$ 的跃迁 $v=1 \rightarrow v=0$ 和Q(0)、R(0)、R(1)、R(2)、P(1)、P(2)、P(3)和P(4)的预测值极为一致,其中Q(0)可鉴别为该系列的最强峰。

[1048] 通过冷却样品而使旋转振动激发谱带减少数目和抑制激发。在包含充当H和HOH分数氢催化剂的来源的水合水的KCl晶体中形成分子分数氢。通过无窗UV光谱(图44)观测晶格中捕获的 $H_2(1/4)$ 的熟悉的旋转振动发射(260nm谱带),其中通过具有25 μA 的电子束电流的入射6KeV电子枪激发丸粒样品。使该电子束丸粒样品从297K至155K至296K进行热循环,其中使用低温泵系统(Helix Corp.公司,CTI-Cryogenics SC型压缩机;TRI-Research T-2000D-IEEE型控制器;Helix Corp.公司,CTI-Cryogenics 22型cryodyne)进行样品冷却。在电子束电流维持恒定的情况下0.25eV间隔系列峰的强度在低温下可逆地降低。强度降低是由于260nm谱带发射中的变化,因为在超低温下高于310nm的光谱区域中的背景实际上增加。这些结果确认发射的来源是由于与 $H_2(1/4)$ 的旋转能近乎完美匹配的旋转振动。Mills[R.Mills,X Yu,Y.Lu,G Chu,J.He,J.Lotoski,“Catalyst induced hydrino transition(CIHT)electrochemical cell,”(2012),Int.J.Energy Res.,(2013),DOI:10.1002/er.3142]表明,使用精度为 $\pm 1 \text{ \AA}$ 的二阶高分辨率可见光谱,不存在符合归属于 $H_2(1/4)$ 的谱线的结构,从而进一步确认归属于 $H_2(1/4)$ 旋转振动。

[1049] 搜索分数氢光谱的另一成功交叉确认技术涉及使用拉曼光谱仪来记录 $H_2(1/4)$ 的旋转振动,作为匹配先前所观测到的紫外一阶光谱(260nm电子束谱带)的二阶荧光[R.Mills,X Yu,Y.Lu,G Chu,J.He,J.Lotoski,“Catalyst induced hydrino transition(CIHT)electrochemical cell,”(2012),Int.J.Energy Res.,(2013),DOI:10.1002/er.3142]。形成于不锈钢SunCell®中的 $H_2(1/4)$ 作为气体释放以供通过两种方法进行分析:(i)对通过添加水至SunCell®而形成的氧化物混合物进行900℃加热以维持分数氢等离子体反应,其中加热导致混合物的 $Ga_2O_3:H_2(1/4)$ 的分解;以及(ii)对溶解于NaOH中的氧化物混合物的滤液进行900℃加热。使用具有HeCd 325nm激光器的Horiba Jobin Yvon LabRAM Aramis拉曼光谱仪以具有40倍放大倍数的显微镜模式记录来自以下中的至少一者的热分解的气体的KCl吸气剂的拉曼光谱:氧化镓的NaOH溶解产物的滤液或包含范德华束缚的 $H_2(1/4)$ 气体的氧化镓。具体而言,将KCl装填于连接至容纳从SunCell®收集的 $Ga_2O_3:H_2(1/4)$ 的压力容器的管中,并使因将 $Ga_2O_3:H_2(1/4)$ 加热至900℃而产生的分解气体流穿KCl吸气剂。关于KCl起始材料的拉曼光谱是不显著的;然而,KCl吸气剂拉曼光谱包括在 8000cm^{-1} 至 $18,000\text{cm}^{-1}$ 区域中观察到的一系列 1000cm^{-1} (0.1234eV)相等能量间隔的拉曼峰。拉曼光谱转换为荧光或光致发光光谱表明了匹配,因为 $H_2(1/4)$ 的二阶振转谱对应于首先通过电子束激发观测到的260nm谱带[R.Mills,X Yu,Y.Lu,G Chu,J.He,J.Lotoski,“Catalyst

induced hydrino transition (CIHT) electrochemical cell,” (2012), Int. J. Energy Res., (2013), DOI:10.1002/er.3142]。Q(0) 归属于最强峰,表5中给出的归属于图45中所示光谱的Q、R和P分支的峰归属为分别在13,188、12,174、11,172、10,159、9097、8090、14,157、15,106、16,055、16,975和17,873 cm^{-1} 处观测到的Q(0)、R(0)、R(1)、R(2)、R(3)、R(4)、P(1)、P(2)、P(3)、P(4)和P(5)。表5中示出了具有峰归属的理论跃迁能相比于所观察到的拉曼光谱。

[1050] 表5. 理论跃迁能和跃迁归属与所观察到的拉曼峰的比较。

[1051]	归属	计算值(cm^{-1})	实验值(cm^{-1})	差值(%)
	P(5)	18,056	17,873	-1.0
	P(4)	17,082	16,975	-0.6
	P(3)	16,109	16,055	-0.3
	P(2)	15,135	15,106	-0.2
	P(1)	14,162	14,157	0
	Q(0)	13,188	13,188	0
	R(0)	12,214	12,174	-0.3
	R(1)	11,241	11,172	-0.6
	R(2)	10,267	10,159	-1.1
	R(3)	9,294	9,097	-2.1
	R(4)	8,320	8,090	-2.8

[1052] 使In箔暴露于点燃密封于铝DSC盘中的固体燃料而产生的气体,所述固体燃料包含100mg Cu+30mg去离子水。通过拉曼光谱和XPS鉴别了所预测的分数氢产物 $\text{H}_2(1/4)$ 。使用具有780nm二极管激光器的Thermo Scientific DXR SmartRaman,在铜金属箔上观测到具有40 cm^{-1} 的宽度的1982 cm^{-1} 处的吸收峰,其匹配 $\text{H}_2(1/4)$ 的自由空间旋转能(0.2414eV)(图46),其中通过XPS仅观测到存在O和In,并且这些元素的化合物不能产生所观测到的峰。此外,XPS谱确认存在分数氢。使用Scientia 300 XPS谱仪,在理海大学(Lehigh University)在In箔片样品上进行XPS。在498.5eV下观察到强峰(图48A-B),其不可归属于任何已知元素。该峰匹配理论上允许的分子分数 $\text{H}_2(1/4)$ 双电离的能量。还在聚合分数氢化合物上记录了 $\text{H}_2(1/4)$ 的496eV XPS峰,该聚合分数氢化合物由在存在包含水蒸气的氩气氛的情况下使Mo线发生线爆轰而形成,如图49A-B中所示。

[1053] 在包含1摩尔% H_2O 的80mg银喷丸点燃之前进一步在铜电极上确认了 $\text{H}_2(1/4)$ 旋转能跃迁,如图47A-B中所示。使用Thermo Scientific DXR SmartRaman光谱仪和780nm激光器所获得的拉曼光谱显示了通过点然而形成的1940 cm^{-1} 处的反向拉曼效应峰,其匹配 $\text{H}_2(1/4)$ 的自由转子能量(0.2414eV)。使用绝对光谱在22.8-647nm区域内在点燃的喷丸上测得了20MW的峰功率,其中光发射能量为所施加的能量的250倍[R.Mills,Y.Lu,R.Frazer,“Power Determination and Hydrino Product Characterization of Ultra-low Field Ignition of Hydrated Silver Shots”,Chinese Journal of Physics,第56卷,(2018),第1667-1717页,以引用的方式并入]。包含1摩尔% H_2O 的80mg银喷丸点燃后铜电极上的相应XPS谱示于图50A-B中,其中爆轰通过用点焊机施加12V35,000A电流来实现。496eV处的峰归属于 $\text{H}_2(1/4)$,其中诸如Na、Sn和Zn之类的其他可能性被排除,因为不存在这些候选物的

相应峰。

[1054] 图45中观测到的 $H_2(1/4)$ 振转谱的激发被认为是通过激光器的高能UV和EUV He和Cd发射引起的。总体而言,这些拉曼结果,诸如 $0.241\text{eV}(1940\text{cm}^{-1})$ 拉曼反向拉曼效应峰和匹配 260nm 电子束能谱的间距为 0.2414eV 的拉曼光致发光谱带的观察结果,是对分子分数氢的有力确认,其核间距离为 H_2 的 $1/4$ 。通过拉曼光谱进行的分子分数氢归属、中心位于 1982cm^{-1} 的反向拉曼效应吸收峰以及通过XPS在 498.5eV 处所观测到的分子分数氢 $H_2(1/4)$ 的双电离多重地确认了H的HOH催化的分数氢产物。

[1055] 此外,具有被吸收分数氢反应产物气体的吸气剂的正离子ToF-SIMS谱显示了具有二氢作为结构的一部分的基质化合物 $M:H_2(1/p)$ ($M=\text{KOH}$ 或 K_2CO_3)的多聚体簇。具体而言,先前的包含 KOH 和 K_2CO_3 的分数氢反应产物[R.Mills,X Yu,Y.Lu,G Chu,J.He,J.Lotoski,“Catalyst induced hydrino transition(CIHT)electrochemical cell,”(2012),Int.J.Energy Res.,(2013),DOI:10.1002/er.3142]或具有这些化合物作为分数氢反应产物气体的吸气剂的分数氢反应产物的正离子谱显示了与作为结构中的络合物的 $H_2(1/p)$ 一致的 $\text{K}^+(\text{H}_2:\text{KOH})_n$ 和 $\text{K}^+(\text{H}_2:\text{K}_2\text{CO}_3)_n$ 。

[1056] 在一个实施方式中,可通过氢与氧的反应而形成分子分数氢气体,其中通过该反应而维持H和HOH催化剂。可通过燃烧或通过催化复合(诸如通过复合催化剂,诸如 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 或本公开的另一者)而复合氢和氧。反应混合物可包括氢、氧、燃烧剂或复合剂和任选的惰性气体以增加原子H和HOH催化剂中的至少一者的寿命和浓度中的至少一者。在一个实施方式中,用以产生分数氢气体的反应器包括水性电解池和复合器并且可还包含惰性气体以支持产生氢和氧的化学计量比混合物,通过复合器和电解氢和氧经历复合而产生H和HOH,其中H和HOH形成分子分数氢。为在反应器气氛中富集分数氢气体,可闭合反应器并连续地操作所需的持续时间,其中可通过收集系统穿过带阀出口从反应器收集富集了分数氢气体的气体,并且任选地,通过气体纯化系统诸如色谱柱进一步富集分数氢气体。

[1057] 在一个示例性实施方式中,通过氧和氢的催化复合而产生氩中的分子分数氢。在稀有气体当中,由于在纯化期间的污染,氩独特地含有痕量分数氢气体。在空气的低温蒸馏期间氩和氧共同凝结,并且通过在复合催化剂诸如铂/ Al_2O_3 上与氢反应而移除氧,借此由于HOH催化剂与H的后续反应而在复合反应期间形成分数氢。氩气的电子束激发发射显示了H I、O I和 O_2 谱带的已知峰(图41)。未知峰匹配分子分数氢($H_2(1/4)$ P分支),其中光谱中不存在其他未归属峰。在另一个实施方式中,可通过低温蒸馏从气氛气体或另一源(诸如SunCell®)中富集分数氢气体诸如 $H_2(1/4)$ 。作为另一种选择,分数氢气体可为通过维持包含 H_2O (诸如稀有气体诸如氩中的 H_2O)的等离子体而原位形成的中的至少一者。等离子体可处于约 0.1 毫托至 1000 托的压力范围内。 H_2O 等离子体可包含另一气体,诸如稀有气体,诸如氩。在一个示例性实施方式中,通过等离子体源(诸如本公开的等离子体源,诸如电子束、辉光、RF或微波放电源)维持包含 1 托 H_2O 蒸气的大气压氩等离子体。

[1058] 在一个实施方式中,使包含分数氢的物质的组合物(诸如本公开中的组合物)热分解,并且对包含分数氢气体诸如 $H_2(1/4)$ 的分解气体进行气相色谱分析。在一个实施方式中,也可从分数氢化合物的热解获得 $H_2(1/4)$ 气体,所述分数氢化合物为诸如来自根据本公开的Zn或Sn线在包含水蒸气的气氛中爆轰的分数氢化合物。气体样品可能需要快速地上样至GC上,因为观测到压力由于极小的 $H_2(1/4)$ 气体从真空密封压力容器快速扩散而在高温

诸如约800℃下快速下降。由于尺寸更小和平均自由路径更大, $H_2(1/p)$ 可比 H_2 载气更导热,从而观测到负峰。已知不存在比氢更导热的气体;因此,与氢相比较更快且负的峰是特征性的并且可用于独特地鉴别分子分数氢,诸如 $H_2(1/4)$ 。

[1059] 与热导检测器(TCD)结合使用HP 5890系列II气相色谱仪,对通过热分解从SunCell®等离子体运行收集的束缚至经NaOH处理的 Ga_2O_3 的分数氢气体而释放的气体进行色谱分析,并且与鉴别已知气体的迁移时间的对照气体相比较。使用60℃下的TCD在303K(30℃)下的毛细柱(安捷伦分子筛5Å, (50m×0.32, df=30μm)上针对2.13ml/min的氦载气流,将压力控制器手动设定在10PSI。使用六通阀将气体样品从加压的气体样品容器直接注入至色谱柱上。由具有8英寸长度的充满的0.065英寸内径铜管提供具有1.74ml的受控注入体积的气体样品。

[1060] 图25中所示的用以产生分子分数氢气体的等离子体反应器包括6英寸直径不锈钢球体,其具有:DC电磁(EM)泵注射器,其具有在该球体的负z轴极点处充当阳极的不锈钢注入管和钨喷嘴;以及氮化硼基座,其具有在该球体的正z轴极点处充当阴极的中央钨杆。反应器容纳在操作期间是熔融的并且由EM泵注射器注入的3.5kg镓。用氩将SunCell®加压至800托,使 H_2 气体以100sccm流动,并且注入250ul H_2O 。池中的约10mg的氧化镓充当氧源,该氧源与 H_2 气体一起用于HOH催化剂,其中后者也充当分数氢反应物原子氢的源。镓的泵送速率为约 $30cm^3/s$ 并且用以维持约100kW过量功率的等离子体的等离子体DC点燃电压和电流分别为50V和1000A。

[1061] 在等离子体运行5分钟之后,从SunCell®收集3克的氧化镓,将该固体与过量的1M NaOH混合24小时,倾析出水溶液,并将不可溶固体放置于多孔薄壁陶瓷坩埚中。将该坩埚放置至65毫升不锈钢容器中,该容器使用铜垫圈和带不锈钢刀刃凸缘的板真空密封,该铜垫圈和带不锈钢刀刃凸缘的板具有两个焊入端口,一个入口/出口端口以及用于在测试期间和之后监测压力改变的端口。将该密封钢容器抽空、进行泄漏检查并加载至熔炼炉(ProCast™ 3kg 110伏特美国电熔炉2102°F)中并在25至40分钟的时间间隔内加热至950℃,其中压力从-30英寸Hg上升至介于15至25PSI之间。然后将该不锈钢容器连接至气相色谱仪的铜样品管和六通阀。最佳的是,铜样品管内的压力维持至少1000托。还使镓经受与经NaOH处理的 Ga_2O_3 相同的规程以充当对照气体。

[1062] 除了因将来自SunCell®的经NaOH处理的氧化物加热而产生的分数氢气体以及包含氧(20%)、氮(80%)和痕量 H_2O 的空气之外,还使用氦载气测试来自大西洋州特种气体公司(Atlantic State Specialty Gas)的以下对照气体:超高纯度氢(UHP)、甲烷(UHP)和氢(HUP)/甲烷(UHP)(90/10%)。在GC分析之后使用残余气体分析仪(Ametek Dycor残余气体分析仪,型号:Q100M)对分数氢气体进行质谱分析。在室温下静置至少24小时后通过气相色谱来重复分析该分数氢气体样品以确定是否有任何物质扩散出该真空密封容器。

[1063] 如由Snaveley和Subramaniam[K. Snaveley, B. Subramaniam, 'Thermal conductivity detector analysis of hydrogen using helium carrier gas and HayeSep®D columns', Journal of Chromatographic Science, 第36卷, ((1998), 第191-196页]所示,在HP5890(具有在小于130℃的温度下的TCD)上运行的氢峰对于所有峰强度均是正的。分子分数氢气体 $H_2(1/p)$ 诸如 $H_2(1/4)$ 具有的体积比普通 H_2 小 p^3 倍,使得弹道碰撞的

平均自由路径小 p^2 倍,从而产生比 H_2 高的热导率。由于分子分数氢气体相对于普通 H_2 的尺寸较小和热导率较高,预期 H_2 (1/4) 的色谱峰的保留时间缩短并且在低浓度下为正且在较高浓度下为负。因此,可具有正前缘和后缘且在其最大值处具有负强度(对应于氦载气中的分子分数氢谱带的最大浓度)的在 H_2 峰之前的峰只能是分数氢,这是因氦不在氦载气中产生峰并且没有已知气体具有比氢或氦短的保留时间和比氢或氦高的热导率。

[1064] 在图51A至图51E中示出了对照气相色谱图,该色谱图利用HP 5890系列II气相色谱仪使用安捷伦分子筛柱采用氦载气和设定处于60℃下的热导检测器(TCD)记录,使得任何 H_2 峰都是正的,其中1000托氢显示了在10分钟处的正峰,1000托甲烷显示了在17分钟处的小的正 H_2O 污染峰和在50.5分钟处的正甲烷峰,1000托氢(90%)和甲烷(10%)混合物显示了在10分钟处的正氢峰和在50.2分钟处的正甲烷峰,760托空气显示了在17.1分钟处的非常小的正 H_2O 峰、在17.6分钟处的正氧峰和在35.7分钟处的正氮峰,并且因将镓金属加热至950℃而产生的气体未显示出峰。在图52A至图52B中示出了通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的分数氢气体的气相色谱图,该 Ga_2O_3 收集自在SunCell®中运行的分数氢反应。在10分钟处观察到已知的正氢峰,并且在9分钟处观察到的新颖负峰归属于 H_2 (1/4),该新颖负峰分别在8.9分钟和9.3分钟处具有正的前缘和后缘。没有已知的气体具有比 H_2 或He快的迁移时间和比 H_2 或He高的热导率,这是分数氢的特征并且可用于鉴别分数氢,这是因其由于示例性的 H_2 (1/4) 具有小64倍的体积和小16倍的弹道横截面而具有大得多的平均自由路径。在记录图52A至图52B中所示的气相色谱图的时间后让包含氢和 H_2 (1/4) 的气体静置于容器中持续超过24小时。再次在10分钟处观察到氢峰,其中小 N_2 污染峰在37.4分钟处,但不存在具有比氢短的保留时间的新颖负峰,如图53中所示的,这与 H_2 (1/4) 的较小尺寸和相应的高扩散率一致,甚至与 H_2 相比也是如此。

[1065] 对于在SunCell®中的第二和第三分数氢反应运行,重复得到了以下气相色谱结果:早的负峰对应于比 H_2 或氦快的迁移时间和比 H_2 或氦高的热导率,并且归属于 H_2 (1/4)。图54A至图54B中示出了从NaOH处理的 Ga_2O_3 中析出的分数氢气体的气相色谱结果,该 Ga_2O_3 收集自SunCell®中的第二分数氢反应运行。在10分钟处观察到已知的正氢峰,在42.4分钟处观察到正未知峰,在51.8分钟处观察到正的甲烷峰,并且在8.76分钟处观察到归属于 H_2 (1/4) 的新颖负峰,该新颖负峰分别在8.66分钟和9.3分钟处具有正的前缘和后缘。图55A至图55B中示出了从NaOH处理的 Ga_2O_3 析出的分数氢气体的气相色谱结果,该 Ga_2O_3 收集自SunCell®中的第三分数氢反应运行。在10分钟处观察到已知的正氢峰,在51.9分钟处观察到正的甲烷峰,并且在8.8分钟处观察到归属于 H_2 (1/4) 的新颖负峰,该新颖负峰分别在8.7分钟和9.3分钟处具有正的前缘和后缘。

[1066] 通过NaOH处理 Ga_2O_3 并加热至950℃而析出的气体的质谱(图56)确认了氢和甲烷的存在,该 Ga_2O_3 收集自SunCell®中的分数氢反应运行,该质谱是在记录图55A至图55B中所示的气相色谱图之后记录的。甲烷形成是特别的并且归因于引起氢与痕量 CO_2 或来自不锈钢反应器的碳反应的高能分数氢等离子体。在记录图55A至图55B中所示的气相色谱图的时间后让包含氢和 H_2 (1/4) 的气体静置于容器中持续超过24小时。再次观察到10分钟处的氢峰和53.7分钟处的甲烷峰,但如图57中所示不存在具有比氢短的保留时间的新颖负峰,此与甚至与 H_2 相比 H_2 (1/4) 的较小大小和相应的高扩散率一致。

[1067] 图58中示出了从NaOH处理的 Ga_2O_3 析出的分数氢气体的气相色谱结果,该 Ga_2O_3 收

集自 SunCell® 中的第四分数氢反应运行。在10分钟处观察到的已知正氢峰的前面是7.4分钟处的新颖正峰。将快的峰归属于 $H_2(1/4)$ ，这是因没有已知气体具有比 H_2 或He快的迁移时间。 $H_2(1/4)$ 峰的正性质可指示对于该样品，分数氢气体在氢载气中的浓度较低。该快的峰以及该快的峰在高浓度下是负峰排除其属于除分数氢以外的任何其他气体。

[1068] 在一个实施方式中，可在低压力（诸如由动态真空维持的10托以下）下将水注入至反应池腔室中以产生功率并且在表面上形成氧化镓，其可经收集以充当分数氢气体源。在一个示例性实施方式中，在操作 SunCell® 之后从熔融镓表面撇取氧化镓，该 SunCell® 包括 (i) 15.24cm 直径304不锈钢反应池腔室以及在底部上的具有6cm内径和6.35cm高度的容纳约3.5kg熔融镓的储罐，(ii) 熔融镓注射器，其在底部上包括具有W喷嘴的DC EM泵；以及 (iii) 在顶部上的BN绝缘基座对电极，其包括连接至能够真空的馈通件（安装于在顶部端处的凸缘上）的1.27cm直径W汇流条，和在底部端处中心深约2.54cm且直径为3.8cm的凹形抛物线腔。为防止反应腔室的熔融，在1000A和25至30V DC下以200g/s EM泵送速率运行 SunCell 三次，间隔为30s，从而允许运行之间的冷却。利用通往水储罐的针型阀和具有用以控制流量的控制器的螺线管，在维持10托以下的压力的动态真空下以约4ml/min将水注入至反应池腔室中。池输出为约120kW，而输入为约28kW。将约15g的氧化镓溶解于约500ml的1M NaOH水溶液中并让其在室温下保持72小时。通过撇取而移除悬浮于溶液中的不可溶材料。将固体置于密封的65cm³ SS容器中并加热至600℃以释放6.8个大气压的气体。使用六通阀将2个大气压的该气体注入至气相色谱仪上。该谱等价于图52A中所示的谱，其中在9分钟保留时间处观察到归属于 $H_2(1/4)$ 的早期负峰。在氢峰之前还观察到作为正峰的早期峰，其中载气是氩并且TCD处于85℃。

