

明 細 書

発明の名称：多結晶シリコンの製造方法

技術分野

[0001] 本発明は多結晶シリコンの製造方法に関する。

背景技術

[0002] 半導体または太陽光発電用ウエハの原料として使用される多結晶シリコンを工業的に製造する方法として、シーメンス法（S i m e n s 法）が知られている。シーメンス法では、水素とトリクロロシランよりなる原料ガスが、鐘型（ベルジャ型）反応器内に、供給される。当該反応器内部には多結晶シリコン析出用芯線（シリコン芯線）が立設されている。このシリコン芯線を加熱することにより、その表面に多結晶シリコンが析出し、成長することにより多結晶シリコンロッドが得られる。

[0003] 近年、生産性を高めるために前記反応器が大型化され、当該反応器内で生成される多結晶シリコンロッドの数が増加している。反応器内のシリコン芯線が増加すると、反応器内の全ての多結晶シリコンロッドの製造を1つの電源回路で制御することが困難となる。そこで、シリコン芯線をグループ分けして当該グループごとに電源回路を設け、複数の電源回路で反応器内のシリコン芯線の温度、電流、および電圧を制御する方法が提案されている。

[0004] 例えば、特許文献1には、内側から4対、8対、12対のシリコン芯線が同心円上に配置された反応器における制御方法が開示されている。特許文献1の発明では、一番内側の円上にある4対を第1電圧コントロール装置で制御している。中間の円上にある8対は、第2電圧コントロール装置で制御している。最も外側の円上にある12対のうち4対は、第3電圧コントロール装置で制御し、残りの8対は、第4電圧コントロール装置で制御している。

[0005] また、特許文献2には、内側から6対、12対、18対のシリコン芯線が同心円上に配置された反応器における制御方法が開示されている。特許文献2の発明では、各同心円上に配置されたシリコン芯線をまず3対ずつのグル

ープに分ける。このように分けた12グループを、4対-4対-4対、または2対-2対-4対-4対のグループ系列に分け、電圧制御している。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：中国実用新案登録公報「第202358923号公報（登録日：2012年8月1日登録）」

特許文献2：中国実用新案登録公報「第202358926号公報（登録日：2012年8月1日登録）」

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 上述のような従来技術においては、全てのシリコン芯線に同じ大きさの電流を流すような電圧制御が行われている。しかしながら、シーメンス法による多結晶シリコンロッドの製造において、以下のような問題があることを本発明の発明者は見出した。すなわち、シーメンス法では、シリコン芯線が成長し、多結晶シリコンロッドが生成する過程で、多結晶シリコンロッドから器壁への熱輻射による熱損失が生じる。この熱損失は、複数の同心円上に配置されたロッドにおいて、器壁に近い円周上に配置されたロッドほど大きくなる。つまり、器壁に近い円周上に配置されたロッドほど析出中の表面温度が下がる。そのため、全てのシリコン芯線に同一の電流を印加するように制御すると、器壁に近い円周上に配置されたロッドの成長速度が、より内側に配置されたロッドの速度よりも遅くなる。この成長速度の違いにより、反応器内で生成される多結晶シリコンロッドの太さにばらつきが生じる。

[0008] 本発明の一態様は、反応器内で生成される多結晶シリコンロッドの太さのばらつきを低減することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0009] 前記の課題を解決するために、本発明の一態様に係る多結晶シリコンロッドの製造方法は、複数の同心円上にシリコン芯線を配置したベルジャ内で前

記シリコン芯線に電流を流すことにより多結晶シリコンを成長させる、多結晶シリコンロッドの製造方法であって、前記複数の同心円のうちのある同心円上に配置されたシリコン芯線に通電する電流値が、当該同心円よりも内側の同心円上に配置されたシリコン芯線に通電する電流値よりも大きくなるように、前記シリコン芯線のそれぞれに通電する電流値を制御することを特徴とする。

発明の効果

- [0010] 本発明の一態様によれば、反応器内で生成される多結晶シリコンロッドの太さのばらつきを低減することができる。

図面の簡単な説明

- [0011] [図1]本発明の実施形態1に係る多結晶シリコンロッドの製造用反応器の構造を示す概略図である。

[図2]本発明の実施形態1に係る反応器内部に設置されたシリコン芯線の配置を示す図である。

発明を実施するための形態

- [0012] 〔実施形態1〕
(多結晶シリコンの製造装置)

