

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5771271号
(P5771271)

(45) 発行日 平成27年8月26日 (2015. 8. 26)

(24) 登録日 平成27年7月3日 (2015. 7. 3)

(51) Int. Cl.

F I

C 3 O B 15/06 (2006. 01)
 C 3 O B 29/06 (2006. 01)
 C O 1 B 33/02 (2006. 01)
 H O 1 L 21/208 (2006. 01)

C 3 O B 15/06
 C 3 O B 29/06 5 O 1 Z
 C 3 O B 29/06 5 O 3
 C O 1 B 33/02 Z
 H O 1 L 21/208 S

請求項の数 13 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2013-509053 (P2013-509053)
 (86) (22) 出願日 平成23年3月2日 (2011. 3. 2)
 (65) 公表番号 特表2013-530911 (P2013-530911A)
 (43) 公表日 平成25年8月1日 (2013. 8. 1)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2011/026790
 (87) 国際公開番号 W02011/139402
 (87) 国際公開日 平成23年11月10日 (2011. 11. 10)
 審査請求日 平成26年1月24日 (2014. 1. 24)
 (31) 優先権主張番号 13/037, 789
 (32) 優先日 平成23年3月1日 (2011. 3. 1)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 61/332, 073
 (32) 優先日 平成22年5月6日 (2010. 5. 6)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

前置審査

(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
 (74) 代理人 100134577
 弁理士 石川 雅章
 (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】 ガスジェットを用いる融液の表面からのシートの取り出し

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

シート形成方法であって、
 材料のシートを、容器内に収容される該材料の融液の表面上に水平に平行移動させるス
 テップと、
 前記融液のメニスカスを圧力セル内に含むステップであって、前記メニスカスは前記容
 器のエッジと前記シートの下面との間に形成されるステップと、
 前記圧力セル内に含まれる第 1 のガスジェットからのガスを前記メニスカスに向けるス
 テップと、
 前記シートを前記融液から取り出すステップと、
 を含み、

前記圧力セル内の圧力は、大気圧より大きい、シート形成方法。

【請求項 2】

前記ガスを向けるステップは、前記メニスカスの前記融液表面の局所的な圧力を高める
 ように設定される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記シート及び前記融液は、等しい速度で平行移動する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

第 2 のガスジェットからの前記ガスを向けるステップを、さらに含み、それにより、前
 記第 1 のガスジェットからの前記ガスを向ける前記ステップにより生成される力のバラ

スを取る、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記材料は、シリコン又はシリコンとゲルマニウムである、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記ガスは、前記メニスカスを安定させるように設定される圧力を有する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記シートを取り出すステップは、前記シートをスピルウェイで前記融液から分離するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

シート形成方法であって、

容器内に収容される材料の融液に種結晶を付与するステップと、

前記融液のメニスカスを圧力セル内に含むステップであって、前記メニスカスは前記容器のエッジで前記種結晶及び前記融液に対して形成されるステップと、

前記圧力セル内に含まれる第 1 のガスジェットからのガスを前記メニスカスに向けるステップと、

前記融液の一部を凍結させて、前記融液の表面上に前記材料のシートを水平に形成するステップと、

前記シートを前記融液から取り出すステップと、

を含み、

前記圧力セル内の圧力は、大気圧より大きい、シート形成方法。

【請求項 9】

前記シート及び前記融液を等しい速度で流すステップを、さらに含む、請求項 8 に記載のシート形成方法。

【請求項 10】

前記材料は、シリコン又はシリコンとゲルマニウムである、請求項 8 に記載のシート形成方法。

【請求項 11】

前記ガスは、前記メニスカスを安定させるように設定される圧力を有する、請求項 8 に記載のシート形成方法。

【請求項 12】

前記シートを取り出すステップは、前記シートをスピルウェイで前記融液から分離するステップを含む、請求項 8 に記載のシート形成方法。

【請求項 13】

前記ガスを向けるステップは、前記メニスカスの前記融液表面の局所的な圧力を高めるように設定される、請求項 8 に記載のシート形成方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、融液からのシートの形成に関し、特に、融液からのシートの取り出しに関する。

【背景技術】

【0002】

シリコンのウエーハ又はシートは、例えば、集積回路又は太陽電池の産業で用いることができる。太陽電池の需要は、再生可能なエネルギー源の需要が増加するにつれて、増え続けている。太陽電池の大多数は、単結晶シリコンウエーハのようなシリコンウエーハから作られる。現在、結晶シリコン太陽電池の主要コストは、その太陽電池が作られるウエーハにかかっている。太陽電池の効率、すなわち、標準照射下で生成される電力量は、一つには、このウエーハの品質により制限される。太陽電池の需要が増えるにつれて、太陽電池産業は、コスト/電力比を下げることを 1 つの目標としている。品質を低下させずに