[1069] 在另一实验实施方式中，通过使3000sccm H_2 和30sccm O_2 流过维持在90℃以上的1g的Pt/ Al_2O_3 复合器催化剂并进入反应池腔室，从而提供HOH催化剂和原子H源。输入功率为约25kW而输出功率为约100kW。将在操作 SunCell® 之后从熔融镓表面撇取的 Ga_2O_3 溶解于1M NaOH中，通过离心析出液体来收集不可溶固体，并将所得的样品在抽空的65cm³ SS容器中加热以将分数氢气体释放至气相色谱柱上，其中在约9分钟保留时间处观察到归属于 $H_2(1/4)$ 的早期负峰。在一个实施方式中，在超低温下的Hayesep柱可用于将 $H_2(1/4)$ 气体与 H_2 气体分开。可通过如下方式来观察分数氢的振转光谱：在包含约1大气压的氩的腔室中进行电子束激发发射以形成氩受激子(excimer)以激发振转谱带，诸如图41中所示的。

[1070] 通过使1200sccm的 H_2 和20sccm的 O_2 流过维持在90℃以上的1g的Pt/ Al_2O_3 复合器催化剂并进入反应池腔室而操作 SunCell® (图25)。在1至5托的压力下操作该池同时使气体从排放端口流出，使该气体鼓泡穿过与由外部液氮杜瓦冷却的真空管线串联的容器中的液态氩的薄层，并使用真空泵抽空该气体。分子分数氢在液态氩中具有比 H_2 高的溶解度，这提供了 $H_2(1/4)$ 气体富集的手段。图59示出了分子分数氢气体的气相色谱图，该分子分数氢气体从 SunCell® 流出，被吸收至作为溶剂的液态氩中，然后通过让液态氩在升温至27℃后蒸发而释放。采用85℃下的热导检测器和在19PSI下的氩载气使用第二HP 5890系列II气相色谱仪在安捷伦柱（安捷伦分子筛5Å，(50m×0.32, df=30μm)，在303K(30℃)下）上在8.05分钟处观察到分数氢峰，相比之下稍后在12.58分钟处观察到的氢。

[1071] 通过氢与氧在负载型贵金属催化剂上在氩气氛中的复合而形成的氩/ $H_2(1/4)$ 混

合物的 $H_2(1/4)$ 气体是通过使该混合物流过在液态氩中冷却至超低温度的35m长2.5mm内径的HayeSep®D色谱柱而富集。使氩部分地液化以允许流动的分子分数氢气体富集,如由如图42中所示的电子束激发发射光谱所观察到的 $H_2(1/4)$ 的旋转振动P分支的显著增加所指示。来自色谱柱的分子分数氢气体也在其流入通过低温泵系统(Helix Corp.公司,CTI-Cryogenics SC型压缩机;TRI-Research T-2000D-IEEE型控制器;Helix Corp.公司,CTI-Cryogenics 22型cryodyne)冷却至55K的带阀的微腔室中时与痕量空气一起液化。使液化气体升温至室温以实现1000托腔室压力并用氩载气将液化气体注入至安捷伦柱上。分别在19和35分钟处观察到氧和氮。在6.9分钟处观察到 $H_2(1/4)$ (图60)。

[1072] 本文中形式为(#.#)的分数氢负离子计算方程式和所引用的章节对应于MILLS GUT的那些。对于普通氢负离子 H^- ,在离子化或结合能的较短波长处观察到连续谱,称为束缚-自由连续谱。对于光球中的典型条件,Stix[M.Stix,The Sun,Springer-Verlag, Berlin, (1991),第136页]的图4.5示出了太阳的连续吸收系数 $\kappa_c(\lambda)$ 。在可见光谱和红外线光谱中,氢负离子 H^- 是主导吸收体。其自由-自由连续谱在 $\lambda=1.645\mu m$ 处开始,此对应于 H^- 的离子化能量0.745eV,其中吸收朝向远红外强烈增加。关于太阳记录的普通氢化物光谱可代表极热等离子体中的氢化物光谱。

[1073] 氢原子与第二电子反应而形成在单个壳层中包含两个成对电子的普通氢负离子会释放连续辐射达到较长波长,其具有氢负离子的第二电子的结合能的截止,如由Stix[M.Stix,The Sun,Springer-Verlag, Berlin, (1991),第136页]所示出的。然而,分数氢负离子和结合第二电子的分数氢原子的相应发射是独特的。分数氢负离子包含未成对电子,该未成对电子导致基于磁通量子或磁体通量子 $\frac{h}{2e}$ 的通量增量的链而以额外量子化

单位的能量释放第二电子的结合能的发射。具体而言,分数氢 $H^-(1/p)$ 包含(i)两个电子,其束缚于最小能量、等电势、球形、二维电流膜中,其中 $H^-(1/p)$ 的电子在相同壳层中在相同位置 r 处是未成对的;以及(ii)光子,其使中心场增加以球体的原点为中心的核处的基本电荷的整数。分数氢状态光子电场与每电子的相互作用会产生非辐射径向单极,使得该状态是稳定的。将两个电子组合进单个原子轨道(AO)同时维持无辐射整数光子中心场会引起在分数氢负离子中的双重AO态而非如在普通氢负离子的情形中的单重态的特殊情形。单重态是非磁性的;然而,双重态具有一波尔磁子 μ_B 的净磁矩。

[1074] 具体而言,原子轨道的电流的基元是如在“原子轨道-CVFS的产生(Generation of the Atomic Orbital-CVFS)”章节中所示的大圆。如“原子轨道(Atomic Orbital)”章节内的“电场的方程式(Equation of the Electric Field)”中所示,(i)光子携带电场并且包括闭合场力线回路,(ii)分数氢原子包含捕获的光子,其中光子场力线回路各自沿着配对大圆电流回路基元在相同向量方向上行进,(iii)每一场力线的方向随着狭义相对论所要求的相对运动而在垂直于传播方向的方向上增加,并且(iv)由于每一点沿着捕获的光子的场力线回路的线性速度是光速 c ,因此相对于实验室参考系的电场方向纯粹垂直于其配对电流回路并且其仅在 $\delta(r-r_n)$ 处存在。 H^- 原子轨道的成对电子包括不具有净磁矩的单重态。然而,分数氢负离子的光子场力线可仅在一个方向上传播以避免对消并且产生中心场以提供离心力与中心力之间的力平衡(式(7.72))。此特殊情形产生分数氢负离子中的双重态。

[1075] 可将分数氢氢化物A0视为包括每电子的电流密度函数的大圆的线性组合,如“轨道球-CVFS的产生(Generation of the Orbitsphere-CVFS)”章节中所给出的。为满足光子在方向上与电子电流匹配并且电子角动量为 $\hbar$ 的边界条件,电子1的一半和电子2的一半可自旋向上并与光子匹配,而电子1的另一半可自旋自旋向上并且电子2的另一半可自旋向下,使得电流的一半是成对的并且电流的一半是不成对的。假定每电子的不可分割性和A0包含两个完全相同电子的条件,将光子的力转移至包含两个完全相同电子的电子A0的总体以满足式(7.72)。未成对电流密度的所得角动量和磁矩分别为 $\hbar$ 和波尔磁子 μ_B 。如“电子g因子(Electron g Factor)”章节中所给出的,由未成对电子以量子化单位的磁通量子或磁通量子 $\frac{h}{2e}$ 来连接通量。

[1076] 通过氢或分数氢原子与具有动能分布的自由电子反应而形成的氢负离子由于电子动能和氢负离子结合能的释放而使束缚-自由发射谱带的波长比离子化或结合能短。如通过式(7.74)与式(7.71)相比较而显示的,用于形成分数氢氢负离子的能量大得多,并且在具有足够光谱分辨率的情况下,由于在形成分数氢氢负离子期间自由电子与束缚电子的相互作用,也许有可能解析相应的束缚-自由谱带中的独特超精细结构。在“分数氢氢负离子超精细谱线(Hydrino Hydride Ion Hyperfine Lines)”章节中给出了独特双重态的超精细谱线的推导。

[1077] 两个0的离子化、两个H的离子化、 Rb^+ 的离子化和两个 K^+ 离子之间的电子转移(式(5.6-5.9))提供了净焓为原子氢的势能27.2eV的整数倍数的反应。对应的I族硝酸盐子通过经历分解或还原成为在等离子体中电离的相应金属而提供直接作为挥发的离子或作为原子的这些反应物。鉴别为提供27.2eV的焓的反应物中的每一者的存在形成低的施加温度,原子氢中的极低电压等离子体称作具有强真空紫外(VUV)发射的共振转移或rt-等离子体。 Rb^+ 和两个 K^+ 的催化剂产物H(1/2)被预测为是高度反应性的中间体,其进一步反应而形成分数氢氢负离子 $H^-(1/2)$ 。

[1078] $H^-(1/2)$ 离子是通过H(1/2)原子与具有动能分布的自由电子反应而形成的。电子动能和分数氢氢负离子结合能的释放使束缚-自由发射谱带的波长比相应氢负离子的电离或结合能短。由于通量通过H(1/2)以整数单位的磁通量子来连接的要求,能量被量子化,并且归因于 $H^-(1/2)$ 形成的发射包括在对应束缚-自由谱带中的一系列超精细谱线。依据电子g因子并且使用所观察到的结合能峰值 E_B^* ,归因于自由电子与束缚电子的相互作用的束缚-自由超精细结构谱线具有由磁通量子能 E_Φ 、自旋-自旋能 E_{ss} 和所观察到的结合能峰值 E_B^* 的总和给出的预测能量 E_{HF} :

$$\begin{aligned}
 E_{HF} &= E_\Phi + E_{ss} + E_B^* \\
 &= j^2 2(g-2) \frac{\mu_B}{\sqrt{s(s+1)}} \frac{\mu_0}{r^3} \left(\frac{e\hbar}{2m_e} \right) + g \frac{\mu_0}{r^3} \left(\frac{e\hbar}{2m_e} \right)^2 + E_B^* \\
 [1079] \quad &= (j^2 3.00213 \times 10^{-5} + 0.011223 + 3.0451) \text{ eV} \\
 &= (j^2 3.00213 \times 10^{-5} + 3.0563) \text{ eV}
 \end{aligned} \tag{7.97}$$

[1080] 其中 $j = \text{整数}$ 。此与 $E_{\text{HF}} = (j^2 3.00213 \times 10^{-5} + 3.0583) \text{ eV}$ 进行比较, 其中无扰动 E_{B} 由式 (7.73) 和 (7.74) 给出。预测的光谱是反转的里德伯型系列, 其在增加的波长下收敛并且在 3.0563 eV (关于精细结构的氢化物结合能加上自旋成对能) 处终止。图61中所示的在 $4000 \text{ \AA}$ 至 $4060 \text{ \AA}$ 的区域中的高分辨率可见等离子体发射光谱在 10^5 分之一的程度上匹配所预测的发射谱线。

[1081] 具体而言, $\text{H}^- (1/2)$ 的预测的 3.0471 eV 结合能作为在 3.047 eV ($\lambda_{\text{空气}} = 4068 \text{ \AA}$) 处的连续阈值被观察到。通过将 3.0451 eV 的相应能量代入式 (7.97) 中的 E_{B} , 将 $4070.6 \text{ \AA}$ (空气波长) 下的实验 $\text{H}^- (1/2)$ 峰值 E_{B}^* 用于计算束缚-自由超精细谱线的峰位置以给出 $\text{H}^- (1/2)$ 的束缚-自由超精细结构线。在 $3995 \text{ \AA}$ 至 $4060 \text{ \AA}$ 的区域中的高分辨率可见等离子体发射谱线 (包括从 3.0563 eV 至 3.1012 eV 的反转里德伯型系列) 匹配由式 (7.97) 针对 $j=1$ 至 $j=39$ 给出的预测的超精细分裂发射能 E_{HF} , 其中 $3996.3 \text{ \AA}$ 处的系列缘高达 10^5 分之一 [R.L.Mills, P.Ray, "A Comprehensive Study of Spectra of the Bound-Free Hyperfine Levels of Novel Hydride Ion $\text{H}^- (1/2)$, Hydrogen, Nitrogen, and Air", Int.J.Hydrogen Energy, 第28卷, 第8期, (2003), 第825-871页; R.Mills, W.Good, P.Jansson, J.He, "Stationary Inverted Lyman Populations and Free-Free and Bound-Free Emission of Lower-Energy State Hydride Ion formed by and Exothermic Catalytic Reaction of Atomic Hydrogen and Certain Group I Catalysts," Cent.Eur.J.Phys., 第8卷, (2010), 7-16, doi:10.2478/s11534-009-0052-6; R.L.Mills, P.Ray, "Stationary Inverted Lyman Population and a Very Stable Novel Hydride Formed by a Catalytic Reaction of Atomic Hydrogen and Certain Catalysts," J.Opt.Mat., 27, (2004), 181-186, 以及 R.L.Mills, P.C.Ray, R.M.Mayo, M.Nansteel, W.Good, P.Jansson, B.Dhandapani, J.He, "Hydrogen Plasmas Generated Using Certain Group I Catalysts Show Stationary Inverted Lyman Populations and Free-Free and Bound-Free Emission of Lower-Energy State Hydride," Res.J.Chem Env., 第12卷 (2), (2008), 42-72, 将这些文献以引用的方式并入本文]。平坦的强度曲线匹配约瑟夫森结 (诸如也以磁通量量子 $\frac{h}{2e}$ 为量子化单位来连接磁通量的超导量子干涉装置 (SQUID) 的约瑟夫森结) 的强度曲线。

