(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7655351号
(P7655351)

(45)発行日　令和7年4月2日(2025.4.2)

(24)登録日　令和7年3月25日(2025.3.25)

(51)国際特許分類

Ｃ３０Ｂ　29/06　(2006.01)	Ｃ３０Ｂ	29/06	５０２Ｅ
Ｃ３０Ｂ　15/14　(2006.01)	Ｃ３０Ｂ	15/14	

ＦＩ

請求項の数　5　（全12頁）

(21)出願番号　特願2023-100103(P2023-100103)
(22)出願日　令和5年6月19日(2023.6.19)
(65)公開番号　特開2025-312(P2025-312A)
(43)公開日　令和7年1月7日(2025.1.7)
審査請求日　令和5年9月4日(2023.9.4)

(73)特許権者　302006854
株式会社ＳＵＭＣＯ
東京都港区芝浦一丁目２番１号
(74)代理人　110000637
弁理士法人樹之下知的財産事務所
(72)発明者　高橋 知世
東京都港区芝浦一丁目２番１号 株式会社ＳＵＭＣＯ内
(72)発明者　山田 惇弘
東京都港区芝浦一丁目２番１号 株式会社ＳＵＭＣＯ内
(72)発明者　末若 良太
東京都港区芝浦一丁目２番１号 株式会社ＳＵＭＣＯ内
審査官　山本 一郎

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　加熱装置、シリコン単結晶製造装置およびシリコン単結晶の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

シリコン融液に水平磁場を印加しながらチョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶製造装置において、シリコン融液を収容する坩堝を加熱する加熱装置であって、

前記坩堝を囲む円筒形状のグラファイト製の発熱部を備え、

前記発熱部は、上端から下方向へ伸びる複数の上スリットおよび下端から上方向へ伸びる複数の下スリットが、円周方向に交互に並ぶように形成されるとともに、前記上スリットおよび前記下スリット以外の一部が欠けた形状を有する、加熱装置。

【請求項２】

請求項１に記載の加熱装置において、

前記一部が欠けた形状は、前記円筒形状の一部が上下方向の全体にわたって欠けた形状である、加熱装置。

【請求項３】

請求項２に記載の加熱装置において、

前記一部が欠けた形状は、鉛直上方から見る平面視で中心角が１０°以上１８０°未満の円弧状の領域が欠けた形状である、加熱装置。

【請求項４】

シリコン融液に水平磁場を印加しながらチョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶製造装置であって、