10

20

30

40

50

、ウエーハの生産コストを削減することにより、コスト／電力比を下げ、このクリーンエネルギー技術のより広い有用性を可能にする。

【 0 0 0 3 】

最も高い効率のシリコン太陽電池は、20%より大きい効率を有する。これらは、エレクトロニクスグレードの単結晶シリコンウエーハを用いて作られる。そのようなウエーハは、チョクラスキー法を用いて成長させた単結晶シリコンの円筒状ブルから薄いスライスを切断することにより、作ることができる。これらのスライスの厚さは、200 μm 未満とすることができる。単結晶成長を維持するために、ブルは、融液を収容しているつばから、例えば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。後続の切断プロセスは、ウエーハ毎に約200 μm の切り口損失、すなわち、ソー・ブレードの幅による損失をもたらす。円筒ブルやウエーハは、正方形の太陽電池を作るために、四角にする必要もある。正方形にすることと切り口の損失は、両方とも、材料の無駄と材料のコストの増加をもたらす。太陽電池がより薄くなるにつれて、1カット毎にシリコンの無駄の割合が増大する。インゴットのスライス技術に対する限界は、より薄い太陽電池を得る能力を妨げることになる。

10

【 0 0 0 4 】

他の太陽電池は、多結晶シリコンインゴットから切断したウエーハを用いて作られる。多結晶シリコンインゴットは、単結晶シリコンインゴットより速く成長する。しかしながら、得られるウエーハの品質は、より多くの欠陥と結晶粒界があるため、低下し、この低品質は、太陽電池の効率を下げることになる。多結晶シリコンインゴット用の切断プロセスは、単結晶シリコンのインゴット、すなわち、ブルと同程度に非効率である。

20

【 0 0 0 5 】

さらに別の解決法は、シリコンの薄いリボンを融液から垂直に引っ張り、次いで、引っ張ったシリコンを冷やして、シートに凍結させる方法である。この方法の引っ張り速度は、約18 mm / 分未満に制限される。シリコンの冷却及び凍結の間に放出される潜熱は、垂直なリボンに沿って放出しなければならない。このために、リボンに沿う温度勾配が大きくなる。この温度勾配は、結晶シリコンリボンに応力を加え、多粒子シリコンの品質を損ねることになる。リボンの幅及び厚さも、この温度勾配のために、制限される。例えば、幅は80 mm未満に制限され、厚さは180 μm 未満に制限される。

30

【 0 0 0 6 】

融液から水平方向にシートを形成することによって、インゴットからスライスされるシリコンよりもコストを低くすることができ、また、切り口損失又は正方形にすることによる損失を排除することができる。融液から水平方向に形成されるシートは、また、融液から垂直に引っ張り出されるシリコンのリボンより、コストを低くすることができる。さらに、融液から水平方向に形成されるシートは、融液から垂直に又はある角度で引っ張り出されるシリコンのリボンに比べて、シートの結晶品質を改善することができる。材料コストを低減し得る、このような結晶成長法は、シリコン太陽電池のコストを低減するための主要な実現ステップとなり得るであろう。

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

40

【 0 0 0 7 】

融液から物理的に引っ張り出したシリコンの水平なリボンをテストした。一方法では、ロッドに取り付けた種結晶を融液中に挿入し、ロッド及び得られるシートを、るつぼのエッジから低角度で引っ張る。角度、表面張力及び融解レベルは、融液がるつぼからこぼれないように、バランスを取る。しかしながら、そのような引っ張りプロセスを開始し、そして制御することは困難である。第一に、るつぼのエッジに形成されるメニスカスの重力と表面張力とのバランスを取るための、傾斜角度の調整は困難である。第二に、シートと融液との間の分離点でのリボンに沿う温度勾配は、冷却プレートが、この分離点に近い場合、結晶中に転位を生じさせる。第三に、融液上のシートの傾斜により、凍結先端部に応力をもたらし得る。この凍結先端部は、シートが最も薄く、最も壊れやすい所であるため

50

、シート内に転位又は破損が生じ得る。第四に、低角度を得るために、複雑な引っ張り装置を必要とする。

【 0 0 0 8 】

シートは、融液をこぼさずに、融液の表面から取り出さなければならない。従って、シートの下側と融液との間のメニスカスは、安定したままとするか又は容器に付着したままとしなければならない。これまでは、メニスカスの安定性を維持するために、メニスカスの融液側における圧力を低減させていた。一例では、ロー アングル シリコン シート (Low Angle Silicon Sheet: L A S S) 方法は、シートを小さい角度に傾斜させて、融液上に引っ張りあげた。これは、融液内に大気圧に対し負圧を生成し、メニスカス間に圧力を与えた。別の例では、融液はスピルウェイ (spillway) のエッジを越えて流れ得る。スピルウェイのネイブ (nape) における流体の滴りは、メニスカスを安定させるように、融液内に負圧を与える。しかしながら、融液からシートを取り出す改善方法、特に、局所的な圧力で融液からシートを取り出す改善方法に対する技術のニーズがある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 9 】

本発明の第 1 の態様によれば、シート形成装置が提供される。シート形成装置は、材料の融液を保持するように構成された容器を備える。冷却プレートは、融液に近接して配置され、冷却プレートに近接する融液上に水平となる材料のシートを形成するように構成される。第 1 のガスジェットは、ガスを容器のエッジに向けるように構成される。

【 0 0 1 0 】

本発明の第 2 の態様によれば、シート形成方法が提供される。シート形成方法は、材料のシートを、材料の融液の表面上に水平に平行移動させるステップを含む。第 1 のガスジェットからのガスを融液のメニスカスに向けて、シートを融液から取り出す。

【 0 0 1 1 】

本発明の第 3 の態様によれば、シート形成方法が提供される。シート形成方法は、材料の融液に種結晶を付与するステップを含む。種結晶に対して形成される融液のメニスカスに第 1 のガスジェットからのガスを向ける。融液の一部を凍結させて、融液の表面上に材料のシートを水平に形成する。そして、シートを融液から取り出す。