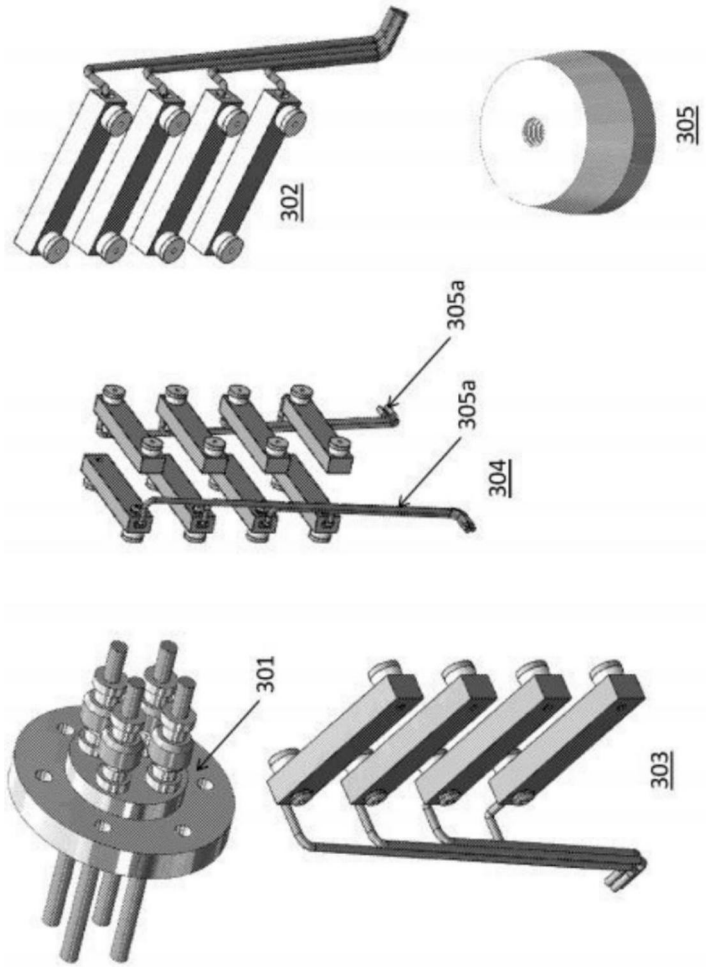


图1

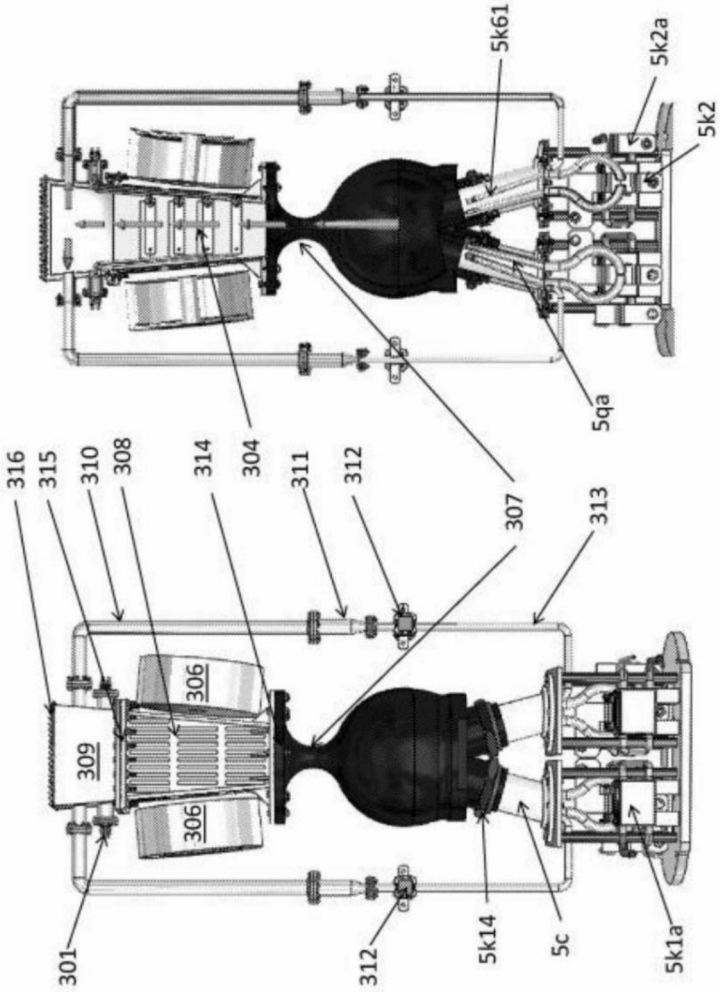


图2

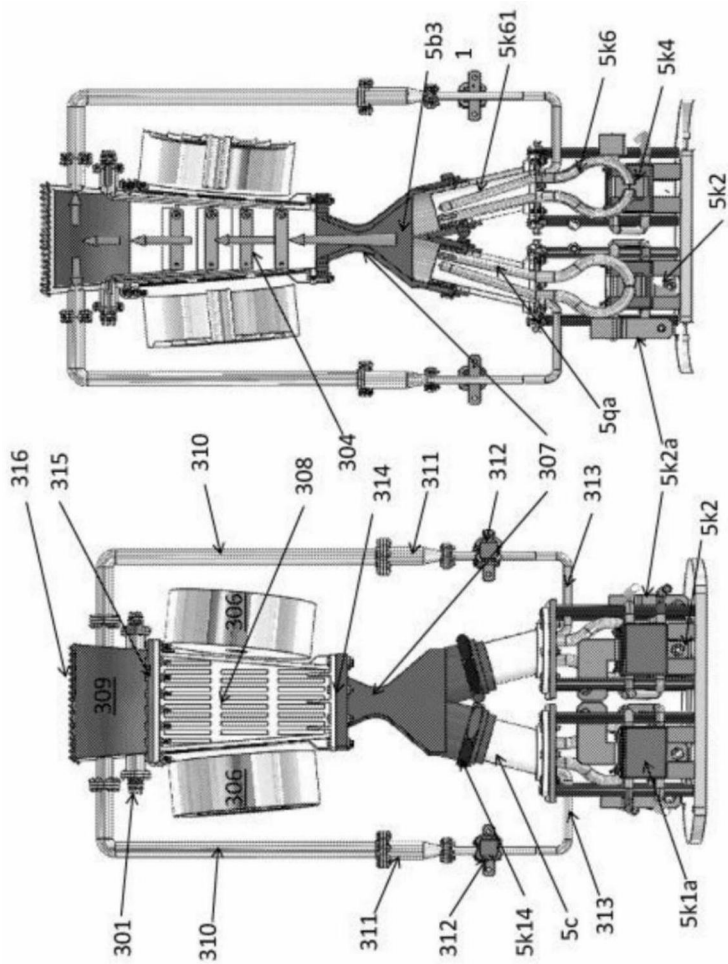


图3

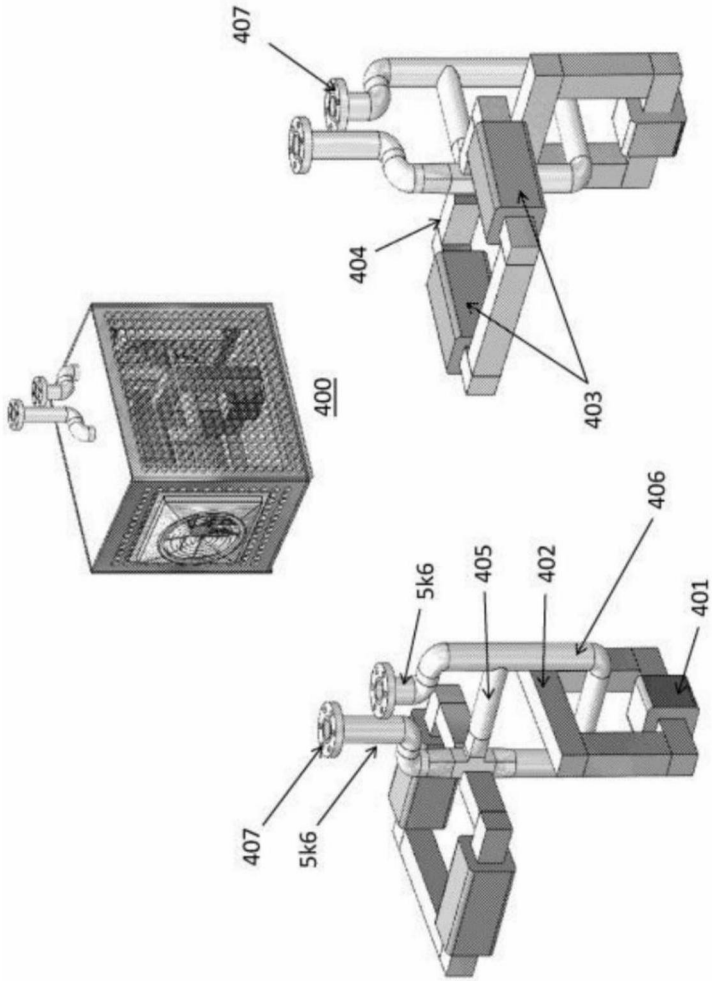


图4

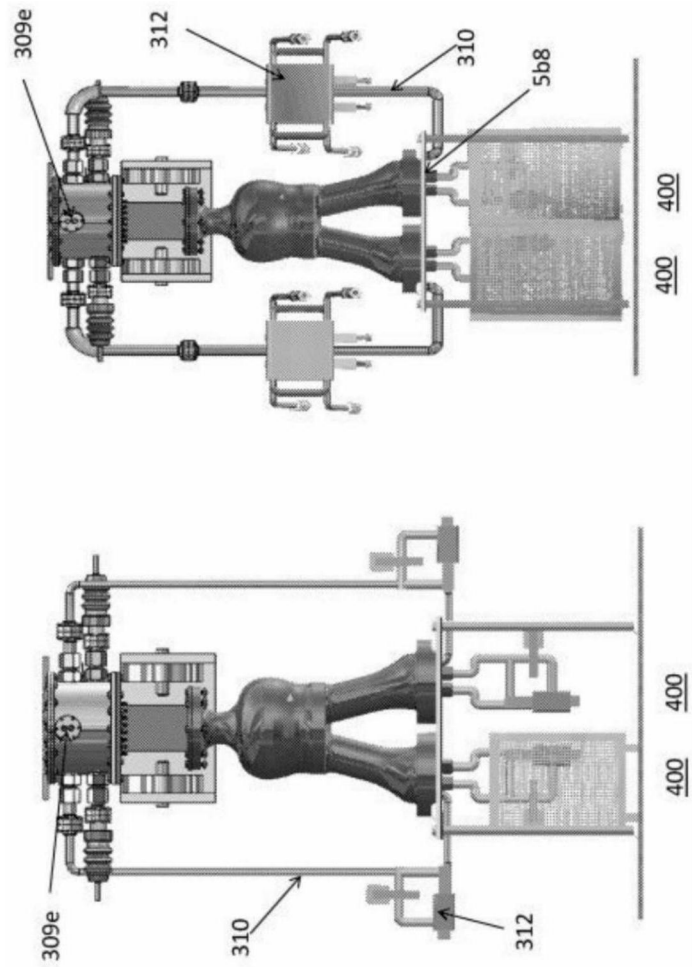


图5

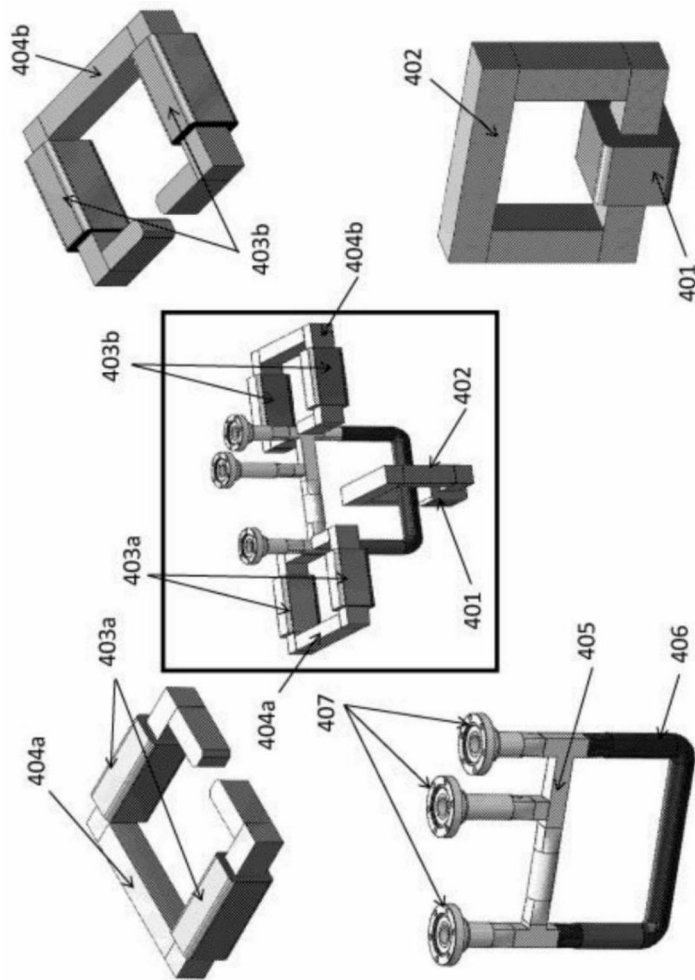


图6

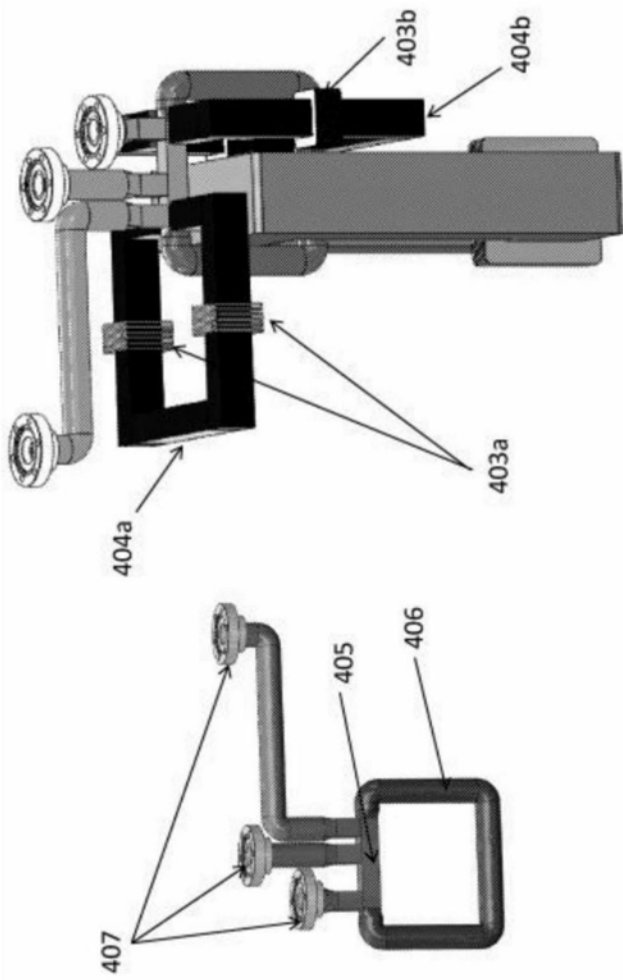


图7

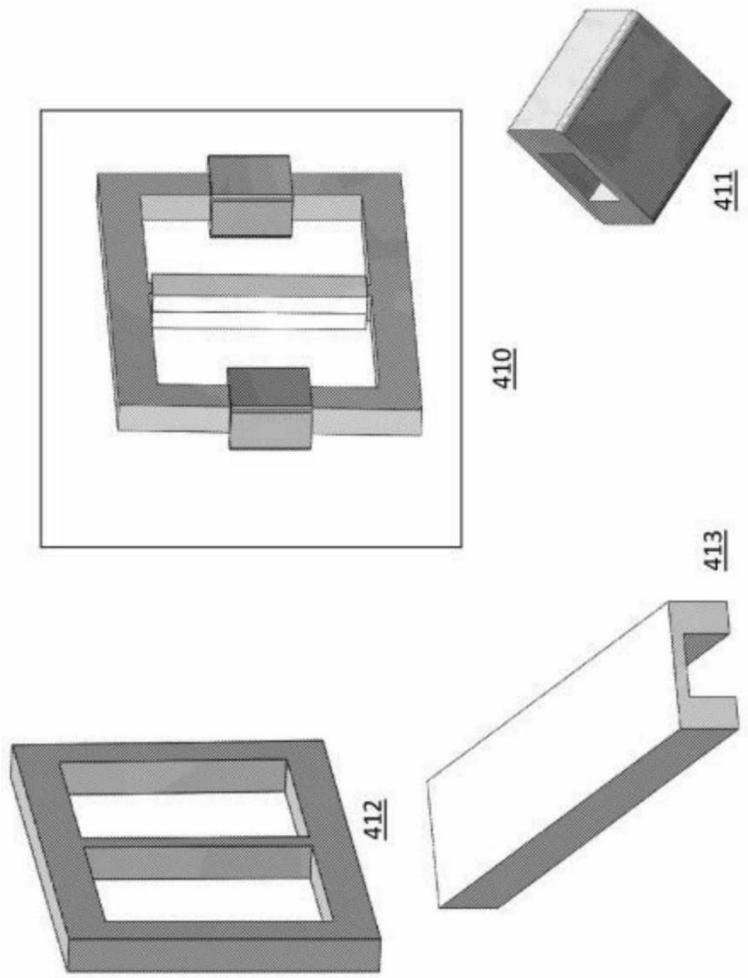


图8

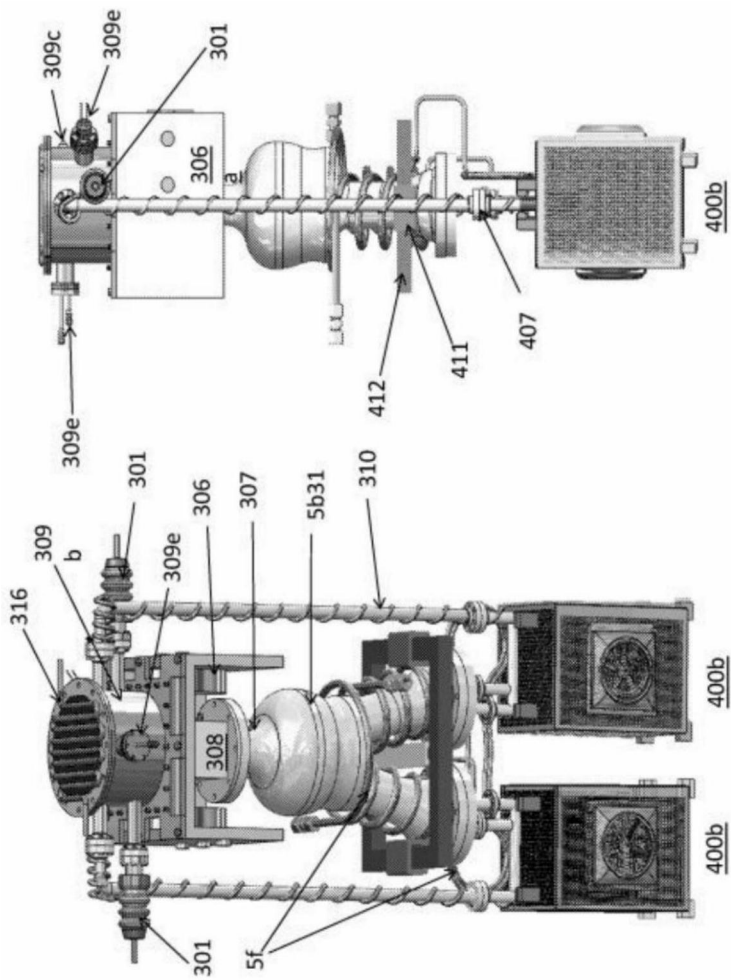


图9

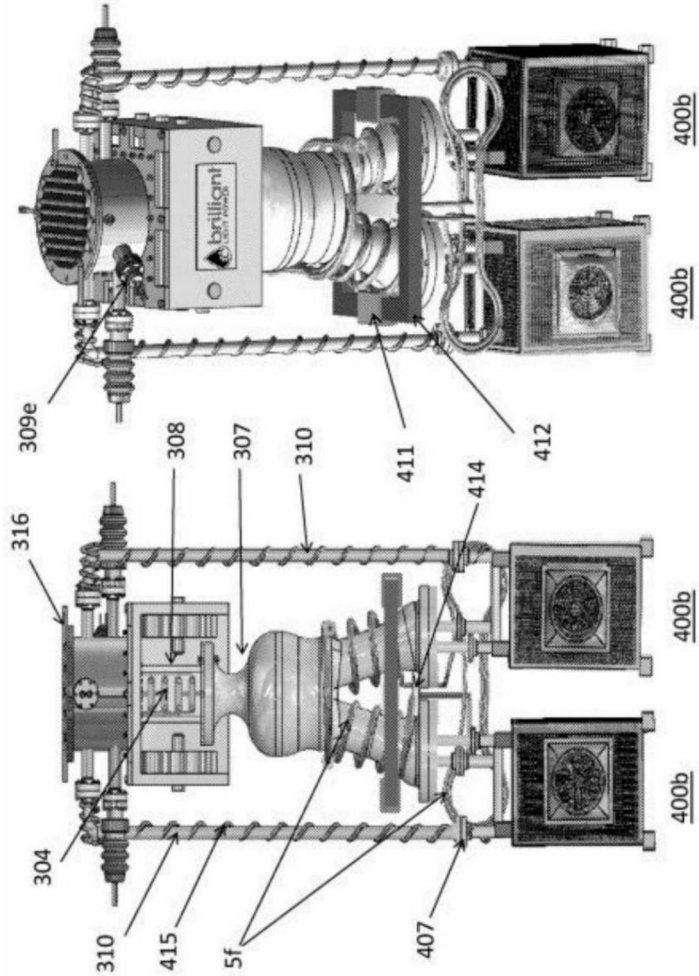


图10

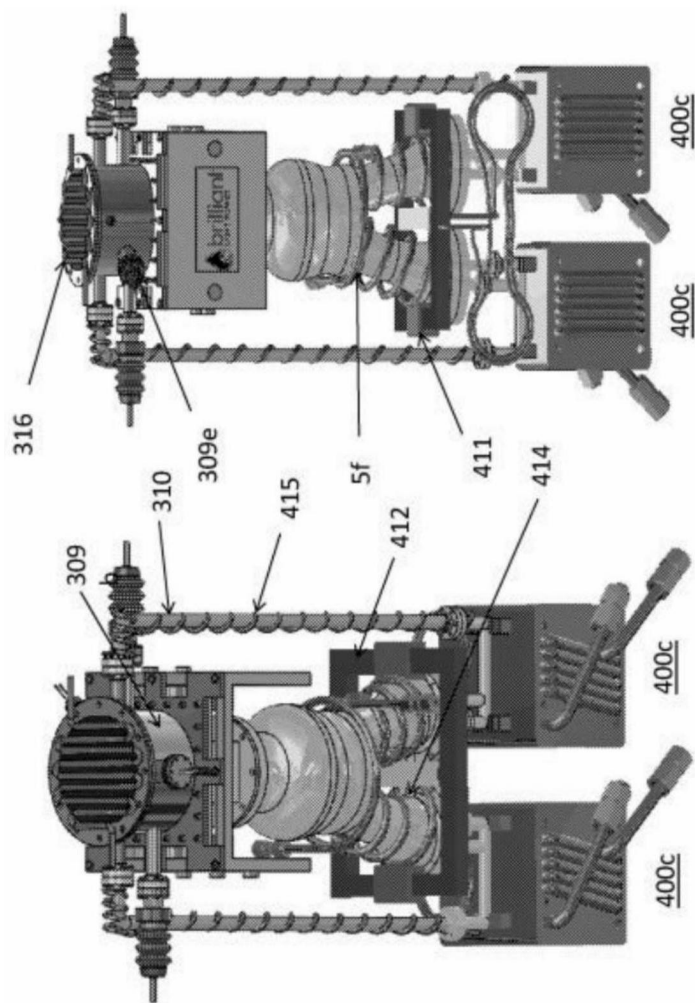


图11

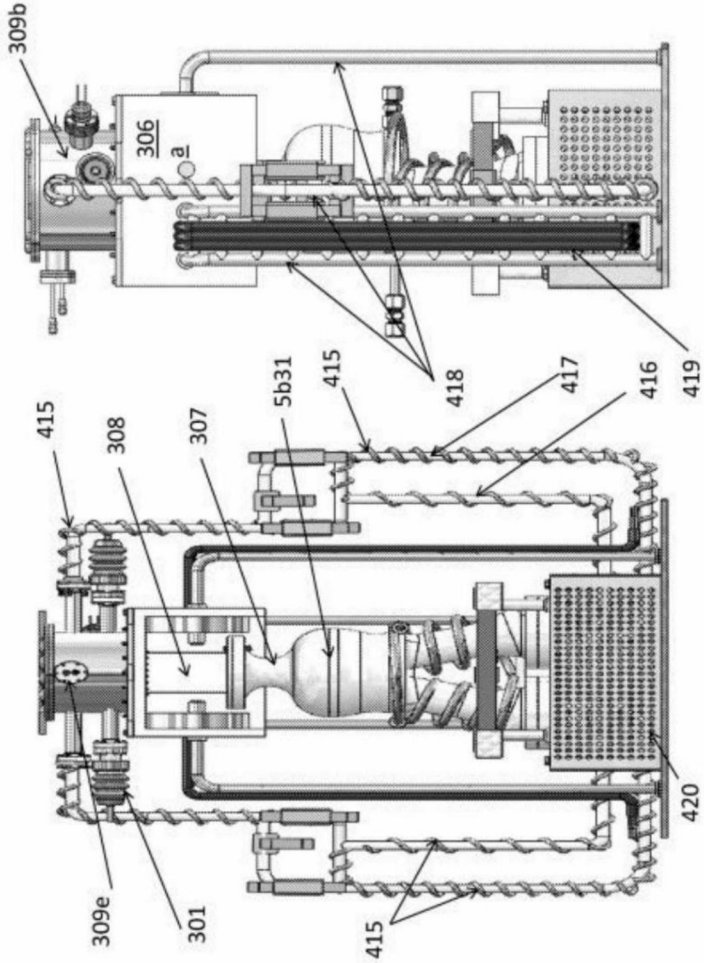