前記シリコン融液を収容する坩堝と、
前記坩堝を加熱する請求項１から請求項３のいずれか一項に記載の加熱装置と、
前記シリコン融液に前記水平磁場を印加する磁場印加部と、を備え、
前記加熱装置は、前記発熱部における前記上スリットおよび前記下スリット以外の欠けた部分が前記坩堝の中心軸および前記水平磁場の中心磁力線を含む鉛直仮想平面に対して一方側に位置するように配置されている、シリコン単結晶製造装置。
【請求項５】
請求項４に記載のシリコン単結晶製造装置を用いて、前記シリコン融液に前記水平磁場を印加しながらチョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶の製造方法であって、
前記坩堝内のシリコン原料を溶融して前記シリコン融液を生成するシリコン融液生成工程と、
前記シリコン融液へ前記水平磁場を印加して、前記中心磁力線に直交する仮想平面における前記シリコン融液の対流の方向を一方向に固定する磁場印加工程と、
前記シリコン融液に着液させた種結晶を引き上げることにより、前記シリコン単結晶を育成する育成工程と、を備える、シリコン単結晶の製造方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、加熱装置、シリコン単結晶製造装置およびシリコン単結晶の製造方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
シリコン単結晶の製造方法として、シリコン融液に水平磁場を印加するＭＣＺ（磁場印加チョクラルスキー）法が用いられる場合がある。ＭＣＺ法を用いてシリコン融液に水平磁場を印加した場合、シリコン融液内の水平磁場の印加方向に直交する仮想平面における対流の方向が、右回り（以下、「右渦モード」と言う場合がある）になる場合と左回り（以下、「左渦モード」と言う場合がある）になる場合がある。
【０００３】
対流モードが右渦モードとなるか左渦モードとなるかはランダムであり、対流モードと炉内環境によってシリコン単結晶に取り込まれる酸素の濃度がばらついてしまう。安定した酸素濃度を有するシリコン単結晶を得るためには、引き上げ中のシリコン融液の対流モードを制御することが重要となる。このため、坩堝内のシリコン融液の対流モードを制御する手法について様々な検討が行われている（例えば、特許文献１参照）。
【０００４】
特許文献１には、それぞれ中心角が１８０°の半円筒状の第１加熱領域および第２加熱領域を有するヒータが開示されている。第２加熱領域は、第１加熱領域よりも厚い形状を有し、抵抗値が第１加熱領域よりも小さい構成を有する。ヒータは、坩堝の中心軸および水平磁場の中心磁力線を含む鉛直仮想平面に対して一方側に第１加熱領域が位置し、他方側に第２加熱領域が位置するように配置されている。
特許文献１には、このようなヒータを用いて、第１加熱領域および第２加熱領域に同じ大きさの電圧を印加することにより、第１加熱領域を第２発熱領域よりも高い温度で発熱させ、炉内の熱環境を坩堝の中心軸に対して非軸対称にすることにより、対流モードを右渦モードおよび左渦モードのうち一方に固定し、対流モードに起因する酸素濃度のばらつきを排除する方法が開示されている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００５】
【文献】特開２０１９－１５１５０２号公報
【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】
【０００６】
しかしながら、特許文献１に開示された方法では、厚さが第２領域よりも薄い第１加熱領域が第２発熱領域よりも高い温度で発熱するため、ヒータを構成するグラファイトの反応に起因する減肉速度（厚さが薄くなる速度）は、第２加熱領域よりも第１加熱領域の方が速くなる。このため、ヒータを長期間にわたって使用すると、第１加熱領域と第２加熱領域との厚さの比率が変化して、抵抗値の比率も変化してしまう。このような抵抗値の比率の変化に伴い坩堝の加熱状態が変化すると、シリコン単結晶の酸素濃度が変化してしまうおそれかがある。また、第１加熱領域の減肉速度が第２加熱領域よりも速いため、ヒータのライフタイムが短くなってしまうおそれがある。
【０００７】
本発明は、シリコン単結晶ごとの酸素濃度を安定させることができ、ライフタイムが短くなることを抑制できる加熱装置、シリコン単結晶製造装置およびシリコン単結晶の製造方法を提供することを目的とする。
【課題を解決するための手段】
【０００８】
本発明の加熱装置は、シリコン融液に水平磁場を印加しながらチョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶製造装置において、シリコン融液を収容する坩堝を加熱する加熱装置であって、前記坩堝を囲む円筒形状の一部が欠けた形状を有するグラファイト製の発熱部を備える。
【０００９】
本発明の加熱装置において、前記発熱部は、前記円筒形状の一部が上下方向の全体にわたって欠けた形状を有する、ことが好ましい。
【００１０】
本発明の加熱装置において、前記発熱部は、鉛直上方から見る平面視で中心角が１０°以上１８０°未満の円弧状の領域が欠けた形状を有する、ことが好ましい。
【００１１】
本発明のシリコン単結晶製造装置は、シリコン融液に水平磁場を印加しながらチョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶製造装置であって、前記シリコン融液を収容する坩堝と、前記坩堝を加熱する上述の加熱装置と、前記シリコン融液に前記水平磁場を印加する磁場印加部と、を備え、前記加熱装置は、前記発熱部の欠けた部分が前記坩堝の中心軸および前記水平磁場の中心磁力線を含む鉛直仮想平面に対して一方側に位置するように配置されている。
【００１２】
本発明のシリコン単結晶の製造方法は、上述のシリコン単結晶製造装置を用いて、前記シリコン融液に前記水平磁場を印加しながらチョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶の製造方法であって、前記坩堝内のシリコン原料を溶融して前記シリコン融液を生成するシリコン融液生成工程と、前記シリコン融液へ前記水平磁場を印加して、前記中心磁力線に直交する仮想平面における前記シリコン融液の対流の方向を一方向に固定する磁場印加工程と、前記シリコン融液に着液させた種結晶を引き上げることにより、前記シリコン単結晶を育成する育成工程と、を備える。
【図面の簡単な説明】
【００１３】
【図１】実施形態に係る加熱装置を示す図であり、（Ａ）は斜視図、（Ｂ）は平面図である。
【図２】実施形態に係るシリコン単結晶製造装置の概略構成を示す縦断面図である。
【図３】実施形態に係るヒータおよび磁場印加部を示す平面模式図である。
【図４】実施形態に係るシリコン単結晶製造装置の要部のブロック図である。
【図５】実施形態に係るシリコン単結晶の製造方法を示すフローチャートである。
【図６】（Ａ）は変形例に係る加熱装置を示す斜視図であり、（Ｂ）は他の変形例に係る