【 0 0 1 2 】

本発明をより良く理解するために、以下に、添付の図面を参照して説明する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 3 】

【図 1】シートを融液から分離する装置の実施形態の側断面図である。

【図 2】シートを融液から分離する装置の第 2 の実施形態の側断面図である。

【図 3】L A S S 用のメニスカス安定化の側断面図である。

【図 4】ガス衝突を用いてメニスカスを安定化させる実施形態の側断面図である。

【図 5】ガスジェットからの圧力分布を例示する断面図である。

【図 6】スピルウェイと共にガス衝突を用いてメニスカスを安定化させる実施形態の断面図である。

【図 7】シートの形成を伴うガスジェットの第 1 の実施形態の側断面図である。

【図 8】シートの形成を伴うガスジェットの第 2 の実施形態の側断面図である。

【図 9】シートの形成を伴うガスジェットの第 3 の実施形態の側断面図である。

【図 10】A ~ D は、ガスジェットの安定化により実現される種結晶の種付けを例示する図である。

【図 11】ガスジェットの実施形態の断面図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

本装置及び方法の実施形態を太陽電池に関連して本明細書で説明する。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、LED 又は当業者に既知の他の基板を製造するために、用いることができる。さらに、本明細書では、融液をシリコンとし

て説明するが、融液は、ゲルマニウム、シリコン及びゲルマニウム、ガリウム、窒化ガリウム、他の半導体材料又は当業者に既知の他の材料を含むことができる。従って、本発明は、以下に説明する特定の実施形態に限定されない。

【0015】

図1は、シートを融液から分離する装置の実施形態の側断面図である。シート形成装置21は、容器16を有する。容器16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16は、融液10を収容できるように構成されている。この融液10は、シリコンとすることができる。シート13は融液10の上に形成される。一例では、シート13は、融液10内に、少なくとも部分的に浮かぶ。図1では、シート13は、融液10中に浮いているように例示してあるが、シート13は、融液10中に少なくとも部分的に沈むか、又は、融液10の表面に浮かんだりする。シート13が位置付けられる深さは、シート13と融液10との相対密度に部分的に基づく。一例では、シート13の僅か10%が、融液10の表面から突き出る。融液10は、シート形成装置21内で循環させることができる。

10

【0016】

この容器16は、少なくとも1つの流路17を画定する。この流路17は融液10を保持するように構成され、融液10は流路17の第1の点18から第2の点19へ流れる。融液10は、例えば、圧力差、重力、ポンプ又は他の移送方法により、流すことができる。次に、融液10はスピルウェイ12を越えて流れる。このスピルウェイ12は、斜面、堰、出っ張り、小さな堰堤又は隅部とすることができるが、図1に例示の実施形態に限定されない。スピルウェイ12は、シート13を融液10から分離することを可能にする任意の形状とすることができる。

20

【0017】

特定の一実施形態では、容器16は、約1685 Kより少し高い温度に維持することができる。シリコンの場合、1685 Kは、凍結温度又は界面温度を表す。容器16の温度を融液10の凍結温度より少し高い温度に維持することにより、冷却プレート14は、放射冷却を利用して、融液10の上又は中におけるシート13の所望の凍結速度を得るように、機能することができる。この特定の実施形態の冷却プレート14は、単一のセグメント又はセクションから成るが、多数のセグメント又はセクションを含むこともできる。流路17の底部は、融液10の溶融温度以上で加熱し、界面における融液10に僅かな垂直温度勾配を生成して、構成上の過冷却や、シート13上にデンドライト又は分岐突起を形成するのを防ぐことができる。しかしながら、容器16は、融液10の溶融温度を超える任意の温度とすることができる。これにより、融液10が容器16の上で凝固するのを防ぐ。

30

【0018】

シート形成装置21は、このシート形成装置21を少なくとも部分的に又は全体的に包囲体内に入れることにより、融液10の凍結温度より少し高い温度に維持することができる。包囲体がシート形成装置21を融液10の凍結温度より上の温度に維持する場合には、シート形成装置21を加熱する必要性を回避する又は減らすことができ、包囲体の中又は周囲のヒーターは熱損失を補うことができる。この包囲体は、異方性伝導率で等温にすることができる。別の特定の実施形態では、ヒーターを包囲体の上又は中に配置しないで、むしろ、シート形成装置21の中に配置する。一例では、容器16の種々の領域は、ヒーターを容器16内に組み込み、マルチゾーン温度制御を用いることにより、種々の温度に加熱することができる。

40

【0019】

包囲体は、シート形成装置21が配置される環境を制御することができる。特定の実施形態では、包囲体は不活性ガスを含む。この不活性ガスは、融液10の凍結温度より高い温度に維持することができる。不活性ガスは、シート13の形成中に構成上の不安定性を引き起こし得る溶質が融液10中に加えられるのを減らすことができる。

【0020】

50

冷却プレート１４は、シート１３を融液１０の上に形成し得るようにするように熱除去を可能にする。冷却プレート１４は、この冷却プレート１４の温度を融液１０の凍結温度より低く下げた場合、シート１３を融液１０の上又は中で凍結させることができる。この冷却プレート１４は、放射冷却を利用することができ、例えば、黒鉛、石英又は炭化ケイ素から作ることができる。シート１３の形成の間に融液１０への外乱を低減させて、シート１３の欠陥を防ぐことができる。融液１０の表面上のシート１３又は融液１０上に浮いているシート１３を冷却することにより、比較的大きなシート１３の引き出し速度を保ちながら、融解潜熱をゆっくりと広範囲にわたって取り出すことができる。