图12

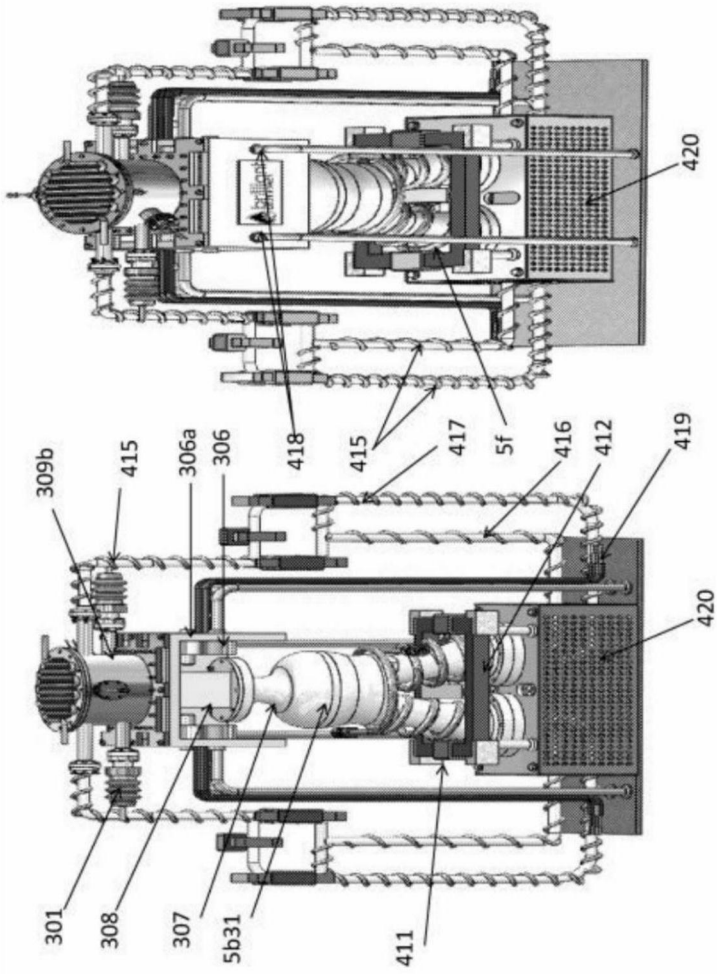


图13

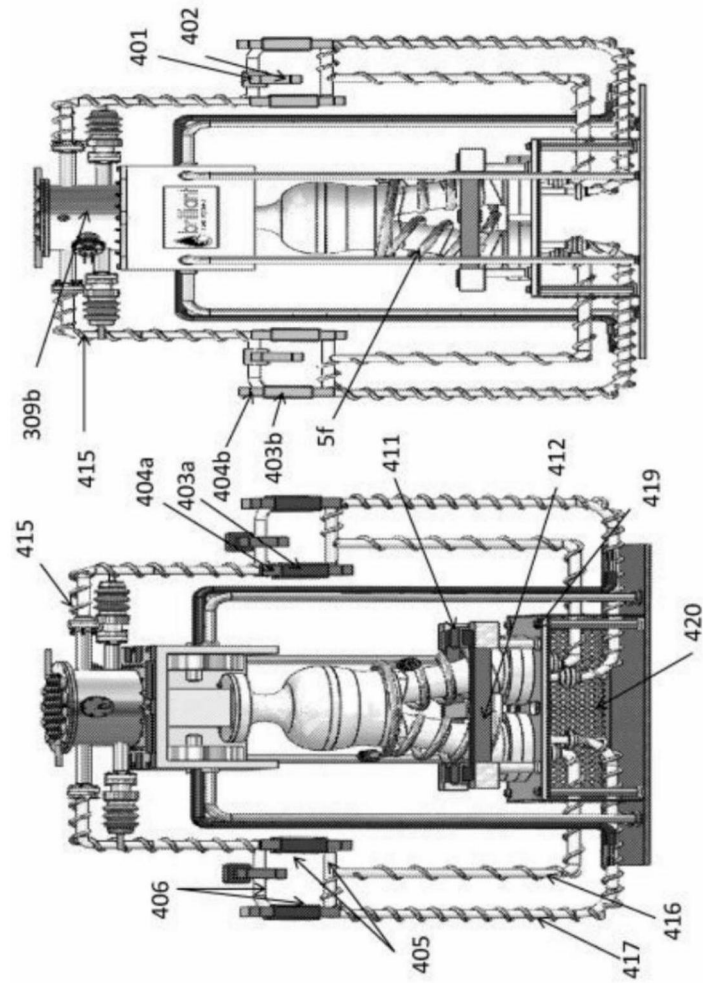


图14

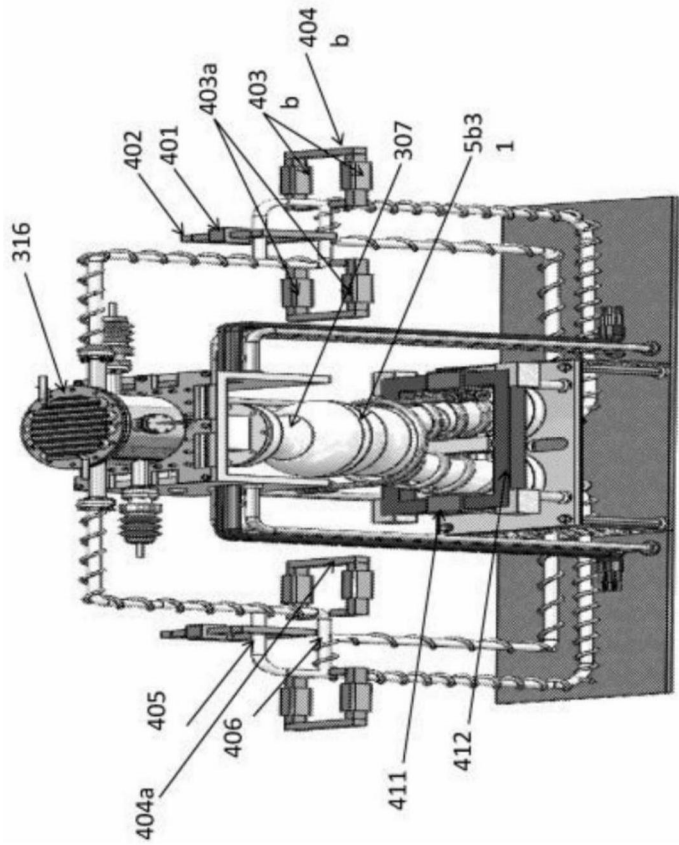


图15

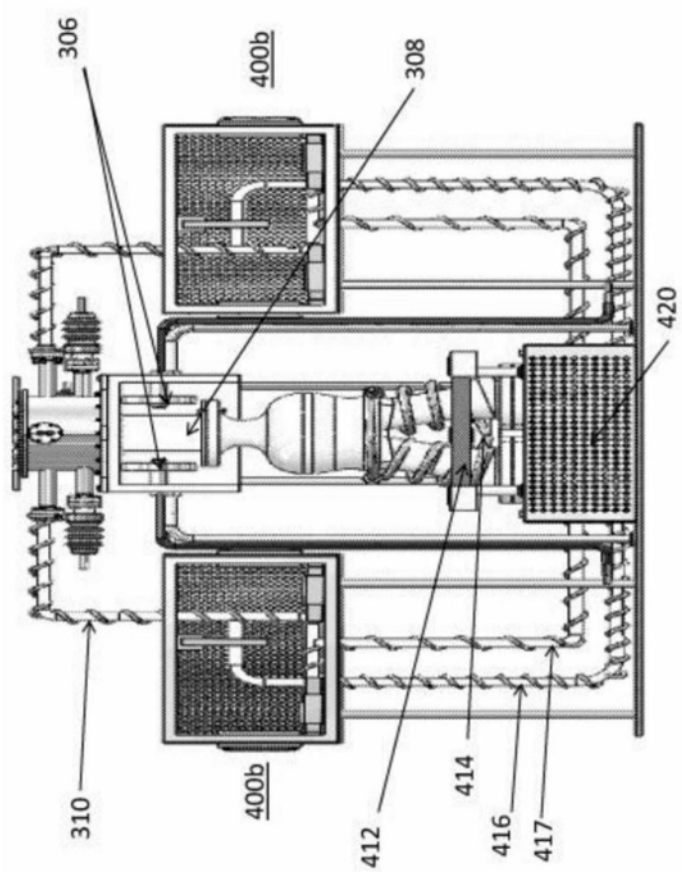


图16

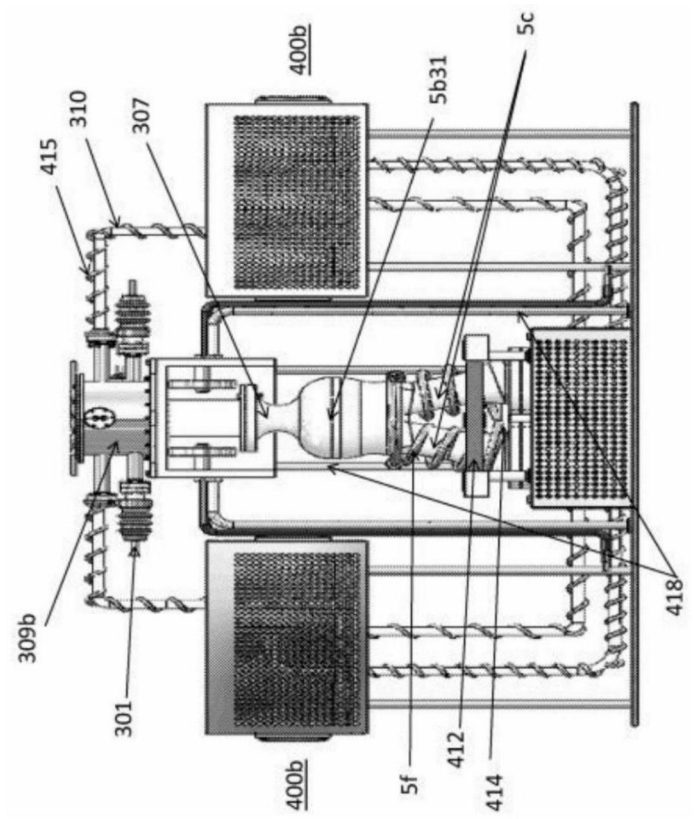


图17

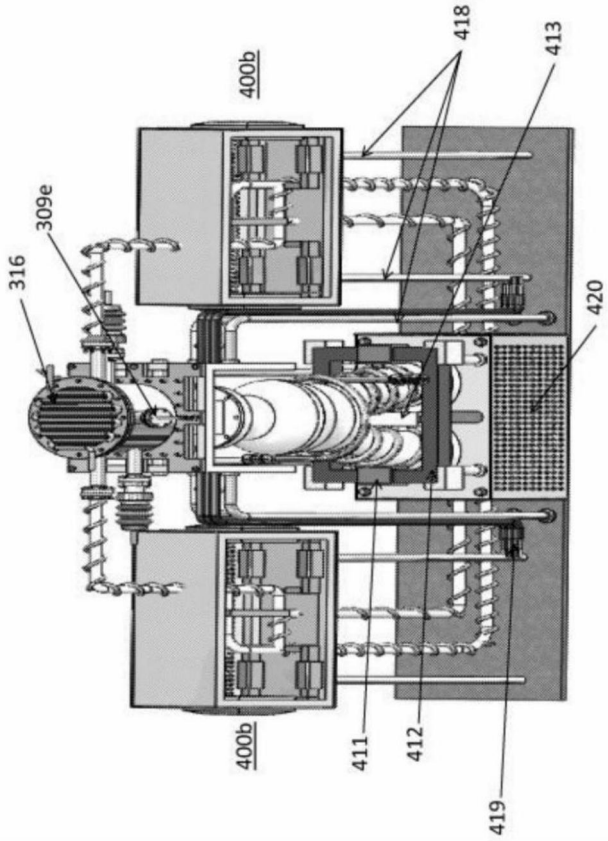


图18

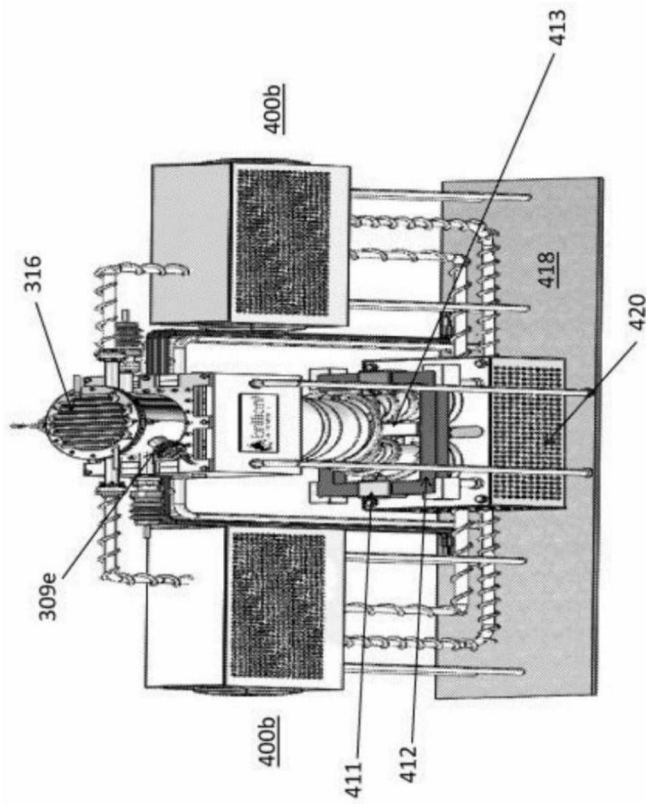


图19

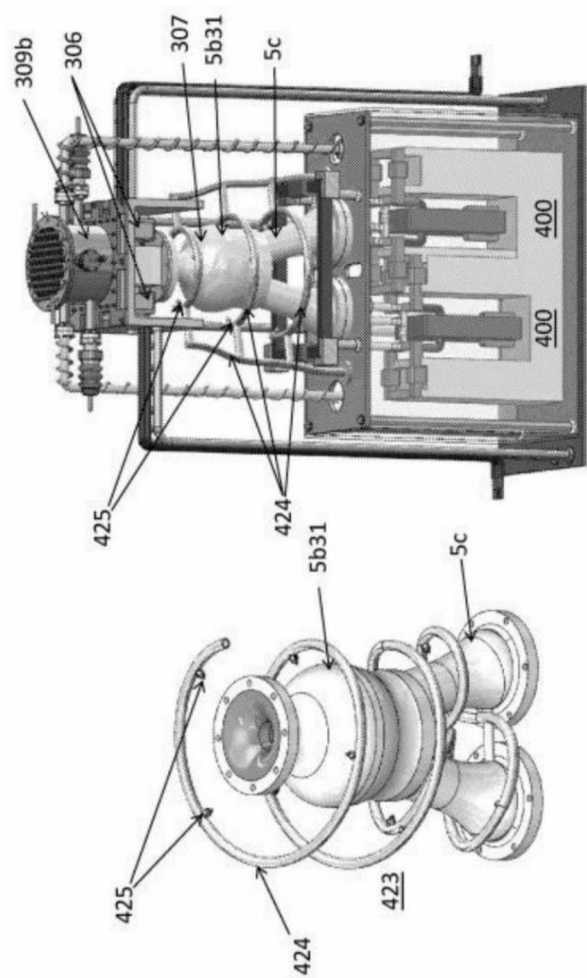


图20

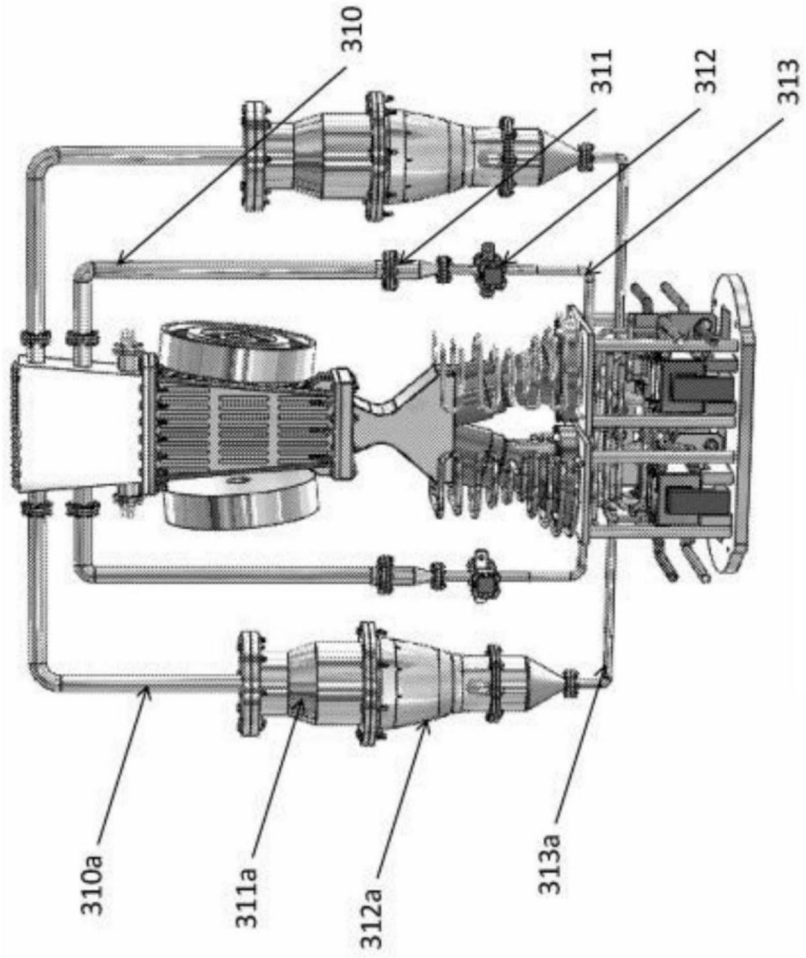


图22

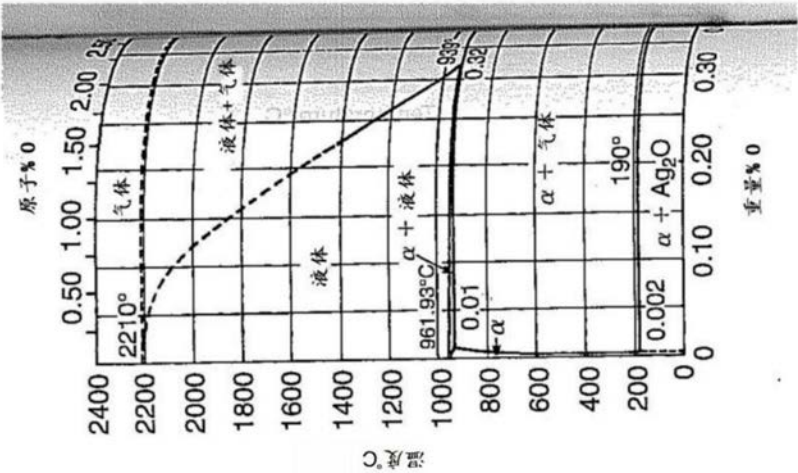


图23

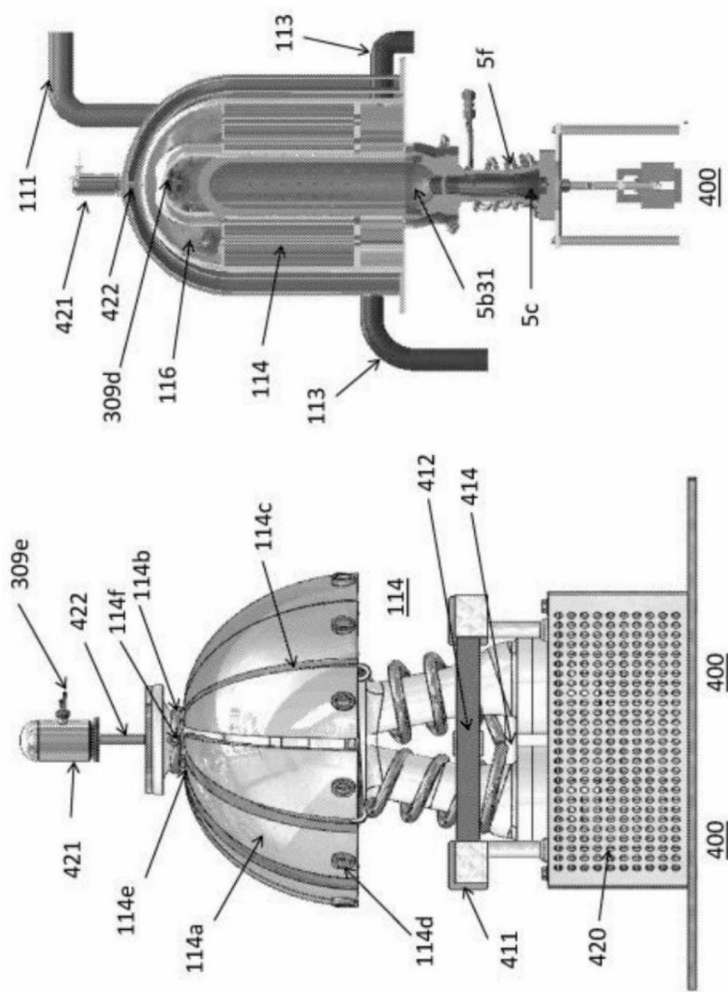


图24

