(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5514444号
(P5514444)

(45)発行日　平成26年6月4日(2014.6.4)　(24)登録日　平成26年4月4日(2014.4.4)

(51)Int.Cl.		F I		
C30B 29/06	(2006.01)	C30B	29/06	501Z
H01L 31/04	(2014.01)	H01L	31/04	H
C30B 11/00	(2006.01)	C30B	11/00	Z
C01B 33/02	(2006.01)	C01B	33/02	E

請求項の数 30　(全 33 頁)

(21)出願番号	特願2008-551522 (P2008-551522)
(86)(22)出願日	平成19年1月18日 (2007.1.18)
(65)公表番号	特表2009-523694 (P2009-523694A)
(43)公表日	平成21年6月25日 (2009.6.25)
(86)国際出願番号	PCT/US2007/060663
(87)国際公開番号	WO2007/084936
(87)国際公開日	平成19年7月26日 (2007.7.26)
審査請求日	平成22年1月14日 (2010.1.14)
(31)優先権主張番号	60/760,453
(32)優先日	平成18年1月20日 (2006.1.20)
(33)優先権主張国	米国 (US)
(31)優先権主張番号	60/808,954
(32)優先日	平成18年5月30日 (2006.5.30)
(33)優先権主張国	米国 (US)

(73)特許権者　511051672
エイエムジー・アイデアルキャスト・ソーラー・コーポレーション
アメリカ合衆国メリーランド州２１７０３，フレデリック，ソラレックス・コート６３０，ノース・キャスティング・ファシリティー
(74)代理人　100140109
弁理士　小野　新次郎
(74)代理人　100075270
弁理士　小林　泰
(74)代理人　100080137
弁理士　千葉　昭男
(74)代理人　100096013
弁理士　富田　博行

最終頁に続く

(54)【発明の名称】幾何学的多結晶成型シリコンの製造方法および装置および光電変換用多結晶成型シリコン本体

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

成型シリコンの製造方法であって、

少なくともシリコンの融点まで加熱した１つ以上の側面と、少なくとも１つの冷却用の壁とを有する坩堝における少なくとも１つの表面上に、複数のシリコン・シード結晶の幾何学的配列を配置するステップと、

前記単結晶シリコン・シード結晶の幾何学的配列と接触するように、溶融シリコンを配置するステップと、

前記複数のシード結晶の少なくとも１つの所望の部分を溶融し、そして少なくとも１つのディップ・ロッドを用いて溶融の程度を測定するステップと、

結晶化を制御するために前記溶融シリコンを冷却することによって、幾何学的に揃った多結晶シリコンから成り、任意に各々少なくとも１０ｃｍの寸法の長方形状の底面を有する固体本体を形成するステップであって、該ステップは、前記溶融シリコンと前記少なくとも１つの冷却用の壁との間の距離が増大する方向に移動するように、前記冷却中に前記溶融シリコンの縁端において固体－液体界面を制御するステップを含む、ステップと、

を備えている、方法。

【請求項２】

太陽電池の製造方法であって、

請求項１記載の方法で成型シリコンの本体を用意するステップと、

前記本体から少なくとも１つのウェハを形成するステップと、

前記ウェハの表面上において、任意に清浄手順を実行するステップと、
任意に、前記表面上において模様形成ステップを実行するステップと、
ｐ－ｎ接合を形成するステップと、
任意に前記表面上に反射防止被膜を堆積するステップと、
裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を任意に形成するステップと、
前記ウェハ上に導電性コンタクトを形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項３】
成型シリコンの製造方法であって、
少なくともシリコンの融点まで加熱した１つ以上の側面と、少なくとも１つの冷却用の壁とを有する坩堝の少なくとも２つの表面上に、所定のパターンで複数のシリコン・シード結晶を配列するステップと、
前記複数の単結晶シリコン・シード結晶と接触するように溶融シリコンを配置するステップと、
前記複数のシード結晶の少なくとも１つの所望の部分を溶融し、そして少なくとも１つのディップ・ロッドを用いて溶融の程度を測定するステップと、
結晶化を制御するために前記坩堝の少なくとも２つの表面から前記溶融シリコンを冷却するによって、幾何学的に揃った多結晶シリコンから成り、任意に各々少なくとも１０ｃｍの寸法の長方形状の底面を有する固体本体を形成するステップであって、該ステップは、前記坩堝における前記溶融シリコンと単結晶シリコン・シード結晶との間の距離が増大する方向に移動するように、前記冷却中に前記溶融シリコンの縁端において前記固体－液体界面を制御するステップを含む、ステップと、
を備えている、方法。
【請求項４】
成型シリコンの製造方法であって、
坩堝の少なくとも１つの表面に複数のシリコン・シード結晶の幾何学的配列を配置するステップと、
前記少なくとも１つの表面において前記複数のシリコン・シード結晶を接触するように、シリコン供給原料を配置するステップと、
前記シリコン供給原料および前記複数のシリコン・シード結晶をシリコンの融点まで加熱するステップと、
前記複数のシード結晶の少なくとも１つの所望の部分を溶融し、そして少なくとも１つのディップ・ロッドを用いて溶融の程度を測定するステップと、
前記少なくとも１つのシリコン・シード結晶が完全に溶融しないように、前記加熱を制御するステップであって、該ステップは、前記坩堝におけるいずれかの部位においてシリコンの融点に達した後、前記坩堝の外面において測定して、約０．１℃／分以下のΔＴを維持するステップを含む、ステップと、
一旦前記複数のシリコン・シード結晶が部分的に溶融したなら、前記シリコンを冷却することによって、単結晶シリコンから成るシリコン本体を形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項５】
太陽電池の製造方法であって、
請求項４記載の方法で成型シリコンの本体を用意するステップと、
前記本体から少なくとも１つのウェハを形成するステップと、
前記ウェハの表面上において、任意に清浄手順を実行するステップと、
任意に、前記表面上において模様形成ステップを実行するステップと、
ｐ－ｎ接合を形成するステップと、
任意に前記表面上に反射防止被膜を堆積するステップと、
裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を任意に形成するステ

ップと、
前記ウェハ上に導電性コンタクトを形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項６】
成型シリコンの製造方法であって、
坩堝の少なくとも２つの表面に、複数のシリコン・シード結晶を所定のパターンで配列するステップと、
前記少なくとも２つの表面において、前記複数のシリコン・シード結晶と接触するように、シリコン供給原料を配置するステップと、
前記シリコン供給原料および前記複数のシリコン・シード結晶をシリコンの融点まで加熱するステップと、
前記複数のシード結晶の少なくとも１つの所望の部分を溶融し、そして少なくとも１つのディップ・ロッドを用いて溶融の程度を測定するステップと、
前記複数のシード結晶が完全に溶融しないように、前記加熱を制御するステップであって、該ステップは、前記坩堝におけるいずれかの部位においてシリコンの融点に達した後、前記坩堝の外面において測定して、約０．１℃／分以下のΔＴを維持するステップを含む、ステップと、
一旦前記少なくとも１つのシリコン・シード結晶が部分的に溶融したなら、前記シリコンを冷却することによって、単結晶シリコンから成るシリコン本体を形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項７】
太陽電池の製造方法であって、
請求項６記載の方法で成型シリコンの本体を用意するステップと、
前記本体から少なくとも１つのウェハを形成するステップと、
前記ウェハの表面上において、任意に清浄手順を実行するステップと、
任意に、前記表面上において模様形成ステップを実行するステップと、
ｐ－ｎ接合を形成するステップと、
任意に前記表面上に反射防止被膜を堆積するステップと、
裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を任意に形成するステップと、
前記ウェハ上に導電性コンタクトを形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項８】
成型シリコンの製造方法であって、
少なくともシリコンの融点まで加熱した１つ以上の側面と、少なくとも１つの冷却用の壁とを有する坩堝の少なくとも１つの表面に、少なくとも１つの幾何学的多結晶シリコン・シード結晶を配列するステップと、
前記少なくとも１つのシリコン・シード結晶と接触するように、溶融シリコンを配置するステップと、
前記複数のシード結晶の少なくとも１つの所望の部分を溶融し、そして少なくとも１つのディップ・ロッドを用いて溶融の程度を測定するステップと、
結晶化を制御するために前記溶融シリコンを冷却することによって、幾何学的に揃った多結晶シリコンから成り、任意に各々少なくとも１０ｃｍの寸法の長方形状の底面を有する固体本体を形成するステップであって、該ステップは、前記坩堝における前記溶融シリコンと少なくとも１つの幾何学的多結晶シリコン・シード結晶との間の距離が増大する方向に移動するように、前記冷却中に前記溶融シリコンの縁端において固体－液体界面を制御するステップを含む、ステップと、
を備えている、方法。
【請求項９】
太陽電池の製造方法であって、

請求項８記載の方法で成型シリコンの本体を用意するステップと、
前記本体から少なくとも１つのウェハを形成するステップと、
前記ウェハの表面上において、任意に清浄手順を実行するステップと、
任意に、前記表面上において模様形成ステップを実行するステップと、
ｐ－ｎ接合を形成するステップと、
任意に前記表面上に反射防止被膜を堆積するステップと、
裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を任意に形成するステップと、
前記ウェハ上に導電性コンタクトを形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項１０】
成型シリコンの製造方法であって、
坩堝内の少なくとも１つの表面に複数のシリコン・シード結晶の幾何学的配列を配置するステップであって、前記複数のシリコン・シード結晶を、前記坩堝における少なくとも１つの表面の区域全体または実質的に区域全体を覆うように配列する、ステップと、
前記シリコン・シード結晶の幾何学的配列と接触するように、溶融シリコンを配置するステップと、
前記複数のシード結晶の少なくとも１つの所望の部分を溶融し、そして少なくとも１つのディップ・ロッドを用いて溶融の程度を測定するステップと、
結晶化を制御するように前記溶融シリコンを冷却することによって、任意に各々少なくとも１０ｃｍの寸法の長方形状の底面を有する幾何学的に揃った多結晶シリコンから成る固体本体を形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項１１】
太陽電池の製造方法であって、
請求項１０記載の方法で成型シリコンの本体を用意するステップと、
前記本体から少なくとも１つのウェハを形成するステップと、
前記ウェハの表面上において、任意に清浄手順を実行するステップと、
任意に、前記表面上において模様形成ステップを実行するステップと、
ｐ－ｎ接合を形成するステップと、
任意に前記表面上に反射防止被膜を堆積するステップと、
裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を任意に形成するステップと、
前記ウェハ上に導電性コンタクトを形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項１２】
成型シリコンの製造方法であって、
１つ以上の側面が少なくともシリコンの融点に加熱されているベッセルにおいて、少なくとも１つの幾何学的に揃った多結晶シリコン・シード結晶と接触するように溶融シリコンを配置するステップであって、前記少なくとも１つの幾何学的に揃った多結晶シリコン・シード結晶を、前記ベッセルの表面の区域全体または実質的に区域全体を覆うように配列する、ステップと、
前記少なくとも１つの幾何学的に揃った多結晶シリコン・シード結晶の所望の部分を溶融し、そして少なくとも１つのディップ・ロッドを用いて溶融の程度を測定するステップと、
結晶化を制御するように前記溶融シリコンを冷却することによって、任意に各々少なくとも１０ｃｍの寸法の長方形状の底面を有する幾何学的に揃った多結晶シシリコンから成る固体本体を形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項１３】

太陽電池の製造方法であって、
請求項１２記載の方法で成型シリコンの本体を用意するステップと、
前記本体から少なくとも１つのウェハを形成するステップと、
前記ウェハの表面上において、任意に清浄手順を実行するステップと、
任意に、前記表面上において模様形成ステップを実行するステップと、
ｐ－ｎ接合を形成するステップと、
任意に前記表面上に反射防止被膜を堆積するステップと、
裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を任意に形成するステップと、
前記ウェハ上に導電性コンタクトを形成するステップと、
を備えている、方法。
【請求項１４】
請求項１～１３のいずれか１項に記載の方法において、前記冷却するステップは、熱を水冷壁に放射するために、ヒート・シンク材料を用いることを含む、方法。
【請求項１５】
請求項１、３、４、６、８、１０、１２及び１４のいずれか１項に記載の方法であって、更に、スワール欠陥が実質的になく、更に酸素誘発積層障害欠陥（ｆａｕｌｔ　ｄｅｆｅｃｔ）も実質的にない前記本体を形成するステップを備えている、方法。
【請求項１６】
請求項１、３、４、６、８、１０、１２及び１４のいずれか１項に記載の方法であって、更に、少なくとも１つの寸法が少なくとも約５０ｍｍであるウェハを形成するステップを備えている、方法。
【請求項１７】
請求項２、５、７、９、１１、１３及び１４のいずれか１項に記載の方法であって、更に、少なくとも１つの寸法が少なくとも約５０ｍｍとなるようにウェハを形成するステップを備えている、方法。
【請求項１８】
請求項１６記載の方法であって、更に、スワール欠陥が実質的になく、更に酸素誘発積層障害欠陥も実質的にないように、前記幾何学的に揃った多結晶シリコンの固体本体を形成するステップを備えている、方法。
【請求項１９】
請求項１７記載の方法であって、更に、スワール欠陥が実質的になく、更に酸素誘発積層障害欠陥も実質的にない前記ウェハを形成するステップを備えている、方法。
【請求項２０】
請求項１、３、または１０のいずれか１項に記載の方法において、前記溶融シリコンを配置するステップは、更に、前記坩堝とは別個の溶融容器においてシリコン供給原料を溶融するステップ、前記坩堝およびシリコンをシリコンの融点まで加熱するステップ、前記坩堝における複数のシード結晶が完全に溶融しないように前記加熱を制御するステップ、及び前記溶融シリコンを前記溶融容器から前記坩堝に移すステップ、を含む、方法。
【請求項２１】
請求項８または１２のいずれか１項に記載の方法において、前記溶融シリコンを配置するステップは、更に、前記坩堝とは別個の溶融容器においてシリコン供給原料を溶融するステップ、前記坩堝およびシリコンをシリコンの融点まで加熱するステップ、前記坩堝における少なくとも１つのシード結晶が完全に溶融しないように前記加熱を制御するステップ、及び前記溶融シリコンを前記溶融容器から前記坩堝に移すステップ、を含む、方法。
【請求項２２】
請求項１、３、４、６、または１０のいずれか１項に記載の方法であって、更に、前記シード結晶間における共通極方向が前記坩堝の底面に対して垂直となるように、前記複数のシード結晶を配列するステップを含む、方法。
【請求項２３】