以下、本発明の一実施形態について、詳細に説明する。まず、本発明の一実施形態にかかる多結晶シリコンロッドの製造方法に用いられる製造装置について、図1および図2を用いて説明する。

- [0013] 図1は、多結晶シリコンロッドの製造に用いられる反応器1の構造を示す概略図である。反応器1は、底板3、ベルジャ5、電極6、シリコン芯線7、原料ガス供給口8、排ガス配管9、電源20、制御装置21、および入力部22を備えている。ベルジャ5は、ボルト締めなどにより、開閉可能に底板3に取り付けられている。また、ベルジャ5は、その内部空間としての反応室2を形成する構造体であり、ベルジャ5の内側の壁面である内壁51を備えている。シリコン芯線7は、2つの柱状部71および72を備えている。

- [0014] ベルジャ 5 内の反応室 2 には、底板 3 の上に配置された電極 6 を介してシリコン芯線 7 が立設している。電極 6 は、カーボン、ステンレススチール（SUS）、または Cu などにより形成され得る。
- [0015] 反応室 2 内は高温となるため、ベルジャ 5 は、耐熱性および軽量性が良好であり且つ反応に悪影響を与えず、しかも容易に冷却し得る材料によって形成されていることが好ましい。この観点から、ベルジャ 5 は、SUS により形成されていることが好ましい。ベルジャ 5 の外面は、冷却ジャケットで覆われていてもよい。
- [0016] また、底板 3 には、原料ガスを反応室 2 内へ供給するための原料ガス供給口 8 が設けられている。また、底板 3 には排ガスを排出する排ガス配管 9 が設けられている。
- [0017] 図 2 は、反応器 1 内部に設置されたシリコン芯線 7（シリコン芯線 7 A～7 C）の配置を示す図である。図 2 に示されるように、本実施形態において、シリコン芯線 7 は、底板 3 の中心を中心とした半径の異なる複数の同心円上に配置されている。図 2 では、同心円が 3 つの場合を例示している。一番内側の同心円である円 A には、電極 6 A が 3 対設けられており、シリコン芯線 7 A のそれぞれが電極 6 A に接続して立設されている。3 対の電極は直列に接続されており、直列接続された配線の両端は、電源 20 A に接続されている。そのため、電源 20 A から各シリコン芯線 7 A に通電可能である。円 A の外側にある円 B には 6 対の電極、最外殻にある円 C については 9 対の電極が設けられており、それぞれ円 A と同様にシリコン芯線 7 B および 7 C が立設されている。円 B の 6 対の電極は、電源 20 B に接続されており、円 C の 9 対の電極は、電源 20 C に接続されている。
- [0018] なお、図 2 では、シリコン芯線 7 が配置される同心円の数 3 つの場合を示しているが、当該同心円の数 3 つに限定されない。当該同心円の数は、通常 2～10 個、好ましくは 3～8 個、より好ましくは 3～5 個である。また、各円に配置される電極の数も図 2 で例示されている数に限定されない。しかし、析出終了後のロッド取り出しを考慮すると、円 k に設けられる電極

の数 M_k は、析出終了時の多結晶シリコンロッド13の直径を R_{max} 、円kの半径を r_k とすると、下記式(1)を満たす整数であることが好ましい。

$$M_k \leq 1.5 \times \pi \times r_k / R_{max} \quad (1)$$

(多結晶シリコンの製造方法)

本実施形態において、多結晶シリコンの製造は、シーメンス法を用いて行われる。シーメンス法における多結晶シリコン析出工程を、図1を参照して以下に概略的に説明する。電源20(電源20A~C)から供給される電流は、電極6を介してシリコン芯線7へ通電され、シリコン芯線7の温度を多結晶シリコンの析出温度以上に加熱する。このとき、多結晶シリコンの析出温度は、特に限定されないが、シリコン芯線7上に多結晶シリコンを迅速に析出するという観点から、1000~1100℃程度の温度に保持されることが好ましい。