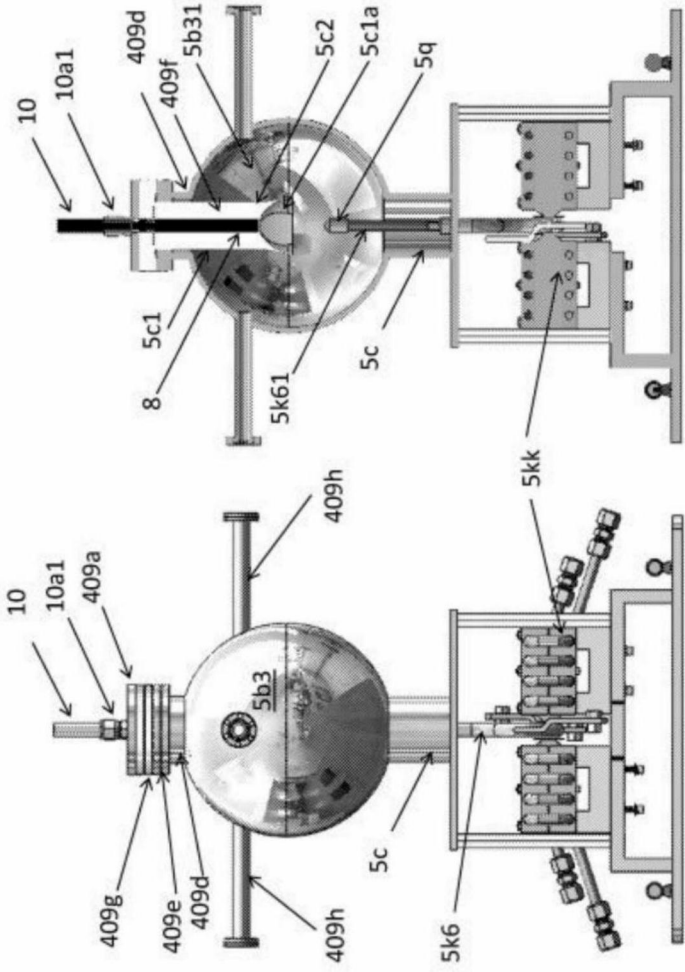


图25

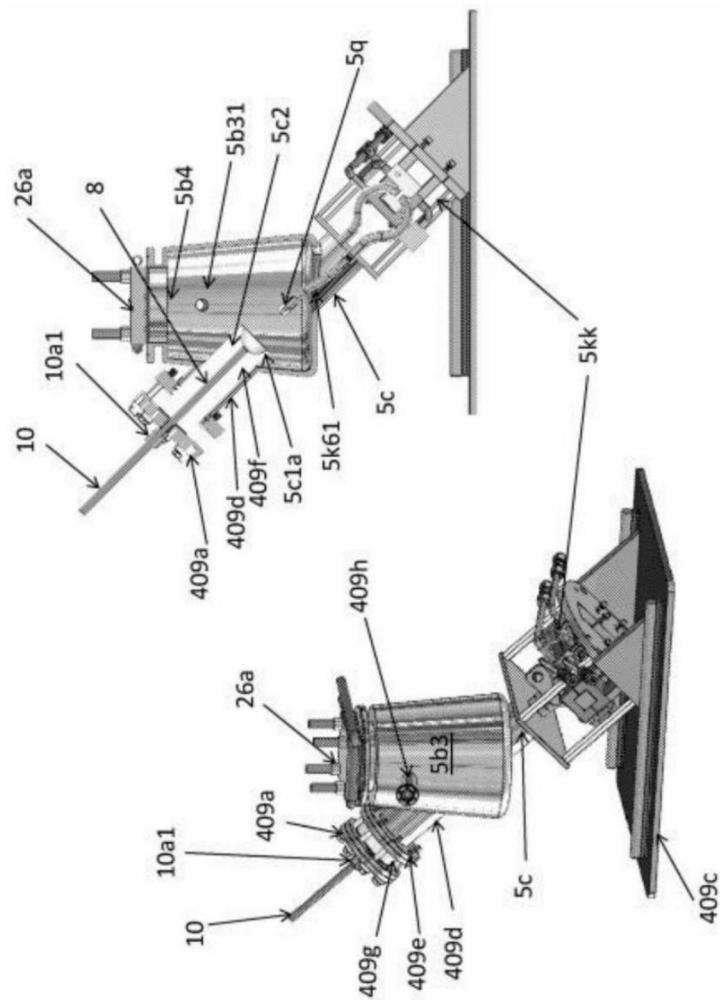


图26

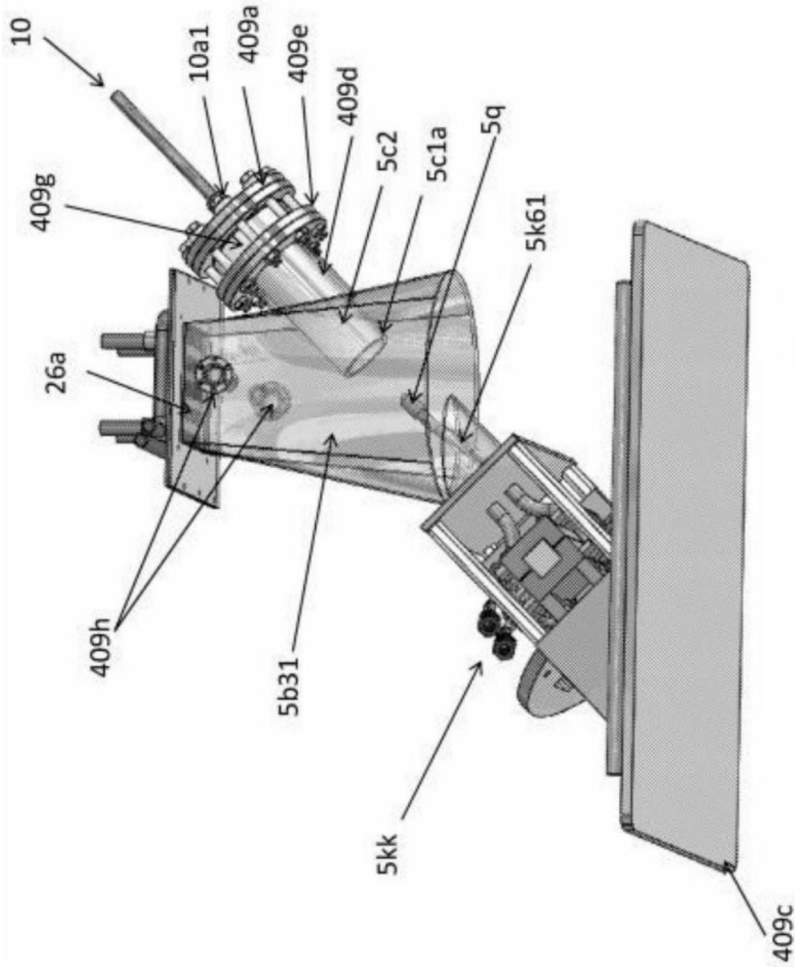


图27

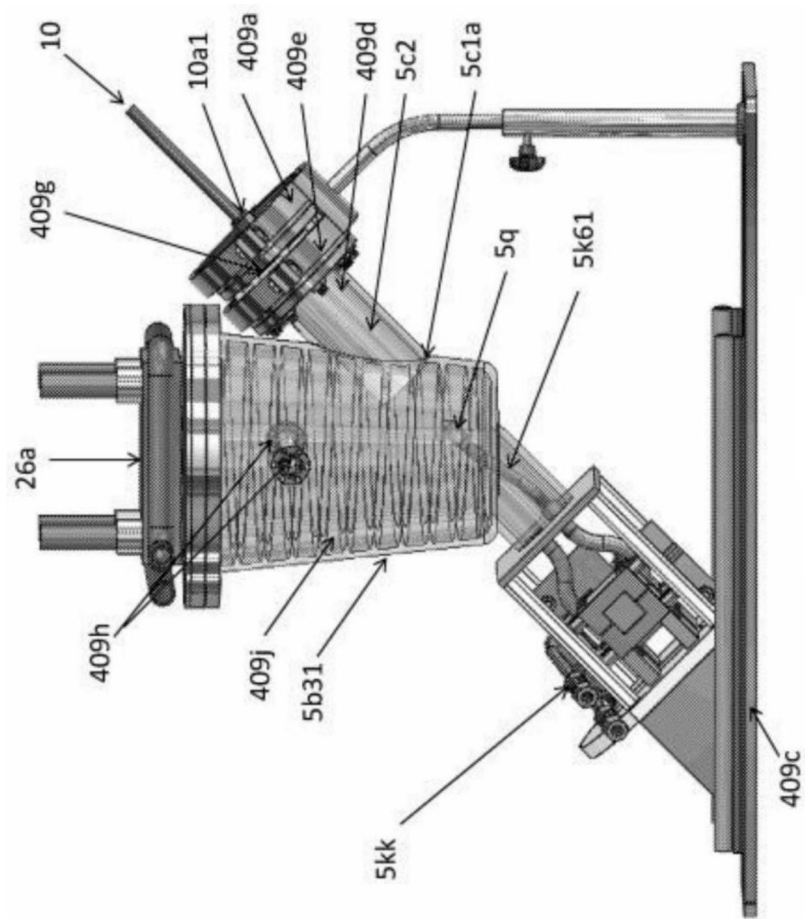


图28

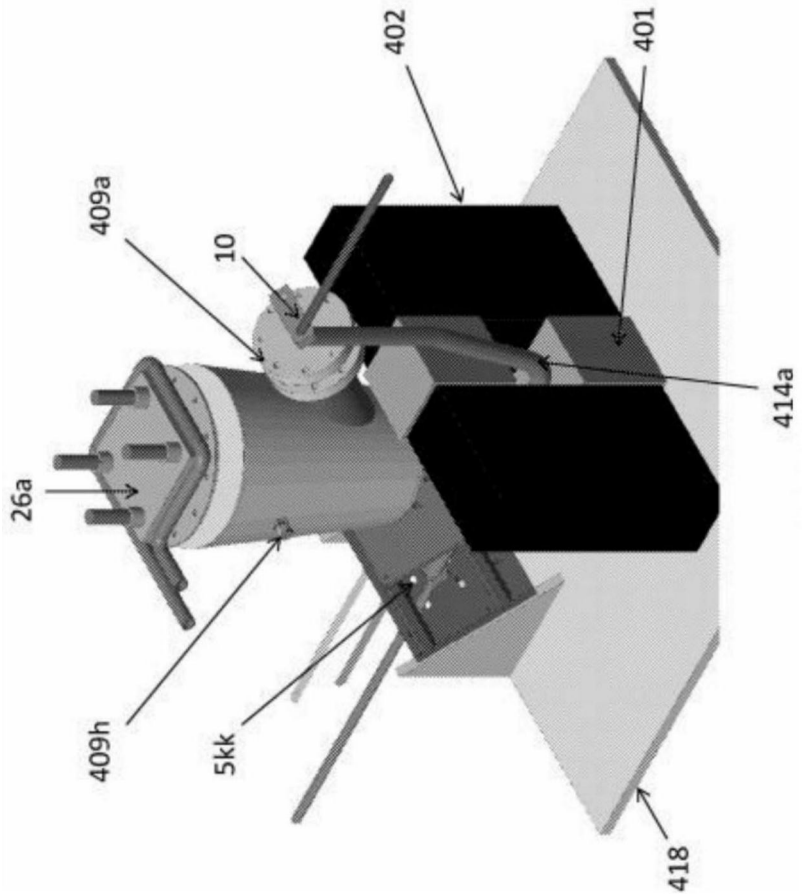


图29

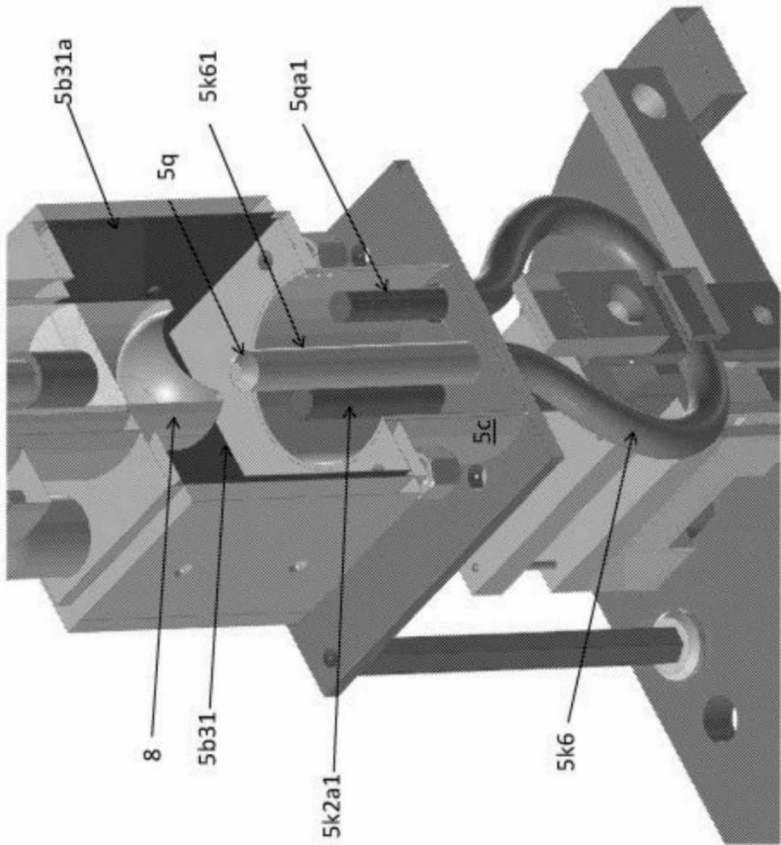


图30

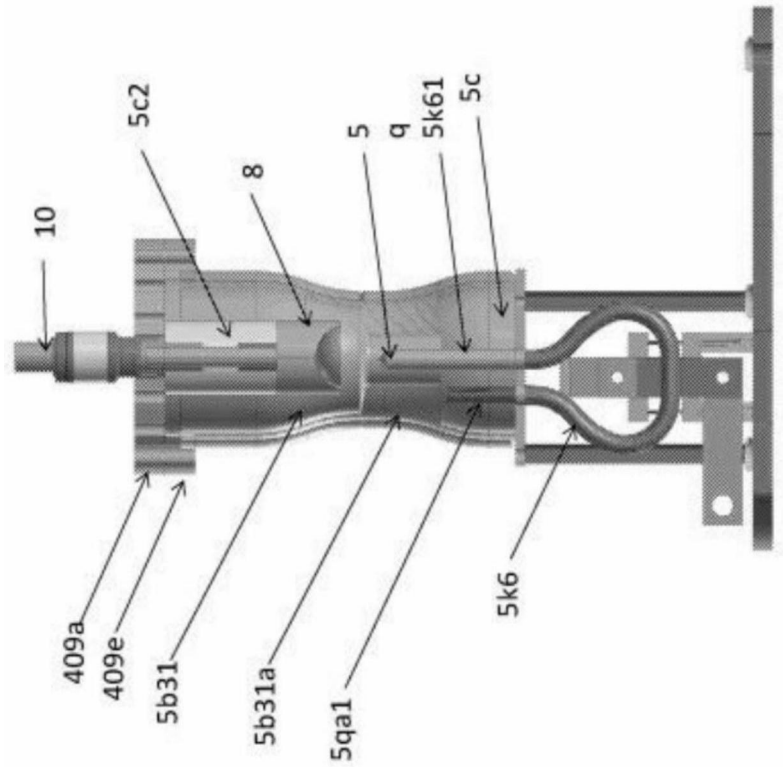


图31

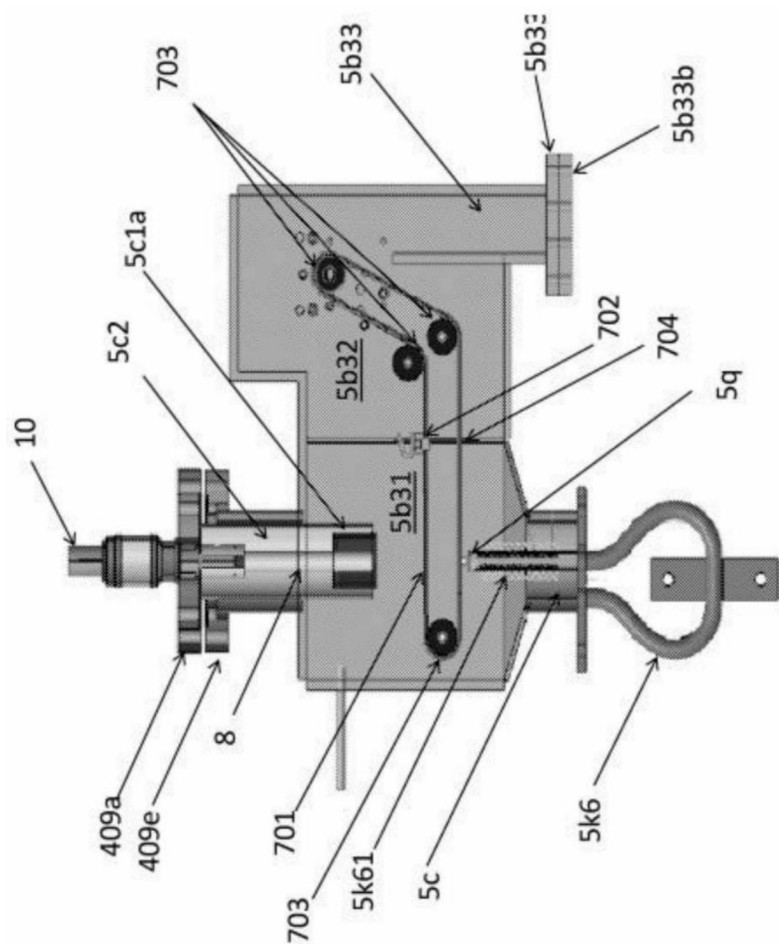


图32

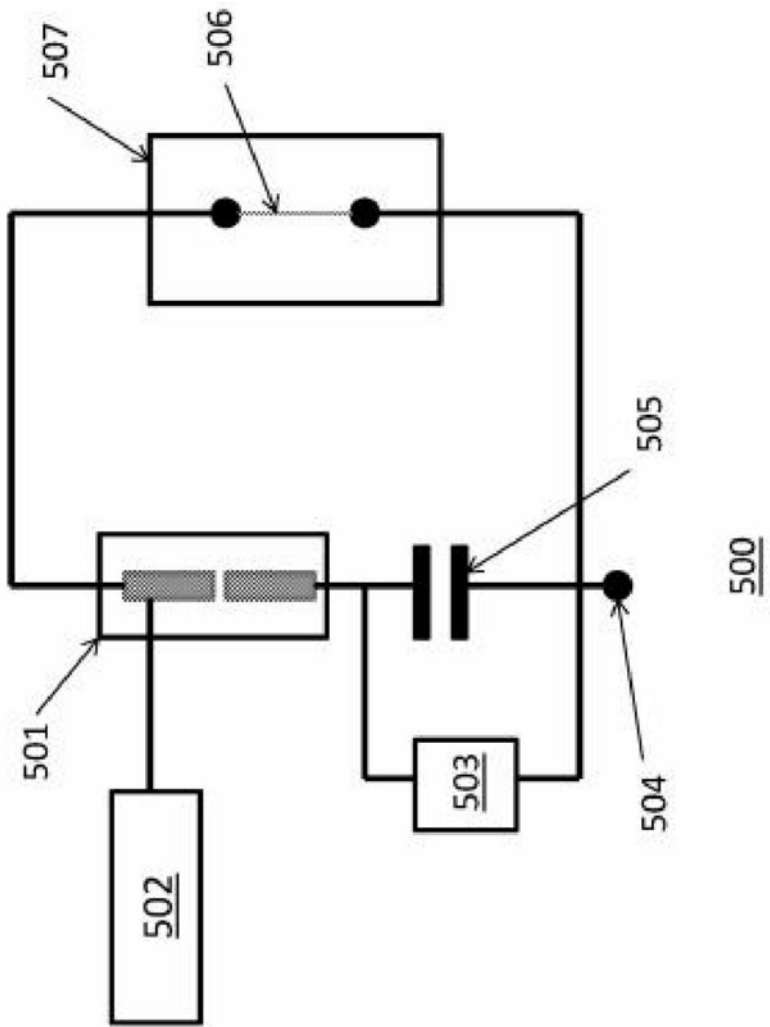


图33

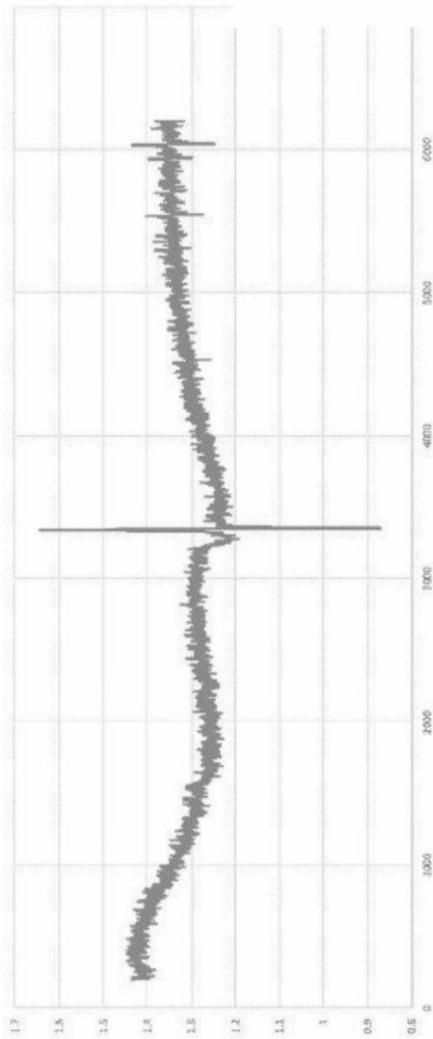


图34

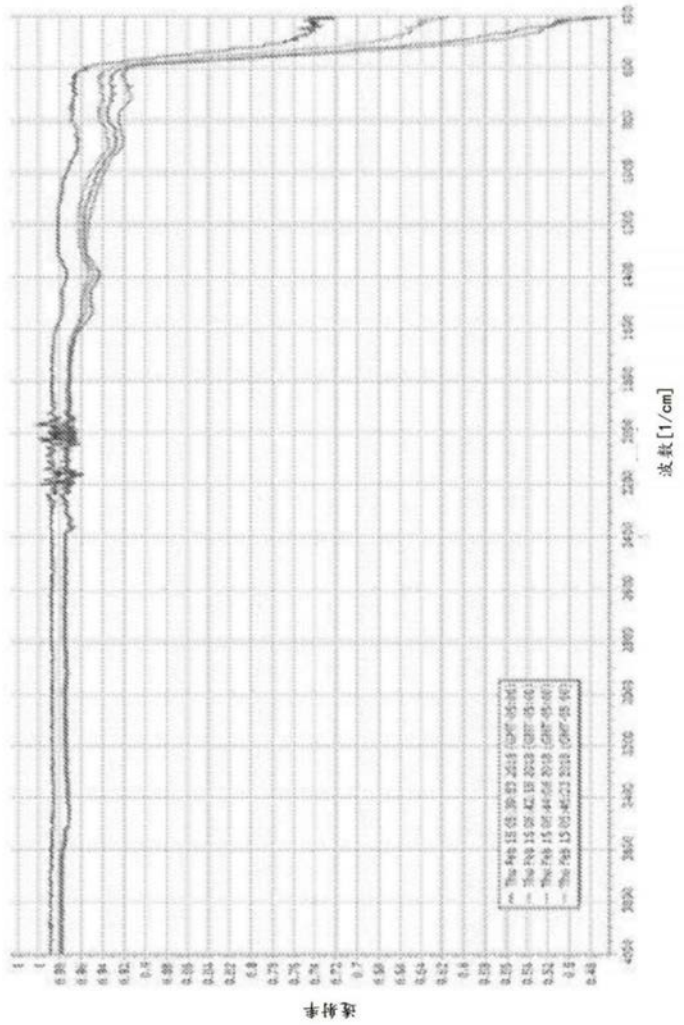


图35A

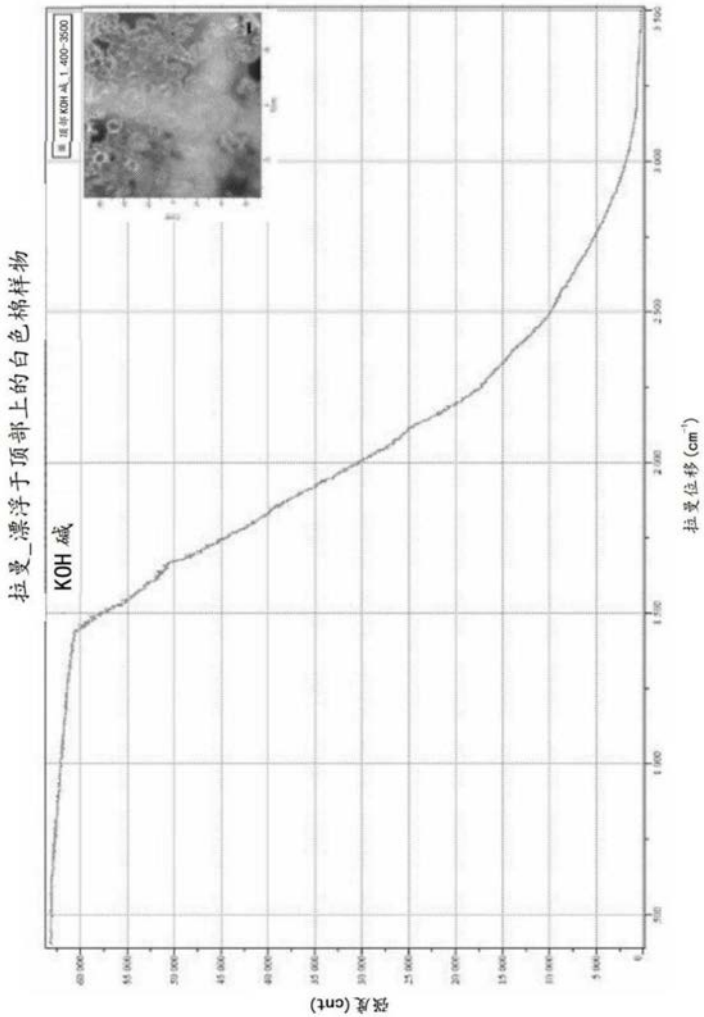