請求項１、３、４、６、８、１０、または１２のいずれか１項に記載の方法において、前記形成するステップは、共通極方向が前記幾何学的に揃った多結晶シリコンの表面に対して垂直となるように、平均粒子サイズが約０．５ｃｍから約５０ｃｍである幾何学的に揃った多結晶シリコンを形成するステップから成る、方法。
【請求項２４】
請求項１、３、４、６、８、または１０のいずれか１項に記載の方法であって、更に、前記方法にしたがって既に成型してある幾何学的に揃った連続多結晶シリコンの本体から得たシード結晶を用いて、幾何学的に揃った多結晶シリコンの別の固体本体を形成するステップを備えている、方法。
【請求項２５】
請求項１、３、または１０のいずれか１項に記載の方法において、前記溶融シリコンを配置するステップは、更に、前記坩堝および前記シリコンをシリコンの融点まで加熱するステップ、及び前記坩堝におけるいずれかの部位においてシリコンの融点に達した後、前記坩堝の外面において測定して、約０．１℃／分以下のΔＴを維持するように前記加熱を制御するステップ、を含む、方法。
【請求項２６】
請求項３または６のいずれか１項に記載の方法であって、更に、前記坩堝の少なくとも２つの表面の間に粒子境界が形成されないように、前記シード結晶間の共通極方向が前記坩堝の少なくとも２つの表面の１つに対して垂直となるように、前記複数のシード結晶を配列するステップを備えている、方法。
【請求項２７】
請求項３または６のいずれか１項に記載の方法であって、更に、最大で３つのシード結晶縁端が前記所定のパターンの少なくとも１つの角において一致するように、前記複数のシード結晶を配列するステップを備えている、方法。
【請求項２８】
請求項３または６のいずれか１項に記載の方法であって、更に、前記坩堝の前記少なくとも１つの表面に沿って、前記所定のパターンを六角形または八角形方位に配列するステップを備えている、方法。
【請求項２９】
請求項３または６のいずれか１項に記載の方法において、前記坩堝の少なくとも２つの表面は垂直である、方法。
【請求項３０】
請求項１または４のいずれか１項に記載の方法において、前記複数の単結晶シリコン・シード結晶の幾何学的配列を配置するステップは、前記坩堝の表面の区域全体または実質的に区域全体を覆うように、前記シード結晶を配列するステップから成る、方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
（特記事項）
本発明は、エネルギ省（ＤＯＥ）の契約第ＤＥ－ＡＣ３６－９８ＧＯ１０３３７号の下において、ＤＯＥが裁定した、国家更新可能エネルギ実験（ＮＲＥＬ：National Renewable Energy Laboratory）下請け契約第ＺＤＯ－２－３０６２８－０３号の下における米国政府支援を受けて行われた。米国政府は、本発明において、一定の権利を有する。
（関連出願）
本願は、２００６年１月２０日に出願した米国仮特許出願第６０／７６０，４５３号、２００６年５月３０日に出願した米国仮特許出願第６０／８０８，９５４号、２００６年８月２４日に出願した米国仮特許出願第６０／８３９，６７２号、および２００６年８月２４日に出願した米国仮特許出願第６０／８３９，６７０号の優先権の恩恵を主張する。これらは、ここで引用したことにより、その内容全体が本願にも含まれるものとする。
（技術分野）

本発明は、一般的には、光電変換の分野、ならびに光電変換用途のための成型シリコンの製造方法および装置に関する。更に、本発明波、光電変換セルやその他の半導体デバイスのようなデバイスを製造するために用いることができる成型シリコンの新しい形態に関する。新しいシリコンは、幾何学的に揃った多結晶構造を有することができ、成型プロセスで製造することができる。

【背景技術】

【０００２】

光電変換セルは、光を電流に変換する。光電セルの最も重要な尺度の１つは、光エネルギを電気エネルギに変換する際におけるその効率である。光電変換セルは種々の半導体材料から製作することができるが、一般にシリコンが用いられている。それは、シリコンが安価で容易に入手可能であるため、そして光電変換セルを製造する際に用いるのに適した電気的、物理的、および化学的特性のバランスを有するからである。

【０００３】

光電変換セルを製造するための既知の手順では、シリコン供給原料を、正または負の導電性のいずれかを誘発する材料（即ち、ドーパント）と混合し、溶融し、次いで、個々のシリコン粒子の粒子サイズに応じて、結晶化したシリコンを溶融帯から単結晶シリコンのインゴットに引き上げることによって（チョクラルスキ（ＣＺ）または浮遊帯（ＦＺ）方法によって）、または多結晶シリコン即ちポリクリスタル・シリコンのブロック即ち「ブリック」(brick)に成型することのいずれかによって結晶化する。前述の手順では、既知のスライシングまたはソーイング方法によって、ウェハとも呼ばれている、インゴットまたはブロックを薄い基板に切断する。

【０００４】

光電変換セルの製造に用いる単結晶シリコンは、一般に、ＣＺまたはＦＺ方法によって生産され、双方は、結晶シリコンの円筒状ブールを生産するプロセスである。ＣＺプロセスでは、ブールを溶融シリコンのプールからゆっくりと引き上げる。ＦＺプロセスでは、個体材料を溶融帯を介して供給し、溶融帯の他方側において再度固化する。単結晶シリコンのブールは、これらの方法で製造した場合、半径方向に分布する不純物や欠陥を内包する。欠陥とは、酸素誘発積層欠陥（ＯＳＦ）および格子間または空位クラスタの「スワール」欠陥等である。これらの不純物や欠陥があっても、単結晶シリコンは、一般に、光電変換セルを生産するには好ましいシリコン源である。何故なら、これは高効率の太陽電池を生産するために用いることができるからである。しかしながら、単結晶シリコンは、前述したような既知の技法を用いると、従来の多結晶シリコンよりも生産に多くの費用がかかる。

【０００５】

光電変換セルの製造に用いるための従来の多結晶シリコンは、一般に、成型プロセスによって生産する。従来の多結晶シリコンを準備する成型プロセスは、光電変換技術の技術分野では周知である。端的に言うと、このようなプロセスでは、クオーツ坩堝のような坩堝に溶融シリコンを収容し、中に収容したシリコンの結晶化を可能とするように制御しながら冷却する。その結果得られた多結晶シリコンのブロックは、通常、ブリックに切断される。ブリックの断面積は、光電変換セルを製造するために用いられるウェハのサイズと同じか、またはこれに近く、ブリックを鋸引きするかまたはそれ以外の方法で切断して、このようなウェハとする。このようにして生産される多結晶シリコンは、結晶粒子の凝集であり、これから作られるウェハの中では、粒子の互いに対する方位は、事実上ランダムである。

【０００６】

従来の多結晶またはポリクリスタル・シリコンのいずれにおいても、粒子のランダムな方位により、得られるウェハの表面に模様を織り込む(texture)のが困難にある。模様の折り込みは、光電変換セルの効率を高めるために用いられ、光の反射を低減し、セルの表面を通じた光エネルギの吸収を改善する。加えて、従来の多結晶シリコンの粒子間の境界に形成する「ねじれ」(kink)が、クラスタまたは転位線(lines of dislocation)の形態の

構造的欠陥の中核となる傾向がある。これらの転位、およびこれらによって引き寄せられる傾向がある不純物は、従来の多結晶シリコンで作られた機能光電変換セルにおいて、電荷キャリアの速い再結合の原因になると考えられている。これは、セルの効率低下の原因となる可能性がある。このような多結晶シリコンで作られる光電変換セルは、一般に、単結晶シリコンで作られた同等の光電変換セルと比較すると、既知の技法によって生産する単結晶シリコンにおいて欠陥の半径方向分布があることを考慮しても、効率が低い。しかしながら、従来の多結晶シリコンは製造が比較的簡単であり、コストも低いため、更にセル処理における有効な欠陥パシベーションのために、多結晶シリコンの方が広く用いられる光電変換セルを製造するシリコンの形態となっている。

【０００７】

以前の成型技法の中には、結晶成長のために「冷壁」坩堝の使用を伴う場合がある。「冷壁」という用語は、坩堝の壁上または壁内にある誘導コイルを水冷し、更に細長い隙間を付けることによって、全体的に１００°Ｃ未満に留まるようにすることができるという事実を指す。坩堝の壁は、コイルと供給原料との間に近接して配置することができる。坩堝の壁の材料は、特に熱絶縁されておらず、したがって、冷却されたコイルと熱平衡の状態を保つことができる。したがって、シリコンの加熱は、坩堝の壁からの放熱に根拠があることにはならない。何故なら、坩堝におけるシリコンの誘導加熱は、シリコンを、その中を流れるように誘発された電流によって直接加熱することを意味するからである。このように、坩堝の壁はシリコンの融点未満に留まり、溶融シリコンと比較すると「冷たい」と見なされる。誘導加熱によって溶融したシリコンの固化の間、坩堝のこれら冷壁はヒート・シンクとして作用する。インゴットは素早く冷却し、冷壁への放熱によって決定される。したがって、初期固化前面(initial solidification front)は大きく湾曲し、インゴットの側面に結晶核形成が生じ、インゴットの中心に向かって対角線状に成長し、垂直で幾何学的に揃ったシーディング・プロセス(seeding process)、または実質的に平坦な固化前面を維持しようとするいずれの試みをも粉砕する。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００８】

以上のことに鑑み、光電変換セルを製造するために用いることができるシリコンを改良した形態が求められている。また、これまで単結晶シリコンを生産するために用いられてきたプロセスよりも高速でしかも費用がかからないプロセスにおいて製造することができるシリコンも求められている。本発明は、このようなシリコンおよびこのようなプロセスを提供する。

【課題を解決するための手段】

【０００９】

ここで用いる場合、「単結晶シリコン」という用語は、全体的に一貫した１つの結晶方位を有する単結晶シリコンの本体のことを言う。更に、従来の多結晶シリコンは、ｃｍ単位の(cm-scale)粒子サイズ分布を有し、多数のランダムな方向を向いた結晶がシリコン本体内にある結晶シリコンのことを言う。

【００１０】

更に、ここで用いる場合、「多結晶シリコン」という用語は、ミクロン級粒子サイズを有し、多数の粒子方位が所与のシリコン本体内にある結晶シリコンのことを言う。例えば、粒子は、通例、サイズがミクロン未満からミリメートル未満であり（例えば、個々の粒子は裸眼では見えない場合もある）、粒子の方位は全体的にランダムに分布している。

【００１１】

更に、ここで用いる場合、「準単結晶シリコン」(near-monocrystalline silicon)という用語は、本体の体積の５０％よりも多い領域全体に１つの一貫した結晶方位を有する結晶シリコンの本体のことを言い、例えば、このような準単結晶シリコンは、多結晶領域に隣接した単結晶シリコンの本体を備えている場合があり、あるいは大きな連続して一貫性のあるシリコン結晶と、その中に部分的にまたは全体的に含まれる他の結晶方位の小さな

シリコン結晶とを備えることができ、小さい結晶は体積全体の５０％よりも多い領域を構成しない。好ましくは、準単結晶シリコンは、体積全体の２５％よりも多い領域を構成しない小さな結晶を含有するとよい。更に好ましくは、準単結晶シリコンは、体積全体の１０％よりも多い領域を構成しない小さな結晶を含有するとよい。更に一層好ましくは、準単結晶シリコンは、体積全体の５％よりも多い領域を構成しない小さな結晶を含有するとよい。

【００１２】

しかしながら、ここで用いる場合、「幾何学的に揃った多結晶シリコン」（以下「幾何学的多結晶シリコン」と呼ぶ）という用語は、本発明の実施形態によれば、幾何学的に揃ったｃｍ単位の粒子サイズ分布を有し、多数の揃った結晶がシリコンの本体内にある結晶シリコンのことを言う。例えば、幾何学的多結晶シリコンでは、核粒子は、通例、約０．２５ｃｍ^{2}から約２，５００ｃｍ^{2}のサイズの平均断面積と、シリコン本体と同程度とすることができる高さとを有し、断面は、粒子の高さまたは長さに対して垂直な平面内にあり、例えば、高さは断面に対して垂直なシリコン本体の寸法と同程度とすることができ、幾何学的多結晶シリコン本体内における粒子方位を、所定の方位にしたがって制御する。幾何学的多結晶シリコンの粒子の高さまたは長さに垂直な粒子の断面の形状は、通例、それが形成されたシード結晶またはシード結晶の一部の形状と同一である。好ましくは、粒子の断面の形状は多角形である。好ましくは、多角形粒子の過度は、３つの異なる粒子の接合部に対応する。幾何学的多結晶シリコンの本体内にある各粒子は、当該粒子全体において連続的に一貫した１つの結晶方位を備えていることが好ましいが、１つ以上の粒子が、少量の方位が異なるシリコンの更に小さな結晶を含有することもできる。例えば、このような粒子は、各々、部分的または全体的に、結晶方位が別のシリコンの更に小さい結晶を含有することができる。この場合、このような更に小さい結晶は、粒子の全体積の２５％よりも大きい領域を構成せず、好ましくは、粒子の全体積の１０％よりも大きい領域を構成せず、更に好ましくは、粒子の全体積の５％よりも大きい領域を構成せず、更に一層好ましくは、粒子の全体積の１％よりも大きい領域を構成せず、その上更に一層好ましくは、粒子の全体積の０．１％よりも大きい領域を構成しない。

【００１３】

本発明によれば、具体化し広義に記載すると、成型シリコンの製造方法を提供し、該成型シリコンの製造方法は、少なくともシリコンの融点まで加熱した１つ以上の側面と、少なくとも１つの冷却用の壁とを有する坩堝における少なくとも１つの表面上に、複数の単結晶シリコン・シード結晶の幾何学的配列を配置するステップと、単結晶シリコン・シード結晶の幾何学的配列と接触するように、溶融シリコンを配置するステップと、結晶化を制御するために溶融シリコンを冷却することによって、幾何学的に揃った多結晶シリコンから成り、任意に各々約１０ｃｍの少なくとも２つの寸法を有する固体本体を形成するステップであって、溶融シリコンと少なくとも１つの冷却用の壁との間の距離が増大する方向に移動するように、冷却中に溶融シリコンの縁端において固体－液体界面を制御するステップを含む、ステップと、を備えている。