【００２１】

シート１３が融液１０上に形成されたら、シート１３をスピルウェイ１２を用いて融液１０から分離する。融液１０は流路１７の第１の点１８から第２の点１９へ流れる。シート１３は融液１０と一緒に流れる。このシート１３の移送は連続動作とすることができる。一例では、シート１３は、融液１０が流れるのとはほぼ同じ速度で流れる。従って、シート１３は、融液１０に対しては静止したままで、形成し、移送することができる。スピルウェイ１２の形状又は配向は、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、変更することができる。

【００２２】

融液１０はスピルウェイ１２の箇所でシート１３から分離される。一実施形態では、融液１０の流れは、融液１０をスピルウェイ１２を越えて移送し、またその流れの少なくとも一部が、シート１３をスピルウェイ１２を越えて移送させることができる。これは、外部応力がシート１３に全くかからないため、シート１３の破損を最小限にするが、又は、防ぐことができる。もちろん、シート１３は、引っ張るか、又は、いくらかの外力を加えることもできる。この特定の実施形態では、融液１０は、シート１３から離れて、スピルウェイ１２を越えて流れる。シート１３への熱衝撃をなくすために、スピルウェイ１２は冷却しないようにする。一実施形態では、スピルウェイ１２での分離は、等温に近い状態で行う。一実施形態では、シート１３は、スピルウェイ１２を越えて真っすぐに進む傾向にある。このシート１３は、破損を防ぐために、いくつかの例では、スピルウェイ１２を越えて進んだ後に、支持するのがよい。

【００２３】

もちろん、冷却プレート１４の長さにはわたる種々の冷却温度、融液１０の種々の流速やシート１３の引っ張り速度、シート形成装置２１の様々な部分の長さ、又は、シート形成装置２１内のタイミングは、プロセス制御のために用いることができる。融液１０がシリコンである場合、シート１３は、シート形成装置２１を用いることにより、多結晶の又は単結晶のシートとなり得る。図１は、シート１３を融液１０から形成することができるシート形成装置の一例に過ぎない。シート１３を水平に成長させる他の装置又は方法も可能である。本明細書で説明する実施形態は、任意のシート１３を水平に成長させる装置又は方法に適用することができる。従って、本明細書で説明する実施形態は、図１の特定の実施形態だけに限定されない。例えば、図２は、シートを融液から分離する装置の第２の実施形態の側断面図である。シート形成装置３１において、融液１０は容器１６内に収容されている。シート１３は、冷却プレート１４による形成後に、融液１０から引っ張り出される。図２では水平であるが、シート１３は、融液１０に対してある角度を成すこともできる。図１～２の実施形態では、融液１０は、例えばシート形成装置２１又は３１の側面の周りや云ったような、シート形成装置２１又は３１の周りを循環させることができる。もちろん、融液１０は、シート１３の形成プロセスの一部又は全ての期間中、静止させることもできる。

【００２４】

液体が気体と接触すると、メニスカス界面が形成される。この界面はヤング・ラプラス方程式に従う。二次元において、その方程式は

10

20

30

40

【数 1】

$$\Delta P = \frac{\sigma}{R}$$

$$\frac{1}{R(x)} = \frac{\left| \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right)^{3/2}}$$

10

の形になる。ここで、 ΔP は界面間の圧力差、 σ は液体の表面張力、及び、 R は表面の曲率半径である。

【0025】

図3は、LASS用のメニスカス安定化の側断面図である。図3の座標系に関して、曲率半径は、メニスカスを描写する線の一次導関数及び二次導関数で表すことができる。図3におけるメニスカス27間の圧力差は、重力（ gy ）による融液10の液体中の静水圧に起因する。従って、ヤング-ラプラス方程式は、二階微分方程式になる。

20

【数 2】

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\frac{1}{\sigma} (\rho g y(x)) \left(1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right)^{3/2}$$

図3に例示するメニスカス27の凹形状は、大気圧（ P_{atmos} ）に対しての負圧（ P_1 ）によりもたらされる。これは、シート13を x 軸に対して持ち上げ、ある角度に傾けて、シート13の凍結最前部が、融液10の高さよりも低くなるように、シート13を容器16の壁部のエッジで高く持ち上げることににより形成される。図3において、 θ_1 はメニスカス27における融液10とシート13との間の接触角を表し、 θ_2 はメニスカス27における融液10と容器16との間の接触角を表す。シリコンから成る融液10及び石英から成る容器16の場合、 θ_1 は約 87° である。これらの角度は材料に基づいて変わり得る。図3では、融液10のレベルは x 軸であるも、この融液10のレベルは容器16に対してどうにでもなる。

30

【0026】

ガスジェットは、融液10における局所的な圧力を高くすることにより、メニスカスを安定化させるのに、用いることができる。例えば、メニスカスのガス側の局所的圧力は高めることができる。本明細書で説明する実施形態を用いるメニスカスの安定化は、融液の流れに無関係として、融液10が流れ始める前に初期結晶化が生じるようにする。これは、融液の流れを用いるシステムでの種結晶の種付けを簡単にする。シートは、本明細書で説明する実施形態を用いて、水平方向に成長させることができ、これは、ある角度での引っ張り速度に対する、成長速度の複雑なバランスを排除（すなわち、熱除去）する。シートの成長は、融液からの分離を行う容器のエッジの上流で行うことができる。