- [0019] 反応器1内へ原料ガスが原料ガス供給口8から供給される。これにより、通電加熱されたシリコン芯線7へ原料ガスが供給される。前記原料ガスとしては、シラン化合物のガスと水素とを含む混合ガスが挙げられる。この原料ガスの反応、つまり、シラン化合物の還元反応によって多結晶シリコンロッド13を生成させる。
- [0020] シラン化合物のガスとしては、モノシラン、トリクロロシラン、四塩化ケイ素、モノクロロシランおよび／またはジクロロシランなどのシラン化合物のガスが使用され、一般的には、トリクロロシランガスが好適に使用される。多結晶シリコン析出工程に用いるトリクロロシランは、高純度の多結晶シリコンを得る観点から、純度が99.9%以上であることが好ましい。
- [0021] 多結晶シリコン析出工程では、原料ガスに含有される水素は、排ガスから精製して循環された水素ガスにより、その殆どが補われ得るが、不足分は、公知の製造方法により得られる水素が用いられ得る。例えば、かかる水素は、水の電気分解によって製造され得る。多結晶シリコン析出工程に用いる水

素は、高純度の多結晶シリコンを得る観点から、純度が99.99vol%以上であることが好ましい。これら高純度のトリクロロシランおよび水素を用いることにより、純度11N以上の高純度の多結晶シリコンを得ることが可能である。

[0022] (電流の制御)

図1に示されるように、電源20は、制御装置21および入力部22に接続される。実施形態1において、ユーザーによって通電する電流値が入力部22を介して制御装置21に入力されると、制御装置21は、同心円ごとに設置されている電源20の電流値を制御する。具体的には、図2に示すように、円Aの電流は電源20A、円Bの電流は電源20B、円Cの電流は電源20Cから供給される。電源20A～20Cは、それぞれ個別に制御装置21によって制御される。

[0023] 本実施形態では、制御装置21は、複数の同心円のうちのある同心円上に配置されたシリコン芯線に通電する電流値が、当該同心円よりも内側の同心円上に配置されたシリコン芯線に通電する電流値よりも大きくなるように電源20A～20Cを制御する。

[0024] 同心円ごとにどのような比率で電流を印加すればよいかを決定するために、発明者は、円毎の輻射熱量の比率に応じて各円の多結晶シリコンロッド13に流す電流比率を決定する方法を見出した。当該輻射熱量の比率は、複数の同心円上に配置された多結晶シリコンロッド13の熱輻射の量を、円ごとに簡単な方法で導出することにより得られる。

[0025] 具体的には、まず、同心円の数n、各同心円上にあるシリコン芯線を形成する鉛直方向の柱状部の総数M、および多結晶シリコンの成長過程（以下、単に成長過程と称する）のある時点における多結晶シリコンロッド13の直径Rを決定する。これらを決定することにより、各円の輻射熱量を導出することができ、得られた円ごとの輻射熱量の比率に応じて各円の多結晶シリコンロッド13に流す電流値比率を決定することができることを見出した。この電流値比率の求め方を以下により詳細に説明する。

[0026] (電流値比率の求め方)

同心円の数 n である反応器1について考える。まず、内側から数えて k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線7（またはシリコン芯線7上に析出し生成した多結晶シリコンロッド13）（鉛直方向において、柱状部となる部分）について考える。 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線7の輻射熱が、他の同心円上および k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線7によって遮蔽される割合である熱遮蔽率 S_k は下記式(2)で示される。

$$S_k = R \times M_k / (2 \times r_k \times \pi) \quad (2)$$

ここで、 R は、成長過程のある時点における多結晶シリコンロッド13の直径である。析出終了時の多結晶シリコンロッド13の直径を R_{max} とすると、 R は、 R_{max} の50%～65%程度に設定されることが好ましい。例えば、析出終了時の多結晶シリコンロッド13の直径が150mmの場合、 R は80～130mm、好ましくは90～110mm、より好ましくは95～105mmに設定される。 M_k は、 k 番目（ただし、 k は、 $1 \leq k \leq n$ を満たす整数）の同心円上に配置したシリコン芯線7の鉛直方向の柱状部71および72の総数である。例えば、同心円上に3対の電極6がある場合、当該同心円状のシリコン芯線7の柱状部71および72の総数は6である。 r_k は、 k 番目の同心円の半径であり、 $r_k + (4/3) \times R_{max} \leq r_{k+1}$ を満たすことが好ましい。 r_{k+1} が $r_k + (4/3) \times R_{max}$ よりも小さい場合は、析出終了時 R_{max} に、隣接する多結晶シリコンロッド13間の距離が R_{max} の3分の1未満となり、析出終了後のロッド取り出しが困難となるためである。