【００１４】

本発明の一実施形態によれば、成型シリコンの製造方法も提供し、該成型シリコンの製造方法は、坩堝の少なくとも２つの表面上に、所定のパターンで複数の単結晶シリコン・シード結晶を配列するステップと、単結晶シリコン・シード結晶と接触するように溶融シリコンを配置するステップと、結晶化を制御するために坩堝の少なくとも２つの表面から溶融シリコンを冷却することによって、幾何学的に揃った多結晶から成り、任意に各々約１０ｃｍの少なくとも２つの寸法を有する固体本体を形成するステップであって、該ステップは、坩堝における溶融シリコンと単結晶シリコン・シード結晶との間の距離が増大する方向に移動するように、冷却中に溶融シリコンの縁端において固体－液体界面を制御するステップを含む、ステップと、を備えている。

【００１５】

本発明の別の実施形態によれば、成型シリコンの製造方法も提供し、該成型シリコンの

製造方法は、坩堝の少なくとも１つの表面に複数のシリコン・シード結晶の幾何学的配列を配置するステップと、少なくとも１つの表面において複数のシリコン・シード結晶を接触するように、シリコン供給原料を配置するステップと、シリコン供給原料および複数のシリコン・シード結晶をシリコンの融点まで加熱するステップと、少なくとも１つのシリコン・シード結晶が完全に溶融しないように、加熱を制御するステップであって、該ステップは、坩堝におけるいずれかの部位においてシリコンの融点に達した後、坩堝の外面において測定して、約０．１°Ｃ／分以下のΔＴを維持するステップを含む、ステップと、一旦複数のシリコン・シード結晶が部分的に溶融したなら、シリコンを冷却することによって、単結晶シリコンから成るシリコン本体を形成するステップと、を備えている。

【００１６】

本発明の更に別の実施形態によれば、成型シリコンの製造方法も提供し、該成型シリコンの製造方法は、坩堝の少なくとも２つの表面に、複数の単結晶シリコン・シード結晶を所定のパターンで配列するステップと、少なくとも２つの表面において、複数の単結晶シリコン・シード結晶と接触するように、シリコン供給原料を配置するステップと、シリコン供給原料および複数の単結晶シリコン・シード結晶をシリコンの融点まで加熱するステップと、複数の単結晶シリコン・シード結晶が完全に溶融しないように、加熱を制御するステップであって、該ステップは、坩堝におけるいずれかの部位においてシリコンの融点に達した後、坩堝の外面において測定して、約０．１°Ｃ／分以下のΔＴを維持するステップを含む、ステップと、一旦少なくとも１つのシリコン・シード結晶が部分的に溶融したなら、シリコンを冷却することによって、単結晶シリコンから成るシリコン本体を形成するステップと、を備えている。

【００１７】

本発明の別の実施形態によれば、成型シリコンの製造方法も提供し、該成型シリコンの製造方法は、少なくともシリコンの融点まで加熱した１つ以上の側面と、少なくとも１つの冷却用の壁とを有する坩堝の少なくとも１つの表面に、少なくとも１つの幾何学的多結晶シリコン・シード結晶を配列するステップと、少なくとも１つのシリコン・シード結晶と接触するように、溶融シリコンを配置するステップと、結晶化を制御するために溶融シリコンを冷却することによって、幾何学的に揃った多結晶シリコンから成り、任意に各々約１０ｃｍの少なくとも２つの寸法を有する固体本体を形成するステップであって、該ステップは、坩堝における溶融シリコンと少なくとも１つの幾何学的多結晶シリコン・シード結晶との間の距離が増大する方向に移動するように、冷却中に溶融シリコンの縁端において固体－液体界面を制御するステップを含む、ステップとを備えている。

【００１８】

本発明の別の実施形態によれば、成型シリコンの製造方法も提供し、該成型シリコンの製造方法は、坩堝内の少なくとも１つの表面に複数の単結晶シリコン・シード結晶の幾何学的配列を配置するステップであって、複数の単結晶シリコン・シード結晶を、坩堝における少なくとも１つの表面の区域全体または実質的に区域全体を覆うように配列する、ステップと、シリコン・シード結晶の幾何学的配列と接触するように、溶融シリコンを配置するステップと、結晶化を制御するように溶融シリコンを冷却することによって、任意に各々少なくとも約１０ｃｍの少なくとも２つの寸法を有する幾何学的に揃った多結晶シリコンから成る固体本体を形成するステップとを備えている。

【００１９】

本発明の別の実施形態によれば、成型シリコンの製造方法も提供し、該成型シリコンの製造方法は、１つ以上の側面が少なくともシリコンの融点に加熱されているベッセルにおいて、少なくとも１つの幾何学的に揃った多結晶シリコン・シード結晶と接触するように溶融シリコンを配置するステップであって、少なくとも１つの幾何学的に揃った多結晶シリコン・シード結晶を、ベッセルの表面の区域全体または実質的に区域全体を覆うように配列する、ステップと、結晶化を制御するように溶融シリコンを冷却することによって、任意に各々少なくとも約１０ｃｍの少なくとも２つの寸法を有する幾何学的に揃った多結晶シシリコンから成る固体本体を形成するステップとを備えている。

【００２０】
本発明の更に別の実施形態によれば、粒子方位の所定の配列を有する、幾何学的に揃った連続多結晶シリコンの本体も提供し、この本体は、任意に、各々、少なくとも約１０ｃｍである少なくとも２つの寸法と、少なくとも約５ｃｍである第３の寸法とを有する。
【００２１】
本発明の更にまた別の実施形態によれば、粒子方位の所定の配列を有し、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約１０ｃｍである、連続成型し幾何学的に揃った多結晶シリコンの本体も提供する。
【００２２】
本発明の更に別の実施形態によれば、粒子方位の所定の配列を有し、更に、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約５０ｍｍである、幾何学的に揃った連続成型多結晶シリコン・ウェハも提供する。
【００２３】
本発明の更に別の実施形態によれば、太陽電池も提供し、該太陽電池は、幾何学的に揃った連続多結晶シリコンの本体から形成したウェハであって、本体が粒子方位の所定の配列を有し、その共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、本体は、更に、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約１０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍである、ウェハと、ｐ－ｎ接合と、ウェハの表面上にある任意の反射防止被膜と、任意に裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層と、ウェハ上にある導電性コンタクトとを備えている。
【００２４】
本発明の更に別の実施形態によれば、太陽電池も提供し、該太陽電池は、幾何学的に揃った連続成型多結晶シリコンの本体から形成したウェハであって、本体が、粒子方位の所定の配列を有し、その共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、本体は、更に、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約１０ｃｍである、ウェハと、ｐ－ｎ接合と、ウェハの表面上にある任意の反射防止被膜と、任意に裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層と、ウェハ上にある導電性コンタクトとを備えている。
【００２５】
本発明の更に別の実施形態によれば、太陽電池も提供し、該太陽電池は、粒子方位の所定の配列を有し、その共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、更に、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約５０ｍｍである、幾何学的に揃った連続多結晶シリコン・ウェハと、ｐ－ｎ接合と、ウェハの表面上にある任意の反射防止被膜と、任意に裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層と、ウェハ上にある導電性コンタクトとを備えている。
【００２６】
本発明の更に別の実施形態によれば、幾何学的に揃った連続多結晶シリコンの本体から形成したシリコンの本体から成り、本体が、粒子方位の所定の配列を有し、好ましくはその共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、この本体が、更に、各々、任意に少なくとも約１０ｃｍである少なくとも２つの寸法と、少なくとも約５ｃｍである第３の寸法とを有する、ウェハも提供する。
【００２７】
本発明の更に別の実施形態によれば、幾何学的に揃った連続多結晶シリコンの本体から形成したシリコンの本体から形成したシリコンから成り、本体が、粒子方位の所定の配列を有し、好ましくはその共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、この本体が、更に、各々任意に少なくとも約１０ｃｍである少なくとも２つの寸法を有する、ウェハも提供する。
【００２８】
本発明の更に別の実施形態によれば、粒子方位の所定の配列を有し、好ましくはその共通極方向が当該本体の表面に対して垂直である、幾何学的に揃った連続多結晶シリコン・ウェハから成り、更に、各々少なくとも約５０ｍｍである少なくとも２つの寸法を有する

、ウェハも提供する。

【００２９】

本発明の更に別の実施形態によれば、太陽電池も提供し、該太陽電池は、幾何学的に揃った連続多結晶シリコンの本体から形成したウェハであって、本体が粒子方位の所定の配列を有し、好ましくはその共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、本体は、更に、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約１０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍである、ウェハと、ｐ－ｎ接合と、ウェハの表面上にある任意の反射防止被膜と、任意に裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層と、ウェハ上にある導電性コンタクトとを備えている。

【００３０】

本発明の更に別の実施形態によれば、太陽電池も提供し、該太陽電池は、幾何学的に揃った連続成型多結晶シリコンの本体から形成したウェハであって、本体が、粒子方位の所定の配列を有し、好ましくはその共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、本体は、更に、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約１０ｃｍである、ウェハと、ｐ－ｎ接合と、ウェハの表面上にある任意の反射防止被膜と、任意に裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層と、ウェハ上にある導電性コンタクトとを備えている。

【００３１】

本発明の更に別の実施形態によれば、太陽電池も提供し、該太陽電池は、粒子方位の所定の配列を有し、好ましくはその共通極方向が当該本体の表面に対して垂直であり、更に、少なくとも２つの寸法が、各々、少なくとも約５０ｍｍである、幾何学的に揃った連続多結晶シリコン・ウェハと、ｐ－ｎ接合と、ウェハの表面上にある任意の反射防止被膜と、任意に裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層と、ウェハ上にある導電性コンタクトとを備えている。

【００３２】

本発明の別の実施形態によれば、本発明にしたがって作成した準単結晶シリコンは、他の結晶方位のシリコンの更に小さい結晶を５体積％まで含有することができる。好ましくは、本発明の別の実施形態によれば、本発明にしたがって作成した準単結晶シリコンは、他の結晶方位のシリコンの更に小さい結晶を１体積％まで含有することができる。更に一層好ましくは、本発明の別の実施形態によれば、本発明にしたがって作成した準単結晶シリコンは、他の結晶方位のシリコンの更に小さい結晶を０．１体積％まで含有することができる。

【００３３】

本発明の更に別の特徴および利点は、以下に続く説明に明記されており、説明から明白であるか、または本発明の実施形態の実用化によって習得できよう。本発明の特徴およびその他の利点は、記載した説明および特許請求の範囲、ならびに添付図面において特定的に指摘した、半導体デバイス構造、ならびに製造方法および装置によって実現および達成する。

【００３４】

尚、以上の概略的な説明、および以下の詳細な説明の双方は、一例で説明のためのものであり、特許請求する発明を更に詳しく説明することを意図していることは理解されるべきである。また、本発明は、ここに記載し特許請求する方法によって作られたシリコン、ならびにこのようなシリコンから作られたウェハおよび太陽電池も含むものとする。

【００３５】

添付図面は、本明細書に組み込まれその一部を構成するが、本発明の実施形態を例示し、更に記載と共に、本発明の特徴、利点、および原理を説明するのに役立つ。

【発明を実施するための最良の形態】

【００３６】

これより、本発明の実施形態について詳細に見ていくことにする。その例を添付図面に示す。可能なときはいつでも、同じまたは同様の部分に言及する際に、同じまたは同様の

参照番号を図面全体において用いることとする。

【００３７】

本発明に係る実施形態では、溶融シリコンの結晶化は、１つ以上のシード結晶を用いた成型プロセスによって行われる。ここで開示するように、このような成型プロセスは、結晶化シリコンの成型本体における結晶粒子のサイズ、形状、および方位を制御するように実施することができる。ここで用いる場合、「成型」という用語は、溶融シリコンを保持するために用いる型またはベッセルにおいて溶融シリコンを冷却することによって、シリコンを形成することを意味する。溶融シリコンのような液体は、それが流し込まれた容器の形状となるので、ここでは、溶融シリコンの冷却は、単に型やベッセルにおけるだけではく、いずれの手段によって溶融シリコンを閉じ込めている間でも、溶融シリコンの冷却を遂行できることも想定している。一例として、シリコンは、坩堝における固化によって形成することができ、固化は坩堝の少なくとも１つの壁から開始し、溶融物(melt)に混入した冷たい異物によってではない。坩堝は、カップ、円筒、またはボックスのような、適した形状であればいずれをなしてもよい。つまり、本発明による溶融シリコン結晶化プロセスは、ブールまたはリボンを「引き上げる」ことによって制御するのではない。更に、本発明の実施形態にしたがえば、型、ベッセル、または坩堝は、溶融シリコンと接触する少なくとも１つの「熱い側壁」を含む。ここで用いる場合、「熱い側壁」とは、それが接触する溶融シリコンと等温度のまたはそれよりも熱い表面を言う。好ましくは、熱い側面は、シリコンの処理中固定されたままである。

【００３８】

本発明の実施形態にしたがえば、結晶化シリコンは、連続単結晶、準単結晶シリコン、または粒子方位を制御した連続幾何学的多結晶のいずれかとすることができる。ここで用いる場合、「連続単結晶シリコン」という用語は、シリコンの本体が単結晶シリコンの１つの同質体であり、互いに接合して大きなシリコン片を形成する小さなシリコン片ではない、単結晶シリコンのことを言う。更に、ここで用いる場合、「連続的幾何学的多結晶シリコン」という用語は、シリコンの本体が幾何学的多結晶シリコンの１つの同質体であり、互いに接合して大きなシリコン片を形成する小さなシリコン片ではない、幾何学的多結晶シリコンのことを言う。