图35B

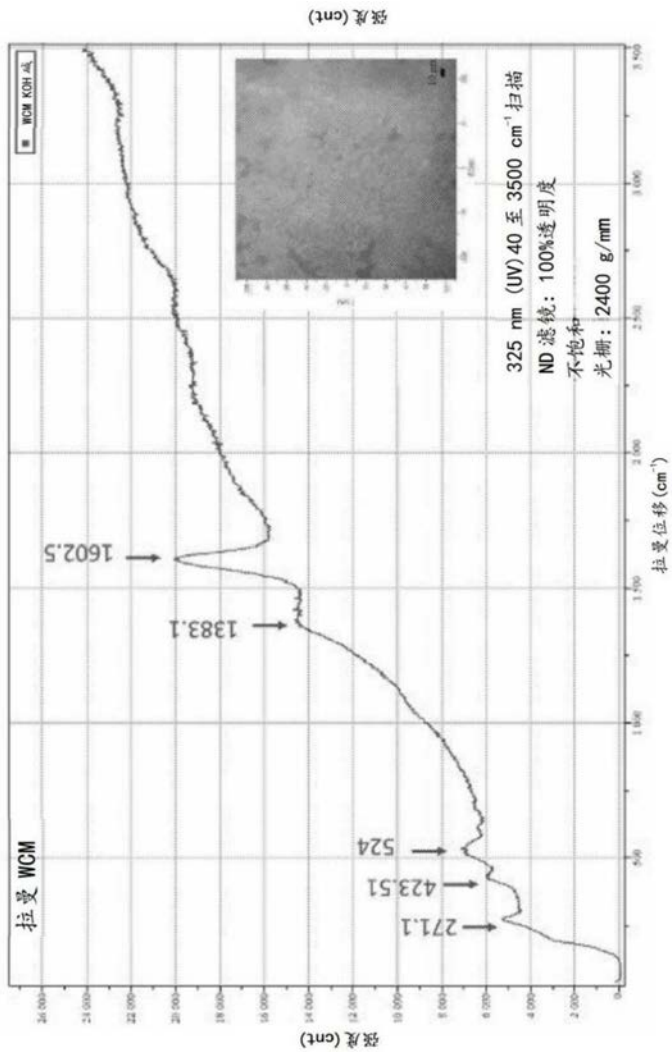


图35C

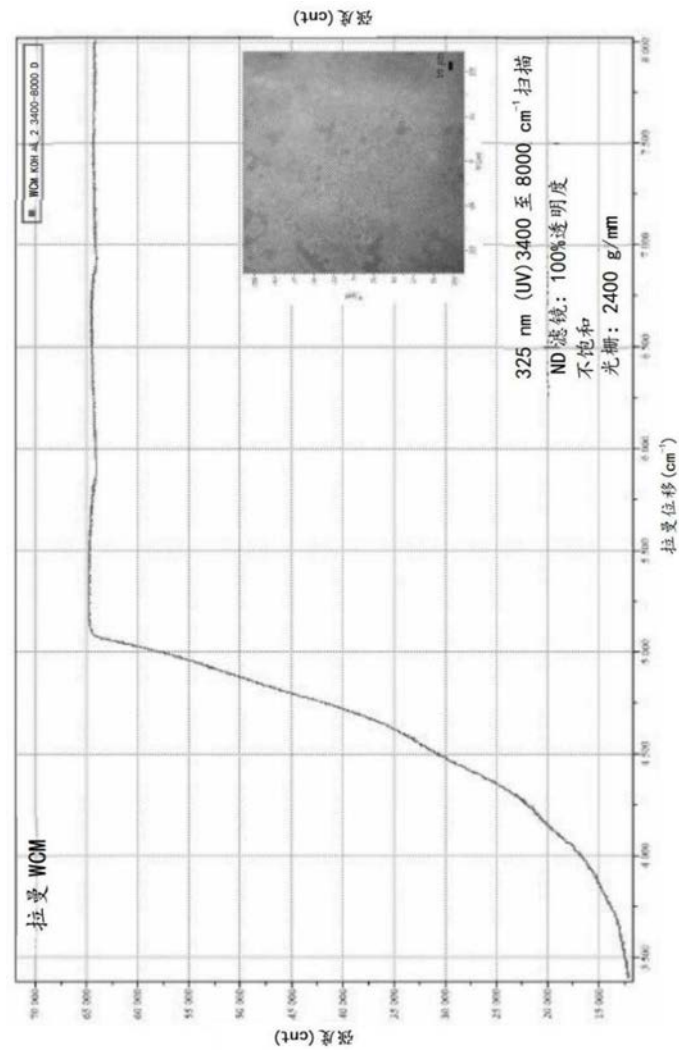


图35D

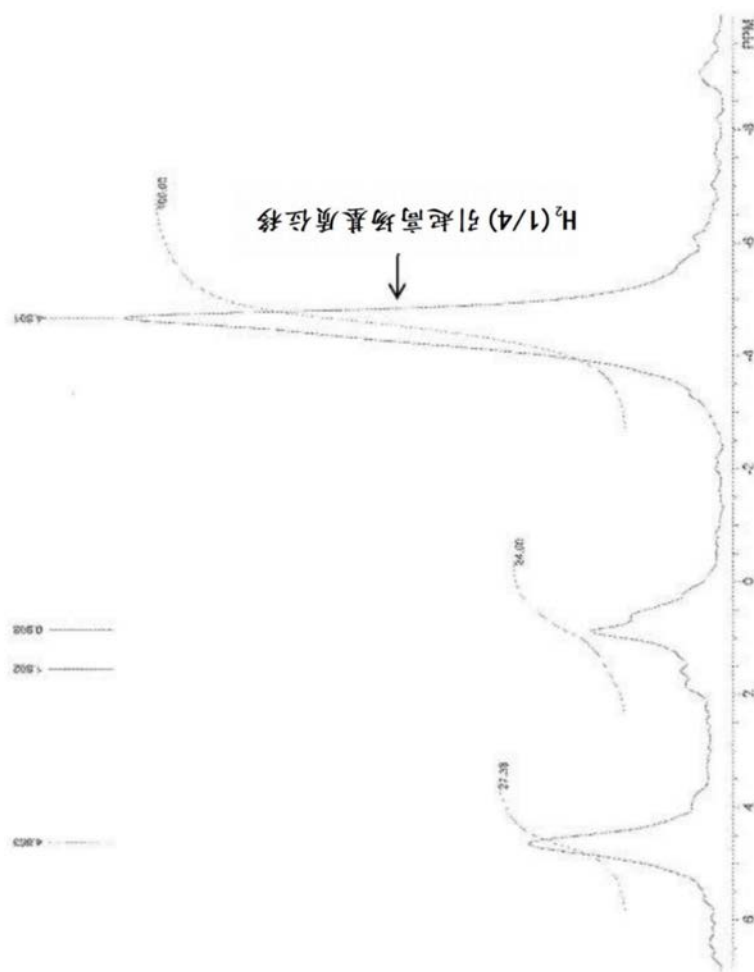


图36

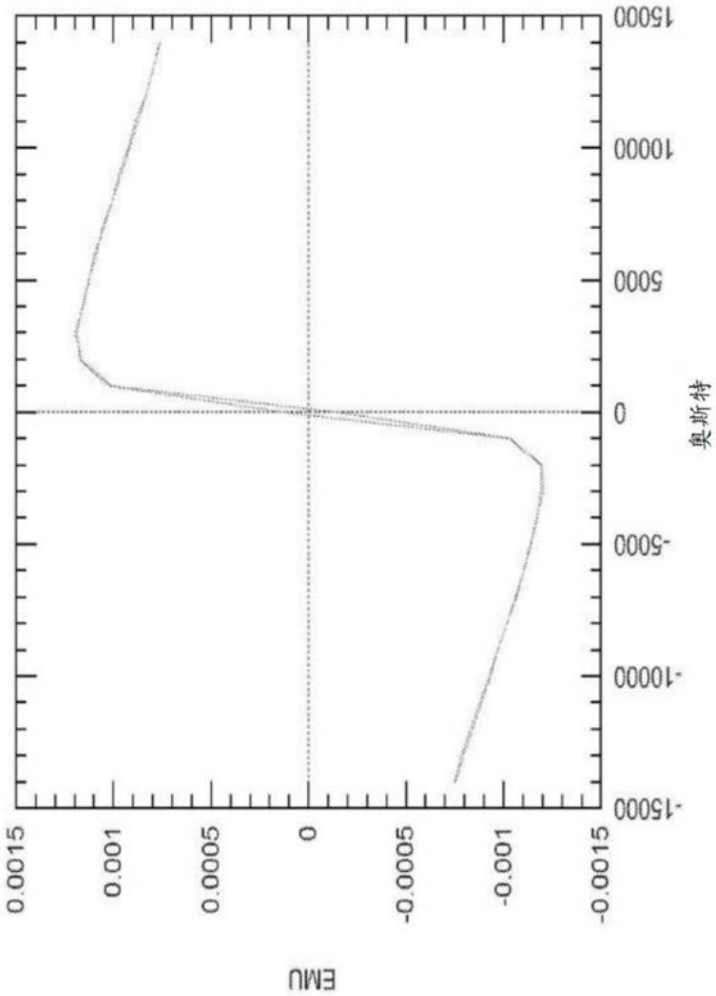


图37

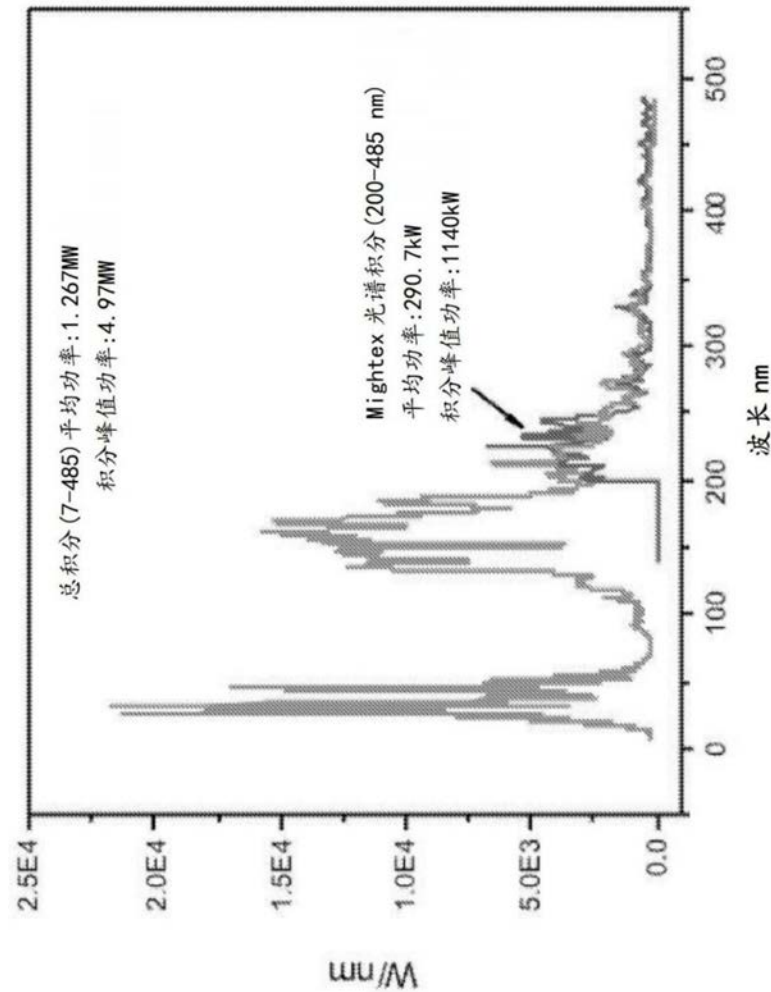


图38

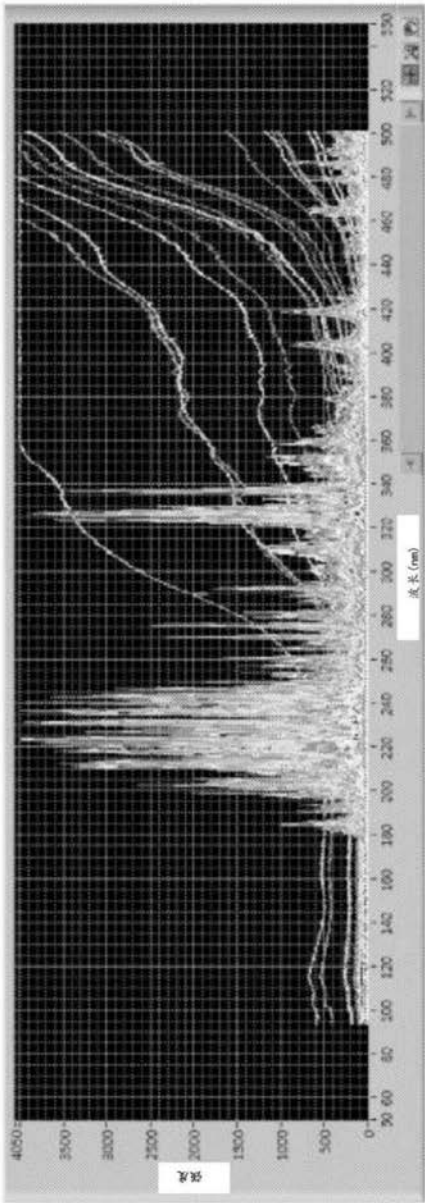


图39

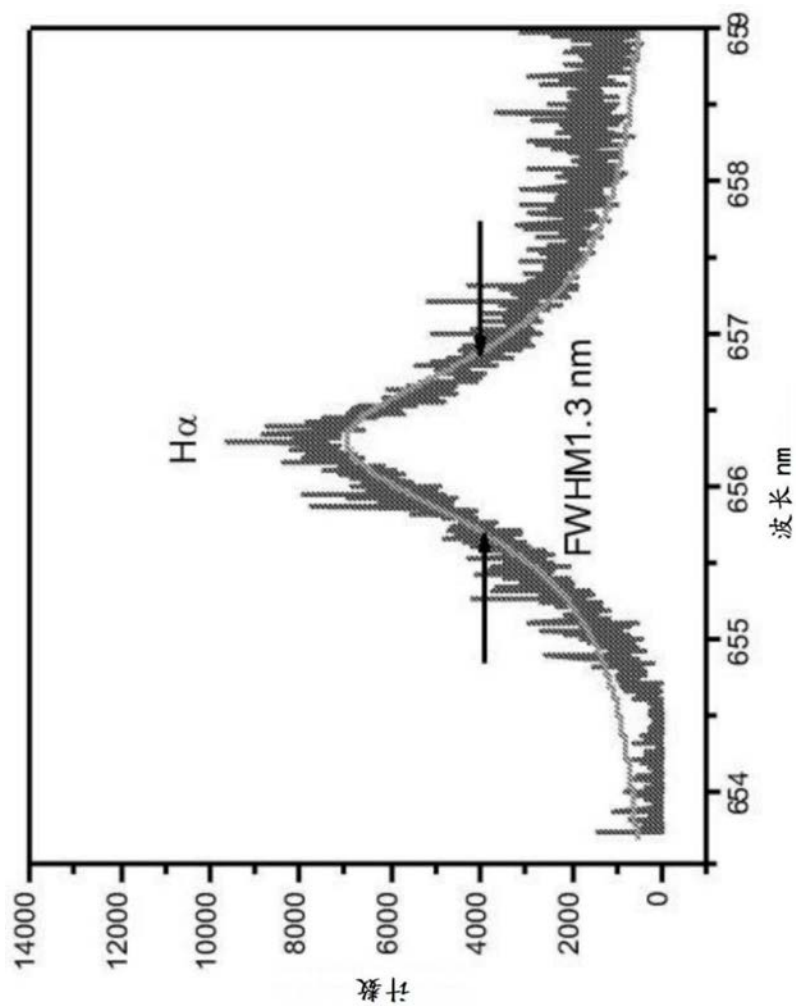


图40

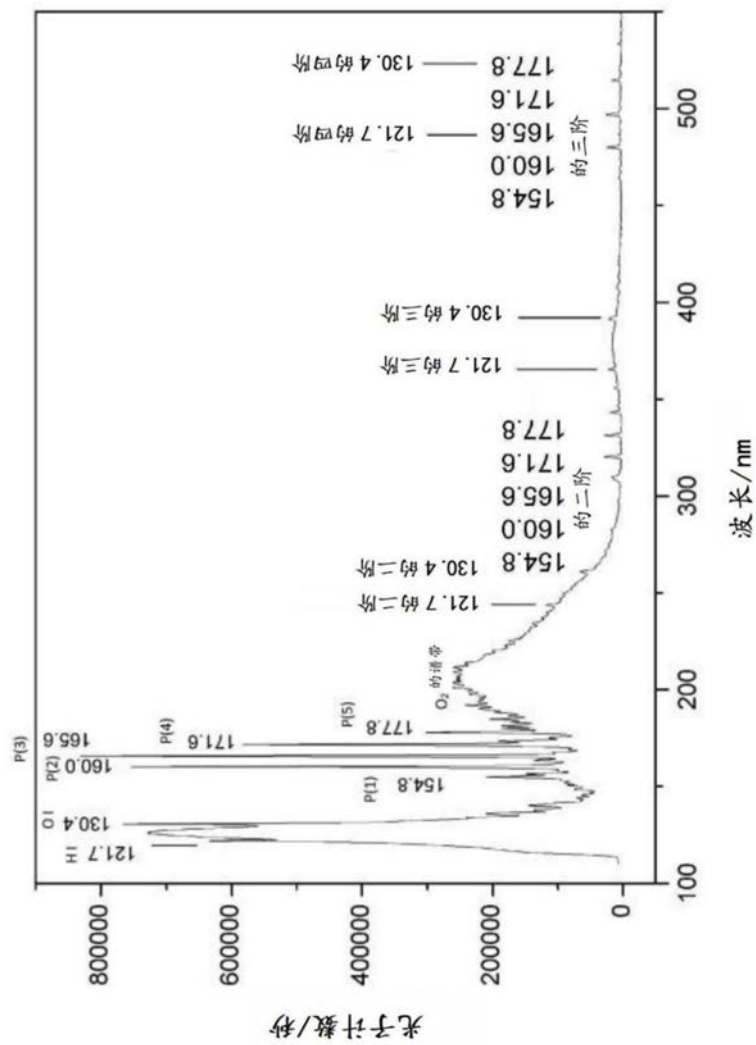


图41

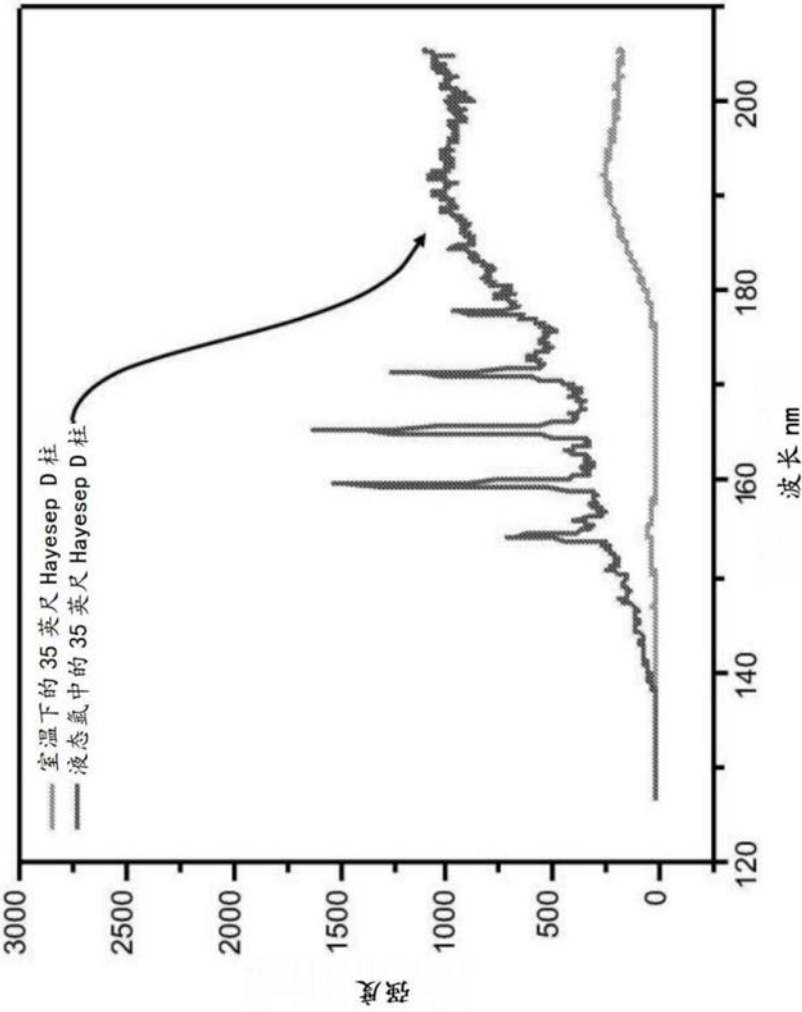


图42

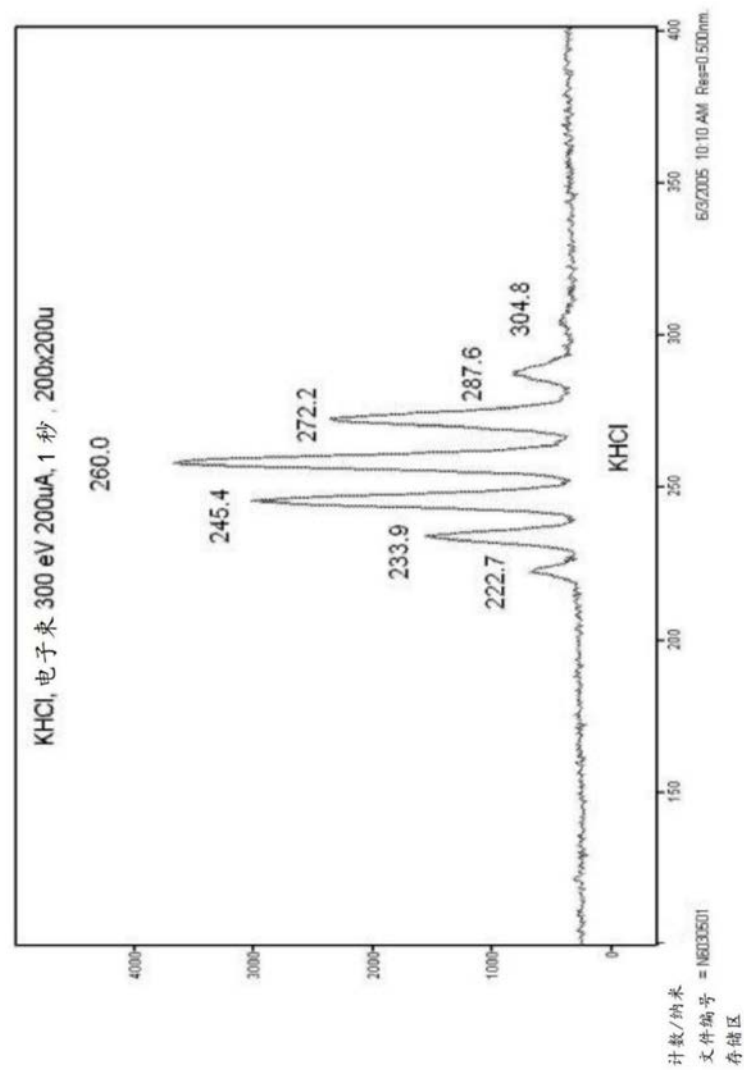


图43

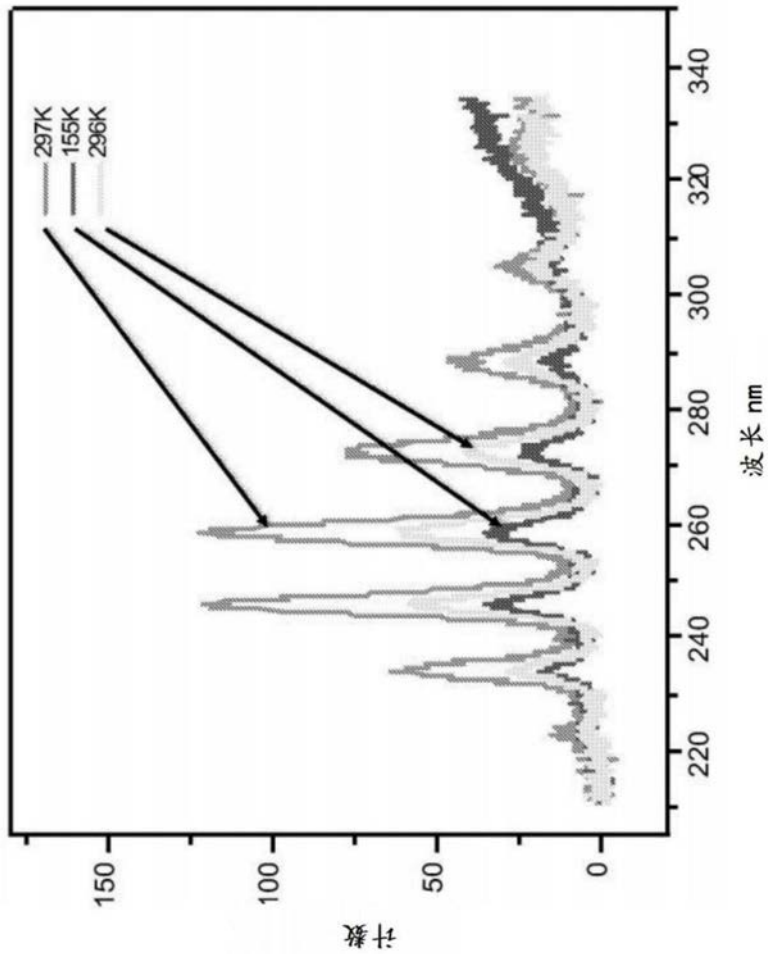


图44