40

【0027】

図4は、ガス衝突を用いてメニスカスを安定化させる実施形態の側断面図である。本実施形態では、シート13を水平方向に引っ張る。容器16の壁は、融液10の表面レベルより下であり、この表面レベルは、本例では、 x 軸と y 軸が交差する箇所、すなわち、シート13が位置するところである。融液10は、シート13の下にメニスカス27が形成されることによりこぼれない。例示していないが、融液10は、例えば、図1に例示のス

50

ピルウェイ 12 を用いるなどして、容器 16 のエッジを越えて、循環させることも、また、図 6 に例示するように、メニスカス 27 を形成することもあることは勿論である。図 4 へ戻るに、凹形のメニスカス 27 を維持するための圧力差は、メニスカス 27 の下のガスジェット 22 より提供され、ガスジェット 22 は、このガスジェット 22 から出る矢印により示されるように、メニスカス 27 又は容器 16 のエッジに向けて、ある角度に傾けている。このような例では、ヤング - ラプラス方程式は、

【数 3】

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{\sigma} (-\rho g y(x) - P_{jet}(x, y)) \left(1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right)^{3/2} \quad 10$$

の形になる。この場合のヤング - ラプラス方程式は、2 つの境界条件を必要とする二階微分方程式である。図 3 ~ 4 の実施形態では、メニスカス 27 は容器 16 の壁に留められるため、その位置は $x = 0$ に留まる。メニスカスがシート 13 につながるメニスカスの他の端部では、メニスカス 27 は、押さえつけられず、それがシートと成す角度は、固体、液体及び気体間の表面エネルギーにより決定される。シリコン融液 10 と接触する固体のシリコンシート 13 の場合、接触角は約 0° と 11° との間とすることができる。 y_0 を $x = 0$ に特定する場合、メニスカス 27 とシート 13 との接触点の位置及び最初の接触角は、微分方程式の解により決定される。

20

【0028】

ガスジェット 22 の出口での圧力の大きさは、ガスの流れ及びガスを流すガスジェット 22 の開口部の幅に依存する。開口部は、例えば、スリットジェットとすることができる。これは、運動量の保存法則を用いて、少なくともある程度は推定することができる。従って、ガスがメニスカス 27 を跳ね返えさせるよどみ点における圧力は、

【数 4】

$$P = \frac{1}{2} \rho_g u_g^2 = \frac{1}{2} \rho_g \left(\frac{Q_g}{A} \right)^2 \quad 30$$

となり、ここで、 ρ_g 、 u_g 及び Q_g は、それぞれ、ガス密度、速度及び体積流量率である。以下の例は、幅が 0.5 mm のガスジェット 22 の開口部により、メニスカス 27 で 40 Pa の圧力を得るために必要とされるアルゴンの流れを計算する。融液 10 の温度（シリコンの場合、 1412 である）でのアルゴンの密度は 0.32 kg/m^3 である。

【数 5】

$$u_g = \left(\frac{2 \cdot 40 \text{ Pa}}{0.32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1/2} = 15.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad 40$$

$$\frac{Q_g}{L} = u_g \cdot \text{gap} = 15.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.5 \text{ mm} = \frac{7.9}{\text{m}} \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$20 \text{ cm の場合 広いリボン } Q_g = 95 \text{ lpm}$$

【0029】

ここで推定される圧力は、ガスジェット 22 の出口における圧力に過ぎない。圧力は、

50

軸方向及び横方向にも低下し得る。圧力分布は、楕円ガウス分布として近似させることができる。

【数 6】

$$P_{jet}(x, y) = P_0 e^{-\left(a(x-x_0)^2 + 2b(y-y_0)^2(x-x_0)^2 + c(y-y_0)^2\right)}$$

$$a = \frac{\cos^2 \theta}{2\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \theta}{2\sigma_y^2}$$

$$b = -\frac{\sin 2\theta}{4\sigma_x^2} + \frac{\sin 2\theta}{4\sigma_y^2}$$

$$c = \frac{\sin^2 \theta}{2\sigma_x^2} + \frac{\cos^2 \theta}{2\sigma_y^2}$$

10

【0030】

図5は、ガスジェットからの圧力分布を例示する断面図である。これは、上記の式を解く。全ての場合に、ガスジェット22の出口で $P_0 = 40 \text{ Pa}$ 、 $x_0 = 6 \text{ mm}$ 、ガスジェット22の出口で $y_0 = -4 \text{ mm}$ 、 $x = 4 \text{ mm}$ 、 $y = 0.8 \text{ mm}$ 及び $\theta = 45^\circ$ である。 x 及び y は、ガスジェット22の周りの圧力の楕円分布を表す。メニスカス27が容器16に留まる場所は、メニスカス27の形状に影響を及ぼす。 $\theta = 11^\circ$ の場合、メニスカス27はシート13の1mm下で $\theta = 17^\circ$ で容器16の壁に留まる。 $\theta = 11^\circ$ の場合、メニスカス27はシート13の2mm下で $\theta = 15.87^\circ$ で容器16の壁に留まる。 $\theta = 11^\circ$ の場合、メニスカス27はシート13の2.5mm下で $\theta = 10.58^\circ$ で容器16の壁に留まる。 $\theta = 0^\circ$ の場合、メニスカス27はシート13の1mm下で $\theta = 7.21^\circ$ で容器16の壁に留まる。

