

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5639053号
(P5639053)

(45) 発行日 平成26年12月10日 (2014. 12. 10)

(24) 登録日 平成26年10月31日 (2014. 10. 31)

(51) Int. Cl.

F I

C O 1 B 33/037 (2006. 01)
 C 3 O B 29/06 (2006. 01)
 C 3 O B 28/04 (2006. 01)
 C 3 O B 29/38 (2006. 01)

C O 1 B 33/037
 C 3 O B 29/06 5 O 1 Z
 C 3 O B 28/04
 C 3 O B 29/38 D

請求項の数 16 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2011-514840 (P2011-514840)
 (86) (22) 出願日 平成21年6月19日 (2009. 6. 19)
 (65) 公表番号 特表2011-525168 (P2011-525168A)
 (43) 公表日 平成23年9月15日 (2011. 9. 15)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2009/047947
 (87) 国際公開番号 W02009/155512
 (87) 国際公開日 平成21年12月23日 (2009. 12. 23)
 審査請求日 平成24年6月15日 (2012. 6. 15)
 (31) 優先権主張番号 61/074, 249
 (32) 優先日 平成20年6月20日 (2008. 6. 20)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 12/487, 119
 (32) 優先日 平成21年6月18日 (2009. 6. 18)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 500239188
 ヴァリアン セミコンダクター イクイッ
 プメント アソシエイツ インコーポレイ
 テッド
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
 1 9 3 O グローチェスター ドリー ロ
 ード 3 5
 (74) 代理人 100147485
 弁理士 杉村 憲司
 (72) 発明者 ピーター エル ケラーマン
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
 1 9 3 O グローチェスター ドリー ロ
 ード 3 5

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 溶融精製及び運搬システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

チャンバに対して、クーラー及びヒーターを第一の方向に並進するステップと、
前記チャンバ内の溶融液の第一の部分を前記第一の方向に凝固するステップと、
 前記第一の方向の前記溶融液の前記第一の部分の一部を溶融し、前記溶融液の第二の部
 分は凝固されたままにするステップと、
 前記チャンバから前記溶融液を流すステップと、
 前記チャンバから前記第二の部分を除去するステップと、
 を含み、
前記溶融液は、シリコン、シリコンゲルマニウム、ガリウム、窒化ガリウム又は他の半
導体物質からなる群から選択される、精製方法。

【請求項 2】

前記凝固するステップ中、前記溶融液内の溶質及び前記第二の部分を濃縮するステップ
 をさらに含む請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記除去するステップは、前記チャンバから前記第二の部分を落下するステップを含む
 請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記除去するステップは、前記第二の部分を溶融するステップと、前記チャンバから前
 記第二の部分を流すステップとを含む請求項 1 に記載の方法。

10

20

【請求項 5】

熔融液を精製する装置であって、
キャビティ、注入口、放出口が画定しているチャンバと、
クーラーと、
ヒーターと、

前記チャンバに沿って、前記クーラー及び前記ヒーターを第一の方向に並進するように構成される並進機構と、

を含み、

前記熔融液は、シリコン、シリコンゲルマニウム、ガリウム、窒化ガリウム又は他の半導体物質からなる群から選択される、熔融液を精製する装置。

10

【請求項 6】

前記ヒーターは、オームヒーター、誘導コイル、抵抗ヒーターのうちの少なくとも一つで構成される請求項 5 に記載の装置。

【請求項 7】

前記クーラー及び前記ヒーターの間に絶縁体をさらに含む請求項 5 に記載の装置。

【請求項 8】

シートを形成する装置であって、
熔融液を形成するように構成されるるつぽと、
前記るつぽと流体連結する第一のポンプと、
前記第一のポンプと流体連結する精製システムと、
前記精製システムと流体連結する第二のポンプと、

20

シートを形成するために前記熔融液を凝固するように構成されたシート形成装置とを含み、該シート形成装置は、前記第二のポンプと第一のパスに沿って流体連結しており、前記熔融液を保持するように構成されるチャンネルを確定する容器と、前記熔融液上に配置される冷却板とを有し、

前記熔融液は、シリコン、シリコンゲルマニウム、ガリウム、窒化ガリウム又は他の半導体物質からなる群から選択される、

シートを形成する装置。

【請求項 9】

前記シート形成装置は、余水路を含み、前記熔融液及び前記シートは、前記チャンネル内を該余水路へ向かい流れる請求項 8 に記載の装置。

30

【請求項 10】

前記精製システムは、
キャビティ、注入口、放出口を画定するチャンバと、
クーラーと、
ヒーターと、

前記チャンバに沿って、前記クーラー及び前記ヒーターを第一の方向に並進するように構成される並進機構と、

を含む請求項 8 に記載の装置。

【請求項 11】

フィルタをさらに含む請求項 8 に記載の装置。

40

【請求項 12】

粒子トラップをさらに含む請求項 8 に記載の装置。

【請求項 13】

前記精製システムと流体連結する第三のポンプをさらに含み、前記シート形成装置が該第三のポンプと流体連結する請求項 8 に記載の装置。

【請求項 14】

前記シート形成装置と前記第二のポンプとの間に第二のパスをさらに含み、該第二のパスは前記熔融液が前記シート形成装置に循環をするように構成される請求項 8 に記載の装置。

50

【請求項 15】

前記シート形成装置は前記精製システムと流体連結する請求項 8 に記載の装置。

【請求項 16】

前記第一のポンプ及び前記第二のポンプは、
前記熔融液を保持するように構成されるキャビティを画定しているチャンバと、
前記チャンバと流体連結するガス供給源と、
前記チャンバと流体連結する第一のパイプと、
前記チャンバと流体連結する第二のパイプと、
前記第一のパイプと前記第二のパイプとの間に配置される第一のバルブと、
前記チャンバと前記第二のパイプとの間に配置される第二のバルブと、

を含む請求項 8 に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、熔融液からのシート形成、より詳細には、熔融液からシートを形成する際に使用する精製システムに関する。

【背景技術】

【0002】

シリコンウエハ又はシリコンシートは、例えば、集積回路又は太陽電池の産業で使用され得る。再生可能なエネルギー源の需要が増加するにつれて、太陽電池の需要は増加し続ける。これらの需要が増加するにつれ、太陽電池産業の一つの目標は、コスト対電力比を低下させることである。太陽電池には、シリコン及び薄膜の 2 種類の太陽電池がある。多くの太陽電池は、シリコンウエハ、例えば単結晶シリコンウエハから製造される。現在、結晶シリコン太陽電池にかかる主なコストは、太陽電池が製造されるウエハである。太陽電池の効率又は標準照明下で生成される電力量は、一つには、このウエハの品質によって制限される。品質を下げることでウエハの製造コストを低減することは、コスト対電力比を低下させて、このクリーンエネルギー技術の使用可能性をさらに広げることができる。

【0003】

シリコン太陽電池の最高効率は、20% 超の効率の良さである。これらは、電子グレードの単結晶シリコンウエハを用いて作られる。このようなウエハは、チョクラルスキー法を用いて、単結晶シリコンが成長した円筒状のブールから薄いスライスを切断することにより作られる。これらのスライスは、200 μm 未満の厚さとすることができる。単結晶成長を維持するためには、ブールは、例えば熔融液を含むルツボから 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 未満の速度で、ゆっくり成長させなければならない。続く切断工程は、ウエハ毎に、略 200 μm の切断ロス又は切断刃の幅によるロスにつながる。円筒状のブール又はウエハはまた、四角形の太陽電池を製造するために、四角状にされる必要があるかもしれない。四角形にすること及び切断ロスの両方とも、材料浪費及び材料コストの増加につながる。太陽電池が薄くなるにつれて、切断毎のシリコン浪費のパーセンテージは増加する。しかしながら、インゴットのスライス技術の限界は、より薄い太陽電池を得る能力を妨げうる。

【0004】

他の太陽電池は、多結晶シリコンインゴットから切断されたウエハを用いて製造される。多結晶シリコンインゴットは、単結晶シリコンより速く成長させることができる。しかしながら、より多くの欠陥及び粒界が存在するため、結果として生じるウエハの品質は低く、この低品質のウエハにより、太陽電池の効率は低下する。多結晶シリコンインゴットへの切断工程は、単結晶シリコンインゴット又はブールと同じ程度に非効率的である。