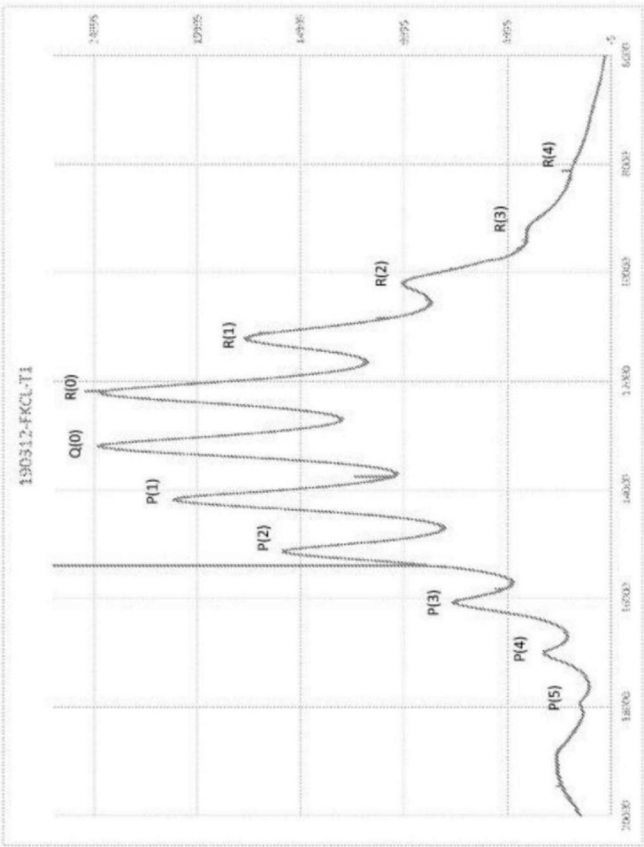


图45

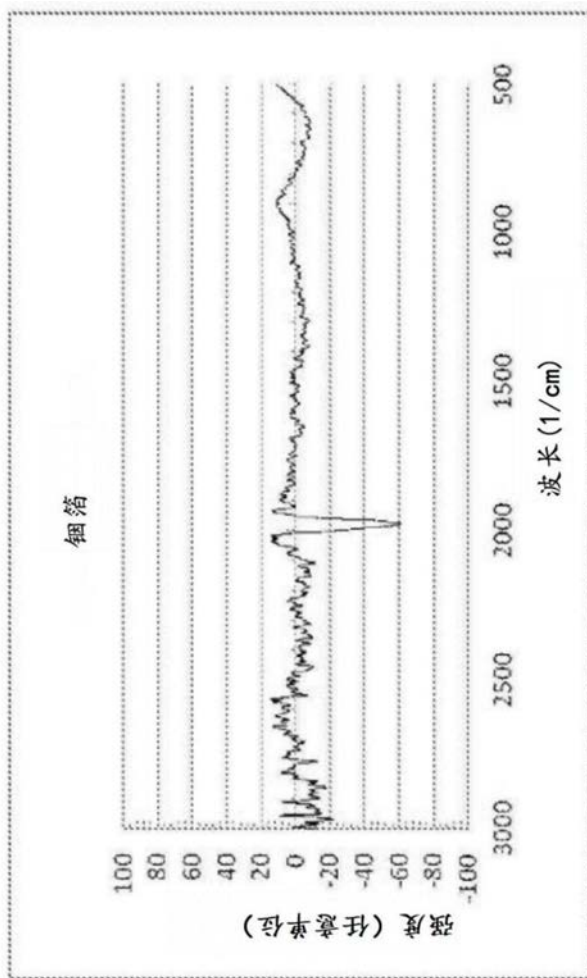


图46

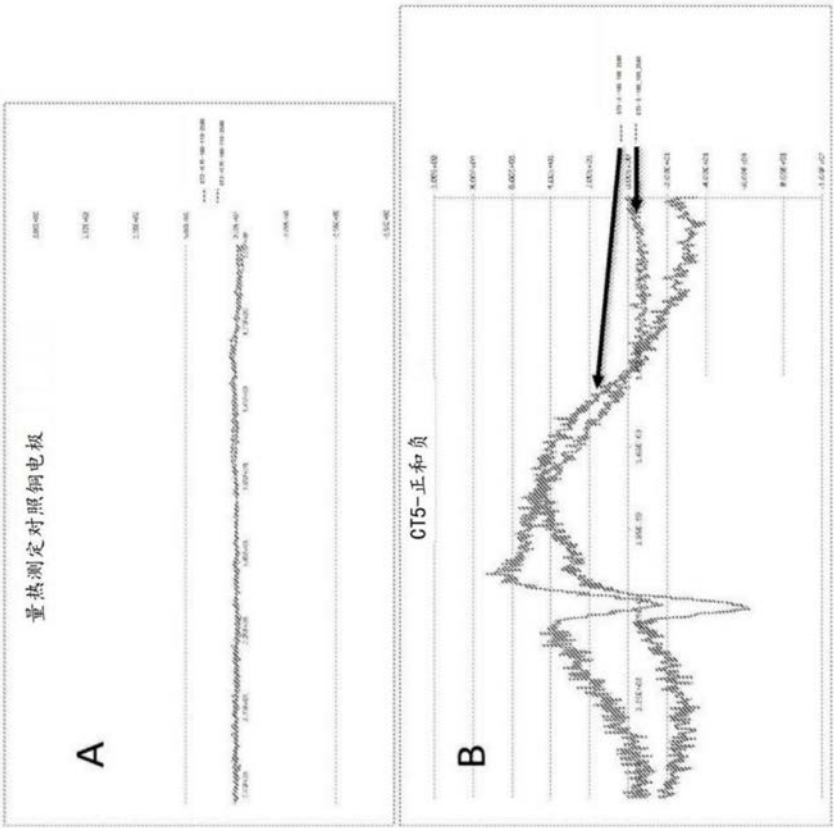


图47

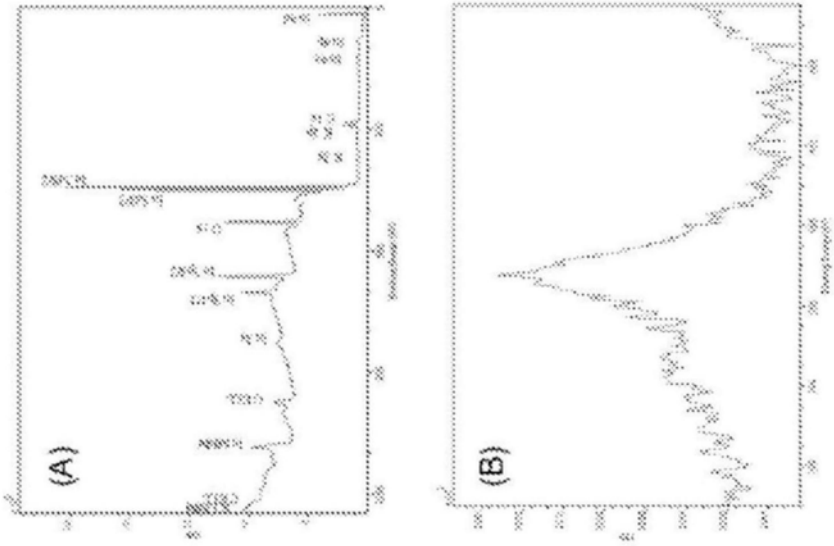


图48

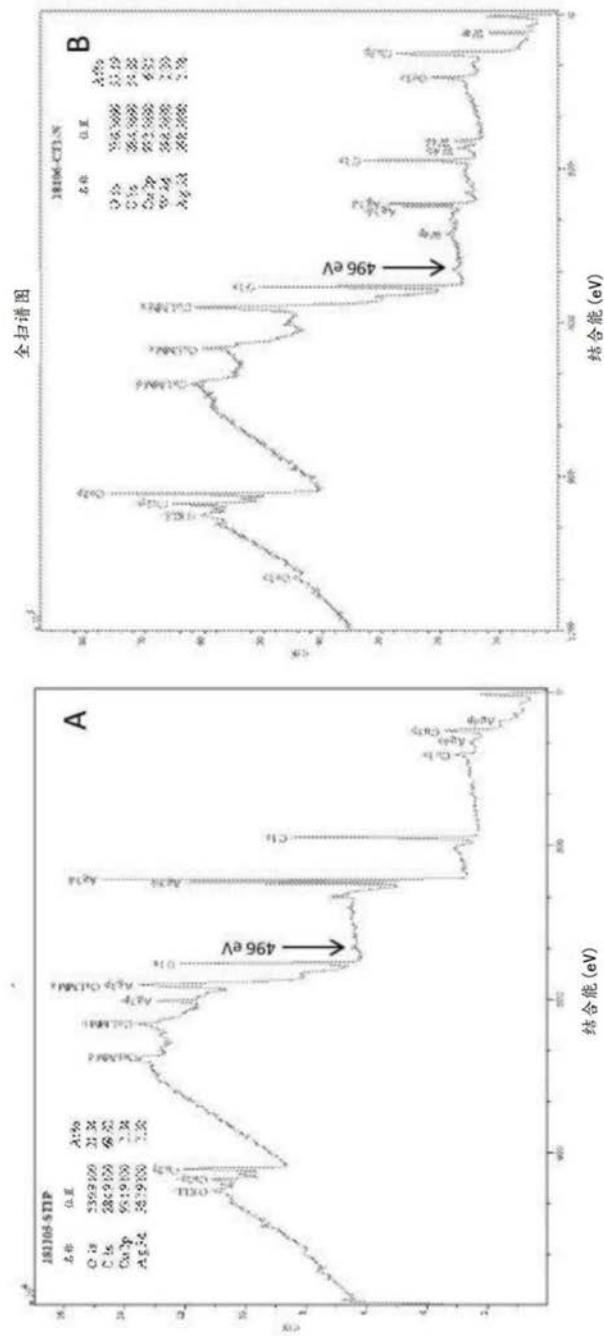


图50

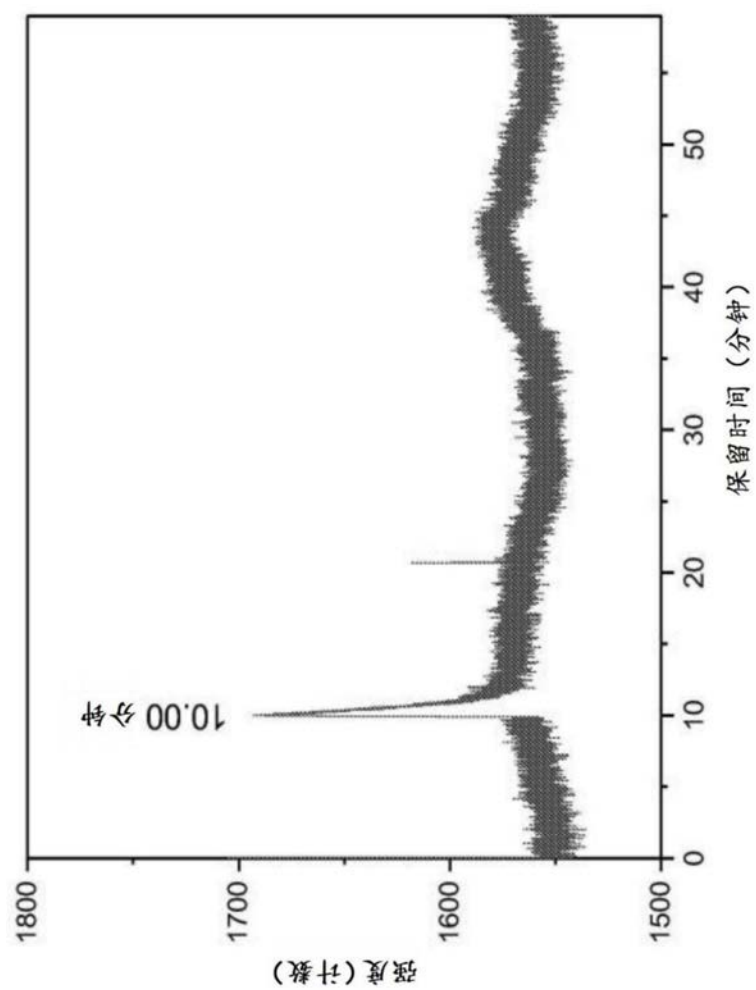


图51A

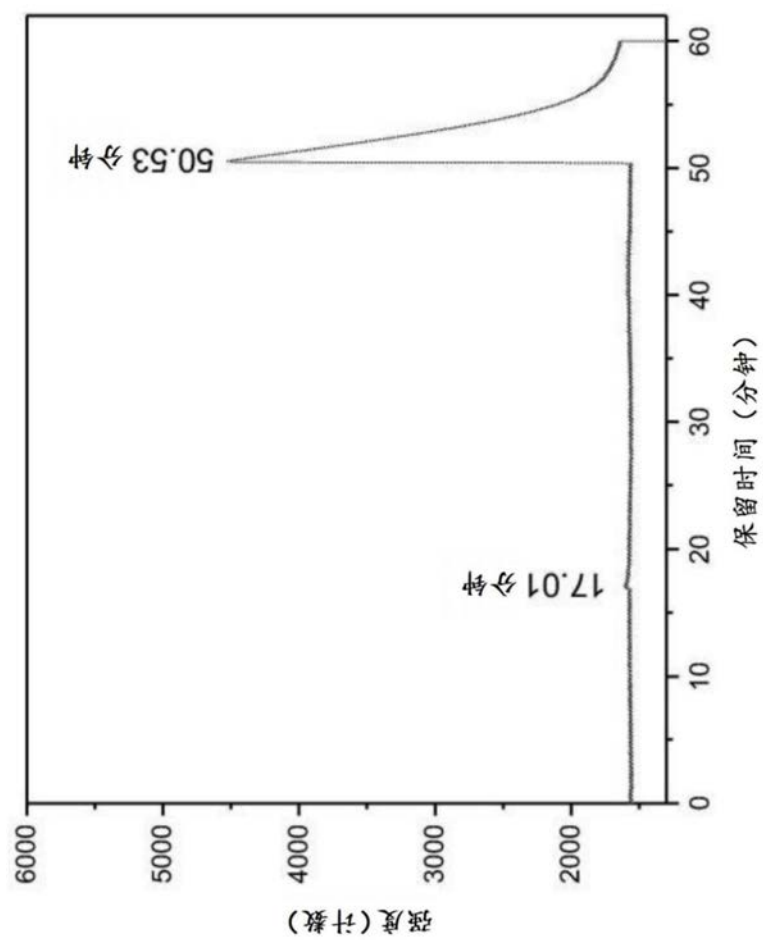


图51B

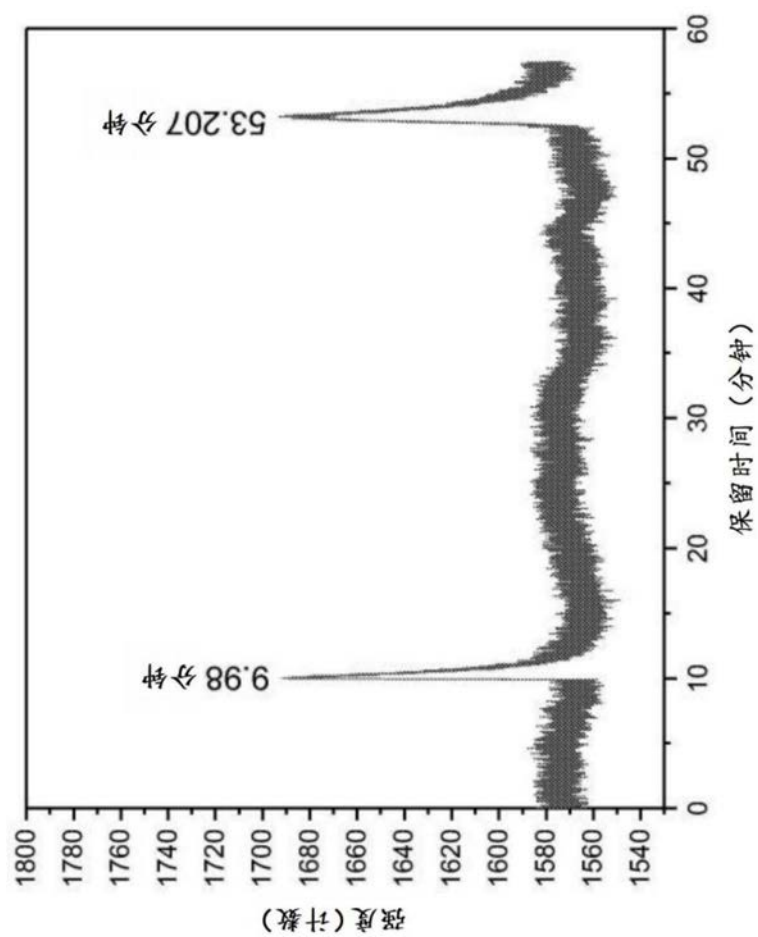


图51C

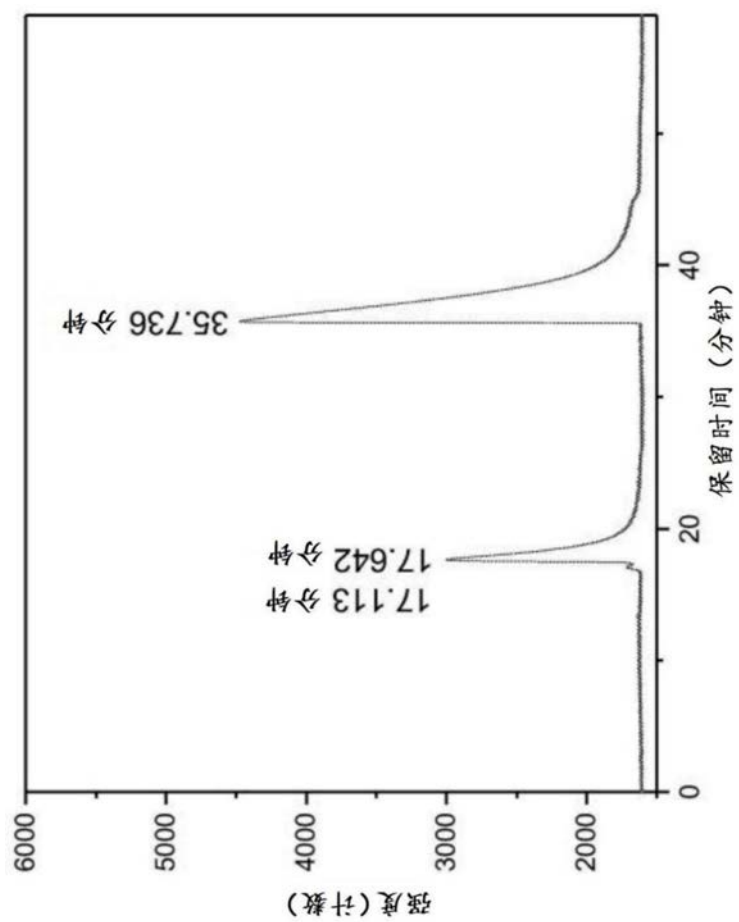


图51D

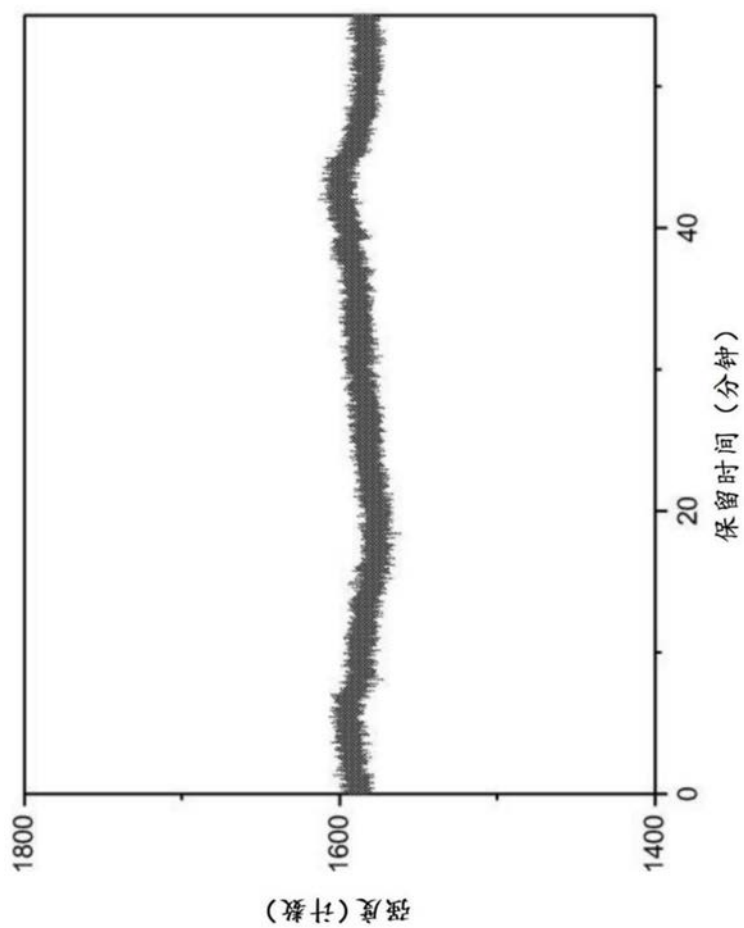


图51E

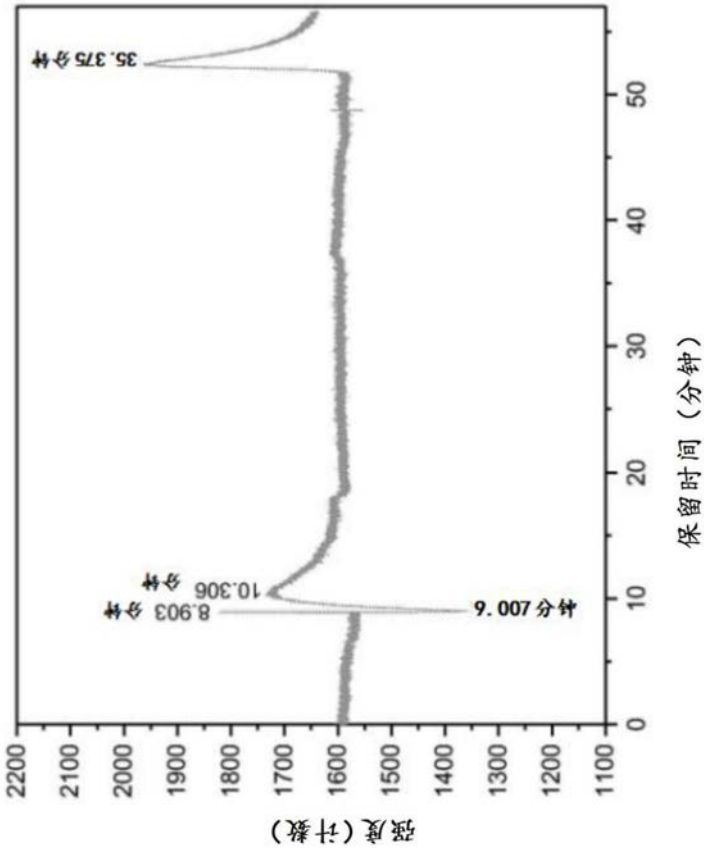


图52A

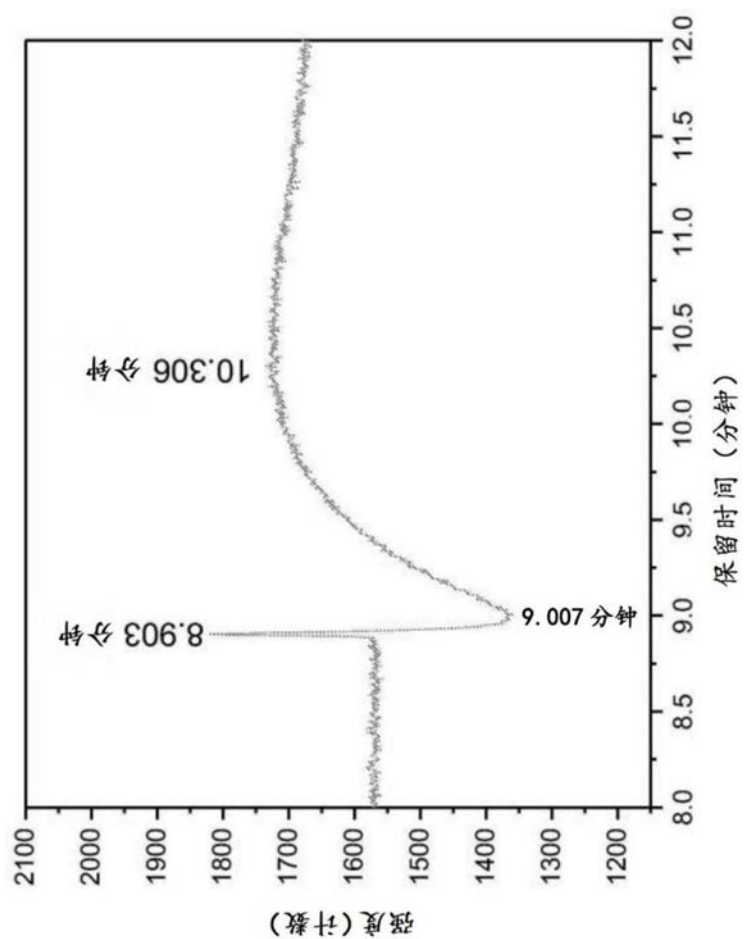