【００３９】

本発明の実施形態にしたがえば、結晶化は、結晶シリコン「シード」の所望の集合体を、例えば、溶融シリコンを保持することができるクオーツ坩堝のようなベッセルの底面に配置することによって行うことができる。ここで用いる場合、「シード」という用語は、所望の結晶構造を有する、好ましくは幾何学的形状のシリコン片のことを言い、好ましくは、少なくとも１つの断面が幾何学的形状、好ましくは多角形状を有し、好ましくはその一側面が、シリコン片を収容しようとするベッセルの表面と一致する。このようなシードは、単結晶シリコン片、または幾何学的に揃った多結晶シリコン片のいずれかとすることができ、例えば、単結晶シリコンのインゴットから切断した、またはそれ以外の方法で得たスラブ、即ち、水平断片である。本発明にしたがえば、シードの上面はその底面と平衡であるとよいが、必ずしもそうでなくてもよい。例えば、シードは、サイズが約２ｍｍから約３０００ｍｍまで変動するシリコン片とすることができる。例えば、シードは、約１０ｍｍから約３００ｍｍまでとすることができる。シリコン片の厚さは、約１ｍｍから約１０００ｍｍ、好ましくは、約５ｍｍから約５０ｍｍとするとよい。シードの適したサイズおよび形状は、都合に合わせて、そしてタイリングに合わせて選択すればよい。タイリングについては、以下で更に詳しく説明するが、例えば、坩堝の底面または側面および底面の１つ以上にわたって、所定の幾何学的方位またはパターンでシリコン・シード結晶を配列する。１つまたは複数のシードが坩堝の表面全体を覆い、それに隣接してこれらを配することにより、シードされた結晶の成長固化前面をシードから遠ざけるように移動させるときに、坩堝の断面積の最大サイズが、一貫した幾何学的結晶として維持できるようにすることが好ましい。

【００４０】

次いで、溶融シリコンを冷却し、シードが存在する中で結晶化することができる。好ましくは、溶融シリコンの冷却は、溶融シリコンの結晶化が固体シードの元の上面の高さ以下で開始し、シードから、好ましくは、上に向かって進んでいくようにする。溶融シリコンの縁端における固体－液体界面は、好ましくは、溶融シリコンを成型している坩堝の表面のような、ベッセルの冷却面に、最初は一致することが好ましい。本発明の実施形態によれば、溶融シリコンと結晶化シリコンとの間の液体－固体体界面は、成型プロセスの一部、例えば、固化段階の初期部分、またはその全てにわたって実質的に平坦に維持することができる。本発明の一実施形態では、溶融シリコンの縁端の各々における固体体－液体界面を、好ましくは固体－液体界面を実質的に平坦に維持しつつ、溶融シリコンと坩堝の冷却面との間の距離が増大する方向に移動するように冷却中に制御する。

【００４１】

このため、本発明にしたがえば、固化前面は、ベッセルの冷却面の形状と平行とすることができる。例えば、底面が平坦な坩堝を用いると、固化前面は実質的に平坦のままであり続けることができ、固体－液体界面の横断面(profile)が制御される。固体－液体界面は、縁端から中央に移動すると、その曲率半径が減少するように制御することができる。あるいは、固体－液体界面は、ベッセルの幅の少なくとも半分の平均曲率半径を維持するように制御することができる。更に、固体－液体界面は、ベッセルの幅の少なくとも２倍の平均曲率半径を維持するように制御することができる。固体は、多少凸状の界面を有する可能性があり、曲率半径は少なくともベッセルの幅の４倍となる。例えば、固体－液体界面の曲率半径は、一般に、０．７ｍの正方形坩堝では２ｍよりも大きく、坩堝の横寸法の２倍よりも大きく、好ましくは、坩堝の横寸法の約８倍から約１６倍とすることができる。

【００４２】

本発明の実施形態によれば、好ましくは成型した、単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、好ましくは、少なくとも２つの寸法が、各々、約２０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約２０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約１０ｃｍで形成することができる。好ましくは、好ましくは成型した、単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約３０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約３０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも１０ｃｍで形成することができる。更に好ましくは、好ましくは成型した、単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約３５ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約３５ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも１０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した、単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約４０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約４０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した、単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約５０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約５０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した、単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約６０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約６０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した、単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約７０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約７０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。本発明の実施形態によれば、連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの本体は、半径方向に分布する欠陥および／または不純物がなく、または実質的になく、好ましくは、少なくとも２つの寸法が、各々、約２０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約１０ｃｍで形成することができる。好ましくは、連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの本体は、半径方向に分布する欠陥および／または不純物がなく、または実質的になく、少なくとも２つの寸法が、各々、約３０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約１０ｃｍで形成することができる。更に好ましくは、連続単結晶シリ

コン、または準単結晶シリコンの本体は、半径方向に分布する欠陥および／または不純物がなく、または実質的になく、少なくとも２つの寸法が、各々、約３５ｃｍ、第３の寸法が少なくとも約１０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの本体は、半径方向に分布する欠陥および／または不純物がなく、または実質的になく、少なくとも２つの寸法が、各々、約４０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの本体は、半径方向に分布する欠陥および／または不純物がなく、または実質的になく、少なくとも２つの寸法が、各々、約５０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの本体は、半径方向に分布する欠陥および／または不純物がなく、または実質的になく、少なくとも２つの寸法が、各々、約６０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの本体は、半径方向に分布する欠陥および／または不純物がなく、または実質的になく、少なくとも２つの寸法が、各々、約７０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍで形成することができる。

【００４３】

本発明の実施形態によって作成した成型シリコンのインゴットの横サイズの上限は、成型および坩堝製作技術のみによって決められ、本発明の方法自体によって決まるのではない。本発明によれば、断面積が少なくとも１ｍ^{2}から４～８ｍ^{2}までのインゴットを製造することができる。同様に、インゴットの高さの上限は、成型プロセスの基礎的事項ではなく、サイクル時間の長さに関係すると考えられる。約５０ｃｍから約８０ｃｍまでの高さのインゴットが可能である。つまり、本発明にしたがえば、連続単結晶シリコンまたは準単結晶シリコンの本体は、断面が約６６ｃｍ×６６ｃｍに首尾良く成長することができ、連続単結晶シリコンの矩形固体片の体積は、少なくとも３３，７５０ｃｍ^{3}となる。更に、本発明にしたがえば、成型連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの固体本体は、好ましくは、少なくとも２つの寸法の各々が、成型ベッセルの内部寸法と同じ大きさであり、第３寸法がインゴットと同じ高さとなるように形成することができる。例えば、単結晶シリコンの成型本体は、正方形状または矩形状固体であり、前述の寸法は、このような本体の長さ、幅、および高さのことである。

【００４４】

同様に、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、好ましくは、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約１０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。好ましくは、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約２０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。更に好ましくは、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約３０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約３５ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約４０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約５０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約６０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。更に一層好ましくは、成型幾何学的多結晶シリコンの固体本体は、少なくとも２つの寸法の各々が少なくとも約７０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約５ｃｍで形成することができる。つまり、本発明にしたがえば、連続幾何学的多結晶シリコンの本体は、断面が約６６ｃｍ×６６ｃｍに首尾良く成長することができ、連続幾何学的多結晶シリコンの矩形固体片の体積は、少なくとも３３，７５０ｃｍ^{3}となる。更に、本発明にしたがえば、成型幾何学的多結晶シ

リコンは、好ましくは、少なくとも２つの寸法の各々が、成型ベッセルの内部寸法と同じ大きさとなるように形成することができる。例えば、幾何学的多結晶シリコンの成型本体は、正方形状または矩形状固体であり、前述の寸法は、このような本体の長さ、幅、および高さのことである。

【００４５】

本発明の実施形態にしたがった様式で溶融シリコンの結晶化を行うことにより、ランダムではなく特定の粒子境界および特定の粒子サイズを有する成型シリコンを作成することができる。加えて、全てのシードを互いに対して同じように向けさせるようにシードを整列することによって、例えば、（１００）極方向を坩堝の底面に対して垂直とし、（１１０）極方向を矩形または正方形断面の坩堝の辺の１つに対して平行とすることによって、成型シリコンの大きな温帯を得ることができ、これは、このような成型シリコンの極方向がシードのそれと同じとなっている、単結晶シリコンまたは準単結晶シリコンである。同様に、他の極方向も坩堝の底面に対して垂直としてもよい。更に、本発明の一実施形態にしたがえば、シードは、いずれの共通極方向も坩堝の底面に対して垂直となるように配列することもできる。

【００４６】

円筒状に形成されたブールを溶融シリコンのプールから引き上げる従来の方法、例えば、ＣＺまたはＦＺ方法によって単結晶シリコンを作成すると、得られる単結晶シリコンは、半径方向に分布する不純物、およびスワール欠陥（空乏や自己格子間原子のような内在的な欠陥から形成される）のような、欠陥、ならびにＯＳＦ環状欠陥を含有する。スワール欠陥は、格子間シリコン原子または空乏であり、単独または群生形態のいずれかとなる。このようなスワール欠陥は、ｘ線トポグラフィによって検出することができ、シリコンにおいて「スワール」（渦巻き）のように見える。また、これらは、欠陥描写に好ましいシリコンの酸エッチングの後に検出することができる。

【００４７】

従来のＣＺまたはＦＺ方法によれば、シリコン内部における酸素原子の分布、およびこのような酸素原子によって生ずるシリコン内の欠陥は、半径方向に位置する。これが意味するのは、これらは、中心軸に対して対称なリング、螺旋、または条線状に並ぶ傾向があるということである。ＯＦＳリング欠陥は、これの特定的な例であり、ナノメートル単位の酸素が、引き上げた単結晶インゴットまたはシリコンのブール内にある円筒状帯域における有核積層不良(nucleate stacking fault)を突然引き起こし、このようなシリコンから作られるウェハ上に円形の欠陥帯域が生ずる。このような帯域は、好ましい酸エッチング(preferential acid etching)の後に、シリコンのサンプルにおいて観察することができる。

【００４８】

スワール欠陥およびＯＳＦリング欠陥の双方は、例えば、従来のＣＺまたはＦＺ方法によって、溶融シリコンのプールから円筒形状のブールを引き上げることによって、引き上げプロセスの回転対称、軸方向熱勾配、およびプロセスに内在する回転のために、単結晶シリコンのブールに発生する。対照的に、本発明の実施形態による成型プロセスでは、このようなスワール欠陥やＯＳＦリング欠陥を呈しないシリコンを作成することができる。これは、円筒対称性(cylindrical symmetry)を有さないシリコン本体において、そして固化および冷却プロセス全体にわたってインゴットの全てにおいて等温線が本質的に平坦であるプロセスにおいて、成型プロセス中における欠陥の組み込みが、回転の影響を受けない成長界面において本質的にランダムに分散することができるからである。

【００４９】

異なる方法によって成長したシリコンにおける軽い元素の不純物濃度に関して、表１に示す以下のレベルが、広く考慮される特性である。

【００５０】

【表１】

	濃度（原子／ｃｍ^3）		
	酸素	炭素	窒素
浮遊帯	＜1×10^{16}	＜1×10^{16}	＜1×10^{14}
チョクラルスキ	2×10^{17}～1×10^{18}	＜1×10^{16}	＜5×10^{14}
成型	$2\sim3\times10^{17}$	2×10^{16}～5×10^{17}	＞1×10^{15}

【００５１】

ＣＺインゴットの一部は、5×10^{17}原子／ｃｍ^{3}という低さの酸素濃度で生産することができるが、これより低くはならない。炭素および窒素の濃度は、ＦＺおよびＣＺインゴットでは、意図的なドーピングによって増大させることができるが、ドーピングはこれらの技法では固体の溶解度の限界を超過することはなく（成型物質でも同様）、ドープしたインゴットは、直径２０ｃｍよりも大きいサイズでは作成されたことはない。対照的に、成型インゴットは、通例、剥離剤塗布およびファーネス・ホット・ゾーンの設計により、炭素および窒素が過飽和となる。その結果、液相核形成(liquid phase nucleation)および成長のために、凝結した窒素および炭素が至る所に発生する。更に、本発明の実施形態によれば、先に報告した不純物レベルで、そして５０×５０×２０ｃｍ^{3}および６０×６５×５ｃｍ^{3}というサイズで、成型単結晶インゴットが製造されている。これらの寸法は一例に過ぎず、本発明の成型プロセスの上限と見なしてはならない。

【００５２】

例えば、不純物レベルに関して、本発明によって成型されたシリコンでは、約$1\sim5\times10^{17}$原子／ｃｍ^3（約1×10^{17}原子／ｃｍ^{3}から約5×10^{17}原子／ｃｍ^{3}に対する表記）の溶解炭素濃度、約$2\sim3\times10^{17}$原子／ｃｍ^{3}の溶解酸素濃度、および約$1\sim5\times10^{15}$原子／ｃｍ^{3}の溶解窒素濃度が好ましい。本発明の実施形態によれば、好ましくは成型した単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約２０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約２０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約１０ｃｍであり、溶解炭素濃度が約$1\sim5\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、溶解酸素濃度が約$2\sim3\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、および溶解窒素濃度が約$1\sim5\times10^{15}$原子／ｃｍ^{3}で形成することができる。好ましくは、好ましくは成型した単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約３０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約３０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約１０ｃｍであり、溶解炭素濃度が約$1\sim5\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、溶解酸素濃度が約$2\sim3\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、および溶解窒素濃度が約$1\sim5\times10^{15}$原子／ｃｍ^{3}で形成することができる。更に好ましくは、好ましくは成型した単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約３５ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約３５ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約１０ｃｍであり、溶解炭素濃度が約$1\sim5\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、溶解酸素濃度が約$2\sim3\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、および溶解窒素濃度が約$1\sim5\times10^{15}$原子／ｃｍ^{3}で形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約４０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約４０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍであり、溶解炭素濃度が約$1\sim5\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、溶解酸素濃度が約$2\sim3\times10^{17}$原子／ｃｍ^3、および溶解窒素濃度が約$1\sim5\times10^{15}$原子／ｃｍ^{3}で形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法

が、各々、約５０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約５０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍであり、溶解炭素濃度が約１～５×１０^{17}原子／ｃｍ^{3}、溶解酸素濃度が約２～３×１０^{17}原子／ｃｍ^{3}、および溶解窒素濃度が約１～５×１０^{15}原子／ｃｍ^{3}で形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約６０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約６０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍであり、溶解炭素濃度が約１～５×１０^{17}原子／ｃｍ^{3}、溶解酸素濃度が約２～３×１０^{17}原子／ｃｍ^{3}、および溶解窒素濃度が約１～５×１０^{15}原子／ｃｍ^{3}で形成することができる。更に一層好ましくは、好ましくは成型した単結晶シリコンの固体本体、または準単結晶シリコンは、少なくとも２つの寸法が、各々、約７０ｃｍ、例えば、一辺が少なくとも約７０ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍであり、溶解炭素濃度が約１～５×１０^{17}原子／ｃｍ^{3}、溶解酸素濃度が約２～３×１０^{17}原子／ｃｍ^{3}、および溶解窒素濃度が約１～５×１０^{15}原子／ｃｍ^{3}で形成することができる。