[0027] 次に、 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線7について、当該同心円の外側へ向かう輻射熱率 H_k について考える。 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線7は、 $k+1$ 番目の多結晶シリコンロッド13によって熱遮蔽率 S_{k+1} で熱遮蔽を受ける。続いて、前記シリコン芯線7は、 $k+2$ 番目の多結晶シリコンロッド13によって熱遮蔽率 S_{k+2} で熱遮蔽を受ける。その

後、前記シリコン芯線 7 は、同様に熱遮蔽を受けた後、最終的に最外円である n 番目の同心円上に配置された多結晶シリコンロッド 13 によって熱遮蔽率 S_n で熱遮蔽を受ける。従って、 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から当該同心円の外側方向へ向かう熱輻射において、輻射熱率 H_{k_o} は、 $1 \leq k \leq n-1$ のとき、下記式 (3) で示される。当該輻射熱率 H_{k_o} は、熱遮蔽する物が存在せずに内壁 51 に到達する全輻射熱量に対する、他の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 によって遮蔽されずに内壁 51 に到達する輻射熱量の割合である。

$$H_{k_o} = (1 - S_{k+1}) \times (1 - S_{k+2}) \times \cdots \times (1 - S_n) \quad (3)$$

同様に、 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 について、当該同心円の中心を通過して、内壁 51 へ向かう輻射熱率 H_{k_i} について考える。 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 は、 $k-1$ 番目の多結晶シリコンロッド 13 によって熱遮蔽率 S_{k-1} で熱遮蔽を受け、続いて、 $k-2$ 番目、 $k-3$ 番目、 $\cdots$ 2 番目、1 番目、1 番目、2 番目 $\cdots$ k 番目 $\cdots$ n 番目の多結晶シリコンロッド 13 によって熱遮蔽を受ける。従って、 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から当該同心円の中心を通過して内壁 51 へ向かう熱輻射において、輻射熱率 H_{k_i} は、下記式 (4) で示される。当該輻射熱率 H_{k_i} は、熱遮蔽する物が存在せずに内壁 51 に到達する全輻射熱量に対する、他の同心円上および k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 によって遮蔽されずに内壁 51 に到達する輻射熱量の割合である。

$$H_{k_i} = \{ (1 - S_1) \times \cdots \times (1 - S_{k-1}) \}^2 \times (1 - S_k) \times (1 - S_{k+1}) \times \cdots \times (1 - S_n) \quad (4)$$

ここで、公知であるように、絶対温度 T_s 、表面積 A_2 で放射率 ε_2 の物体が、周囲の壁面（表面積 A_1 、放射率 ε_1 、温度 T_a ）に熱放射によって放出

する熱量 Q は下記式（５）で示される。

$$Q = \sigma \varepsilon_2 A_2 \times (T_s^4 - T_a^4) \quad (5)$$

前記式（５）より、 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 の総輻射熱量 Q_k は、多結晶シリコンロッド 13 の表面積 A_k と、総輻射熱率 H_k に比例することが言え、下記式（６）で示すことができる。

$$Q_k = \beta \times H_k \times A_k \quad (6)$$

ここで、総輻射熱率 H_k とは、 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から内壁 51 へ向かう熱輻射における、下記（ i ）に対する下記（ ii ）の割合である。

[0028] （ i ）熱遮蔽する物が存在せずに内壁 51 に到達する全輻射熱量

（ ii ）他の同心円および k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 によって遮蔽されずに内壁 51 に到達する輻射熱量

また、総輻射熱量 Q_k は、同心円の外側方向への輻射熱量 Q_{ko} と、同心円の中心方向への輻射熱量 Q_{ki} との合計であるので、下記式（７）で示すことができる。

$$Q_k = Q_{ko} + Q_{ki} = (\beta \times H_{ko} \times A_{ko}) + (\beta \times H_{ki} \times A_{ki}) \quad (7)$$

A_k を、同心円の外側方向 A_{ko} と、同心円の中心方向 A_{ki} とに分けると、 $A_k = A_{ko} + A_{ki}$ であり、 $A_{ko} = A_{ki} = (1/2) \times A_k$ と仮定すると、 Q_k は、下記式（８）で示される。

$$Q_k = \{\beta \times H_{ko} \times (1/2) \times A_k\} + \{\beta \times H_{ki} \times (1/2) \times A_k\} = \beta \times (1/2) \times A_k \times (H_{ko} + H_{ki}) \quad (8)$$