20

【0031】

従って、ガス衝突を用いることにより、安定なメニスカス27を、約 11° の接触角でシート13の少なくとも2.5mm下で容器16の壁に留めることができる。たとえ接触角が 0° と低かったとしても、安定なメニスカス27が、まだ、シート13の1mm下で容器16の壁に維持される。ガスジェットの衝突は、粘性力により引き起こされる抗力を補償することもできる。ガスジェットの衝突の圧力は、メニスカス27を安定させること、すなわち、メニスカス27を容器16に留めることを維持するのに役立つように設定することができる。

30

【0032】

図6は、スピルウェイと共にガス衝突を用いるメニスカス安定化の実施形態の断面図である。融液10はスピルウェイ12を越えて流れる。メニスカス27は、スピルウェイ12を越えて通る融液10でできる。もちろん、他の実施形態も可能である。

40

【0033】

図7は、シートの形成を伴うガスジェットの第1の実施形態の側断面図である。このシステムは、支持テーブル23から離れたガスジェット22を有する。支持テーブル23は、シート13を支持するために、空気又は他の流体のジェットを用いることができるが、ローラー又は他の機構を用いることもできる。本特定の実施形態では、もっと多く又はもっと少なく設けることはできるけれども、2つのガスジェット22、25を用いる。シート13の下ガスジェット22は、メニスカス27を安定させ、その位置及び角度を調整することができる。シート13の上ガスジェット25は、ガスジェット22からの衝突力の垂直方向成分のバランスを取る。ガスジェット22及び25からの流れは、他の流れ

50

も可能であるけれども、一例では、ほぼ等しくすることができる。アルゴン、別の希ガス、別の不活性ガス又は当業者に既知の他の種を、ガスジェット 22 又は 25 に用いることができる。容器 16 は、融液 10 のメニスカス 27 を留めて、融液を滴らせないで接触角を大きく変えることができる機構、すなわち溝 24 を含むのがよい。そのような機構、すなわち溝 24 のない容器 16 の表面は、そこに留まるメニスカス 27 を有することができるも、滴りが生じる前のメニスカス 27 の角度は制限される。例えば、この角度は約 87° である。上記機構、すなわち溝 24 を加えることにより、滴りが生じる前に、メニスカス 27 をたるませ、すなわち容器 16 の表面から約 177° の角度を持つようにすることを可能にする。

【0034】

10

図 8 は、シートの形成を伴うガスジェットの第 2 の実施形態の側断面図である。本実施形態では、ガスジェット 22 を支持テーブル 23 に組み込む。別の実施形態では、シート 13 の上方にガスジェットを設けて、図 7 に例示するように、垂直方向の衝突力のバランスを取るようにすることができる。

【0035】

図 9 は、シートの形成を伴うガスジェットの第 3 の実施形態の側断面図である。ガスジェット 22 は、圧力セル 26 の一部である。圧力セル 26 内は、エッジ又はシールで導通が制限されることにより、高めの圧力 (P_2) である。圧力セル 26 内のガスは、矢印で示すように流れる。本例の P_2 は、大気圧 (P_{atmos}) より大きい。圧力セル 26 の上部は、底部の上の気体軸受の上に浮いている。底部のレベルは、融液 10 のレベルに一致するように設定することができる。圧力セル 26 とシート 13 との間のギャップ又はシールは、一例では、 0.5 mm 未満の寸法とすることができる。メニスカス 27 は、圧力セル 26 の底部の一部であるガスジェット 22 のために、この圧力セル 26 内に少なくとも部分的に含まれる。

20

【0036】

図 10A ~ D は、ガスジェットの安定化により可能にすることができる種付けを例示する。本明細書に開示した実施形態は、容器 16 内の流れに無関係にメニスカスを安定化させる。従って、結晶の開始は、融液 10 が、流れ始める前に始まり、シート形成プロセスを簡単に行うことができる。図 10A では、種ウエーハ 28 を挿入する。種ウエーハ 28 は、例えば、所望の結晶配向性を有する約 0.7 mm の厚さのエレクトロニクスグレードのシリコンウエーハとすることができる。種ウエーハ 28 のレベルは、この種ウエーハ 28 のレベルを融液 10 のレベルに対して制御する支持テーブル 23 の上に種ウエーハ 28 が載るように制御する。融液 10 は、例えば、この融液 10 のシリコンの表面張力を用いて、メサ 29 を作り、融液 10 は、容器 16 の壁のエッジの上に位置するようにすることができる。従って、種ウエーハ 28 が融液 10 に触れる前に、図 10A に例示するように、融液 10 には凸状のメニスカスができていく。ガスジェット 22、25 は、種ウエーハ 28 が融液 10 に触れる前に、このメニスカスを安定させるのに用いることができる。もちろん、もっと多い又はもっと少ないガスジェットを用いることも可能である。