加熱装置を示す斜視図である。
【図７】（Ａ）は比較例の坩堝および加熱装置の配置状態を示す模式図であり、（Ｂ）は実施例の坩堝および加熱装置の配置状態を示す模式図である。
【図８】比較例および実施例のシリコン融液における坩堝の径方向の温度分布の計算結果を示すグラフである。
【発明を実施するための形態】
【００１４】
［実施形態］
〔加熱装置の構成〕
まず、本発明の実施形態に係る加熱装置の構成について説明する。
図１は、加熱装置を示す図であり、（Ａ）は斜視図、（Ｂ）は平面図である。
【００１５】
図１（Ａ）および図１（Ｂ）に示す加熱装置４は、シリコン融液に水平磁場を印加しながらチョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶製造装置の坩堝を加熱する用途に用いられる。加熱装置４は、グラファイト製の発熱部４０と、第１端子４３および第２端子４４と、を備える。
【００１６】
発熱部４０は、坩堝を囲む円筒形状の一部が当該発熱部４０の中心軸４Ｃ（以下、「加熱装置中心軸４Ｃ」と言う場合がある）方向の全体にわたって欠けた形状、つまり平面視で円弧状に形成されている。発熱部４０は、平面視で中心角θが１０°以上１８０°未満の円弧状の領域４５（以下、「欠落領域４５」と言う場合がある）が欠けた形状に形成されていることが好ましい。発熱部４０は、円周方向の全体にわたって均一な厚さで形成されていることが好ましい。発熱部４０には、上端から下方向へ伸びる複数の上スリット４１および下端から上方向へ伸びる複数の下スリット４２が、円周方向に交互に並ぶように形成されていることが好ましい。各上スリット４１および各下スリット４２は、幅寸法が互いに等しく、上下方向に沿った切り込み深さも互いに等しいことが好ましい。また、上スリット４１と下スリット４２との間隔も、加熱装置４の全周にわたって等しいことが好ましい。
【００１７】
発熱部４０の内径、外径および高さは、シリコン単結晶の直胴部の直径、シリコン単結晶全体の長さ、坩堝の外径または発熱部４０を囲む断熱材の内径などに応じて設定されれば良い。例えば、直径３００mmのシリコンウェーハ用のシリコン単結晶（直径３０１mm以上３４０mm以下）の場合、発熱部４０の内径は８４０mm以上１０００mm以下であることが好ましく、外径は８８０mm以上１０４０mmであることが好ましく、高さは４００mm以上８００mm以下であることが好ましい。直径４５０mmのシリコンウェーハ用のシリコン単結晶（直径４５１mm以上５１０mm以下）の場合、発熱部４０の内径は１０６０mm以上１２００mm以下であることが好ましく、外径は１１２０mm以上１２６０mmであることが好ましく、高さは６００mm以上１０００mm以下であることが好ましい。
【００１８】
第１端子４３および第２端子４４は、発熱部４０の下面における加熱装置中心軸４Ｃを挟んだ対向する位置において、２本の下スリット４２で区画される部分の下端から下方に延びるように設けられ、発熱部４０と一体に形成されても良いし、発熱部４０とは別体で形成されても良い。第１端子４３および第２端子４４のうち一方の端子には、図示しない電源の陽極が電気的に接続され、他方の端子には、電源の陰極またはアース電極が電気的に接続される。
例えば、第１端子４３から第２端子４４に流れる電流が印加されると、発熱部４０における平面視で第１端子４３と第２端子４４との間における電流が流れる領域、つまり図１（Ｂ）における第１端子４３と第２端子４４とを結ぶ仮想線よりも右側の領域は発熱するが、電流が流れない左側の領域は発熱しない。しかし、当該左側の領域の温度は右側の領

域からの伝熱により高くなり、発熱部４０全体で内側に配置された坩堝を加熱する。
なお、発熱部４０に電流を流す端子は、２本に限らず、３本以上であっても良い。
【００１９】
〔シリコン単結晶製造装置の構成〕
次に、本発明の加熱装置を備えるシリコン単結晶製造装置の構成について説明する。
図２は、シリコン単結晶製造装置の概略構成を示す縦断面図である。図３は、ヒータおよび磁場印加部を示す平面模式図である。図４は、シリコン単結晶製造装置の要部のブロック図である。
【００２０】
図２に示すシリコン単結晶製造装置１は、ＭＣＺ法によりシリコン単結晶ＳＭを製造する装置であり、シリコン融液Ｍに水平磁場を印加しながら、ネック部ＳＭ１、肩部ＳＭ２、直胴部ＳＭ３および図示しないテール部を有するシリコン単結晶ＳＭを引き上げる。シリコン単結晶製造装置１は、外郭を構成するチャンバ２と、チャンバ２の中心部に配置される坩堝３と、坩堝３内の周囲に配置される加熱装置４と、を備える。
【００２１】
坩堝３は、外側の黒鉛坩堝３Ａと、内側の石英坩堝３Ｂとから構成される二重構造とされ、石英坩堝３Ｂ内にはシリコン融液Ｍが収容される。黒鉛坩堝３Ａおよび石英坩堝３Ｂは、有底円筒形状の容器であり、鉛直上方から見る平面視で円形形状とされている。坩堝３は、回転および昇降が可能な支持軸５の上端部に固定されている。
【００２２】
加熱装置４の外側には、チャンバ２の内面に沿って円筒状の断熱材６が設けられている。
【００２３】
坩堝３の上方には、支持軸５と同軸上に引き上げ軸７が配置されている。引き上げ軸７は、ワイヤなどで形成されている。引き上げ軸７の下端には種結晶ＳＣが取り付けられている。
【００２４】
チャンバ２内には、坩堝３内のシリコン融液Ｍの上方で育成中のシリコン単結晶ＳＭを囲む筒状の熱遮蔽体８が配置されている。
熱遮蔽体８は、育成中のシリコン単結晶ＳＭに対して、シリコン融液Ｍ、坩堝３の側壁およびヒータからの輻射熱を遮断することにより、シリコン単結晶ＳＭの温度上昇を抑制する。
【００２５】
チャンバ２の上部には、アルゴンガスなどの不活性ガスをチャンバ２内に導入するガス導入口２Ａが設けられている。チャンバ２の下部には、図示しない真空ポンプの駆動により、チャンバ２内の気体を吸引して排出する排気口２Ｂが設けられている。
【００２６】
図３に示すように、シリコン単結晶製造装置１は、磁場印加部１６をさらに備える。
磁場印加部１６は、それぞれ電磁コイルで構成された第１磁性体１６Ａおよび第２磁性体１６Ｂを備える。第１磁性体１６Ａおよび第２磁性体１６Ｂは、チャンバ２の外側において坩堝３を挟んで対向するように設けられている。磁場印加部１６は、平面視で、電磁コイルの中心軸を通る中心磁力線１６Ｃが、坩堝３の中心軸３Ｃ（以下、「坩堝中心軸３Ｃ」と言う場合がある）と交差し、第２磁性体１６Ｂから第１磁性体１６Ａに向かう方向（図３における中心磁力線１６Ｃを示す矢印で示される上方向であり、図２における紙面手前から奥に向かう方向）となるように、水平磁場を印加する。
【００２７】
断熱材６は、その中心軸が坩堝中心軸３Ｃと同一軸上に位置するように配置されている。
加熱装置４は、加熱装置中心軸４Ｃが坩堝中心軸３Ｃと同一軸上に位置するように配置されている。加熱装置４は、発熱部４０の欠落領域４５が坩堝中心軸３Ｃおよび中心磁力線１６Ｃを含む鉛直仮想平面ＶＦに対して左側に位置するように配置されている。また、発熱部４０は、第１端子４３と第２端子４４を結ぶ仮想線が平面視で鉛直仮想平面ＶＦに