【0005】

シリコンの浪費を減少することができる他の方法は、イオン注入後のシリコンインゴットからウエハを劈開することである。例えば、シリコンインゴットの表面下に、水素、ヘリウム又は他の希ガスイオンが注入し、注入領域を形成する。その後熱処理、物理的処理

10

20

30

40

50

、又は化学的処理が行われ、この注入領域に沿ってインゴットからウエハを劈開する。イオン注入によって劈開することにより、切断ロスが生じることなくウエハを製造することができるが、この方法がシリコンウエハを経済的に製造するために採用され得ることは、未だ証明されていない。

【 0 0 0 6 】

さらに他の方法は、熔融液からシリコンの細いリボンを垂直に引き上げ、その後、引き上げられたシリコンが冷却され、シートへ凝固可能な方法である。この方法の引き上げ速度は、 18 mm/min 未満に制限されうる。シリコンの冷却及び凝固の間の除去された潜熱は、垂直なリボンに伴って除去されなければならない。これは結果として、リボンに伴う大きな温度勾配となる。この温度勾配は、結晶シリコンリボンに対して応力を加え、その結果、低品質の多粒子シリコン (multi-grain silicon) となる可能性がある。リボンの幅及び厚みはまた、この温度勾配によって制限されることが出来る。例えば、幅は 80 mm 未満に制限され、厚みは $180\text{ }\mu\text{m}$ に制限されうる。

【 0 0 0 7 】

熔融液から物理的に水平に引き出されたシリコンのリボンもまた、試験されている。一つの方法では、ロッドに取り付けられたシードが熔融物に挿入され、該ロッド及び結果として生じるシートが、るつぼ端の上で、低い角度で引き出される。熔融物がルツボからこぼれるのを防ぐように、角度及び表面張力はバランスが取られる。しかしながら、このような引っ張り工程を開始し、制御することは難しい。シードを挿入するためには、ルツボ及び熔融物に接近されなければならない、これは結果として熱ロスになり得る。追加の熱が、この熱ロスを補償するためにルツボに加えられることができる。これによって、非層流の流れを引き起こし得る、熔融物における垂直な温度勾配を生じることが出来る。また、るつぼ端で形成されるメニスカスの重力及び表面張力のバランスを取るために、おそらく難しいであろう、傾斜角度の調整が行われなければならない。さらにまた、熱は、シート及び熔融物の分離点で除去されるため、潜熱として除去されている熱と、顕熱として除去されている熱と、が急転する。これにより、この分離点で、リボンに沿って大きな温度勾配が生じ、結晶中の転位を引き起こす場合がある。転位及び歪み (warping) は、シートに沿ったこれらの温度勾配によって起こり得る。

【 0 0 0 8 】

余水路 (spillway) を用いるような、熔融液から水平に分離された薄いシートの製造は、未だ行われていない。熔融液から分離によって水平にシートを製造することは、インゴットからスライスされたシリコンよりも安価であり、また、切断ロス又は四角形にすることによるロスをなくすることができる。熔融液から分離によって水平に製造されたシートはまた、水素イオンを用いてインゴットから切断されたシリコン、又は、他の引き出されたシリコンリボンの方法よりも安価にすることができる。さらに、熔融液からシートを水平に分離することは、引き出されたりボンと比較して、シートの結晶品質を改善することができる。このような材料コストを低減できる結晶の成長方法は、シリコン太陽電池のコストを低減するための主な実現ステップとなるであろう。

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 9 】

それでもまだ、不純物または溶質が、熔融液中に堆積する可能性がある。従って、当技術分野においては、熔融液を精製するための改良された装置及び方法が必要である。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 0 】

本発明の第一の態様によれば、精製方法が提供される。当該方法は、チャンバ内の熔融液の第一の部分を、第一の方向に凝固するステップを含む。第一の部分の一部は、第一の方向に溶解される。熔融液の第二の部分は、凝固されたままである。チャンバから流れる熔融液と第二の部分は、チャンバから除去される。

【 0 0 1 1 】

本発明の第二の態様によれば、熔融液を精製する装置が提供される。当該装置は、キャピティを画定しているチャンバを含む。チャンバはまた、注入口及び放出口を画定する。装置はまた、クーラーと、ヒーターと、チャンバに沿って該クーラー及びヒーターを第一の方向に並進する並進機構とを含む。

【 0 0 1 2 】

本発明の第三の態様によれば、シートを形成する装置が提供される。当該装置は、熔融液を形成するように構成されるるつぽを含む。第一のポンプは、るつぽと流体連結する。精製システムは、第一のポンプと流体連結する。第二のポンプは、精製システムと流体連結する。前記第二のポンプと第一のパスに沿って流体連結するシート形成装置は、熔融液を凝固してシートを形成するように構成される。シート形成装置は、熔融液を保持するよう

10

【 0 0 1 3 】

本発明をより理解するために、添付の図面が参照され、参照により本願発明に組み込まれる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 4 】

【図 1】 熔融液からシートを切り離す装置の一例の側面断面図である。

【図 2】 熔融液からシートを切り離す装置の一例の側面断面図である。

【図 3】 ポンプの一例の側面断面図である。

【図 4】 4 A ~ 4 D は、図 3 の例のポンプを用いたポンピングの側面断面図である。

20

【図 5】 フィルタのブロック図である。

【図 6】 粒子トラップの第一実施形態の側面断面図である。

【図 7】 粒子トラップの第二実施形態の側面断面図である。

【図 8】 精製システムの第一実施形態の斜視図である。

【図 9】 9 A ~ 9 F は、図 8 の精製システムを用いた精製工程の段階の正面断面図である。

【図 1 0】 精製システムの第二実施形態の正面断面図である。

【図 1 1】 精製システムの第三実施形態の正面断面図である。

【図 1 2】 溶質濃度を比較したグラフである。

【図 1 3】 シート形成システムの第一実施形態のブロック図である。

30

【図 1 4】 シート形成システムの第二実施形態のブロック図である。

【図 1 5】 シート形成システムの第三実施形態のブロック図である。

【図 1 6】 熔融液からシートを切り離す装置の第一実施形態の上面図である。

【図 1 7】 熔融液からシートを切り離す装置の第二実施形態の上面図である。

【図 1 8】 シート形成システムの第四実施形態のブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 5 】

本願明細書において、装置及び方法の実施形態は、太陽電池と関連して記載されている。しかしながら、これらはまた、例えば、集積回路、フラットパネル又は当業者にとって公知の他の基板を製造するために用いられることができる。さらに、本願明細書において、熔融液はシリコンであるとして記載されているが、当該熔融液には、ゲルマニウム、シリコンゲルマニウム、ガリウム、窒化ガリウム、他の半導体物質又は当業者に公知の他の材料を含むことができる。このように、本発明は、以下に記載する特定の実施形態に限定されるものではない。

40

【 0 0 1 6 】

図 1 は、熔融液からシートを切り離す装置の一実施形態の側面断面図である。シート形成装置 2 1 は、容器 1 6 と、パネル 1 5 及び 2 0 とを有している。容器 1 6 と、パネル 1 5 及び 2 0 は、例えば、タングステン、窒化ホウ素、窒化アルミニウム、モリブデン、黒鉛、炭化ケイ素又は石英とすることができる。容器 1 6 は、熔融液 1 0 を含むように構成される。熔融液 1 0 はシリコンとすることができる。一実施形態では、熔融液 1 0 は、供

50

給部 11 によって補充されることができる。供給部 11 は、固体シリコン、又は、固体シリコンゲルマニウムを含むことができる。他の実施形態では、熔融液 10 は、容器 16 へポンプで供給されることができる。シート 13 は、熔融液 10 上に形成される。一例を挙げると、シート 13 は、熔融液 10 中で少なくとも部分的に浮く。図 1 では、シート 13 は熔融液 10 中で浮くように例示されているが、シート 13 は、少なくとも部分的に熔融液 10 中に沈むか又は熔融液 10 上に浮くことができる。一例を挙げると、シート 13 の 10% だけが、熔融液 10 の最上面より上に突出する。熔融液 10 は、装置 21 内で循環することができる。