このことから、 $H_k = (1/2) \times H_{k,i} + (1/2) \times H_{k,o}$ であるといえる。

[0029] よって、 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から、内壁 5 1 への総輻射熱率 H_k は、下記式 (9) で示される。

$$H_k = (1/2) \times H_{k,i} + (1/2) H_{k,o} = (1/2) \times [(1 - S_{k+1}) \times \dots \times (1 - S_n) + \{(1 - S_1) \times \dots \times (1 - S_{k-1})\}^2 \times (1 - S_k) \times (1 - S_{k+1}) \times \dots \times (1 - S_n)] \quad (9)$$

次に、最も外側の同心円 (n 番目の同心円) 上に配置されたシリコン芯線 7 について、熱遮蔽率 S_n は、前記式 (2) と同様に、下記式 (10) で示される。当該熱遮蔽率 S_n は、 n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 の輻射熱が、他の同心円上および n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 によって遮蔽される割合である。

$$S_n = R \times M_n / (2 \times r_n \times \pi) \quad (10)$$

ここで、 n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から当該同心円の外側方向へ向かう熱輻射における輻射熱率 $H_{n,o}$ について考える。当該輻射熱率 $H_{n,o}$ は、熱遮蔽する物が存在せずに内壁 5 1 に到達する全輻射熱量に対する、他の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 によって遮蔽されずに内壁 5 1 に到達する輻射熱量の割合である。 n 番目の同心円は最外円であるため、他の円の多結晶シリコンロッド 13 によって輻射熱が遮蔽されず、 $H_{n,o} = 1.0$ となる。

[0030] n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から当該同心円の中心を通過して内壁 5 1 へ向かう熱輻射における輻射熱率 $H_{n,i}$ は、前記式 (4) と同様に、下記式 (11) で示される。当該輻射熱率 $H_{n,i}$ は、熱遮蔽する物が存

在せずには内壁 5 1 に到達する全輻射熱量に対する、他の同心円上および n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 によって遮蔽されずに内壁 5 1 に到達する輻射熱量の割合である。

$$H_{ni} = \{ (1 - S_1) \times \cdots \times (1 - S_{n-1}) \}^2 \times (1 - S_n) \quad (11)$$

よって、n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から内壁 5 1 へ向かう熱輻射における総輻射熱率 H_n は、前記式 (9) と同様に、下記式 (12) で示される。当該総輻射熱率 H_n は、熱遮蔽する物が存在せずには内壁 5 1 に到達する全輻射熱量に対する、他の同心円上および n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 によって遮蔽されずに内壁 5 1 に到達する輻射熱量の割合である。

$$H_n = (1/2) \times H_{ni} + (1/2) \times H_{no} = (1/2) \times \{ 1 + \{ (1 - S_1) \times \cdots \times (1 - S_{n-1}) \}^2 \times (1 - S_n) \} \quad (12)$$

k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 から内壁 5 1 への総輻射熱量を Q_k とすると、k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 の総輻射熱率 H_k は、総輻射熱量 Q_k に比例する。総輻射熱量を Q_k による熱損失の補充を、k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線 7 に供給する電流値 I_k で調節する場合、 I_k は H_k および Q_k に依存する。

[0031] しかし、電流供給による熱供給は、原料ガスの加熱にも使用される。また、各ロッド間でガス加熱に使用される熱量はほぼ同一ではあるが、供給する電流による熱供給の内、熱輻射による熱損失の補充に使用される比率については、非常に複雑である。そこで、熱輻射による総輻射熱量 Q_k の補充を、電流値 I_k で調整した析出反応を実際に行い、経験的に求めた結果、下記式 (13) を満たす条件で電流を印加すると、生成した多結晶シリコンロッド 13