30

【0037】

図 10B では、種ウエーハ 28 は、矢印の方向に動いた後に、融液 10 に触れる。メニスカス 27 は、種ウエーハ 28 の下にできる。凸状となるこのメニスカス 27 は、容器 16 の壁と種ウエーハ 28 との間のギャップを埋める。凸状のメニスカス 27 は、種ウエーハ 28 の幅を越えて容器 16 の壁に付着したままとなる。メサ 29 のメニスカスと種ウエーハ 28 の下の凸状のメニスカス 27 との間のこの遷移個所のメニスカスは、不均一になり得る。この不均一性は、プロセスがほぼ等温の環境で生じるため、シート 13 の厚さの均一性又は品質に影響を及ぼすことはないと思われる。

40

【0038】

図 10C では、種ウエーハ 28 を、矢印の方向に平行移動させる。この平行移動は、種ウエーハ 28 の一端でローラー又は他の機構により行うことができる。種ウエーハ 28 は、この種ウエーハ 28 が挿入されたのと反対方向に、冷却プレート 14 の下を動く。冷却

50

プレート 14 は、最初は、ターン・オフさせるか、又は、融液 10 の温度に等しく、又は、融液 10 の温度より高くすることができる。冷却プレート 14 を、メニスカス 27 が付着する容器 16 の壁の上流の所定距離の所に配置すれば、メニスカス 27 の影響は最小になり得る。冷却プレート 14 をターン・オンさせると、種ウエーハ 28 の近くで凍結が始まる。種ウエーハ 28 を引っ張る動作が始まって、シート 13 は引っ張り出される。

【0039】

図 10D では、融液 10 は、例えば、ポンプを用いて流れ始める。別の実施形態では、融液 10 はスピルウェイを越えることができる。シート 13 の幅は、融液 10 が流れ始めるにつれて、大きくすることができる。冷却プレート 14 の温度及び融液 10 の流れやシート 13 が動く速度は、シート 13 の所望の厚さを得るために、調整することができる。このようにして、定常状態プロセスを達成することができる。

10

【0040】

ガスジェットを用いるメニスカスの安定化には、多数の利点がある。それは、水平シートの形成又は水平リボンの成長 (HGR) システムに適用することができ、一例では、LASS を回避するために用いることができる。一実施形態では、シート 13 を水平に引っ張ることができ、結晶形成領域はメニスカス 27 の上流に位置するようにすることができる。これは、シートを形成する間にシート 13 に悪影響を及ぼすことになる、引っ張りメカニズムにより生じる摂動を最小にする。融液 10 の流速は、シート 13 の速度に関係なく、制御することができる。これは、より単純な種付けプロセスを可能にする。さらに、融液 10 の流出を低減し又は防ぐことができる。

20

【0041】

図 11 は、ガスジェットの実施形態の断面図である。ガスジェット 22 はプレナム 32 及び開口部 30 を有する。ガスは矢印の方向に流れる。プレナム 32 を開口部 30 より大きくすることにより、均一な圧力と開口部 30 の大きさにわたる均一な流れを確保することができる。一実施形態では、開口部 30 は、図 4 のシート 13 のようなシートの幅にほぼ等しい幅を有する。もちろん、他の大きさも可能である。

【0042】

本明細書で開示した実施形態では、ガスジェット 22 は、特定の温度で、ガスを向けることができる。メニスカスが凍結しないように、ガスは暖めることができる。シートが溶融されないように、ガスを冷却するか、さもなければ、シートを冷却することができる。

30

【0043】

本発明は、本明細書に記載した特定の実施形態による範囲に限定すべきではない。実際に、本明細書に記載した実施形態に加えて、本発明の他の様々な実施形態及び変更は、前述の記載及び添付図面から当業者には明らかであろう。従って、そのような他の実施形態及び変更は、本発明の範囲内に入ることを意図している。さらに、本発明は、特定の目的のため、特定の環境で、特定の実施のコンテキストで、本明細書に記載したけれども、当業者は、その有用性がそれらに限定されず、本発明が、任意の数の目的のため、任意の数の環境で、有用に実施することができることを理解するであろう。従って、以下に記載の特許請求の範囲は、本明細書に記載されているように、本発明の全容及び精神に鑑みて解釈すべきである。

40

【図 1】

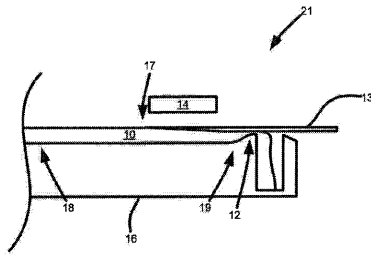


FIG. 1

【図 2】

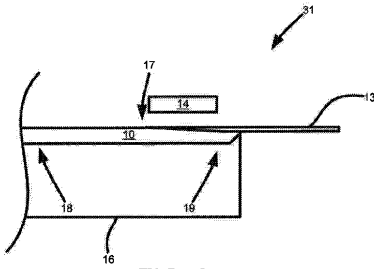
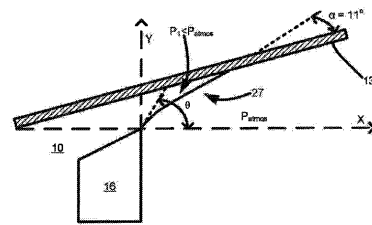


FIG. 2

【図 3】

FIG. 3
(Prior Art)