【0017】

この容器 16 は、少なくとも一つのチャネル 17 を確定する。このチャネル 17 は熔融液 10 を収容するように構成され、熔融液 10 は、チャネル 17 の第一の位置 18 から第二の位置 19 まで流れる。一例を挙げると、チャネル 17 内の環境は、熔融液 10 での波動を防止するために静止している。熔融液 10 は、例えば圧力差、重力、電磁流体力学駆動、スクリーポンプ及びインペラポンプ、ホイール又は他の運搬方法によって流れることができる。熔融液 10 は、その後、余水路 12 を越えて流れる。この余水路 12 は、傾斜路、堰、小さいダム又はコーナーとすることができ、図 1 に示される実施形態に制限されない。余水路 12 は、シート 13 が熔融液 10 から切り離されることを可能にするように、任意の形状とすることができる。

【0018】

パネル 15 は、この特定の実施形態では、熔融液 10 の表面より下に部分的に延びるように構成される。これにより、熔融液 10 上でシート 13 を形成する際に、波又は波動が、シート 13 を妨害するのを防止することができる。これらの波又は波動は、供給部 11 からの追加的な熔融材料、ポンピング又は当業者にとって公知の他の要因によって形成される可能性がある。

【0019】

一つ of 特定の実施形態では、容器 16 とパネル 15 及び 20 は、約 1687 K (1413.85) よりも僅かに上の温度に維持されることができる。シリコンにとって 1687 K (1413.85) は、凝固点または界面温度を表す。容器 16 とパネル 15 及び 20 の温度を、熔融液 10 の凝固点よりも僅かに上の温度に維持することによって、冷却板 14 は、熔融液 10 上の又は熔融液 10 中のシート 13 の所望の凝固速度を得るために、放射冷却を用いて機能することができる。この特定の実施形態では、冷却板 14 は単一のセグメント又はセクションで構成されているが、他の例では、複数のセグメント又はセクションを含んでもよい。チャネル 17 の底部は、シート 13 上での組成的過冷却又はデンドライトの形成或いは分岐突起の形成を回避するために、境界面で熔融液 10 の小さな垂直温度勾配を生成するように、熔融液 10 の融点よりも上の温度に加熱されることができる。しかしながら、容器 16 とパネル 15 及び 20 は、熔融液 10 の融点よりも上の任意の温度とすることができる。この事は、熔融液 10 が、容器 16 とパネル 15 及び 20 上で凝固することを防止する。

【0020】

装置 21 を、筐体の中で少なくとも部分的に又は完全に覆うことによって、装置 21 は、熔融液 10 の凝固点よりも僅かに上の温度に維持されることができる。筐体が装置 21 を熔融液 10 の凝固点より上の温度に維持する場合、装置 21 を加熱する必要は回避又は低減され、筐体内又は筐体周辺のヒーターが熱口スを補償することができる。この筐体は、非等方性伝導率を有し、等温とすることができる。他の特定の実施形態では、ヒーターは、筐体上又は筐体内ではなく、装置 21 内に配置される。一例を挙げると、容器 16 の異なる領域は、容器 16 内にヒーターを埋め込み、マルチゾーン温度制御 (multi-zone temperature control) を用いることによって、異なる温度まで加熱されることができる。

【0021】

筐体は、装置 21 が配置される場所の環境を制御することができる。特定の実施形態において、筐体は、不活性ガスを含む。この不活性ガスは、熔融液 10 の凝固点よりも上の

10

20

30

40

50

温度に維持されることができる。不活性ガスは、シート 13 の形成工程の期間中に不安定性を引き起こす、熔融液 10 への溶質の追加を低減することができる。

【0022】

装置 21 は、冷却板 14 を具えている。冷却板 14 は、シート 13 が熔融液 10 上で形成する際の熱の除去を可能にする。冷却板 14 の温度が熔融液 10 の凝固点以下になる場合、冷却板 14 は、熔融液 10 上又は熔融液 10 中でシート 13 を凝固することができる。この冷却板 14 は放射冷却を使用することができ、例えば、黒鉛、石英又は炭化ケイ素で製造されることができる。冷却板 14 は、急速に、一様にそして制御された量で、液体の熔融 10 から熱を除去することができる。シート 13 を形成する間、シート 13 の欠陥を防止するために熔融液 10 への妨害は低減されることができる。

10

【0023】

融解熱、及び熔融液 10 の表面上の熔融液 10 からの熱の熱除去は、低い欠陥密度を有するシート 13 を維持すると共に、他のリボン引き上げ法と比較して、シート 13 のより速い製造を可能にする。熔融液 10 の表面上のシート 13 又は熔融液 10 上に浮かぶシート 13 を冷却することは、融解の潜熱がゆっくり、そして大きな水平の流速を有しながら広い領域にわたって除去されることを可能にする。

【0024】

冷却板 14 の寸法は、長さ及び幅の両方で増加させることができる。長さを増加することにより、同じ垂直成長速度に対して熔融液 10 の流速をより速いものにすることができ、結果としてシート 13 の厚みになる。冷却板 14 の幅を増加することにより、より幅広のシート 13 になる。垂直にシートを引き上げる方法とは異なり、図 1 に記載の装置及び方法の実施形態を用いて製造されるシート 13 の幅に対し、固有の物理的な制限は無い。

20

【0025】

一つの特実の実施形態において、熔融液 10 及びシート 13 は、約 1 cm/s の速度で流れる。冷却板 14 は、長さ約 20 cm 及び幅約 25 cm である。シート 13 は、約 20 秒で、約 $100\text{ }\mu\text{m}$ の厚みに成長することができる。従って、シートは、厚みにおいて約 $5\text{ }\mu\text{m/s}$ の速さで成長することができる。厚み約 $100\text{ }\mu\text{m}$ のシート 13 は、約 $10\text{ m}^2/\text{h}$ の速さで製造されることができる。

【0026】

熔融液 10 の温度勾配は、一実施形態において最小化されることができる。これは、熔融液 10 が安定且つ層状に流れることを可能にする。また、シート 13 が、冷却板 14 を用いた熱放射冷却を経て形成されることを可能にする。一つの特実例では、冷却板 14 及び熔融液 10 の間の約 300 K (26.85) の温度差は、熔融液 10 上又は熔融液 10 内で、約 $7\text{ }\mu\text{m/s}$ の速さでのシート 13 の形成を可能にする。

30

【0027】

冷却板 14 から下流とパネル 20 の下のチャネル 17 の領域とは、等温とすることができる。この等温領域は、シート 13 の焼鈍しをする。

【0028】

熔融液 10 上にシート 13 が形成された後、シート 13 は、余水路 12 を用いて熔融液 10 から切り離される。熔融液 10 は、チャネル 17 の第 1 の位置 18 から第 2 の位置 19 まで流れる。シート 13 は、熔融液 10 とともに流れる。シート 13 のこの運搬は、連続動作とすることができる。一実施例では、シート 13 は、熔融液 10 が流れるのと略同じ速度で流れることができる。従って、シート 13 は、熔融液 10 に対して静止している間に形成され、運搬されることができる。余水路 12 の形状又は余水路 12 の方向は、熔融液 10 又はシート 13 の速度プロファイルを変えるために変更されることができる。

40

【0029】

熔融液 10 は、余水路 12 において、シート 13 から切り離される。一実施形態において、熔融液 10 の流れは、熔融液 10 を、余水路 12 を越えて運搬し、また、少なくとも一部の流れが、シート 13 を、余水路 12 を越えて運搬することができる。シート 13 に外部応力が負荷されないため、シート 13 の結晶の破壊を最小化又は防止することができ

50

る。この特定の実施形態において、熔融液 10 は、シート 13 から分離して、余水路 12 を越えて流れる。シート 13 への熱衝撃を防止するために、冷却は、余水路 12 で適用することはできない。一実施形態では、略等温の状態で、余水路 12 における分離が生じる。

【0030】

熔融液 10 は、熔融液 10 上のシート 13 の適切な冷却及び結晶化が可能である速度で流れることができるので、シート 13 は、熔融液に垂直に引き上げられるよりも、装置 21 内でより速く形成されることができる。シート 13 は、熔融液 10 が流れるのと略同じ速さで流れる。これは、シート 13 への圧力を低減する。引き上げによってリボンに対して圧力がかかるため、熔融液に垂直にリボンを引き上げることは、速度において制限される。一実施形態においては、装置 21 のシート 13 は、何の引き上げ圧力も受けない。これにより、シート 13 の品質及びシート 13 の生産速度を上げることができる。