重なるように配置されている。

【００２８】

このように配置された発熱部４０が発熱すると、坩堝３における鉛直仮想平面ＶＦに対して左側に位置する第１部分３１Ａの加熱温度は、右側に位置する第２部分３１Ｂの加熱温度よりも低くなる。そして、坩堝３内のシリコン融液Ｍは、左側に位置する部分の温度が右側に位置する部分の温度よりも低くなるように加熱される。このようにシリコン融液Ｍが加熱されると、シリコン融液Ｍで上昇流が坩堝３の右側に安定して発生するとともに、下降流が坩堝３の左側に安定して発生する。この状態でシリコン融液Ｍに水平磁場を印加すると、印加のタイミングに関係なく、対流が左回りに固定されて左渦モードになる。

なお、加熱装置４は、第１部分３１Ａの加熱温度と第２部分３１Ｂの加熱温度とが異なるように配置されていれば良く、欠落領域４５の円弧方向中心４５Ａが平面視で鉛直仮想平面ＶＦと重ならないように、図３に示す状態から回転した状態で配置されていても良い。

【００２９】

図４に示すように、シリコン単結晶製造装置１は、電源１７と、原料供給部１８と、坩堝回転駆動部１９と、引き上げ駆動部２０と、入力部２１と、記憶部２２と、制御部２３と、をさらに備える。制御部２３には、磁場印加部１６、電源１７、原料供給部１８、坩堝回転駆動部１９、引き上げ駆動部２０、入力部２１および記憶部２２が各種情報を送受信可能に接続されている。

【００３０】

磁場印加部１６は、制御部２３の制御に基づいて、所定の強さの水平磁場をシリコン融液Ｍに印加する。

電源１７は、制御部２３の制御に基づいて、所定の大きさの電力を発熱部４０にそれぞれ供給する。

原料供給部１８は、制御部２３の制御に基づいて、坩堝３にシリコン原料を投入する。

坩堝回転駆動部１９は、制御部２３の制御に基づいて、坩堝３を所定速度で所定方向に回転させる。

引き上げ駆動部２０は、制御部２３の制御に基づいて、引き上げ軸７を昇降させる。また、引き上げ駆動部２０は、制御部２３の制御に基づいて、引き上げ軸７を支持軸５の回転方向と逆方向または同一方向に所定の速度で回転させる。

【００３１】

入力部２１は、例えばタッチパネルまたは物理ボタンにより構成されている。入力部２１は、各種設定の入力操作に用いられ、入力操作に対応する信号を制御部２３へ出力する。

記憶部２２は、例えばＨＤＤ（Hard Disk Drive）などの周知の記憶装置により構成されている。記憶部２２は、シリコン単結晶ＳＭの引き上げ制御に必要な各種情報を記憶している。

制御部２３は、ＣＰＵ（Central Processing Unit）を備える。制御部２３は、記憶部２２に記憶されたプログラムをＣＰＵが実行することにより、シリコン単結晶ＳＭの引き上げを制御する。

【００３２】

〔シリコン単結晶の製造方法〕

次に、シリコン単結晶製造装置１を用いるシリコン単結晶ＳＭの製造方法について説明する。図５は、シリコン単結晶の製造方法を示すフローチャートである。

【００３３】

まず、作業者は、入力部２１を操作して製造対象のシリコン単結晶ＳＭの引き上げ条件を入力する。

制御部２３は、図５に示すように、入力された引き上げ条件を取得する（ステップＳ１）。

この後、制御部２３は、取得した引き上げ条件に基づいて、シリコン単結晶ＳＭの製造工程を行う。

具体的に、制御部２３は、チャンバ２内を減圧下の不活性ガス雰囲気に維持し、加熱装

置４をオフにした（加熱装置４に電力を供給しない）状態で、かつ、水平磁場を印加しない状態で、原料供給部１８を制御してシリコン原料を坩堝３に投入した後、坩堝回転駆動部１９を制御して、坩堝３を一方向に回転させる（ステップＳ２）。