【００５３】

本発明の実施形態によって作成し、先に参照した不純物濃度を有する成型シリコンのインゴットの横サイズの上限は、成型および坩堝製作技術のみによって決められ、本発明の方法自体によって決まるのではない。つまり、本発明にしたがえば、先に参照した不純物濃度を有する成型連続単結晶シリコン、または準単結晶シリコンの固体本体は、好ましくは、少なくとも２つの寸法の各々が、成型ベッセルの内部寸法と同じ大きさであり、第３寸法がインゴットと同じ高さとなるように形成することができる。例えば、単結晶シリコンの成型本体は、正方形状または矩形状固体であり、前述の寸法は、このような本体の長さ、幅、および高さのことである。

【００５４】

本発明の実施形態にしたがえば、成型プロセスに用いられるシードは、所望のサイズおよび形状であればいずれでも可能であるが、正方形、矩形、六角形、菱形、または八角形の形状としたシリコン辺のように、適した幾何学的形状とした単結晶シリコン片、準単結晶シリコン、または幾何学的に揃った多結晶シリコンである。これらは、その縁辺同士を合わせて配置する、即ち、「敷設する」ことができ、所望のパターンで坩堝の底面に一致させることができるように、タイリングに適した形状とすることができる。また、本発明の実施形態にしたがえば、坩堝の側面の、全てを含む、１つ以上に、シードを置くことができる。このようなシードは、単結晶シリコンのブールのような、結晶シリコン源を鋸引きして、所望の形状を有する片とすることによって得ることができる。また、シードは、本発明の実施形態によるプロセスによって作成した連続単結晶、準単結晶シリコン、または連続幾何学的多結晶シリコンのいずれかのサンプルからこれらを切断することによって形成し、後続の成型プロセスにおいて用いるシードを、初期成型プロセスから作ることができるようにすることもできる。つまり、例えば、連続単結晶または準単結晶シリコンのいずれかのスラブを、連続単結晶または準単結晶シリコンのインゴットから切断するまたはそれ以外の方法で得れば、後続の連続単結晶または準単結晶シリコンの成型のためのテンプレートとして機能することができる。このようなシード結晶は、シードを配置する坩堝またはその他のベッセルの底辺のような、一側面のサイズおよび形状、または実質的にそのサイズおよび形状とすることができる。単結晶成型のためには、欠陥の組み込みを回避するために、できるだけ少ないシードで坩堝の底面を覆うことが好ましい。つまり、１つまたは複数のシードは、本発明による成型方法を実行するために１つ以上のシードを配置する坩堝またはその他のベッセルの底面のような、１つ以上の側面のサイズおよび形状、または実質的にそのサイズおよび形状とすることができる。

【００５５】

これより、本発明のある種の実施形態によってシリコンを用意するプロセスおよび装置について説明する。しかしながら、これらは、本発明の原理に沿ってシリコンを形成する唯一の方法ではないことは言うまでもない。

【００５６】

図１を参照すると、クオーツ坩堝のような、底面および壁のある坩堝１１０の底面にシード１００が配置されており、これらは大きな連続的に方位付けられたスラブ１２０を形成するように、密接して同じ方位に突き合わされている。あるいは、これらは、特定的な粒子境界が生じ、結果的に生産されるシリコンにおいて、故意に選択した粒子サイズが得られるように、予め選択した誤方位(misorientation)に密接して突き合わせる。即ち、幾何学的多結晶シリコンの成型では、得られる結晶化幾何学的多結晶シリコンの断面粒子サイズ、および、好ましくは、断面形状は、シードのそれと等しいか、または近似することになり、粒子の高さは、断面に対して垂直なシリコンの寸法と同じ長さとすることができる。幾何学的多結晶シード結晶、例えば、幾何学的多結晶シリコンのインゴットから切断したまたはその他の方法で得た幾何学的多結晶シリコンのスラブを、幾何学的多結晶シリコンを成型するための１つまたは複数のシード結晶として用いる場合、得られる幾何学的多結晶シリコンの粒子の断面粒子サイズ、および、好ましくは、断面形状は、１つまたは複数の幾何学的多結晶シードにおける粒子に近似する。つまり、幾何学的多結晶シリコンのインゴットから切断したまたはそれ以外の方法で得た幾何学的多結晶シリコンのスラブは、「幾何学的多結晶シリコン・シード結晶」（「幾何学的に揃った多結晶シリコン・シード結晶」とも呼ぶ）となることができ、後続の幾何学的多結晶シリコンの成型のためのテンプレートとして機能することができる。このようなシード結晶は、シードを配置する坩堝またはその他のベッセルの、底面のような、一側面のサイズおよび形状、または実質的にそのサイズおよび形状とすることができる。このようなシード結晶を本発明の方法において用いると、その結果得られる幾何学的多結晶シリコンが有する結晶粒子は、好ましくは、シードの中にある粒子と同じまたは実質的に同じ断面サイズおよび形状を有する。

【００５７】

図２を参照すると、シード１００は、坩堝１１０の１つ以上の側面１３０、１４０上に配置することもできる。シード１００は坩堝１１０の４つの側面全てに配置することができるが、例示の目的のみのために、壁１３０、１４０上だけにシード１００を示す。好ましくは、坩堝１１０の４つの壁のいずれに配置するシードも、結晶が成長し易くするために、柱状となっている。好ましくは、坩堝１１０の４つの壁のいずれに配置した柱状シードの各々も、坩堝１１０の底面上でその直下に置かれたシードと同じ粒子方位を有する。幾何学的多結晶シリコンの成長の場合、このように柱状のシードを配置することにより、坩堝１１０の高さと同じまで幾何学的多結晶シリコン粒子を成長するのを促進する。

【００５８】

更に図２を参照すると、シード１１０のこの配列の利点は、シリコンを成型するための自己伝搬プロセス(self-propagating process)が一層素早く、単純となり、結晶性が高くなり、成長速度も高くなることである。例えば、シリコンは、互いに積層した多数のシードから成る、シリコン「カップ」の中で溶融し、坩堝１１０の内側に空洞、例えば、底面および４つの壁を形成することができる。代替例では、この受け入れる「カップ」を最初にシリコンの融点まで加熱するが固体状態を維持し、次いで溶融シリコンを注ぎ込み、熱平衡に到達させる。次いで、前述の例のいずれにおいても、例えば、熱を周囲に放射する固体ヒート・シンク材料（図示せず）によって、坩堝１１０を冷却することによって、坩堝１１０の底面および側面から熱を除去しつつ、熱を坩堝１１０の開放上面に加え続ける。このように、得られたシリコンの成型インゴットは、単結晶または幾何学的多結晶のいずれにもなることができ（用いるシード１００の種類およびその方位に左右される）、結晶化は既知の多結晶成型プロセスよりも速く進む。このプロセスを繰り返すために、既知の技法を用いて、結晶化したシリコン・インゴットの側面および底面の一部を除去し、後続の成型プロセスにおいて再利用することができる。好ましくは、複数のシード結晶、例えば、シード１００は、シード１００間における共通極方向が坩堝１１０の底面および側面の各々に対して垂直となるように配列し、坩堝１１０の底面と側面との間に粒子境界が形成されないようにする。

【００５９】

図３Ａから図３Ｃは、坩堝１１０において幾何学的多結晶シリコンを成型するためのタ

イリングの一例を示す。注意深いシードの作成、方位決定、配置、および結晶の成長によって、結晶粒子技術を達成することができる。例えば、図３Ａおよび図３Ｂは、２つの単結晶シリコン・スラブ１５５、１６５を示し、その上に異なる（１１０）方向が示されている。双方のスラブは、その表面に対して垂直な共通の（１００）方向を有する。次いで、単結晶シリコン１５５、１６５の各スラブを切断して多数のシリコン片を形成する。これらがシード１５０、１６０となる。表面の形式(type)は、模様の形成(texturing)の理由により均一にすることができ、あるいは自由に選択することができる。粒子の形状およびサイズは、図３Ｂに示すように、単結晶シリコン１５５および１６５のスラブからのタイルの切断に基づいて選択することができる。片１５０、１６０の隣接するタイル間の相対的方位角度によって、得られる成型幾何学的多結晶シリコンにおける粒子境界形式（例えば、高角度、低角度、または二重）が決定する。図３Ａでは、例えば、（１００）極方向の２つの粒子方位が示されている。

【００６０】

ここで、図３Ｃに示すシードは、敷き詰めた単結晶シリコン片１５０、１６０で構成されており、単結晶シリコン片１５０、１６０は、それらの隣接タイルと、特定的に選択した方位関係を有する。次いで、図３Ｃに示すように、シリコン片１５０、１６０を、坩堝１１０の底面に敷き詰め、片１５０、１６０上に描いた矢印で示すように、２つの（１１０）方向が交互するようにする。尚、片１５０、１６０は、図示の目的のみのために、大まかに正方形のブロックとして描いたが、以下で論ずる理由のために、他の形状も可能であることを注記しておくのは重要である。

【００６１】

図３Ｃには示さないが、シードは、図２におけるように、坩堝の側面上に配置してもよい。この場合、シリコン供給材料（図示せず）は片１５０、１６０の上から坩堝１１０の中に導入し、次いで溶融させることができる。あるいは、溶融シリコンを坩堝１１０に注ぎ込むこともできる。代替例では、坩堝１１０をシリコンの融点に非常に近い温度または融点まで加熱し、次いで溶融シリコンを注ぎ込む。本発明の実施形態にしたがえば、固化が始まる前に、シードの薄い層を溶融させることができる。

【００６２】

次いで、前述の例のいずれにおいても、例えば、熱を周囲に放射する固体ヒート・シンク材料（図示せず）によって、坩堝１１０を冷却することによって、坩堝１１０の底面（およびシードが側面にも並べられる場合にのみ側面）から熱を除去しつつ、熱を坩堝１１０の開放上面に加え続ける。つまり、溶融シリコンは、シードが固体に維持されている間に導入され、溶融物の固化に指向性があるために、柱状粒子が上に向かって成長することになる。このように、得られた幾何学的多結晶シリコンの成型インゴットは、敷き詰めたシリコン・シード１５０、１６０の粒子方位を模倣する(mimic)ことができる。一旦この技法を適正に実施したなら、得られたインゴットを切断して、例えば、水平スラブとし、他の成型プロセスのためのシード層として作用することができる。スラブは、例えば、成型に用いられる坩堝またはその他のベッセルの底面のような、表面のサイズおよび形状、または実質的にそのサイズおよび形状を有することができる。例えば、このようなスラブを１つだけ、成型プロセスに用いることができる。

【００６３】

図４は、図３Ｃに示したタイリングの変形を示す。成型幾何学的多結晶シリコンに対する粒子方位の一例として、シード片１５０、１６０は、共通極方向（００１）が坩堝１１０の底面に対して垂直となるように、敷き詰められている。図４では、（１１０）方向群の全てのばらつきを、方向矢印で示すように、片１５０、１６０のタイリングにおいて表現している。この特定的な図には示さないが、シードは坩堝１１０の１つ以上の側面上にあることも可能である。

【００６４】

このように、シリコンを形成するために用いられる坩堝におけるシード結晶の方位は、特定の粒子境界が成型幾何学的多結晶シリコンにおいて形成されるように選択することが

でき、このような粒子境界は幾何学的形状を包囲する。本発明の実施形態とは対照的に、既知の成型プロセスでは、完全に溶融したシリコンの塊からの直接固化によって、制御せずに、多結晶粒子を成型することを伴う。その結果得られる粒子は、基本的にランダムな方位およびサイズの分布を有する。粒子方位がランダムであると、シリコン表面に効果的に模様を形成することが困難になる。更に、典型的な成長技法の自然生成物である、粒子境界におけるねじれが、転位の群発または線状の転位を伴う構造的欠陥を凝集させる傾向があることが示されている。これらの転位、およびこれらが引き付ける傾向がある不純物は、電子キャリアの速い再結合、および光電変換材料としての性能劣化の原因となる。したがって、本発明の一実施形態にしたがえば、単結晶または幾何学的多結晶シリコンのいずれの成型についても、規則的な粒子境界網を注意深く計画し、植え付けて、構造的欠陥を最少に抑えつつ、少数キャリアの寿命および不純物ゲッタリングが最大となるように、粒子のサイズ、形状、および方位を明示的に選択するようにする。

【００６５】

粒子境界は、成長中にその垂直方向を維持しつつ、転位の凝集を最少に抑えるために、平面となるように選択することができる。粒子境界の形式は、不純物のゲッタリングおよび応力解放が最大となるように選択する。粒子方位（そして、特に表面方位）は、模様の形成が可能となり、表面のパシベーションを改良し、粒子強度を高めるように選択する。粒子のサイズは、効果的なゲッタリング距離と大きな吸収面積との間のバランスを最適化するように選択する。例えば、幾何学的多結晶シリコンの成型は、幾何学的多結晶シリコンの平均最少粒子断面サイズが少なくとも約０．５ｃｍから約１０ｃｍとなり、共通極方向が、例えば、図３Ｃおよび図４に示すような、成型幾何学的多結晶シリコンの表面に対して垂直となるように遂行することができる。平均結晶粒子断面サイズは、約０．５ｃｍから約７０ｃｍ、またはそれ以上とすることができる。前述のように、断面サイズとは、粒子の高さまたは長さに対して垂直な粒子の断面における最大寸法と見なすこととする。