【図 4】

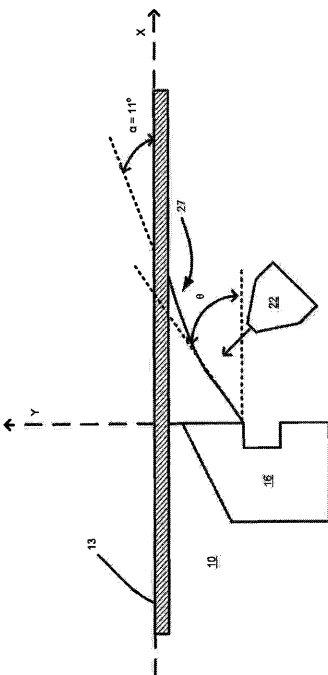


FIG. 4

【図 5】

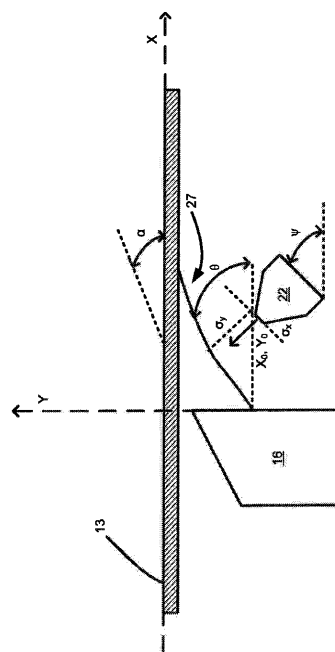


FIG. 5

【図 6】

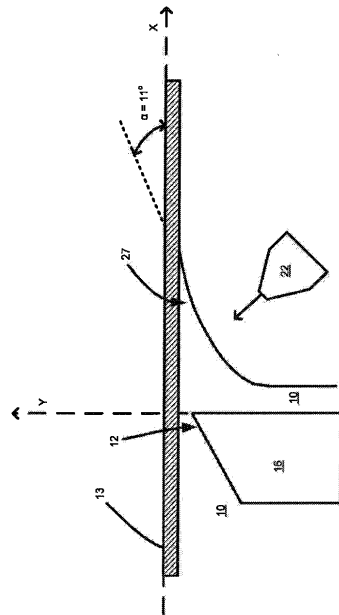


FIG. 6

【図 7】

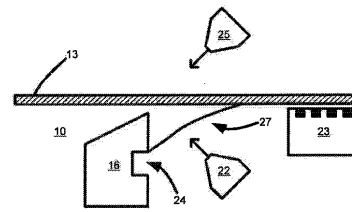


FIG. 7

【図 8】

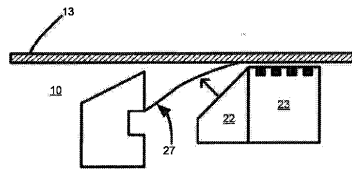


FIG. 8

【図 9】

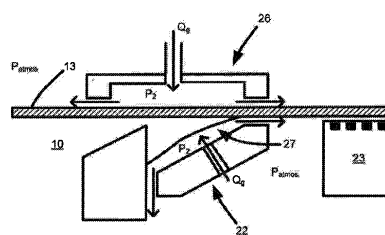
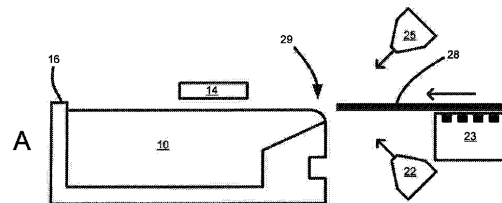
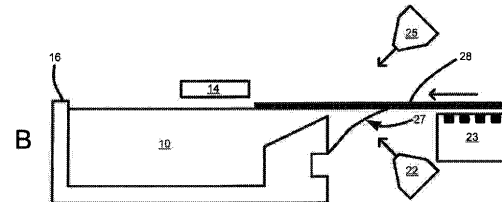


FIG. 9

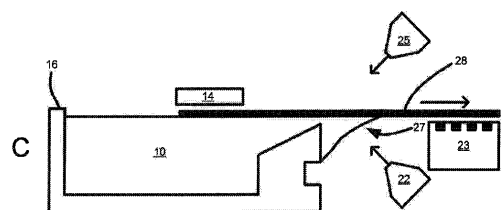
【図 10 A】



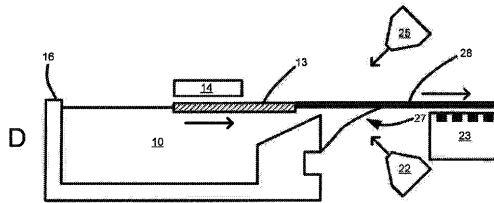
【図 10 B】



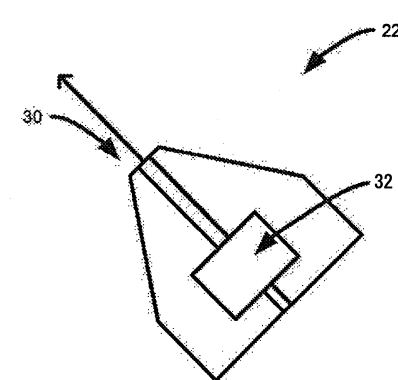
【図 10 C】



【図 10 D】



【図 11】



フロントページの続き

(72)発明者 グレゴリー ディー スロンソン

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 スン ダウェイ

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 田中 則充

(56)参考文献 国際公開第2009/114764(WO, A2)

特開2002-114597(JP, A)

特開昭52-015485(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C30B1/00-35/00

C01B33/02