【００３４】

次に、制御部２３は、電源１７を制御して、加熱装置４の発熱部４０により坩堝３を加熱し、シリコン原料を溶融させてシリコン融液Ｍを生成する（ステップＳ３：シリコン融液生成工程）。

【００３５】

この後、制御部２３は、磁場印加部１６を制御して、シリコン融液Ｍへの水平磁場の印加を開始する（ステップＳ４：磁場印加工程）。ステップＳ４の処理により、シリコン融液Ｍの上昇流が坩堝３の右側に安定して発生するとともに、下降流が坩堝３の左側に安定して発生しているため、シリコン融液Ｍに水平磁場が作用すると、シリコン融液Ｍの対流が左回りに固定されて左渦モードになる。

【００３６】

制御部２３は、シリコン融液Ｍの対流が左渦モードに固定されたタイミングで、水平磁場の印加を継続しながら、引き上げ駆動部２０を制御して、シリコン単結晶ＳＭを育成する（ステップＳ５：育成工程）。ステップＳ５において、引き上げ駆動部２０は、制御部２３の制御に基づいて、シリコン融液Ｍに種結晶ＳＣを着液してから種結晶ＳＣを引き上げるように、引き上げ軸７を昇降させることにより、シリコン単結晶ＳＭを育成する。

【００３７】

〔実施形態の効果〕

シリコン単結晶製造装置１では、発熱部４０の欠けた部分（欠落領域４５）が鉛直仮想平面ＶＦに対して左側に位置するように発熱部４０が配置されているため、シリコン融液Ｍの左側の部分の温度を右側の部分の温度よりも低くすることができ、下降流を左側に安定して発生させることができる。したがって、下降流が安定した位置に発生しているシリコン融液Ｍに水平磁場を印加することにより、水平磁場の印加のタイミングに関係なく、シリコン融液Ｍの対流モードを左渦モードに固定することができ、シリコン単結晶ＳＭごとの酸素濃度を安定させることができる。

また、発熱部４０を一部が欠けた形状に形成しているため、発熱部４０の厚さを円周方向で均一にして発熱部４０全体の発熱温度をほぼ均一にしても、第１部分３１Ａと第２部分３１Ｂの加熱温度を異ならせることができる。したがって、グラファイトの反応に起因する減肉速度を発熱部４０全体でほぼ均一にすることができ、加熱装置４のライフタイムが短くなることを抑制することができる。

【００３８】

ここで、中心角θが１０°未満の円弧状の領域が欠けた形状に発熱部４０が形成されている場合、欠けた部分が小さすぎて、３１Ａと３１Ｂの温度がほぼ同じになってしまうおそれがある。この場合、シリコン融液Ｍの下降流の位置が無秩序に変化してしまい、水平磁場の印加のタイミングよって、対流モードが右渦モードになったり左渦モードになったりして、シリコン単結晶ＳＭごとの酸素濃度を安定させることができないおそれがある。一方、中心角θが１８０°を超える円弧状の領域が欠けた形状に発熱部４０が形成されている場合、欠けた部分が大きすぎて、坩堝３を所望の温度に加熱するために大きなパワーが必要になるか、所望の温度に加熱できないおそれがある。

本実施形態では、発熱部４０が平面視で中心角θが１０°以上１８０°未満の円弧状の領域が欠けた形状に形成されているため、上述のような不具合の発生を抑制することができる。

【００３９】

［変形例］

以上、本発明の実施形態について図面を参照して詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲の種々の改良並びに設計の変更等があっても本発明に含まれる。