の直径がほぼ同一となることを見出した。

$$I_k = I_n \times (Q_k / Q_n)^\alpha \quad (0 < \alpha \leq 0.3) \quad (13)$$

すなわち、前記式(13)を利用して、各同心円の多結晶シリコンロッド13に流す電流値を、最も外側の同心円の多結晶シリコンロッド13に流す電流値の一次関数として決定することができる。そのため、総輻射熱量 Q_k と総輻射熱量 Q_n との比(Q_k / Q_n)を求めれば、特定の I_n に対応する I_k を求めることができる。 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線7の総輻射熱率 H_k は、総輻射熱量 Q_k に比例し、 n 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線7の総輻射熱率 H_n は、総輻射熱量 Q_n に比例する。このことから、総輻射熱量 Q_k と総輻射熱量 Q_n との比は、下記式(14)で示される。

$$Q_k / Q_n = H_k / H_n \quad (14)$$

前記式(14)における H_k を式(9)で置き換えるとともに、前記式(14)における H_n を式(12)で置き換えることができる。このように置き換えた式における熱遮蔽率 S_k を式(2)によって求め、当該置き換えた式における熱遮蔽率 S_n を式(10)によって求めることができる。このようにして Q_k / Q_n を求めることができる。つまり、成長過程のある時点における多結晶シリコンロッド13の直径(R)、同心円の半径(r_k および r_n)、および当該同心円上に配置したシリコン芯線7の柱状部の総数(M_k および M_n)から、最外殻にあるシリコン芯線7に印加する特定の電流値(I_n)に対応する、 k 番目の同心円上のシリコン芯線7に印加する電流値(I_k)を導き出すことができる。

[0032] (発明の効果)

本発明の一態様によれば、上述の方法によって決定した電流比率で電流を流すことにより、反応器1内においてワンバッチで生成される多結晶シリコ

ンロッドの太さのばらつきを低減することができる。これにより均一な太さの多結晶シリコンロッド13を得ることができる。得られる多結晶シリコンロッド13の太さにばらつきがあると、ワンバッチでの多結晶シリコンロッド13の生産量の低下につながる。また、生成した多結晶シリコンロッド13の太さが不均一であると、底板から取り外す際の吊り上げる力の調整、生成ロッドを破碎工程に出す前の粗割工程での力の調整などの非定常作業が発生し、作業効率が低下する。本発明の一態様により、より均一な太さで多結晶シリコンロッド13を得ることにより、上述のような問題を解決し、生産性を向上させることができる。

[0033] 本発明の効果について実証した試験の結果について、以下に説明する。

[0034] (実証試験の結果1)

同心円の半径 r_A 、 r_B 、 r_C がそれぞれ300 mm、600 mm、900 mmである同心円A、B、およびCの円周上にシリコン芯線7をそれぞれ4本、8本、16本配置した反応器1を用いて、 $R = 100$ (mm) のときの各円の総輻射熱率 H_k を、熱遮蔽率 S_k の式に基づいて計算した。その結果を表1に示す。

[0035] [表1]

円Aのロッドの総熱輻射比率	0.505
円Bのロッドの総熱輻射比率	0.534
円Cのロッドの総熱輻射比率	0.638

表1の結果に基づき、各円のシリコン芯線7に流す電流値を、前記式(13)に基づいて計算した。その結果を表2に示す。表中、 I_A/I_C は、円Cに印加する電流値に対する、円Aに印加する電流値の比率を示している。

[0036] [表2]

	$(Q_k/Q_n)^\alpha$						
	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.15$	$\alpha = 0.18$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.22$	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.3$
I_A/I_C	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93
I_B/I_C	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95
I_C/I_C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

表2の計算結果から得られた電流比率で円A、円Bおよび円Cに電流を印

加した場合の、得られた多結晶シリコンロッド13の直径のばらつきを表3に示す。

[0037] 例えば、 α が0.3の場合、円Aのシリコン芯線7へ印加する電流値が、円Cの電流値の93%に、円Bのシリコン芯線7へ印加する電流値が、円Cの電流値の95%となるように制御し、円Cの多結晶シリコンロッド13が150mmになるまで析出を行った。このとき、反応器1内で得られた全ての多結晶シリコンロッド13のうち、ロッド径の最大値と最小値の差を最大値で除した値（ばらつき）は8%であった。

[0038] [表3]

IA/IC	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93
IB/IC	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95
IC/IC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ばらつき	8%	7%	3%	2%	3%	6%	8%

前記の結果から、 $0 < \alpha \leq 0.3$ のどの値においても、ばらつきが10%未満である多結晶シリコンロッド13を28本得ることができた。

[0039] (実証試験の結果2)

同心円の半径 r_A 、 r_B 、 r_C 、 r_D 、 r_E がそれぞれ400mm、800mm、1200mm、1600mm、2000mmである同心円A、B、C、DおよびEの円周上にシリコン芯線7をそれぞれ4本、8本、16本、32本、および48本配置した反応器1を用いて、 $R = 100$ (mm)のときの各円の総輻射熱率 H_k を、熱遮蔽率 S_k の式に基づいて計算した。その結果を表4に示す。