10

【0031】

一実施形態において、シート 13 は、余水路 12 を越えて直進する傾向がある。このシート 13 は、破損を防止するために、場合によっては、余水路 12 を越えて進んだ後に支えられることができる。支持装置 22 は、シート 13 を支えるように構成される。支持装置 22 は、シート 13 を支持するために、例えばガス又は空気ブローを用いてガス圧差を与えることができる。シート 13 が熔融液 10 から切り離された後、シート 13 が配置される場所の環境温度は、ゆっくりと変化させることができる。一例を挙げると、シート 13 が余水路 12 から遠くに移動するにつれて、温度は低下する。

20

【0032】

一例を挙げると、シート 13 の成長、シート 13 の焼鈍し、余水路 12 を用いた熔融液 10 からのシート 13 の分離は、等温環境において行うことができる。余水路 12 を用いる分離と、シート 13 及び熔融液 10 の略等しい流速は、シート 13 に対する応力又は機械的歪を最小化する。この事は、単結晶シート 13 の生産可能性を増加させる。

【0033】

他の実施形態では、磁場が、装置 21 内の熔融液 10 及びシート 13 に与えられる。これにより、熔融液 10 内の振動流を弱めることができ、シート 13 の結晶化を向上させることができる。

【0034】

図 2 は、熔融液からシートを引き出す装置の実施形態の、側面断面図である。この実施形態において、装置 23 は、熔融液 10 からシート 13 を引っ張る。この実施形態では、熔融液 10 はチャネル 17 を循環することはできず、シート 13 は、シードを用いて引っ張られることができる。シート 13 は冷却板 14 で冷却することによって形成され、結果として生じるシートは、熔融液 10 から引っ張られることができる。

30

【0035】

図 1、図 2 の実施形態は両方とも、冷却板 14 を使用する。冷却板 14 の長さにわたる冷却温度の違い、熔融液 10 の流速或いはシート 13 の引き出し速度の違い、装置 21 或いは装置 23 の種々の領域の長さ、又は、装置 21 或いは装置 23 内のタイミングが、工程の制御のために用いられ得る。熔融液 10 がシリコンである場合、装置 21 において、多結晶シート 13 又は単結晶シート 13 が形成されることができる。図 1 又は図 2 のどちらの実施形態においても、装置 21 又は装置 23 は、筐体内に包含されることができる。

40

【0036】

図 1 及び図 2 は、熔融液 10 からシート 13 を形成可能な装置の 2 つの例のみを示している。垂直又は水平なシート 13 の成長の、他の装置又は方法が可能である。本願明細書において記載されている方法及び装置の実施形態は、任意の垂直又は水平なシート 13 の成長の方法又は装置に適用されることができ、単に、図 1、図 2 の特定の実施形態に制限されるものではない。

【0037】

図 3 は、ポンプの実施形態の側面断面図である。ポンプ 30 は、熔融液 10 の凝固点よ

50

り上の温度で、熔融液 10 を運搬するように構成されている。一例を挙げると、この熔融液 10 はシリコンであり、ポンプ 30 は、シリコンの凝固点より上の温度で作動可能である。ポンプ 30 は、熔融液 10 の凝固点より上の温度に維持された、熱的に絶縁されたチャンバ内に配置されることができる。

【0038】

ポンプ 30 は、キャピティ 39 を画定するポンプチャンバ 31 と、第一のパイプ 34 に近い入力バルブ 32 と、第二のパイプ 35 に近い出力バルブ 33 とを含む。第一のパイプ 34 は熔融液 10 の注入口とすることができ、第二のパイプ 35 は熔融液 10 の放出口とすることができる。ガス供給源 36 は、例えば、圧力制御されたアルゴンを供給する。アルゴンを具体的に挙げたが、他の不活性ガス又は希ガスもまた用いることができる。ガス供給源 36 は、ガス供給源 36 からチャンバ 31 へのガス流量を調節するために、ガスバルブを含むことができる。ガスバルブは、チャンバ 31 内へ及びチャンバ 31 外への、両方のガス流を可能にする。熔融液 10 と接触するポンプ 30 の全ての部品は、窒化ホウ素、石英、炭化ケイ素又は窒化シリコンのような、非汚染材料からなるものとすることができる。ポンプ 30 内の圧力が、熔融液 10 を誘引し、所望の圧力で熔融液 10 を供給するであろう。ポンプ 30 は、ガス供給源 36 によって駆動される。このポンプ 30 は、第一のパイプ 34 の圧力 (P_0 と称する) より上の所望の圧力 (P_f と称する) での、熔融液 10 の略連続的な供給を与えることができる。

【0039】

図 3 の実施形態において、入力バルブ 32 及び出力バルブ 33 の両者はチェックバルブであるが、他の種類のバルブが使用されてもよい。チェックバルブは、流体が、バルブを通して一方だけに流れることができる、逆止めバルブすなわち一方のバルブである。この特定の実施形態では、入力バルブ 32 及び出力バルブ 33 は各々、ボディ 37 及びシート 38 を含んでいる。この実施形態では、ボディ 37 は円形であるが、他の形状も可能である。ボディ 37 は、一実施形態ではソケットとすることができるシート 38 に、嵌合するように構成されている。入力バルブ 32 又は出力バルブ 33 がシールされた場合、ボディ 37 は、シート 38 に対して静止する。ボディ 37 は、窒化ホウ素、石英、窒化シリコン又は炭化ケイ素で被覆される又は製造されることができる。

【0040】

図 4 A ~ 図 4 D は、図 3 の実施形態のポンプを用いたポンピングの側面断面図である。図 4 A は、ポンプチャンバ 31 内の圧力 (P) が第一のパイプ 34 内の圧力 (P_0) に略等しい ($P = P_0$)、初期状態を表している。それゆえ、入力バルブ 32 及び出力バルブ 33 は各々閉じられる。図 4 B において、ポンプチャンバ 31 内の圧力は下げられる。これは不等式 $P < P_0 - \rho g h_i$ で表される。ここで、 ρ は熔融液 10 の密度、 g は重力、 h_i は高さであって、この高さとは、熔融液 10 は、ポンプチャンバ 31 に入るために、ライン 40 で示される入力バルブ 32 より上を移動しなければならない高さである。ポンプチャンバ 31 内の圧力が第一のパイプ 34 の圧力より低いので、入力バルブ 32 が開いて、熔融液 10 がポンプチャンバ 31 を満たす。ポンプチャンバ 31 内の低い圧力は、出力バルブ 33 を閉じるように保つ。図 4 C において、ポンプチャンバ 31 の圧力は、ガス供給源 36 からのガスを用いて増加している。ポンプチャンバ 31 内の圧力は、第二のパイプ 35 内の圧力を略超える。これは、不等式 $P > P_f + \rho g h_i$ で表される。ポンプチャンバ 31 内の圧力が第二のパイプ 35 の圧力より高いので、出力バルブ 33 が開いて、熔融液 10 がポンプチャンバ 31 から、空になる。ポンプチャンバ 31 内の高い圧力は、入力バルブ 32 を閉じるように保つ。図 4 D において、ポンプ 30 は、ポンプチャンバ 31 内の圧力が第一のパイプ 34 内の圧力に略等しい ($P = P_0$)、図 4 A の初期状態に戻る。

【0041】

図 4 A ~ 図 4 D に示される工程は、熔融液 10 の流れを生じるために繰り返されることができる。熔融液 10 の流速が、必要に応じて調整されることができる。熔融液 10 の適切な流れ又は速度を確実にするために、一つ又は複数のポンプ 30 が、単体で又は少なく

10

20

30

40

50

とも部分的に同時に用いられることができる。例えば、第一のポンプからの溶解液 10 の流れが終了するときに、第二のポンプからの溶解液 10 の流れが開始するように、2 つのポンプが並行に用いられることができる。これは、一定の溶解液 10 の運搬を確実にすることができる。

【0042】

図 5 は、フィルタのブロック図である。この特定の実施形態では、フィルタ 51 は、より高い圧力ゾーン 50 及びより低い圧力ゾーン 52 の間に位置している。より高い圧力ゾーン 50 及びより低い圧力ゾーン 52 の間の異なる圧力により、フィルタ 51 を通って、方向 53 に向かって溶解液 10 が流れる。フィルタ 51 は、溶解液 10 中の、二酸化ケイ素又は炭化ケイ素のような粒子を除去することができる。このフィルタ 51 は、例えば、窒化シリコンメッシュ又は膜であってもよい。窒化シリコンメッシュ又は膜は、例えば、NanoStructures 社によって製造されるか、又は、DUR-SIN (登録商標) であってもよい。他の実施形態においては、フィルタ 51 は、窒化ホウ素顆粒を含んでもよい。