【００４０】
例えば、欠落領域４５が発熱部４０の中心軸４Ｃ方向の全体にわたる加熱装置４を例示したが、図６（Ａ）に示すように、加熱装置１０は、発熱部１０１における円弧状の欠落領域１０２が下側のみに存在しても良いし、図示はしないが上側のみに存在しても良い。また、図６（Ｂ）に示すように、加熱装置１１は、円筒形状の上発熱部１１１と、上発熱部１１１の下側において上発熱部１１１と同軸上に位置する略円筒形状の下発熱部１１２とを備え、円弧状の欠けた欠落領域１１３が下発熱部１１２のみに存在しても良いし、図示はしないが上発熱部１１１のみに存在しても良いし、上発熱部１１１および下発熱部１１２の両方に存在しても良い。
【実施例】
【００４１】
次に、本発明の実施例について説明する。なお、本発明は実施例に限定されるものではない。
【００４２】
［数値シミュレーション条件］
実施例として、チョクラルスキー法によりシリコン単結晶を製造するシリコン単結晶製造装置において、円筒形状の発熱部を有する比較例の加熱装置を用いた場合のシリコン融液の温度分布と、円筒形状の一部が欠けた発熱部を有する実施例の加熱装置を用いた場合のシリコン融液の温度分布とを比較する数値シミュレーションを行った。
【００４３】
〔比較例〕
比較例の数値シミュレーションにおいて、上記実施形態のシリコン単結晶製造装置１と同様の構成を有するシリコン単結晶製造装置を用いることを前提として、図７（Ａ）に示すように、比較例の加熱装置１２の発熱部１２１の形状を、円筒形状に設定した。また、坩堝３および比較例の加熱装置１２の発熱部１２１のサイズを、以下のように設定した。
・坩堝３の黒鉛坩堝３Ａの外径：３２インチ（８１２．８ｍｍ）
・加熱装置１２の発熱部１２１の内径、外径および高さ：９２０ｍｍ、９６０ｍｍ、５００ｍｍ
さらに、坩堝３と比較例の加熱装置１２との配置関係を、図７（Ａ）に示すように、坩堝中心軸３Ｃと発熱部１２１の加熱装置中心軸１２１Ｃとが同一軸上に位置するように設定した。
そして、以下の育成条件でシリコン単結晶を育成中にシリコン融液の高さが坩堝の高さの約２／３（６６．７％）になった瞬間における、水平面に直交しかつ坩堝中心軸３Ｃを含む鉛直断面ＶＤにおける石英坩堝３Ｂの底部３３Ｂとシリコン融液Ｍとの境界の温度分布を、シリコン融液における坩堝の径方向の温度分布として計算した。なお、石英坩堝３Ｂの底部３３Ｂとは、円筒状の側部３４Ｂの下端に連続する曲面状の部位である。また、鉛直断面ＶＤは、水平磁場の中心磁力線の方向に対して垂直な面である。
・シリコン融液量：シリコン融液Ｍの深さが石英坩堝３Ｂの深さの２／３となる量
・水平磁場：印加なし
・シリコン単結晶育成中の不活性ガス（アルゴンガス）流量、炉内圧、坩堝回転速度、結晶回転速度、結晶成長速度：それぞれ所定値
・育成対象のシリコン単結晶の肩部の長さ、直胴部の直径および長さ:２００ｍｍ、３０６ｍｍ、６００ｍｍ
ここで、本発明は、シリコン融液Ｍにおける坩堝３の径方向の温度分布を偏らせることで、水平磁場印加前にシリコン融液の対流の方向を固定することを目的としている。このため、上述のように、水平磁場を印加しない条件における温度分布の偏りを、数値シミュレーションにより検証した。
【００４４】
〔実施例〕
実施例の数値シミュレーションにおいて、図７（Ｂ）に示すように、実施例の加熱装置

１３の発熱部１３１の形状を、比較例の加熱装置１２の発熱部１２１と同じサイズの円筒形状のうち、平面視で中心角θが６０°の円弧状の欠落領域１３２が欠けた形状に設定した。また、坩堝３と実施例の加熱装置１３との配置関係を、図７（Ｂ）に示すように、坩堝中心軸３Ｃと発熱部１３１の加熱装置中心軸１３１Ｃとが同一軸上に位置し、欠落領域１３２の円弧方向中心１３２Ｃが鉛直断面ＶＤ上における坩堝中心軸３Ｃに対してＸ１方向側に位置するように設定した。つまり、比較例では、坩堝３の全周が加熱装置１２により加熱されるのに対し、実施例では、坩堝３のＸ１方向（水平方向の一方向側）側の部分が加熱装置１３により加熱されないように条件を設定した。

そして、比較例と同じ育成条件でシリコン単結晶を育成している途中におけるシリコン融液の高さが坩堝の高さの約２／３になった時点での、鉛直断面ＶＤにおける石英坩堝３Ｂの底部３３Ｂとシリコン融液Ｍとの境界の温度分布を、シリコン融液Ｍにおける坩堝の径方向の温度分布として計算した。

なお、実施例の加熱装置１３における出力パワーは、育成中のシリコン単結晶（固相）、シリコン融液（液相）および不活性ガス（固相）の３重点（シリコン単結晶とシリコン融液Ｍとの固液界面の外周）の平均温度が比較例における３重点の平均温度と同じになるように、設定した。

【００４５】

［評価］

比較例および実施例のシリコン融液Ｍにおける坩堝３の径方向の温度分布の計算結果を、図８に示す。なお、図８に示すように、比較例では坩堝３の全周が加熱装置１２により加熱されるにもかかわらず、実施例と同様に、Ｘ２方向側の温度がＸ１方向側の温度よりも高くなっている。その理由は、坩堝３の全周を均一に加熱してもシリコン融液の小さな対流は常に変化しており、計算対象の育成中の瞬間がＸ２方向側の温度がＸ１方向側の温度よりも高い瞬間であったためである。

【００４６】

温度分布の評価は、シリコン融液ＭにおけるＸ１方向側の端部およびＸ２方向（水平方向の他方向）側の端部から、それぞれ５０ｍｍ外側の部分を除外した範囲で評価した。その理由は、Ｘ１方向側の端部およびＸ２方向側の端部から、それぞれ５０ｍｍ外側の部分は、シリコン融液Ｍの温度に側部３４Ｂの上端からの放熱が反映され、加熱装置１２，１３の加熱のみによるシリコン融液の温度を適切に評価できないおそれがあるからである。

図８に示すように、実施例の温度勾配（Ｘ１方向側端部から５０ｍｍ内側の温度と、Ｘ２方向側端部から５０ｍｍ内側の温度とを結ぶ直線の傾き）は、比較例の温度勾配よりも高くなることが確認できた。つまり、実施例におけるＸ軸方向の温度差は、比較例よりも大きくなることが確認できた。

このことから、坩堝を囲む円筒形状の一部が欠けた形状の発熱部を有する加熱装置を用いて坩堝を加熱することにより、シリコン融液内で温度差をつけることができることが確認できた。