【００６６】

本発明の一実施形態にしたがえば、複数の単結晶シリコン・シード結晶の幾何学的配列は、坩堝の少なくとも１つの表面、例えば、坩堝の底面上に行うことができ、ここで、幾何学的配列は密接に詰め込んだ多角形を含む。あるいは、複数の単結晶シリコン・シード結晶の幾何学的配列は、幾何学的配列が、密接に詰め込んだ多角形、あるいは、例えば、図５および図６に示すように、菱形または三角形の隙間を有する多角形の形状を含むように、行うこともできる。更に別の代替案では、複数の単結晶シード結晶を用いる代わりに、単結晶シリコンまたは準単結晶シリコンの事前成型において生産したインゴットから切断またはそれ以外の方法で得たシリコンの一部(section)またはスラブを、本発明による単結晶シリコンまたは準単結晶シリコンを成型するための単独シード結晶として用いることができる。このような単独シード結晶は、成型を行うために用いる坩堝またはその他のベッセルの表面と同じサイズおよび形状、または実質的に同じサイズおよび形状とすることができる。更に具体的には、図５は六角形１７０を密接に詰め込んだアレイの一例を示す。対照的に、図６は、菱形または三角形の隙間１８０、１９０を有する多角形のアレイの一例を示す。双方のアレイについて、以下で更に詳しく説明する。先に論じた配列のいずれでも、単結晶シリコンの固体本体、準単結晶シリコンの固体本体、または幾何学的多結晶シリコンの固体本体のいずれを成型するためであっても、一実施形態に適用することができ、この場合、坩堝の底面および側面の双方に、シード結晶を配置する。

【００６７】

本発明の実施形態にしたがって、幾何学的多結晶シリコンの本体を成型することによって生産するシリコン結晶粒子は、柱状に成長させることができる。更に、このような結晶粒子の断面は、それを形成した元であるシードの形状、またはそれに近い形状とすることができる。このように特定的に選択した粒子境界を有するシリコンを作成する際、好ましくは、粒子境界接合は、角毎に３つだけの粒子境界を有する。図５に示すように、シード結晶１７０の六角形状配列は、水平面内における原子が、シリコンに対する（１１１）のように、三重(three-fold)または六重(six-fold)対称規則性を有するような結晶方位とな

る、シードのタイリングに望ましい。つまり、図５は、図１および図２に示したような、適した坩堝の底面に配列するための、六角形状シードの集合体の一部の平面図を示す。矢印は、シードにおけるシリコン結晶の（１１０）方向の向きを示す。

【００６８】

あるいは、４重対称規則性を有する方位では、シードの異なる幾何学的構成を用いて、多数の粒子を跨いで安定した対称粒子境界を維持しつつも、三粒子境界角規則を満たすことができる。例えば、図６に示すように、θが（１１０）方向と（１００）極を有する八角形の主要辺(primary side)との間における誤方位とし、アルファが隙間の菱形の頂角とすると、全ての結晶粒子は、α＝９０°－θであれば、（１１０）方向に対して対称的な粒子境界を有することになる。この例では、全ての結晶粒子は、図６を描いた紙面に対して垂直な（１００）極を有する。つまり、図６は、図１および図２に示すような、適した坩堝の底面上の配列に合わせた、菱形状シード１８０、１９０と共に、八角形状のシードの集合体の一部の平面図である。矢印は、シードの中にあるシリコン結晶の（１１０）方向の向きを示す。

【００６９】

図７は、本発明にしたがってシリコンを作成する方法例を示すフローチャートである。図７にしたがえば、方法７００は、開始すると、単結晶または幾何学的多結晶シリコン成長のために、単結晶シリコン・シード結晶を選択し、この単結晶シリコン・シード結晶を坩堝の中に配列する（ステップ７０５）。あるいは、単結晶シリコンまたは幾何学的に揃った多結晶シリコンのインゴットから切断したまたはそれ以外の方法で得た単一のスラブを、単一のシード結晶として用いることもできる。次に、シリコン供給原料を坩堝に追加することができる（ステップ７１０）。次いで、坩堝を上から加熱しながら、坩堝の底面を下から冷却する（受動的または能動的に、ステップ７１５参照）。溶融の間、シリコンの溶融段階を監視して、固体－液体界面の位置を追跡し制御する（ステップ７２０）。シリコンの溶融段階は、単結晶シリコン・シード結晶の一部が溶融するまで、継続することが許される（ステップ７２５）。一旦単結晶シリコン・シード結晶の所望の部分が溶融したなら、溶融段階を終了し、結晶成長段階が開始する（ステップ７３０）。結晶の成長は、シリコンの結晶化が完了するまで、坩堝内において単一方向にそして垂直に連続することができる（ステップ７３５）。幾何学的多結晶シリコン成長に合わせてシードを配列している場合、ステップ７３５の結晶化によって、柱状の粒子を有する幾何学的多結晶シリコン・インゴットが生産される（ステップ７４０）。あるいは、単結晶シリコン成長に合わせてシードを配列している場合、ステップ７３５の結晶化によって、単結晶シリコン・インゴットが生産される（ステップ７４５）。最後に、ステップ７４０または７４５のいずれかで生産されたインゴットを、その後の処理のために、取り出す（ステップ７５０）。

【００７０】

図８Ａに示すように、シリコン供給原料２００を、シード２２０を収容している坩堝２１０に、例えば、２つの方法の内１つで導入することができる。最初の方法では、都合のよい大きさにしたチャンク(chunk)の形態で、坩堝２１０に固体シリコン供給原料２００を最大容量まで装荷し、成型場（図示せず）に、装荷した坩堝２１０を配置する。

【００７１】

図８Ｂに示すように、坩堝１１０内に充填したシリコンの上面が融点まで加熱され、一方底面を能動的または受動的に冷却して坩堝２１０の底面においてシード２２０の固相を維持するように、即ち、供給原料２００を溶融するときにこれらが浮動しないように、坩堝２１０内における熱的特性を設定する。固体のヒート・シンク材料２３０が、水冷壁に熱を放射するために、坩堝２１０の底面に接触している。例えば、ヒート・シンク材料２３０は、グラファイトの固体ブロックとすることができ、好ましくは、坩堝の底面と同じ位またはそれよりも大きい寸法を有することができる。本発明にしたがえば、例えば、ヒート・シンク材料は、底面が６６ｃｍ×６６ｃｍの坩堝と共に用いる場合、６６ｃｍ×６６ｃｍ×２０ｃｍとすることができる。シード２２０を坩堝２１０の底面上のみに配置す

るのであれば、坩堝２１０の側壁は、好ましくは、いずれにしても冷却しない。シード２２０を坩堝２１０の底面および側面上に配置する場合、所望の熱的特性を維持するために、坩堝２１０の底面および側面の双方に、ヒート・シンク材料２３０を配置する。

【００７２】

シリコン供給原料２００の溶融局面(melting phase)を注意深く監視して、溶融シリコンとシードとの間の界面位置を追跡する。好ましくは、溶融２４０（図８Ｂに示す）は、シード２２０を除く供給原料シリコン２００の全てが完全に溶融するまで続き、その後シード２２０が部分的に溶融する。加熱を注意深く制御して、例えば、坩堝におけるいずれかの部位でシリコンの融点に達した後は、坩堝の外面で測定して、ΔＴを約０．１°Ｃ／分以下に維持することにより、シード２２０が完全に溶融しないようにする。好ましくは、坩堝におけるいずれかの部位でシリコンの融点に達した後は、坩堝の外面で測定して、ΔＴを約０．０５°Ｃ／分以下に維持することにより、加熱を注意深く制御することができる。例えば、本発明にしたがえば、ΔＴは、坩堝とグラファイトの大きなブロックとの間にある坩堝の外面上で測定することができ、既に溶融したシード２２０の部分を計算するために、ジプロッド(diprod)を溶融物２４０の中に挿入して溶融物の深さを測定するとよい。

【００７３】

図８Ｃに示すように、部分２５０は、溶融物２４０の下にあるシード２２０の溶融した部分の全ての厚さを示す。シード２２０の部分２５０が、溶融物２４０の下で溶融した後、溶融段階を素早く終わらせて、結晶成長段階を開始し、坩堝２１０の上面における加熱を減少させ、および／またはヒート・シンク材料２３０の底面の冷却を増大させる。このプロセスの一例として、図８Ｄに示すチャートは、時間の関数としてシード２２０の部分２５０の溶融を示す。図８Ｄに示すように、初期厚さが５および６ｃｍの間であるシードの部分を、固体シードが２ｃｍ未満だけ残るまで、徐々に溶融させる。例えば、坩堝におけるいずれかの部位でシリコンの融点に達した後、坩堝の外面で測定して（例えば、冷却ブロック内に取り付けた熱電対によって）、ΔＴを約０．１°Ｃ／分以下に維持することにより、シード２２０が完全に溶融しないように、加熱を注意深く制御することができる。好ましくは、坩堝におけるいずれかの部位でシリコンの融点に達した後は、坩堝の外面で測定して、ΔＴを約０．０５°Ｃ／分以下に維持することにより、加熱を注意深く制御することができる。この時点で、溶融段階を素早く終わらせて、結晶成長段階を開始する。これは、チャートの縦軸上で測定した固体の厚さの相対的な上昇によって示される。

【００７４】

次いで、図８Ｅに示すように、シリコンの結晶化が完了するまで、シードした結晶の成長が単一方向に、そして垂直に、坩堝２１０内において継続する。成型サイクルが終了するのは、坩堝２１０内における上面から底面までの熱勾配がなくなった(evented out)ときである。次いで、インゴット２６０全体をゆっくりと室温まで冷却する。図８Ｅに示すように、幾何学的多結晶シリコンの成型では、このシード単一方向成長によって生成される柱形状粒子２７０は、概略的に、それが形成された個々のシード２２０の形状と同じ水平断面を有する。このように、成型幾何学的多結晶シリコンの粒子境界は、予め選択することができる。既に論じたシード・パターン／タイリングのいずれでも、この成型プロセスに適用することができる。

【００７５】

あるいは、単結晶シリコンの成型では、シード２２０の配列を、粒子境界が全く有さないように行い、その結果成型単結晶シリコンが得られるようにすることもできる。図８Ｆに示すように、部分２５０は、溶融物２４０の下において溶融したシード２２０の全体的な厚さを示す。溶融物２４０の下においてシード２２０の部分２５０が溶融した後、溶融段階を素早く終わらせて、結晶成長段階を開始し、坩堝２１０の上面における加熱を減少させ、および／またはヒート・シンク材料２３０における底面の冷却を増大させる。次いで、図８Ｇに示すように、シードした結晶の成長が、坩堝２１０内部において、シリコンの結晶化が完了するまで、単一方向にそして垂直に継続する。好ましくは実質的に平面の

固体－液体界面２８５が、上に向かって、坩堝２１０の底面から離れるように伝搬する。成型サイクルが終了するのは、結晶成長の完了後、坩堝２１０内における上面から底面までの熱勾配がなくなった(evened out)ときである。次いで、インゴット２８０全体をゆっくりと室温まで冷却する。単結晶シリコンの成型では、図８Ｇに示すように、このシード単一方向成長によって、成型単結晶シリコン２９０の連続固体本体が得られる。

【００７６】

図９に示す別のプロセスでは、シリコン供給原料２００を最初に別個の区画室または別個の溶融ベッセル３００において溶融させてもよい。シード２２０は、溶融した供給原料３０５を溶融管３１０を通じて坩堝２１０に供給または注入する前に、上位から部分的に溶融してもしなくてもよく、その後図８Ｂから図８Ｇを参照して説明したように、冷却および成長が進む。別の実施形態では、シリコン・シード結晶を坩堝２１０（図示せず）の壁に取り付け、シード成長は、既に説明したように、坩堝２１０の底面だけでなく側面からも進むことができる。あるいは、シリコン供給原料２００を、坩堝２１０とは別個の溶融ベッセル３００において溶融し、同時に坩堝２１０をシリコンの融点まで加熱し、シード２２０が完全に溶融しないように加熱を制御する。シード２２０が部分的に溶融したときに、溶融供給原料３０５を溶融ベッセル３００から坩堝２１０に移し、冷却および結晶化を開始することができる。このように、本発明の一実施形態にしたがえば、結晶化シリコンの固体本体の一部はシード２２０を含むことができる。あるいは、溶融物の導入前では、シードを完全に固体のまま保持することもできる。この場合、溶融ベッセル３００の中にある溶融シリコンを融点を超えて加熱し、過熱液体を導入したときに、この過熱液体にシードの一部を溶融させる。

【００７７】

図９に示すような二段階成型場では、溶融供給原料３０５は、溶融ベッセル３００から注ぎ込まれ、シード２２０上に落下し、固化の間にその結晶性を帯びる。あるいは、溶融は、中央溶融ベッセル３００において行われてもよく、中央溶融ベッセル３００は、坩堝２１０（図示せず）の１つ以上のコピーのような、固化坩堝の分散配列を備えている(feed)。本発明の実施形態にしたがえば、固化坩堝には、坩堝の側面および底面のいずれかまたは双方において、シード２２０をぎっしり並べることができる。この手法の利点の一部には、各成型行程の最適化向上を可能にする、溶融および固化システムの分離、坩堝の供給を維持するために必要となる、新たな材料の溶融を規則的に行うことができる、シリコンの半連続溶融、溶融物の中央から固化場に供給しつつ、最上部（および潜在的な底面の排出）のシリコンのスラギング(slagging)による、開始シリコン材料の純度向上、および溶融ベッセル３００が溶融供給原料３０５と平衡状態となり、重大な不純物源ではなくなることが含まれる。

【００７８】

このように、インゴット２６０または２８０を前述した方法の１つによって成型した後、例えば、本発明にしたがって、インゴットの最下部またはその他の区間を切除し、それを後続の成型行程において単結晶シードとして用いて単結晶シリコン、準単結晶シリコン、または幾何学的多結晶シリコンの本体を形成することによって、得られる成型インゴットを更に処理することができ、この場合、このような単結晶シードのサイズおよび形状は、後続の成型行程において用いられる坩堝の底面と同じサイズおよび形状となり、インゴットの残り部分を切断してブリックおよびウェハとし、これらを処理して光電変換セルを得る。あるいは、インゴット全体を切断して、例えば、水平スラブを得て、今後の成型行程のために多数の成型場においてシード結晶として用いることができる。

【００７９】

本発明の実施形態にしたがうプロセスにおいて用いられるシリコン供給原料は、硼素、アルミニウム、リチウム、ガリウム、燐、アンチモニ、砒素、およびビスマスを含むリストから選択したドーパントのような、１つ以上のドーパントを含有することができる。このようなドーパントの総量は、原子％で約０．０１ｐｐｍ（ｐｐｍａ）から約２ｐｐｍａまでとすることができる。好ましくは、シリコンにおけるドーパントの量は、このシリコ