10

【0043】

図 6 は、粒子トラップの第一実施形態の側面断面図である。溶解液 10 が粒子トラップ 62 の中を流れる際、粒子トラップ 62 は、例えば二酸化ケイ素、ホウ素、鉄又は炭化ケイ素のような粒子 65 を収集する。炭化ケイ素、鉄、ホウ素及び任意の形の二酸化ケイ素は、シリコン溶解液 10 よりも高い密度を有する。例えば、二酸化ケイ素が約 2.65 g/cc の密度を有し、炭化ケイ素が約 3.1 g/cc の密度を有するのに対し、シリコン溶解液 10 は、約 2.49 g/cc の密度を有する。溶解液 10 が、粒子トラップ 62 を通って溶解液入力 60 から溶解液出力 61 へ方向 63 に向かって流れるのに対し、これらの粒子 65 は、粒子トラップ 62 の底に沈む。溶解液 10 は、圧力差によって、方向 63 へ流れることができる。

20

【0044】

図 7 は、粒子トラップの第二実施形態の側面断面図である。特定の粒子 66、例えばカーボン、窒素又は空気は、シリコン溶解液 10 より低い密度を有する。溶解液 10 が、粒子トラップ 64 を通って溶解液入力 60 から溶解液出力 61 へ方向 63 に向かって流れるのに対し、これらの粒子 66 は、粒子トラップ 64 の上部に浮かぶ。溶解液 10 は、圧力差によって、方向 63 へ流れることができる。この粒子トラップ 64 は、溶解液 10 中の揮発性の化合物をも捕らえることができる。粒子トラップ 64 はまた、いくらかの粒子 66 を除去するために、スクープ、ランプ又はスキマーを含むことができる。

30

【0045】

図 8 は、精製システムの第一実施形態の斜視図である。このシステムは、カーボン又は金属のように析出係数が 1 未満である不純物を、溶解液 10 から除去することができる。物質の溶質の析出係数 () は、液固界面近くの固体及び液体の、溶質の平衡濃度の比である。 < 1 の場合、溶質は、固体から液体への拒絶反応を示す。 > 1 の場合、溶質は、液体から固体への拒絶反応を示す。

【0046】

装置 80 は、例えば、窒化ホウ素、石英、炭化ケイ素又は窒化シリコンのような、非汚染材料でできている。装置 80 は、注入口 81 を通った溶解液 10 で満たされる。注入口 81 は、この特定の実施形態においては、装置 80 の上部に在る。溶解液 10 は、排出口 82 を用いて、装置 80 から排出される。排出口 82 は、この特定の実施形態においては、装置 80 の底部に在る。注入口 81 及び排出口 82 は、図 8 で示しただけでなく、装置 80 の同じ側上に、又は装置 80 の他の側に配置してもよい。排出口 82 は、精製工程の期間中に装置 80 の底部を形成する、溶質のスラグ 83 よりも上に在る。スラグ 83 は、溶質の高濃度の凝固ブロックである。

40

【0047】

図 9A ~ 図 9F は、図 8 の実施形態の精製システムを用いた、精製工程の段階の、正面断面図である。図 9A ~ 図 9F は順番に起こるが、他の実施形態及び方法も可能である。溶解液 10 は、注入口 81 を通って、装置 80 を満たす。装置 80 は、少なくとも第一の

50

方向に装置 80 に対して並進（平行移動）可能な、クーラー 90 及びヒーター 91 を含む。一実施形態では、並進は、均一に、且つ凝固及び溶融を可能にするための速度とすることができる。クーラー 90 及びヒーター 91 は、各々、シールド及び絶縁体を有することができる。クーラー 90 及びヒーター 91 への又はクーラー 90 及びヒーター 91 からの熱伝達は、導電性、対流性、放射性又は前記 3 つの熱伝達の形態の任意の組み合わせとすることができる。2 つのクーラー 90 及び 2 つのヒーター 91 が示されているが、当業者に公知であるように、他の数のクーラー 90 及びヒーター 91 とすることが可能である。

【0048】

一例を挙げると、クーラー 90 及びヒーター 91 は、装置 80 を囲むバンド又はリングである。他の例では、クーラー 90 及びヒーター 91 は、装置 80 の近くのプレート又はブロックである。クーラー 90 及びヒーター 91 は、この実施形態のように、並進メカニズムを使用して動作可能に連結することができるか、又は、別々に或いは相互に独立して並進することができる。さらに他の例では、クーラー 90 及びヒーター 91 は、装置 80 内に組み込まれ、時間とともに、異なる加熱又は冷却ゾーンが選択的に活性化される。

【0049】

クーラー 90 及びヒーター 91 は、温度擾乱を最小化するために、相互間及びシステムの残部との間に防熱板を有することができる。一実施形態では、クーラー 90 は、熔融液 10 の凝固点未満の温度で作動することができる。従って、クーラー 90 及び熔融液 10 は、熔融液 10 の凝固点以下の温度で冷却されることができる。ヒーター 91 は、オームヒーター、誘導コイル又は抵抗ヒーターを含むことができるが、他の加熱タイプも可能である。一実施形態では、クーラー 90 へ流れる流体は、クーラー 90 の温度を調節することができるが、他の冷却方法も可能である。

【0050】

図 9A ~ 図 9F の特定の実施形態において、クーラー 90 及びヒーター 91 は、装置 80 に対して並進され、装置 80 内の全ての熔融液 10、例えば上部から底部まで（図 9B から図 9C まで）を凝固することができる。これは、凝固した熔融液 92（斜線部で示される部分）を形成する。

【0051】

多くの溶質は、熔融物中よりも固体物中の方が低い溶解度を有するので、溶質の濃度は、固体中で低減される。凝固した熔融液 92 を形成するために、全ての熔融液 10 が凝固するにつれて、熔融液 10 及び凝固した熔融液 92 間の境界面で、より高い溶質濃度の領域が生成される。この境界面は、装置 80 の一端から他端へゆっくり移動し、最終的に、高い溶質濃度を含むスラグ 83 を形成する。この工程は、析出係数

$$= C_s / C_l < 1$$

を有する全ての溶質によって作用することができる。ここで、 C_s は析出係数であり、 C_s は固液界面での固体中の濃度であり、 C_l は液体中の濃度である。このように、これらの溶質は、固液界面において、液体よりも固体の方が可溶でない。多くの化合物、例えば、銀、アルミニウム、金、銅、カーボン、鉄、リチウム、マンガン、ニッケル、硫黄及びタンタルは、このようにして、熔融液 10 から除去されることができる。当業者にとって公知の他の溶質も、同様に、熔融液から除去されることができる。クーラー 90 及びヒーター 91 のパラメータは、少なくともいくつかの酸素及びホウ素を除去するように構成されることができる。例えば、複数のパス又は凝固及び溶融サイクルは、酸素又はホウ素の除去に必要となりうる。

【0052】

この工程による効果は、図 12 に示されている。図 12 において、クーラー 90 及びヒーター 91 が装置 80 にわたって（x 方向に）並進するにつれて、凝固した熔融液 92 中の溶質濃度（c）は増加する。

【0053】

凝固した熔融液 92 は、その後、熔融液 10 を再形成するために、ヒーター 91 を用いて再溶融されることができる（図 9C から図 9D）。この事は、装置 80 の底部に、高濃

度の溶質を有するスラグ 83 を残すことになる。一実施形態において、この工程は、所望の純度の熔融液 10 を得るために繰り返されることができる。この事は、多数の凝固及び熔融サイクルにわたって、スラグ 83 の再熔融又はスラグ 83 の成長を要求するかもしれない。図 9 E において、熔融液 10 が、排出口 82 によって除去される。図 9 F において、スラグ 83 が、装置 80 から除去される。この事は、装置 80 から（スラグを）落下させることによって、スラグを再熔融して装置 80 から排出又はポンプで汲み出すことによって、又は他の除去方法によって行ってもよい。