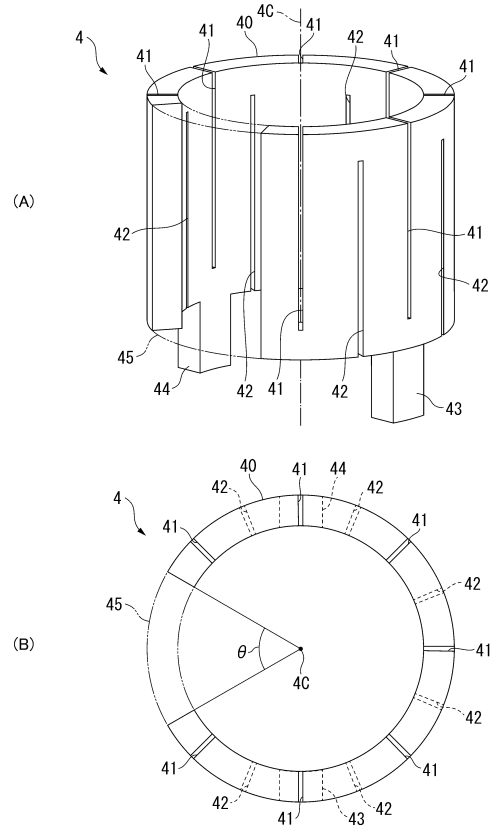
【符号の説明】

【００４７】

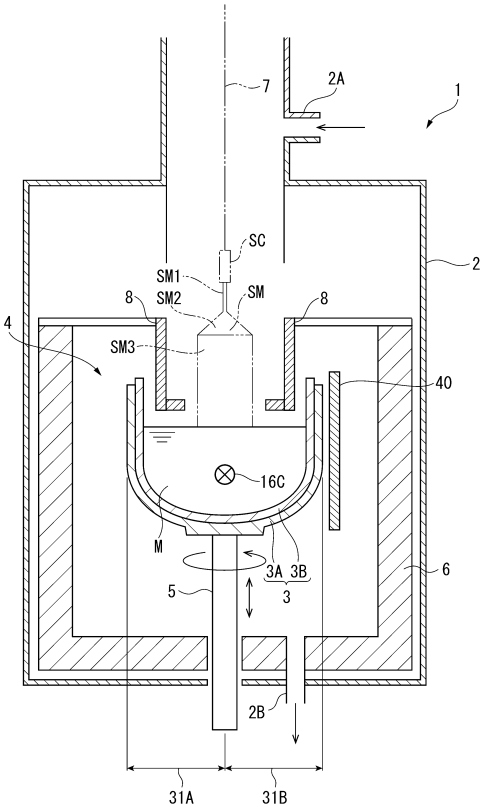
１…シリコン単結晶製造装置、１０…加熱装置、１０１…発熱部、１１…加熱装置、１１１…上発熱部、１１２…下発熱部、１３…加熱装置、１３１…発熱部、１６…磁場印加部、３…坩堝、４…加熱装置、４０…発熱部、Ｍ…シリコン融液、ＳＭ…シリコン単結晶。