ンから作られるウェハの抵抗率が約０．１から約５０オーム－ｃｍ、好ましくは、約０．５から約５．０オーム－ｃｍとなるような量である。

【００８０】

このように、本発明にしたがえば、シリコンは、成型連続単結晶シリコン、成型準単結晶シリコン、または成型連続幾何学的多結晶シリコンの本体とすることができ、ＯＳＦおよび／またはスワール欠陥のような、半径方向に分布する欠陥が本質的にない、またはこれらがないことが好ましく、更に好ましくは、本体の少なくとも２つの寸法が、好ましくは、少なくとも約１０ｃｍであり、好ましくは少なくとも約２０ｃｍ、であり、更に好ましくは少なくとも３０ｃｍであり、更に一層好ましくは少なくとも４０ｃｍであり、更に一層好ましくは少なくとも５０ｃｍであり、更に一層好ましくは少なくとも６０ｃｍであり、最も好ましくは少なくとも７０ｃｍである。更に好ましくは、このようなシリコン本体の第３の寸法は、少なくとも約５ｃｍであり、好ましくは少なくとも約１５ｃｍであり、最も好ましくは少なくとも約２０ｃｍである。シリコン本体は、単一本体のような別個の一片とすることができ、あるいは他のシリコンの中に完全にまたは部分的に内蔵される、または包囲されることも可能である。シリコンの本体は、好ましくは、少なくとも２つの寸法が、各々、溶融ベッセルの内寸と同じ大きさを有するように形成することができる。ここで開示したように、本発明の実施形態は、単結晶シリコン、準単結晶シリコン、または幾何学的多結晶シリコンの大きな本体を、単純で価格効率的な成型プロセスによって生産するために用いることができる。

【００８１】

以下に、本発明の実施形態にしたがった実験結果の一例を示す。これらの例は、単に、本発明の実施形態の例を上げて図示するために紹介するのであり、いかようにも本発明の範囲を限定するように解釈してはならない。

例１

シードの準備。０．３ｐｐｍａの硼素を有する純粋なチョクラルスキ（ＣＺ）シリコン（単結晶）のブールをＭＥＭＣから得て、その長さに沿って、ダイアモンド被膜帯鋸を用いて切断し、１辺当たり１４ｃｍの正方形断面を有するようにした。得られた単結晶シリコンのブロックを、その断面に沿って、同じ鋸を用いて切断し、厚さが約２ｃｍから約３ｃｍのスラブを得た。これらのスラブを、単結晶シリコン・シード結晶、即ち、「シード」として用いた。シリコン・ブールの（１００）結晶極方位(crystallographic pole orientation)を維持した。次に、得られた単結晶シリコン・スラブを、クオーツ坩堝の底面に配列し、スラブの（１００）方向が上を向き、（１１０）方向を坩堝の１つの側面に対して平行を維持するようにした。クオーツ坩堝は、１辺が６８ｃｍの正方形断面を有し、深さが約４０ｃｍ、壁の厚さが約１．８ｃｍである。スラブは、その長手寸法が坩堝の底面に平行となり、その側面が接触して、坩堝の底面上にこのようなスラブの単一の完全な層を形成するように、坩堝の底面に配列した。

【００８２】

成型。次いで、室温において総質量２６５ｋｇの固体シリコン供給原料を坩堝に充填した。次いで、充填した坩堝を、多結晶シリコンを成型するために用いられる、現場溶融／指向性固化(directional solidification)成型場に装填する。抵抗性ヒータを約１５５０°Ｃまで過熱することによって、溶融プロセスを実行し、絶縁体を合計で６ｃｍ開放することにより、熱を底面から放射させつつ、過熱が上から行われるように、ヒータを構成した。この構成により、溶融が上下方向に坩堝の底面まで進んだ。シード結晶を融点において固体状態に維持させる受動冷却を底面を介して行い、熱電対によって監視した。クオーツ・ディップ・ロッド(quartz dip rod)を１０分毎に溶融物の中に突っ込んで、これによって溶融の範囲を測定した。ディップ・ロッド高さを、場における空の坩堝で取った測定値と比較して、残留する固体材料の高さを判定した。ディップ・ロッド測定によって、最初に供給原料の溶融、次いで溶融局面を、シード結晶が約１．５ｃｍの高さだけ残るまで、継続させた。この時点で、加熱電力を落として、温度を１５００°Ｃに設定しつつ、絶縁体を１２ｃｍまで開くことによって、底面からの放射を増大させた。固化が開始する前

に、シード結晶が更に１または２ミリメートル余分に溶融したことが、ディップ・ロッド測定によって観察された。固化行程の終了まで、シード単結晶成長が続いた。成長段階および成型サイクルの残りを、通常のパラメータで実行した。ここでは、上面から底面までの熱勾配がなくなり、次いでインゴット全体を室温までゆっくりと冷却した。成型シリコン生産物は、６６ｃｍ×６６ｃｍ×２４ｃｍのインゴットであり、その中央部分は、５０ｃｍ×５０ｃｍの正方形断面を有し、上面から下面まで単結晶シリコンであった。単結晶シリコン構造は、インゴットの表面を視覚的に検査することによって明白であった。加えて、結晶境界を描写することができる苛性配合(caustic formula)によるシリコンのエッチングで、更に、物質における粒子境界の欠如を確認した。全ドーピング平均は１．２オーム－ｃｍであり、このシリコンから製造した光電変換セルの電気的効率は１６．０％であった。

【００８３】

この例にしたがって実行した他の成型工程では、成型シリコン生産物は、シリコンの連続一貫結晶であり、含有する他の結晶方位のシリコン結晶は少なく、あるいは多結晶シリコンの隣接領域を有する単結晶シリコンの本体であったことが観察された。

例２

シードの準備。シードの半分については、（１１０）方向が正方形シードの辺から４５度の角度をなし、他方の半分は約２０度の角度をなすように、単結晶シリコン・シードを切断したことを除いて、シーディングは例１におけると同様に行った。２つの異なるシード方位が交互する市松模様状に、正方形片を坩堝の底面に敷設した。即ち、（１１０）方向は坩堝の側面の方位から４５度および２０度の角度をなした。互いに対して、シードは２５度または１５５度の誤方位を有した。しかしながら、正方形状シードのサイズの不一致により、シーディング層における一部の間隙は、被覆されないまま残された。坩堝は、正方形の辺の各々が約３３ｃｍであり、高さが約２２ｃｍであった。

【００８４】

成型。シードを収容した坩堝、および合計で５６ｋｇの原料供給シリコン・チャンクを収容した別個の坩堝を、遍在成型プロセス（ＵＣＰ）二段階成型場に装填した。受容坩堝（内部にシードが入っている）をシリコンの融点まで加熱するが、完全に溶融するエネルギは与えなかった。他方の坩堝におけるシリコンは、シリコンの融点よりも少なくとも５０°Ｃ高い温度で、抵抗性グラファイト・ヒータによって溶融させ、次いで受容坩堝に注ぎ込んだ。この時点において、固化が直ちに始まり、指向性固化およびシード結晶成長を行うために、受容坩堝の底面から熱を抽出した。シードが構成する既に固化した物質の質量を考慮して、標準的な成長サイクルを短縮した。このように、冷却プロセスが開始する前に６６ｋｇ全て（１０ｋｇのシードおよび５６ｋｇの供給原料シリコン）が固化する時間を許す代わりに、加熱エネルギの浪費を回避するために、５６ｋｇの溶融シリコンのための時間だけを与えた。このプロセスの生産物は、大きく全体的に柱状の粒子のシリコン・インゴットであり、粒子は正方形断面を有し、その形状および寸法は、これらが形成された元のシード結晶の上面に近い寸法のままであった。横方向の粒子境界位置は、成長が進むに連れて、場合によっては浮動した。

【００８５】

例３

シードの準備。坩堝の底面に敷設するために用いられる２３ｋｇの正方形（１００）板によってシーディングを行い、６３ｃｍ×６３ｃｍの被覆領域(coverage area)、および側面において中心における３ｃｍから１．８ｃｍの範囲の厚さが得られた。全ての板は、その（１１０）方向が坩堝の壁から４５°の角度をなすように配列した。

【００８６】

成型。シードを収容した坩堝に、真性シリコン、以前のインゴットからリサイクルしたシリコン、およびｐ－型抵抗率が９オーム－ｃｍよりも大きい二重成型シリコン(double-cast silicon)の混合を表す、合計２４２ｋｇの追加供給原料シリコン・チャンクを充填した。シリコンを充填した坩堝を、一段階指向性固化炉に装填した。坩堝（シードが内部

に入っている）を１５５０°Ｃに加熱しつつ、絶縁体を１２ｃｍまで開放して底面を冷却した。固体－液体界面は、溶融の間中実質的に平坦のままであり、溶融の終了時に、シードのいずれの部分も溶融しなかった。シリコンの厚さを、クオーツ・ディップ・ロッドを用いて監視した。中心の厚さが２．５ｃｍと測定されたときに、溶融段階を停止し、ヒータの温度を１４４０°Ｃまで低下させ、絶縁体の高さを１５ｃｍまで増大させた。溶融局面変化の開始から、坩堝におけるいずれかの部位でシリコンの溶融温度に達した後温度の上昇率を、坩堝の外面上で測定して、０．１°Ｃ／分以下に維持した。次いで、固化プロセスの残りを進ませ、結晶成長の終了が観察されるまで、ヒータにほぼ一定の電力を維持した。成長の終了後、結晶化シリコン・インゴットの温度は一定となり、次いで均一に室温まで低下した。坩堝からインゴットを取り出した後、インゴットの底部を切断して大きな一片を得た。これは、後に、別の後続の成型プロセスにおいてシードとして再利用するためである。インゴットの残りは、続く処理のために、１２．５ｃｍの正方形ブリックに切断した。このプロセスは、実質的にシード層断面全域において単結晶の成長を生じ、インゴットの上端まで進んだという点において成功であった。切断したシリコンの検査から、単結晶性は明白であった。

【００８７】

この例にしたがって実行した他の成型工程では、成型シリコン生産物がシリコンの連続一貫結晶であり、含有する他の結晶方位のシリコン結晶は少なく、あるいは多結晶シリコンの隣接領域を有する単結晶シリコンの本体であったことが観察された。

【００８８】

本発明の実施形態にしたがったシリコンから作成したウェハは、適度に薄く、光電変換セルに用いることができる。更に、ウェハは、ｎ－型でもｐ－型でも可能である。例えば、ウェハは、厚さが約１０ミクロンから約７００ミクロンまで可能である。更に、光電変換セルに用いるウェハは、好ましくは、ウェハの厚さ（ｔ）よりも大きな拡散長（L_p）を有する。例えば、L_pのｔに対する比率は、少なくとも０．５であることが相応しい。例えば、少なくとも約１．１、または少なくとも約２とすることができる。拡散長は、多数キャリア（ｐ－型物質における正孔）と再結合する前に、少数キャリア（ｐ－型物質における電子のような）が拡散することができる平均距離である。L_pは、関係$L_p = (D\tau)^{1/2}$によって、少数キャリアの寿命τに関係がある。ここで、Ｄは拡散定数である。拡散長は、光子－光線－誘発電流技法または表面光電変換技法というような、多数の技法によって測定することができる。どのようにして拡散長を測定することができるかの説明に関しては、例えば、FahrenbruchおよびR. Bubbeによる"Fundamentals of Solar Cells"（太陽電池の基礎）、Accademic Press, 1983, pp.90-102を参照のこと。

【００８９】

ウェハは、約１００ミリメートルから約６００ミリメートルの幅を有することができる。好ましくは、ウェハは、少なくとも１つの寸法が少なくとも約５０ｍｍである。本発明のシリコンから作成したウェハ、したがって本発明によって作成した光電変換セルは、例えば、約５０から約３６００平方センチメートルの表面積を有することができる。ウェハの表面には、模様を形成することが好ましい。例えば、化学的エッチング、プラズマ・エッチング、あるいはレーザまたは機械的スクライビングを用いると、相応しい模様を形成することができる。（１００）極方位を有するウェハを用いる場合、水酸化ナトリウムのような塩基の水溶液において、高温、例えば、約７０°Ｃから約９０°Ｃで約１０から約１２０分間ウェハを処理することによって、異方性の模様の表面を形成するように、ウェハをエッチングすることができる。水溶液は、イソプロパノールのような、アルコールを含有してもよい。

【００９０】

このように、本発明の実施形態による成型シリコン・インゴットから生産したウェハを用いて、成型シリコンの固体本体をスライスして少なくとも１つのウェハを形成し、任意にウェハの表面上で洗浄手順を実行し、任意に表面上で模様形成工程を実行し、例えば、表面にドーピングすることによってｐ－ｎ接合を形成し、任意に表面上に反射防止被膜を

被着させ、例えば、アルミニウム焼結工程によって、任意に裏面電界(back surface field)またはパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を形成し、ウェハ上に導電性コンタクトを形成することによって、太陽電池を製造することができる。パシベーション層は、表面原子のダングリング・ボンドと連結する剥きだしのウェハ表面との界面を有する層である。シリコン上のパシベーション層の例には、窒化シリコン、二酸化シリコン、およびアモルファス・シリコンが含まれる。この層は、一般に、１ミクロンよりも薄く、光に対して透過性があるか、または反射防止層として作用する。

【００９１】

例えば、ｐ－型シリコン・ウェハを用いる光電変換セルを準備する典型的なそして一般的なプロセスでは、ウェハの一面を適したｎ－ドーパントに露出して、表面、即ち、ウェハの受光面上にエミッタ層およびｐ－ｎ接合を形成する。通例、ｎ－型層またはエミッタ層を形成するには、最初に化学的または物理的堆積のような当技術分野において慣例的に用いられている技法を用いてｎ－ドーパントをｐ－型ウェハの表面上に堆積し、このような堆積の後に、ｎ－ドーパント、例えば、燐をシリコン・ウェハの表面から内部に打ち込んで、更にｎ－ドーパントをウェハ表面内に拡散させる。この「打ち込み」工程は、慣例的に、ウェハを高温に晒すことによって行われる。これによって、ｎ－型層とｐ－型シリコン・ウェハ基板との間にある境界領域に、ｐ－ｎ接合が形成される。ウェハの表面は、エミッタ層を形成するための燐またはその他のドーピングの前に、模様を形成することができる。吸光度を更に高めるために、窒化シリコンのような任意の反射防止被膜を、通例、ウェハの表面に被着することができ、同時に表面上のパシベーションおよび／または大量のパシベーションが得られる場合もある。