【0054】

より高純度の熔融液 10 は、熔融液 10 の組成的過冷却の可能性をより低下させることができる。熔融液 10 の凝固点は、溶質の存在によってさらに低くなりうる。この組成的過冷却は、熔融液 10 が凝固するときに、樹枝状成長を生じさせ得る。高純度の熔融液 10 は、析出物或いはプレートレット (platelet) の形成、又は、任意の凝固した熔融液 10 へ析出物或いはプレートレットが付着する可能性を低下させることができる。さらに、高純度の熔融液 10 は、不純物の減少によって、高効率の太陽電池を生産することができる。このように、一実施形態において熔融液 10 は、 10^{-8} 未満の溶質の質量分率を有する。

【0055】

図 9 A ~ 図 9 F の工程は、重力及び液体シリコン上に浮かぶ個体シリコンの性質を用いるために垂直構成で示されているが、工程は水平に行われることもできる。工程を水平に行うために、装置 80 の寸法は、重力の影響が工程を妨げることがないように減少される。図 11 に示される代替の実施形態では、液体熔融液 10 の小さなゾーンのみが、どの所定時間においても、凝固した熔融液 92 を形成する。これは、凝固ゾーン 110 を形成する。クーラー 90 及びヒーター 91 が装置 80 に対して並進するとともに、この凝固ゾーン 110 は装置 80 の全長の下方に進行する。凝固ゾーン 110 が、装置 80 の一端から他端へ進行するにつれて、凝固ゾーン 110 の上部は、熔融液 10 に再熔融される。凝固した熔融液 92 が上方へ浮かぶのを防ぐために、移動可能なギザギザ状の壁を用いられることができ、これにより、凝固した熔融液 92 は、装置 80 の一端から他端へ移動し続ける。

【0056】

より大きなスループットのために、複数の装置 80 は並行に作動することができる。図 10 は、精製システムの第二実施形態の正面断面図である。この特定の実施形態では、クーラー 90 及びヒーター 91 は一緒に並進されているが、各々個別の装置 80 に対するクーラー 90 及びヒーター 91 が、独立に並進されてもよい。これにより、各装置 80 のタイミングをずらすことで、スループットを増加することができる。

【0057】

図 13 は、シート形成システムの第一実施形態のブロック図である。システム 132 は、るつぼ 130 と、ロードロック 131 と、ポンプ 133 と、少なくとも一つの装置 80 を備える精製システム 134 と、ポンプ 135 及び 136 と、シート形成装置 137 とを含む。このシステム 132 は、シート 13 を形成することができる。ポンプ 133、135、136 は、ポンプ 30 又は何か他のポンプに対応可能である。シート形成装置 137 は、装置 21、装置 23、又は、当業者にとって公知である他の垂直或いは水平なシート形成システムに対応可能である。システム 132 はさらに、フィルタ 51 と、例えば精製システム 134 の上流又はポンプ 135、136 及びシート形成装置 137 との間に在る、粒子トラップ 62 又は粒子トラップ 64 とを含むことができる。この実施形態では、精製された熔融液 10 は、空気へ露出することなくシート形成装置 137 へ供給されるので、供給原料を直接的にシート形成装置 137 に加える方法では存在する、酸化を回避する。

【0058】

一実施形態において、るつぼ 130 を用いて、まず最初に熔融液 10 を形成することができる。この熔融液 10 は、その後、るつぼ 130 からポンプで汲み出される。一実施形

10

20

30

40

50

態において、るつぼ 130 は、非汚染材料、例えばホウ素又は窒化シリコンでできている。他の実施形態において、るつぼ 130 は、例えば炭化ケイ素又は黒鉛のようなカーボンを含む材料から成ることができる。しかしながら、カーボンを含む材料を使用することは、熔融液 10 がその後、フィルターにかけられるか又は精製されることを要求し得る。るつぼ 130 はまた、酸素を含有する化合物、例えば二酸化ケイ素又は石英から成ることができる。るつぼ 130 は、ヒーターを含むことができる。これらは、例えば、導電ヒーター、抵抗ヒーター、又はオームヒーターとすることができる。一実施形態においては、熔融液 10 の凝固点より上の均一な温度が熔融液 10 全体にわたって維持されることができるよう、そして、熔融液 10 を熔融するのに必要なエネルギーを最小化するために、るつぼ 130 は熱的に絶縁される。

10

【0059】

このるつぼ 130 は、熔融液 10 への供給原料の追加を可能にするために、ロードロック 131 を含むことができる。ロードロック 131 は、るつぼ 130 に組み込まれるか、又は、るつぼ 130 から別体のユニットとすることができる。供給原料、例えばシリコンの導入後、ロードロック 131 及びるつぼ 130 は閉じられ、空気を排出することができる。るつぼ 130 はその後、ガス供給源 138 を用いて、例えばアルゴン又は他の希ガスのような不活性ガスで満たされ、供給原料を熔融液 10 に熔融するために加熱されることができる。

【0060】

酸素は、酸化シリコンの蒸発により、るつぼ 130 内の熔融液 10 から除去されることができる。酸化シリコンは、シリコンの融点より下の温度では、不安定な場合がある。一実施形態では、ロードロック 131 又はるつぼ 130 から酸素を除去するために、アルゴン及び酸化シリコンは一回以上パージされ、アルゴンは一回以上補充される。ロードロック 131 又はるつぼ 130 の壁が、炭化ケイ素表面又は黒鉛ヒーター内のようなカーボンを含む場合、一酸化炭素を生ずることがありうる。この一酸化炭素は、熔融液 10 の汚染を防ぐために送出される必要がある。一実施形態において、例えば水素が、脱酸剤として作用するか又は熔融液 10 からの酸素の除去を強化するために、ロードロック 131 又はるつぼ 130 に加えられることができる。

20

【0061】

一例を挙げると、供給原料、例えばシリコンが、るつぼ 130 のロードロック 131 に加えられる。このシリコンは、様々なグレード及び様々な形状とすることができる。一つの特定制形態において、大きな酸化表面を有するシリコンペレットが用いられることができる。ロードロック 131 はその後、閉じられ、排気され、酸素又は他のガスを除去するためにポンプで真空に汲み出される。供給原料がるつぼ 130 へ運搬され、ロードロック 131 及びるつぼ 130 は不活性ガス、例えばアルゴンによって満たされて、熔融液 10 を形成するために供給原料が熔融される。アルゴンガスは、酸化シリコン及び一酸化炭素汚染を除去するために、必要に応じてパージされる。ポンプ 133 は、その後、精製システム 134 へ熔融液 10 を汲み出す。熔融液 10 は、精製システム 134 へ入る前に、フィルタ 51、粒子トラップ 62 又は粒子トラップ 64 を通って汲み出されることができる。図 9A ~ 図 9F に示したように、装置 80 は熔融液 10 で満たされ、熔融液 10 の精製を開始する。精製された熔融液 10 は、ポンプ 135、136 のうちの少なくとも一つを満たし、制御された速さでシート形成装置 137 へ供給される。この制御された速さは、シート 13 を形成するシート形成装置 137 での晶析速度に合わせることができる。

30

40

【0062】

一例を挙げると、熔融液 10 が例えばポンプ 135 から汲み出される一方で、ポンプ 136 を満たす熔融液 10 が精製システム 134 で精製される。熔融液 10 をシート形成装置 137 へ連続的に運搬することができるように、この精製は、始めに満たされているポンプ 135 が空になる前又は空になる時に、ポンプ 136 がシート形成装置 137 への汲み出しを開始するように調節される。

【0063】

50

図 1 4 は、シート形成システムの第二実施形態のブロック図である。このシステム 1 4 0 は、シート形成装置 1 3 7 からポンプ 1 3 6 へのリサイクル 1 4 1 を含む。これは、シート形成装置 1 3 7 内での熔融液 1 0 の連続的な循環を可能にする。

【 0 0 6 4 】

図 1 5 は、シート形成システムの第三実施形態のブロック図である。このシステム 1 5 0 は、シート形成装置 1 3 7 から精製システム 1 3 4 及びポンプ 1 3 6 まで点線 1 5 1 で示される、リサイクルを含む。代替の実施形態においては、リサイクルは、精製システム 1 3 4 のみと流体連結する。これは、シート形成装置 1 3 7 内での熔融液 1 0 の連続的な循環を可能にし、シート形成装置 1 3 7 又はシステム 1 5 0 のどこか他の場所に加えられた、任意の溶質の熔融液 1 0 を精製する。従って、熔融液 1 0 は、溶質又は不純物によって増強することはない。シート 1 3 がシート形成装置 1 3 7 によって生成される場合、1 未満の析出係数を有する溶質は、以下の方程式に従って、熔融液 1 0 において増強する。