【図面】

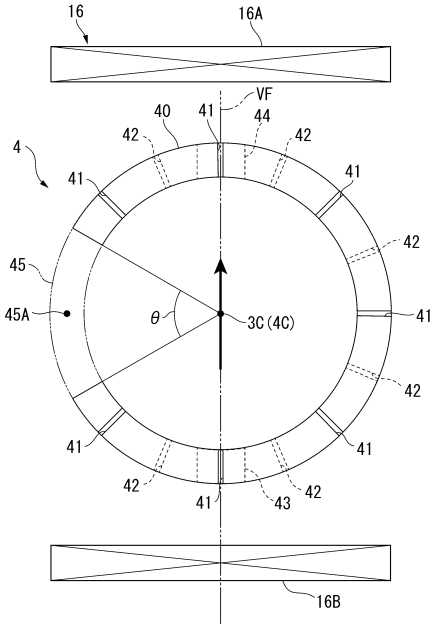
【図１】


(A)
(B)
4
40
41
42
43
44
45
4C
θ

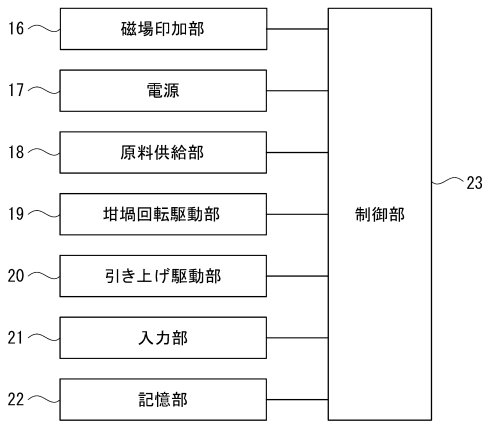
【図２】


1
2
2A
2B
3
3A
3B
4
5
6
7
8
16C
31A
31B
40
M
SC
SM
SM1
SM2
SM3

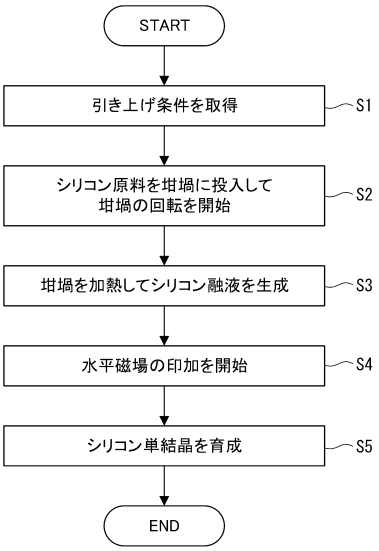
【図３】


16
16A
16B
3C(4C)
4
40
41
42
43
44
45
45A
VF
θ

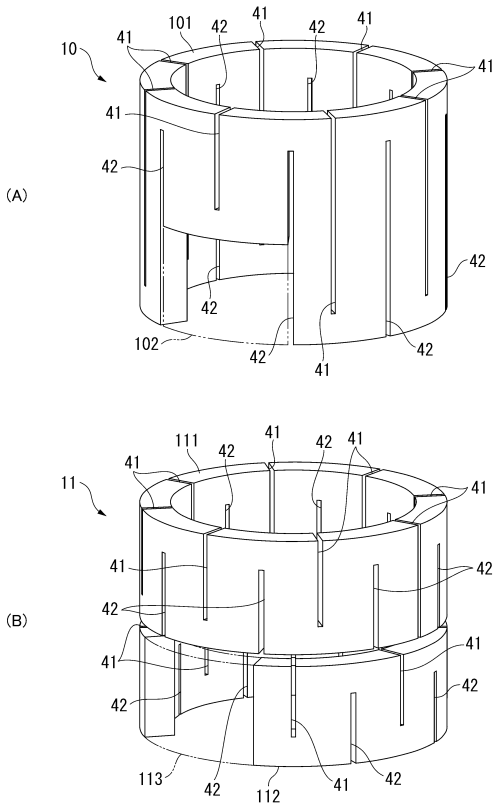
【図４】


16
17
18
19
20
21
22
23
磁場印加部
電源
原料供給部
坩堝回転駆動部
引き上げ駆動部
入力部
記憶部
制御部

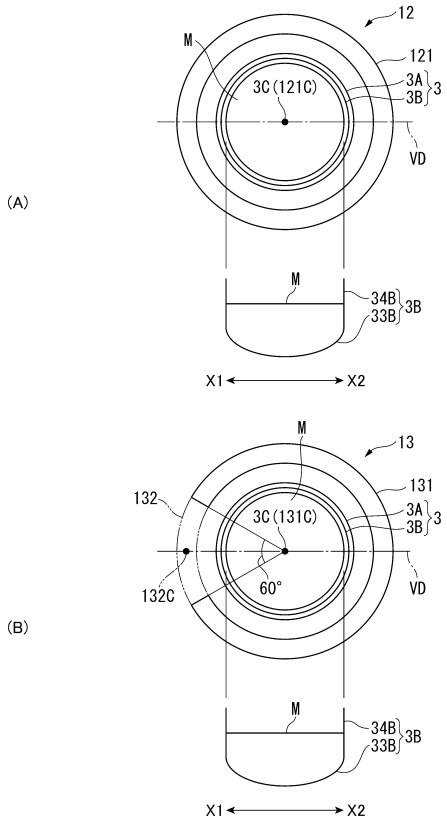
【図５】


START
引き上げ条件を取得
S1
シリコン原料を坩堝に投入して
坩堝の回転を開始
S2
坩堝を加熱してシリコン融液を生成
S3
水平磁場の印加を開始
S4
シリコン単結晶を育成
S5
END

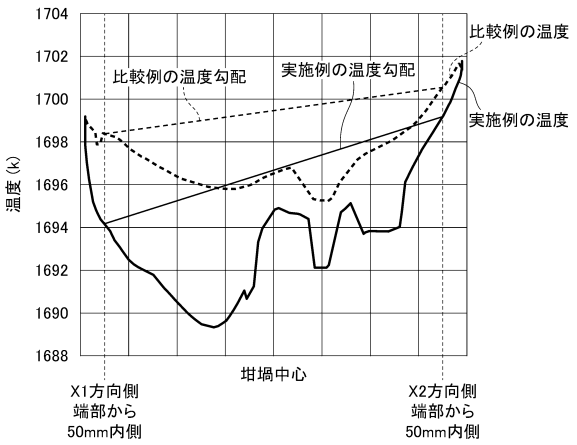
【図６】


(A)
10
101
41
42
102
(B)
11
111
112
113

【図７】


(A)
12
M
121
3C(121C)
3A
3B
3
VD
34B
33B
X1
X2
(B)
13
131
132
132C
60°

【図８】


1704
1702
1700
1698
1696
1694
1692
1690
1688
温度(k)
比較例の温度
実施例の温度
比較例の温度勾配
実施例の温度勾配
坩堝中心
X1方向側
端部から
50mm内側
X2方向側
端部から
50mm内側

フロントページの続き

(56)参考文献　　特開２０１９－１２３６４５（ＪＰ，Ａ）
特開昭６１－６３５９４（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｃ３０Ｂ　２９／０６
Ｃ３０Ｂ　１５／１４