图52B

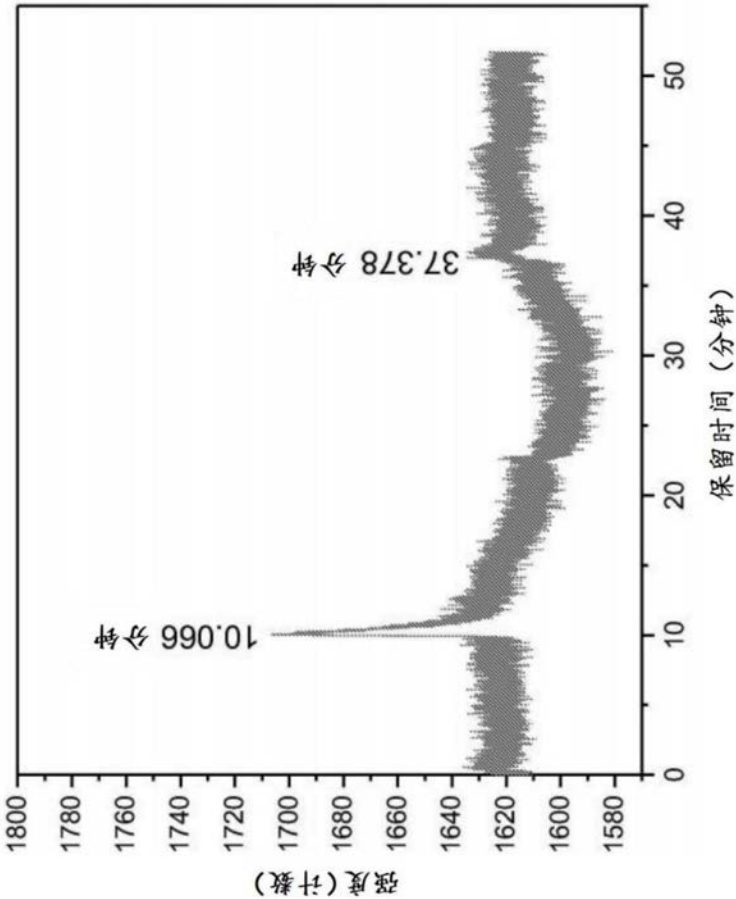


图53

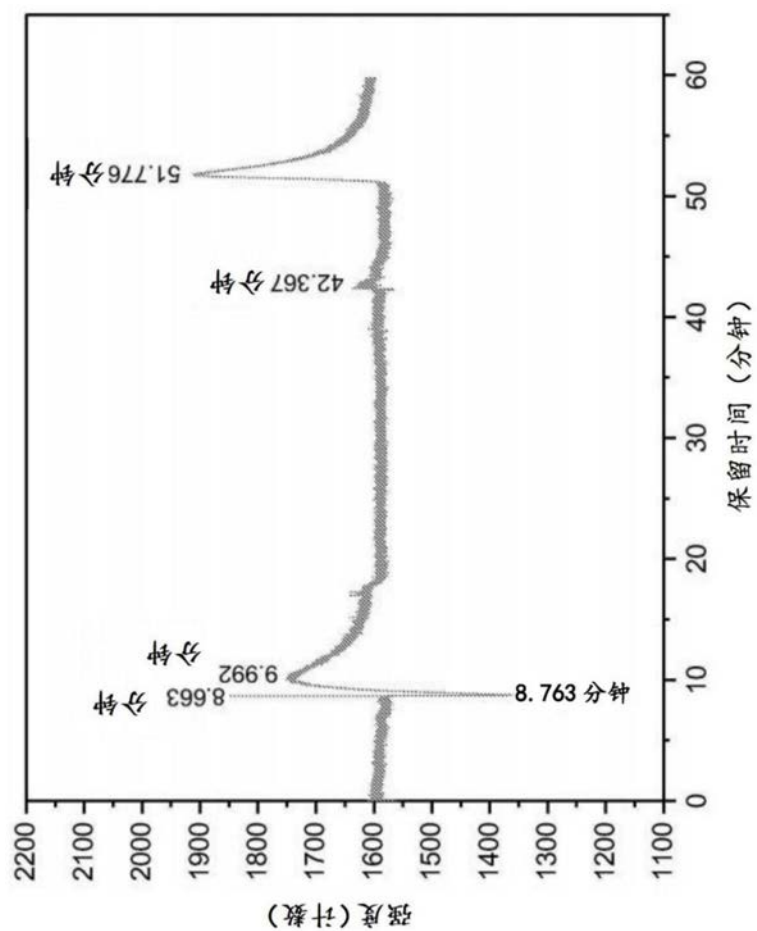


图54A

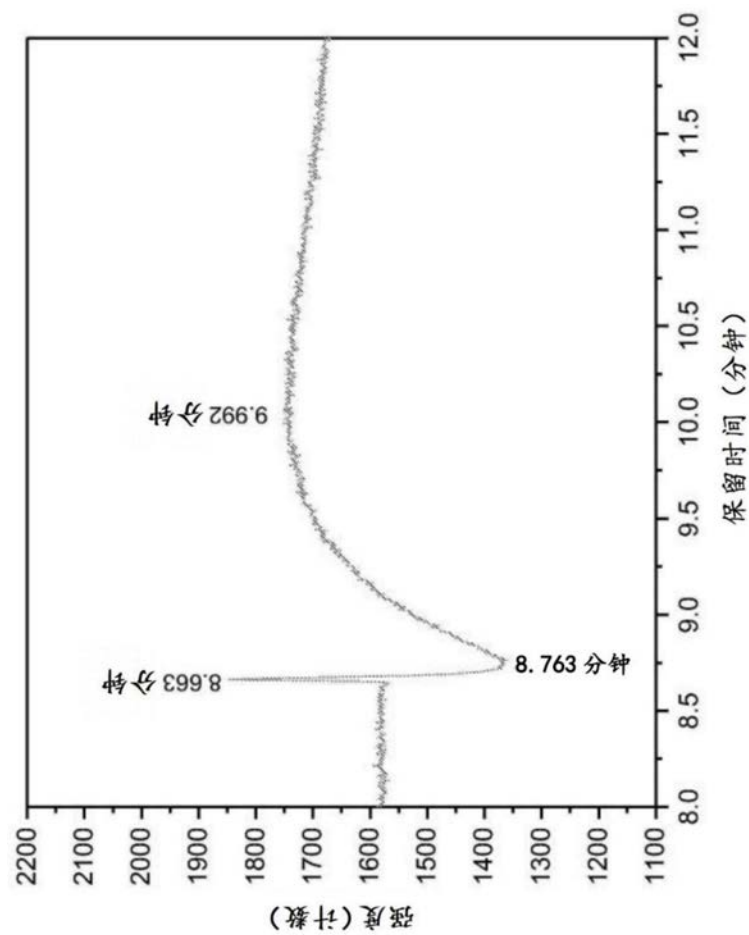


图54B

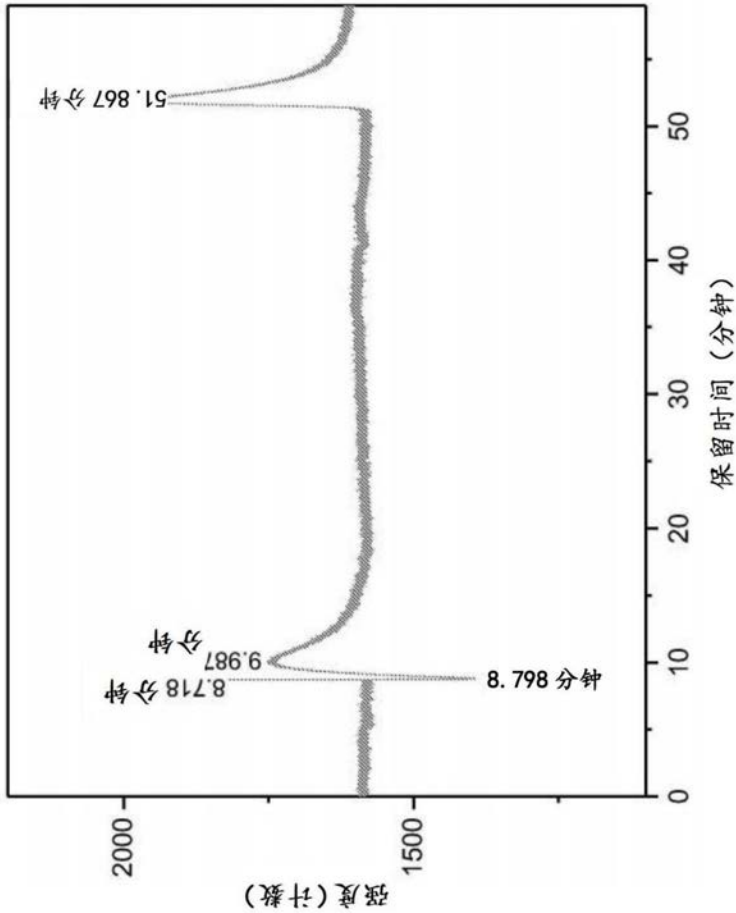


图55A

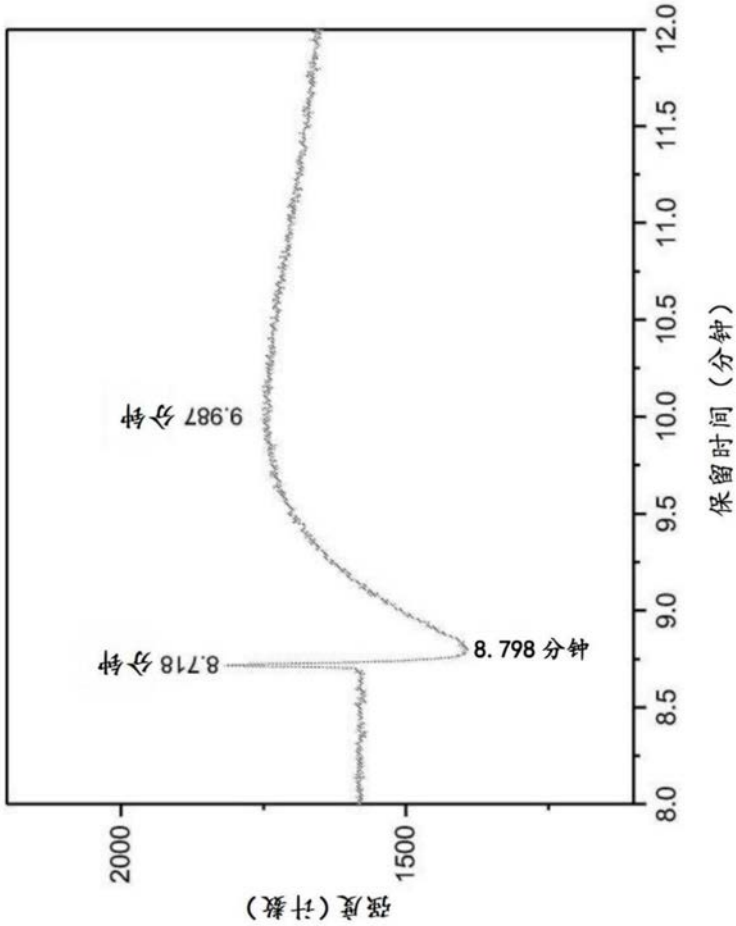


图55B

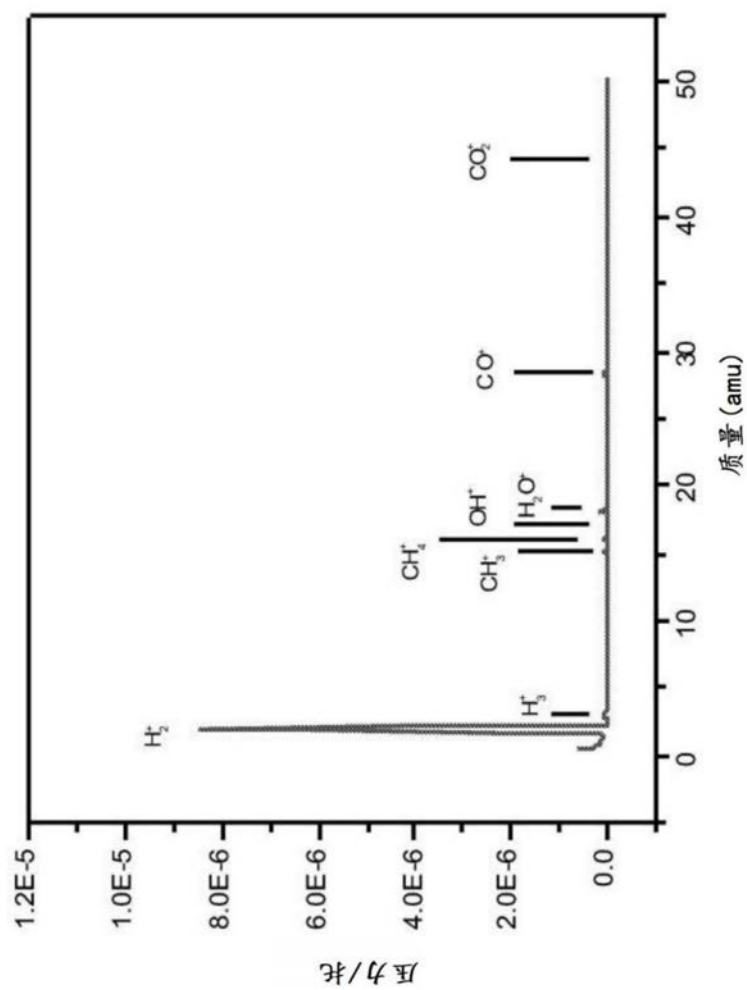


图56

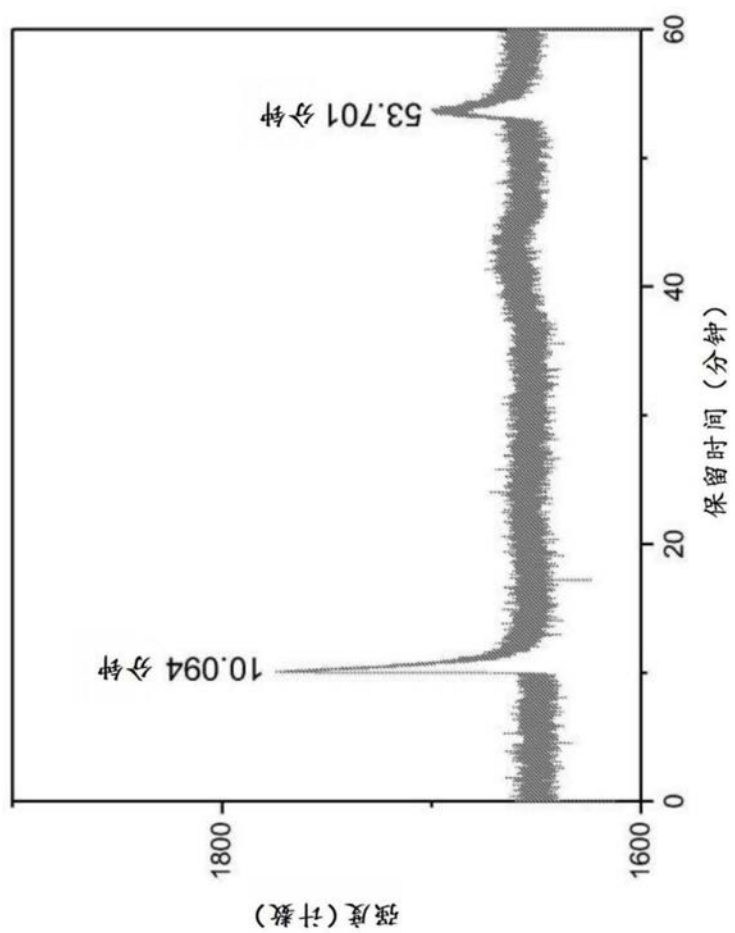


图57

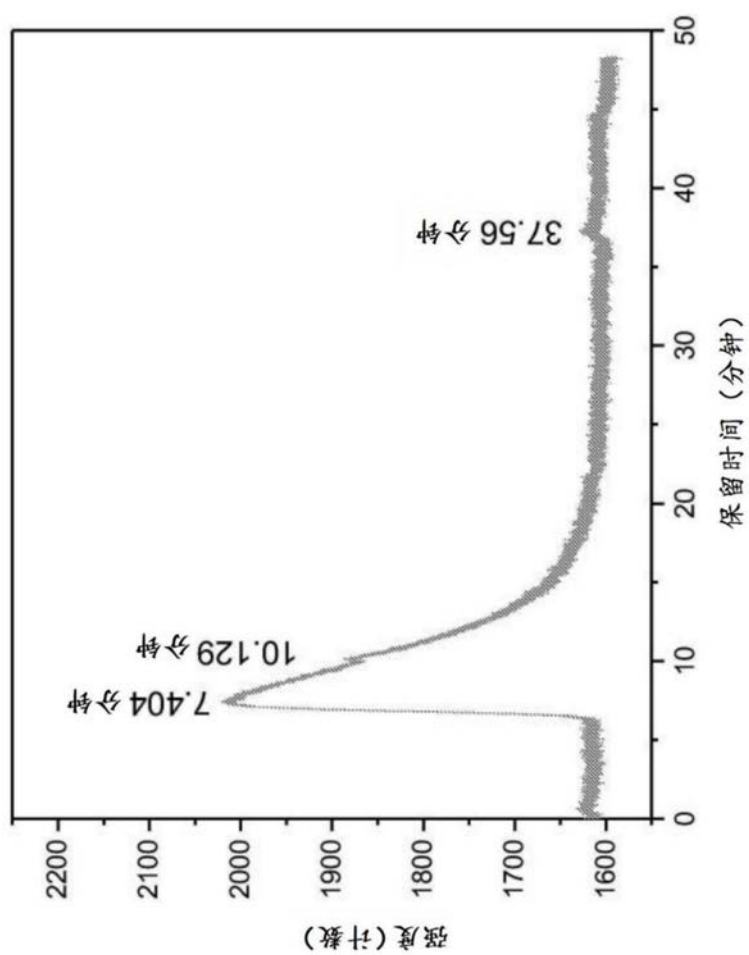


图58

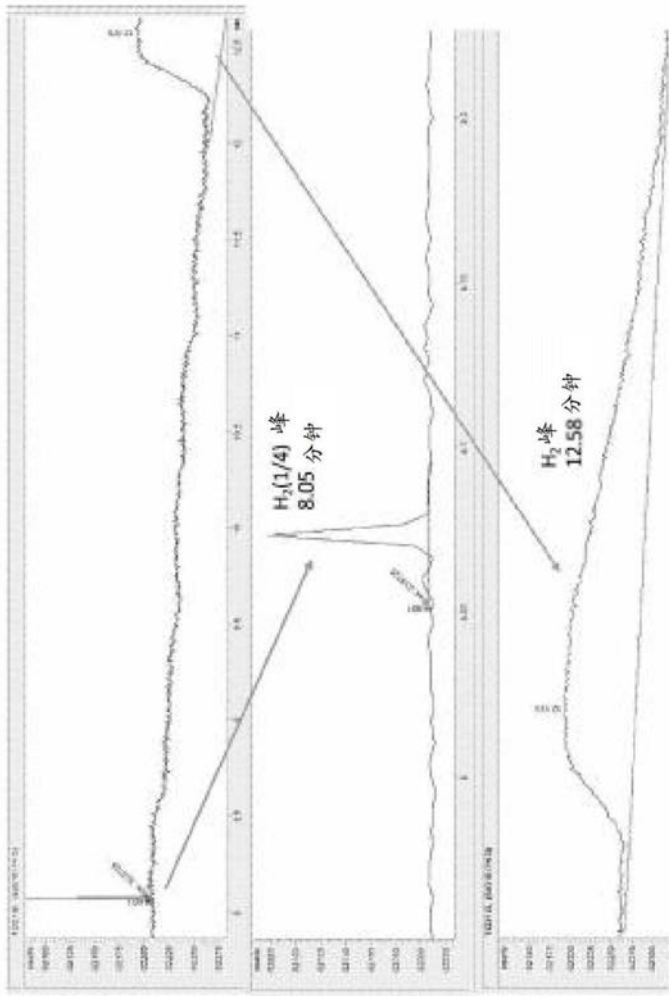


图59

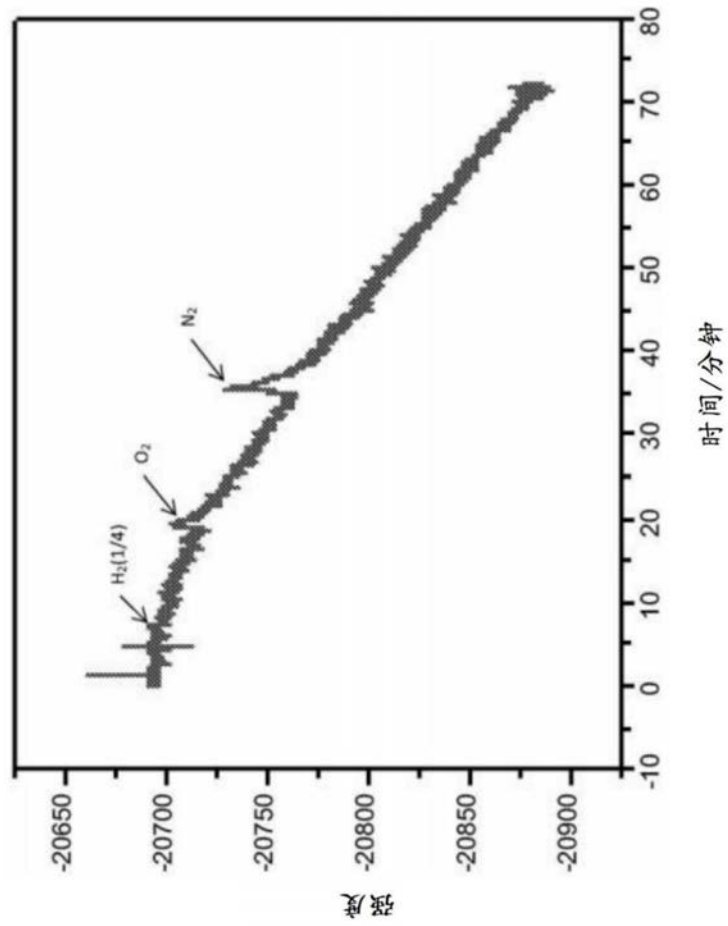


图60

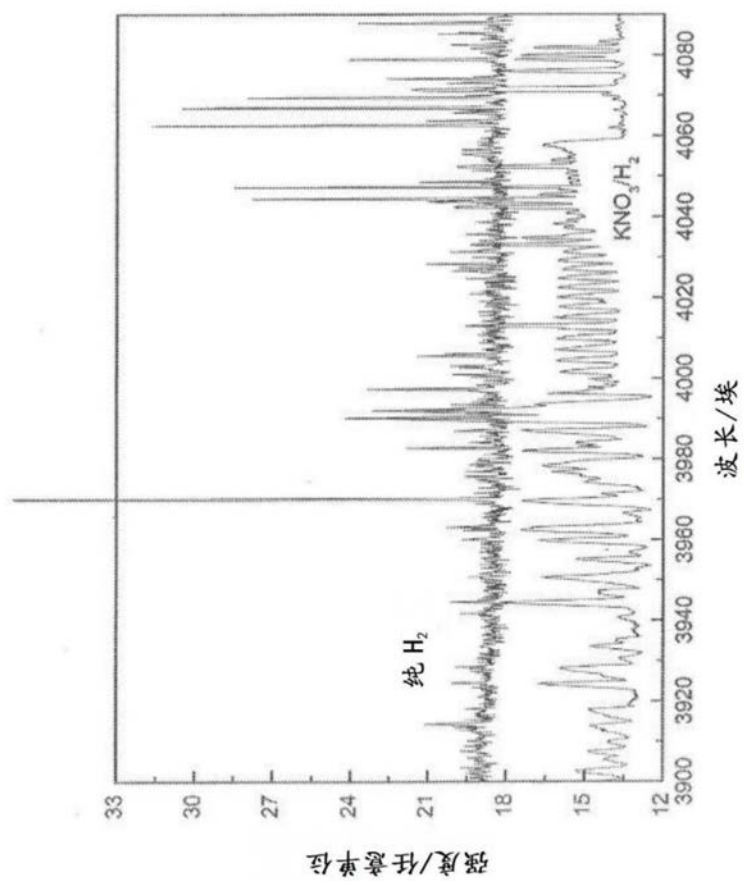


图61