10

【 数 1 】

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{(dV/dt)}{V_0} x_0 - \frac{(dV/dt)}{V_0} kx(t)$$

ここで、 V_0 はるつぼ 1 3 0 又はシート形成装置 1 3 7 の体積であり、 x は熔融液 1 0 の溶質濃度であり、 k は溶質の析出係数であり、 V は凝固体積速度（一例において、熔融液 1 0 のシート形成装置 1 3 7 への入力速度と等しくすることができる）である。例えば、

20

るつぼ 1 3 0 内において、 $x(t)$ は x_0 から変化する。

【 0 0 6 5 】

例えば、熔融液 1 0 が 1 . 6 L で生産サイズ化された、 $10\text{ m}^2/\text{h}$ で $100\text{ }\mu\text{m}$ の厚さのシート 1 3 を生産するシステムにおいて、析出係数が 0 . 0 1 未満の溶質の濃度は、約 1 6 時間で一桁増加する。シート形成装置 1 3 7 でシート 1 3 が生産されるにつれ、精製システム 1 3 4 内の熔融液 1 0 を精製するために使用される同現象によって、溶質は増強される。このように、これらの溶質は、シート形成装置 1 3 7 でシート 1 3 の生産によって“収集される”ため、全ての溶質が、同じ速度で除去されることができる。これは、シート 1 3 を生産する一方で、純粋な熔融液 1 0 の連続状態又は熔融液 1 0 の低溶質濃度を可能にする。

30

【 0 0 6 6 】

さらに他の実施形態において、精製システム 1 3 4 に類似の他の精製システムは、シート形成装置 1 3 7 のみに接続している。これにより、シート形成装置 1 3 7 のみに流れが戻る。この事は、リサイクルストリームでの溶質の除去が、精製システム 1 3 4 からのストリームと切り離されることを可能にする。

【 0 0 6 7 】

図 1 6 は、シートを熔融液から分離する装置の第一実施形態の上面図である。この実施形態の装置 2 1 は、ポンプ 1 6 0 を含む。2 つのポンプ 1 6 0 が図 1 6 に示されているが、他の実施形態では 1 つのポンプ 1 6 0 又は 2 つより多いポンプ 1 6 0 を使用してもよい。これらのポンプ 1 6 0 は、図 3 のポンプ 3 0 に対応可能である。ポンプ 1 6 0 によって、熔融液 1 0 は、方向 1 6 2 に、それから壁 1 6 3 を回り方向 1 6 1 に、そして余水路 1 2 を超えて流れる。これらのポンプ 1 6 0 は、装置 2 1 内の熔融液 1 0 の、途切れることのない流れを提供することができる。熔融液 1 0 は、ポンプ 1 6 0 を用いて、より高い垂直位置へ汲み出されることができる。

40

【 0 0 6 8 】

図 1 7 は、シートを熔融液から分離する装置の第二実施形態の上面図である。この実施形態の装置 2 1 は、ポンプ 1 6 0 を含む他に、ユニット 1 7 0 を含む。これらのユニット 1 7 0 は、例えば図 5 ~ 図 7 からのフィルタ 5 1、粒子トラップ 6 2 又は粒子トラップ 6 4 に対応可能である。ユニット 1 7 0 はまた、当業者にとって公知の他の濾過システムであってもよい。

50

【0069】

図18は、シート形成システムの第四実施形態のブロック図である。システム180は、るつぼ130と、ロードロック131と、ガス供給源138と、ポンプ133及び181と、シート形成装置137とを含む。このシステム180は、シート13を形成することができる。ポンプ133及び181は、ポンプ30又は何か他のポンプに対応可能である。シート形成装置137は、装置21、装置23、又は、当業者にとって公知の他の垂直又は水平なシート形成システムに対応可能である。システム180はさらに、例えばシート形成装置137又はポンプ181の上流に在るフィルタ51、粒子トラップ62又は粒子トラップ64を含むことができる。

【0070】

10

システム180はさらに、バルブ182及び放出パイプ183を含む。この例で、熔融液10は、電子グレードのシリコンであってもよい。熔融液10は、ポンプ181を用いて、シート形成装置137を通して絶えず循環される。熔融液10の溶質濃度レベルが特定の閾値より上回るとき、又は、シート13上の樹枝状成長の前に、バルブ182が開き、放出パイプ183を用いてシート形成装置137から熔融液10が排出される。一例を挙げると、この閾値は、 10^{-8} を超える溶質の質量分率である。これは、熔融液10の不安定性及びシート13上の樹枝状成長を引き起こすのに十分な溶質の質量分率とすることができる。

【0071】

るつぼ130は、シート形成装置137に対して、ポンプ133を用いてシート形成装置137へ汲み出される新たな熔融液10を生成する。このポンプでの汲み出しは、シート形成装置137の連続的な作動を可能にする。一例を挙げると、この新たな熔融液10は、約 10^{-10} の溶質の質量分率を有することができる。この場合、放出パイプ183を用いて排出される熔融液10は、低グレードシリコンとすることができ、他の目的に使用されることができる。例えば、放出パイプ183を用いて排出されるこの熔融液10は、ソーラーグレードシリコンであってもよい。

20

【0072】

一つの特の実施形態では、システム180はさらに、低溶質濃度を有する熔融液10のための貯水部（リザーバ）を含む。放出パイプ183を用いて熔融液10が排出されるため、貯水部は、シート形成装置137の連続的な作動を可能にする。この貯水部は、ポンプ133の下流かつシート形成装置137の上流に配置されることができる。

30

【0073】

ここで開示する内容は、本願明細書において記載されている特定の実施形態の範囲に制限されるものではない。実際、前述の記載及び添付の図面から、本願明細書において記載される内容に加えて他の種々の実施形態及び変更が行われることは、当業者にとって明らかである。このように、他の実施形態及び変更がここで開示する範囲内において行われる。さらに、本願明細書では、特定の目的のために、特定の環境における特定の実装による内容を開示しているが、当業者はその有用性がこれらに制限されないこと、そして、ここで開示の内容が多くの目的のために多くの環境において有益に実装可能であることを認識する。従って、ここで開示される請求項は、広範な幅及び精神をからみて解釈されなければならない。

40

【図 1】

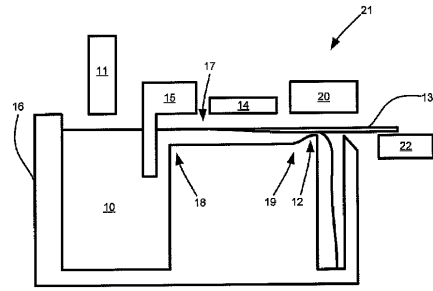


FIG. 1

【図 2】

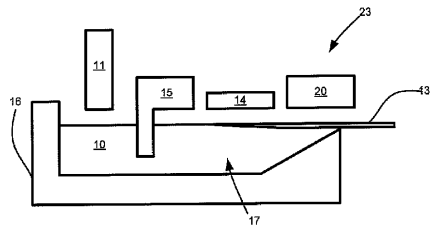


FIG. 2

【図 3】

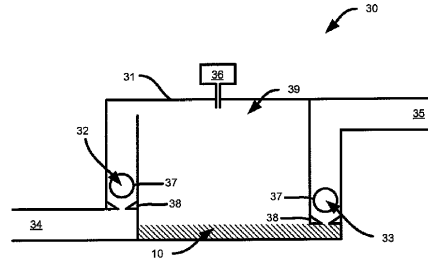
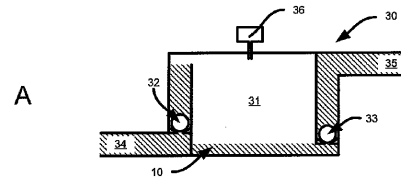
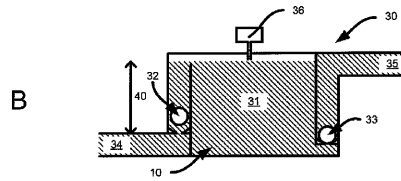