【００９２】

ｐ－ｎ接合を光エネルギに晒すことによって発生する電気ポテンシャルを利用するために、光電変換セルには、ウェハの表面上に導電性前面コンタクトと、ウェハの背面に導電性背面コンタクトとが備えられているが、双方のコンタクトがウェハの背面上にあることも可能である。このようなコンタクトは、通例、導電性が高い１種類以上の金属で作られ、したがって不透明であるのが通例である。

【００９３】

このように、前述の実施形態にしたがった太陽電池は、半径方向に分布する欠陥がないまたは実質的にない、連続単結晶シリコンまたは準単結晶シリコンの本体から形成したウェハを備えており、本体は、先に説明したように、例えば、少なくとも２つの寸法が、各々、約２５ｃｍであり、第３の寸法が少なくとも約２０ｃｍであり、ウェハ上にｐ－ｎ接合を有し、ウェハの表面上に、裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を有することが好ましい任意の反射防止被膜を有し、更にウェハ上に導電性コンタクトを有することができる。本体は、スワール欠陥がないかまたは実質的になく、更にＯＳＦ欠陥もないかまたは実質的になくすることができる。

【００９４】

また、前述の実施形態にしたがった太陽電池は、連続幾何学的多結晶シリコンの本体から形成したウェハを備えることもでき、本体は、粒子方位の所定の配列を有し、好ましくは、共通極方向が本体の表面に対して垂直であり、本体は、好ましくは、各々少なくとも約１０ｃｍの少なくとも２つの寸法と、ウェハの表面上に、裏面電界およびパシベーション層から選択した少なくとも１つの層を有することが好ましい任意の反射防止被膜を有し、ウェハ上に導電性コンタクトとを更に有する。幾何学的多結晶シリコンは、平均結晶粒子断面サイズが約０．５ｃｍから約３０ｃｍのシリコン粒子を含み、本体はスワール欠陥がないかまたは実質的になく、更にＯＳＦ欠陥もないかまたは実質的になくすることができる。

【００９５】

尚、開示した構造および方法には、本発明の範囲または主旨から逸脱することなく、種々の変更や変形が可能であることは、当業者には明らかであろう。例えば、開示したプロセスおよび方法は、単結晶シリコンの形成に関するが、準単結晶シリコン、幾何学的多結

晶シリコン、またはその組み合わせの形成にも適用することができる。更に、シリコンの成型についてここでは説明したが、本発明の範囲および主旨から逸脱することなく、その他の半導体材料および非金属結晶性材料も成型することができる。例えば、本発明者は、砒化ガリウム、シリコン・ゲルマニウム、酸化アルミニウム、窒化ガリウム、酸化亜鉛、硫化亜鉛、砒化ガリウム・インディウム、アンチモン化インディウム、ゲルマニウム、酸化イットリウム硼素、酸化ランタン、酸化マグネシウム、およびその他の半導体、酸化物、ならびに液相を有する合金(intermetallics)のような、本発明の実施形態にしたがったその他の材料の成型も想定している。本発明の他の実施形態は、ここに開示した本発明の仕様および実用の考慮から、当業者には明白であろう。本明細書および例は、単なる一例と見なし、本発明の真の範囲および主旨は以下の特許請求の範囲によって示されることを意図している。

【図面の簡単な説明】

【００９６】

【図１】図１は、本発明の一実施形態による坩堝の底面上におけるシリコン・シードの配置例を示す。

【図２】図２は、本発明の一実施形態による坩堝の底面および側面上におけるシリコン・シードの別の配置例を示す。

【図３Ａ】図３Ａは、本発明の一実施形態にしたがって、坩堝において幾何学的に整えられた多結晶シリコンを成型するためのタイリング(tiling)の一例を示す。

【図３Ｂ】図３Ｂは、本発明の一実施形態にしたがって、坩堝において幾何学的に整えられた多結晶シリコンを成型するためのタイリング(tiling)の一例を示す。

【図３Ｃ】図３Ｃは、本発明の一実施形態にしたがって、坩堝において幾何学的に整えられた多結晶シリコンを成型するためのタイリング(tiling)の一例を示す。

【図４】図４は、本発明の一実施形態にしたがって、坩堝において幾何学的に整えられた多結晶シリコンを成型するためのタイリング(tiling)の別の例を示す。

【図５】図５は、本発明の一実施形態による六角形シード・タイルの密閉アレイの一例を示す。

【図６】図６は、本発明の一実施形態による菱形または三角形の隙間を有する多角形のアレイの一例を示す。

【図７】図７は、本発明の一実施形態による方法例を示す。

【図８Ａ】図８Ａは、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図８Ｂ】図８Ｂは、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図８Ｃ】図８Ｃは、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図８Ｄ】図８Ｄは、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図８Ｅ】図８Ｅは、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図８Ｆ】図８Ｆは、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図８Ｇ】図８Ｇは、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図９】図９は、本発明の実施形態による単結晶または幾何学的に揃った多結晶シリコンの成型プロセス例を示す。

【図１】

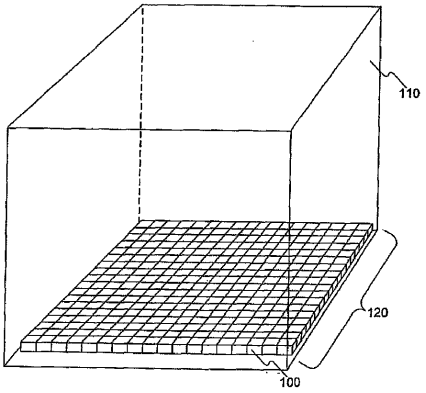


Fig. 1

【図２】

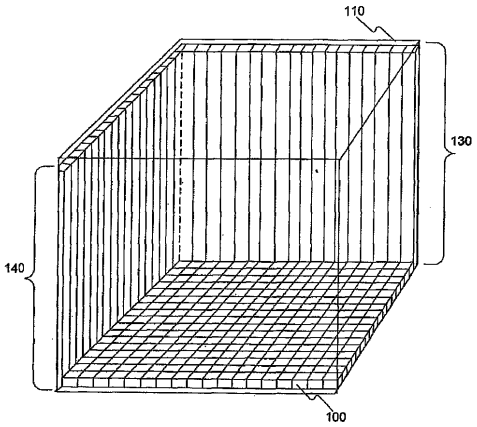


Fig. 2

【図３Ａ】

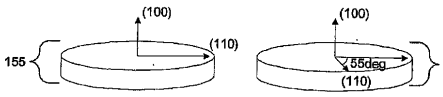


Fig. 3A

【図３Ｂ】

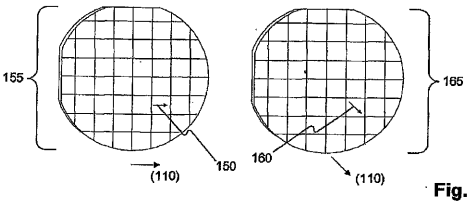


Fig. 3B

【図３Ｃ】

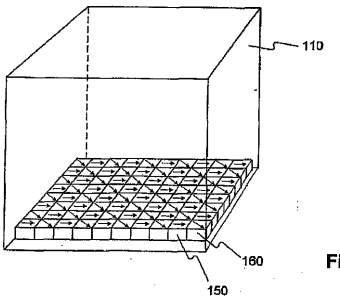


Fig. 3C

【図４】

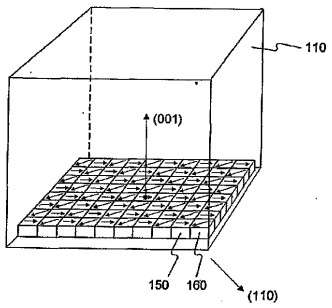


Fig. 4

【図５】

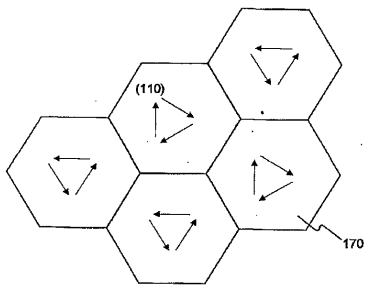


Fig. 5

【図６】

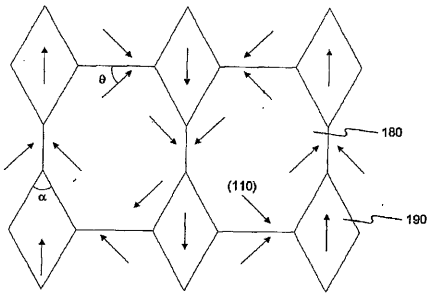
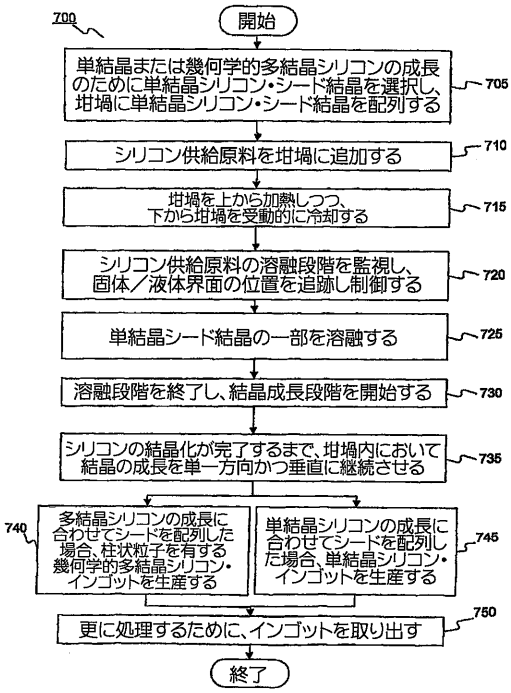


Fig. 6

【図７】



【図８Ａ】

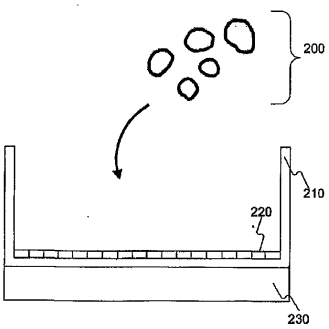


Fig. 8A

【図８Ｂ】

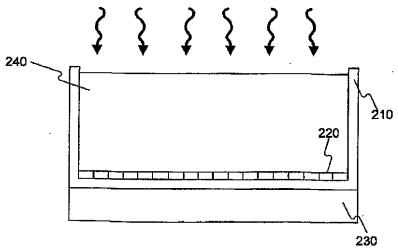


Fig. 8B

【図８Ｃ】

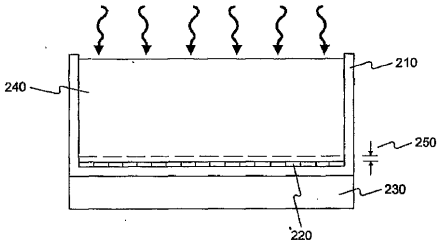


Fig. 8C

【図８Ｄ】

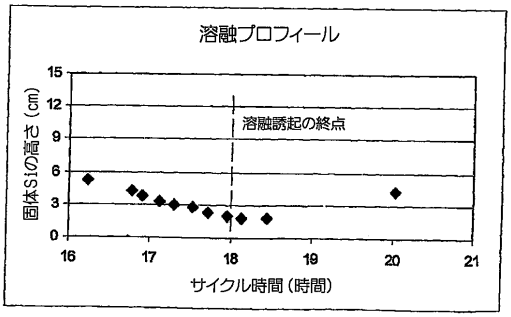


Fig. 8D

【図８Ｅ】

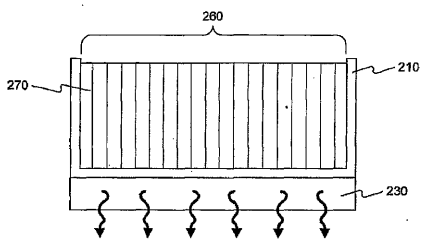


Fig. 8E

【図８Ｆ】

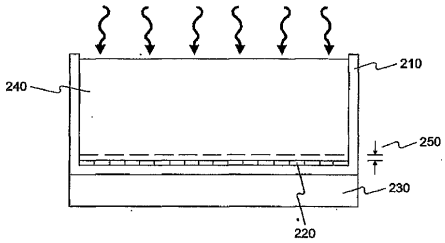


Fig. 8F

【図８Ｇ】

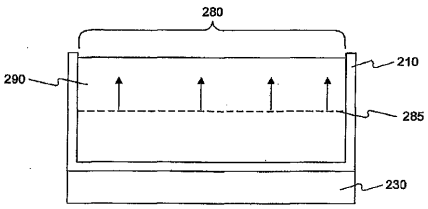


Fig. 8G

【図９】

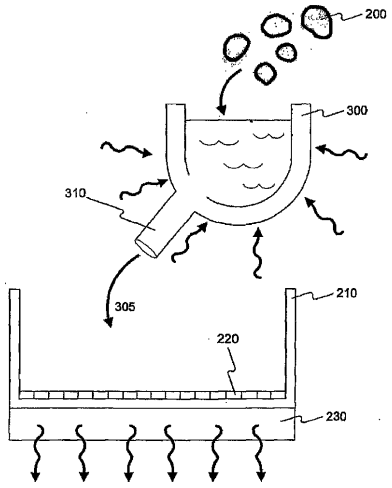


Fig. 9

フロントページの続き

(31)優先権主張番号 60/839,670
(32)優先日 平成18年8月24日(2006.8.24)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 60/839,672
(32)優先日 平成18年8月24日(2006.8.24)
(33)優先権主張国 米国(US)

(74)代理人 100153028
弁理士 上田 忠
(72)発明者 スタッダード, ネイサン・ジー
アメリカ合衆国ペンシルバニア州１７３２５, ゲティズバーグ, ヘリテージ・ドライブ ９９５

審査官 菊地 則義

(56)参考文献 特開平１０－００７４９３（ＪＰ, Ａ）
特開平１０－１９４７１８（ＪＰ, Ａ）
特開平０９－００２８９７（ＪＰ, Ａ）
特開平１１－０１１９２４（ＪＰ, Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
Ｃ３０Ｂ １／００－３５／００