FIG. 3

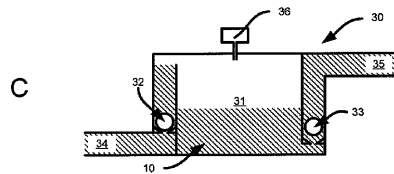
【図 4 A】



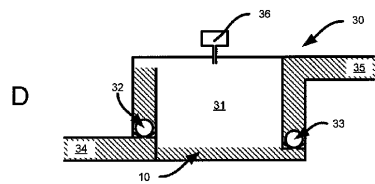
【図 4 B】



【図 4 C】



【図 4 D】



【図 5】

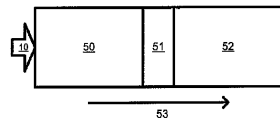


FIG. 5

【図 6】

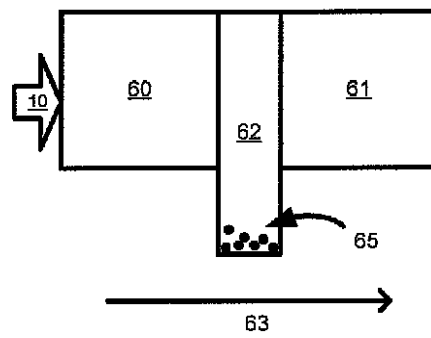


FIG. 6

【図 7】

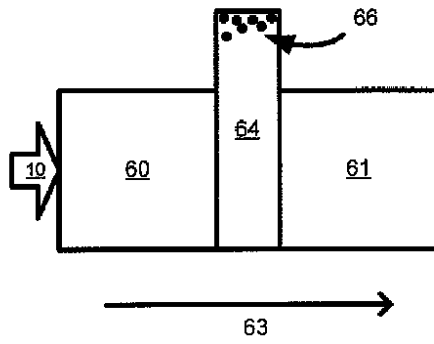


FIG. 7

【図 8】

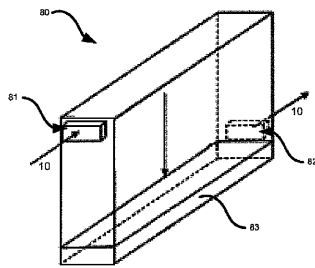
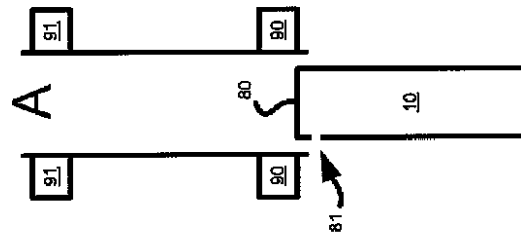
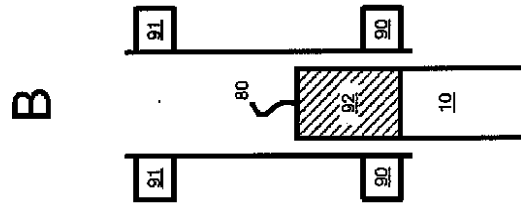


FIG. 8

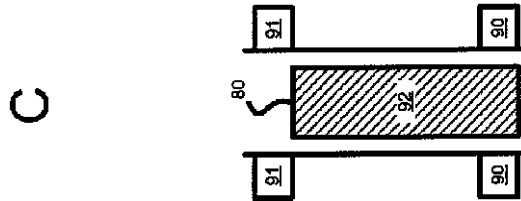
【図 9 A】



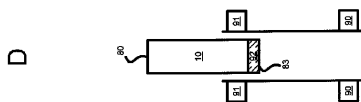
【図 9 B】



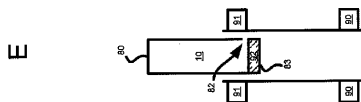
【図 9 C】



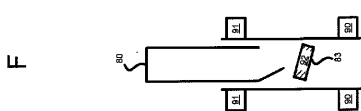
【図 9 D】



【図 9 E】



【図 9 F】



【図 10】

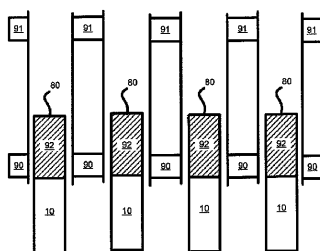


FIG. 10

【図 11】

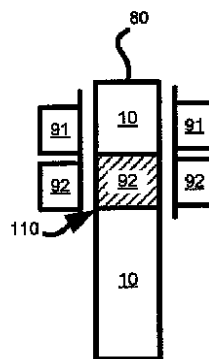
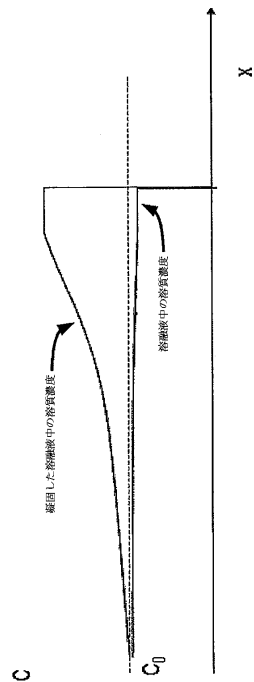


FIG. 11

【図 12】



【図 13】

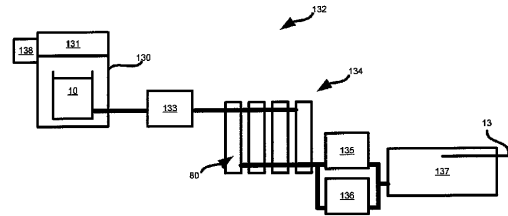


FIG. 13

【図 14】

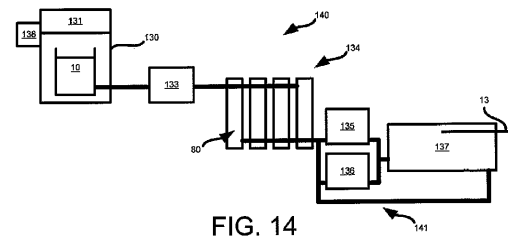


FIG. 14

【図 15】

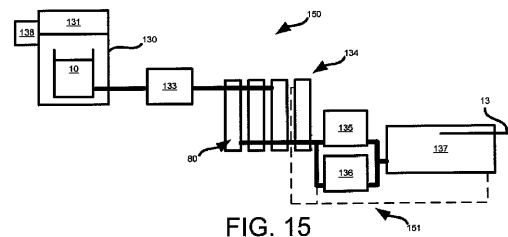


FIG. 15

【図 16】

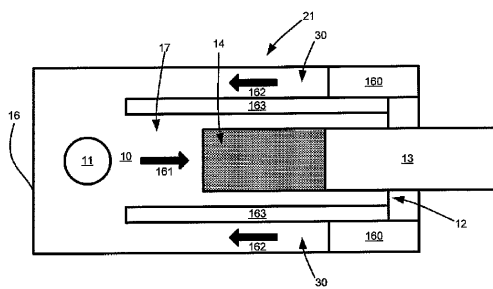


FIG. 16

【図 17】

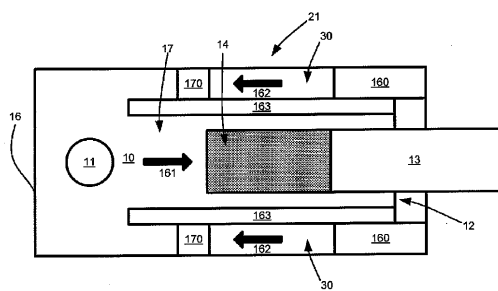


FIG. 17

【図 18】

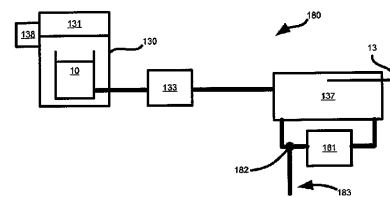


FIG. 18

フロントページの続き

- (72)発明者 フランク シンクレア
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01930 グローチェスター ドリー ロード 35
- (72)発明者 フレデリック カールソン
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01930 グローチェスター ドリー ロード 35
- (72)発明者 ジュリアン ジー ブレイク
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01930 グローチェスター ドリー ロード 35

審査官 西山 義之

- (56)参考文献 特開昭56-022620(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C01B 33/00 - 33/193
C30B 28/04