[0040] [表4]

円Aのロッドの総熱輻射比率	0.257
円Bのロッドの総熱輻射比率	0.265
円Cのロッドの総熱輻射比率	0.294
円Dのロッドの総熱輻射比率	0.374
円Eのロッドの総熱輻射比率	0.545

表4の結果に基づき、各円のシリコン芯線7に流す電流値を、前記式(13)に基づいて計算した。その結果を表5に示す。

[0041] [表5]

	$(Q_k/Q_n)^\alpha$						
	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.15$	$\alpha=0.18$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.22$	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.3$
IA/IE	0.93	0.89	0.87	0.86	0.85	0.83	0.80
IB/IE	0.93	0.90	0.88	0.87	0.85	0.83	0.81
IC/IE	0.94	0.91	0.89	0.88	0.87	0.86	0.83
ID/IE	0.96	0.95	0.93	0.93	0.92	0.91	0.89
IE/IE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

表2の計算結果から得られた電流比率で円A、円B、円C、円D、および円Eに電流を印加した場合の、得られた多結晶シリコンロッド13の直径のばらつきを表6に示す。

[0042] 例えば、 α が0.3の場合、円A、円B、円Cおよび円Dのシリコン芯線7へ印加する電流値が、円Eの電流値に対して、それぞれ80%、81%、83%、および89%になるように制御し、円Eの多結晶シリコンロッド13が150mmになるまで析出を行った。このとき、反応器1内で得られた全ての多結晶シリコンロッド13のうち、ロッド径の最大値と最小値の差を最大値で除した値（ばらつき）は8%であった。

[0043] [表6]

IA/IE	0.93	0.89	0.87	0.86	0.85	0.83	0.80
IB/IE	0.93	0.90	0.88	0.87	0.85	0.83	0.81
IC/IE	0.94	0.91	0.89	0.88	0.87	0.86	0.83
ID/IE	0.96	0.95	0.93	0.93	0.92	0.91	0.89
IE/IE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ばらつき	9%	7%	3%	2%	3%	6%	8%

前記の結果から、 $0 < \alpha \leq 0.3$ のどの値においても、ばらつきが10%未満である多結晶シリコンロッド13を108本得ることができた。

[0044] (比較例)

比較例として、同心円の半径 r_A 、 r_B 、 r_C がそれぞれ300mm、600mm、900mmである同心円A、B、およびCの円周上にシリコン芯線7をそれぞれ4本、8本、16本配置した反応器1を用いて、各円に同じ電流を印加した。円Cの多結晶シリコンロッド13が150mmになるまで析出を行った。このとき、反応器1内で得られた全ての多結晶シリコンロッド1

3のうち、ロッド径の最大値と最小値の差を最大値で除した値（ばらつき）は13%であった。

[0045] （実施形態2）

実施形態1では、Rの値について、成長過程のあるひとつの時点における多結晶シリコンロッド13の直径として、所定の定数を用いて I_n と I_k との電流値比率を導き出した。そして、製造工程を通して一定の前記電流値比率を用いて多結晶シリコンロッド13が製造されている。

[0046] しかしながら、実際の製造工程において、多結晶シリコンロッド13の直径はその成長に伴い経時的に変化する。そのため、多結晶シリコンロッド13の製造工程を複数の工程に区切り、各工程において用いる前記電流値比率を個別に算出してもよい。この場合、制御装置21は、複数の工程ごとに予め定められた電流値比率を実現するように電源20A～Cの電流値を制御する。この構成により、太さのばらつきがより低減された多結晶シリコンロッド13を得ることができる。

符号の説明

- [0047] 1・・・反応器
2・・・反応室
3・・・底板
5・・・ベルジャ
6・・・電極
7・・・シリコン芯線
13・・・多結晶シリコンロッド
20・・・電源
21・・・制御装置
22・・・入力部
51・・・内壁

請求の範囲

[請求項1] 複数の同心円上にシリコン芯線を配置したベルジャ内で前記シリコン芯線に電流を流すことにより多結晶シリコンを成長させる、多結晶シリコンロッドの製造方法であって、

前記複数の同心円のうちのある同心円上に配置されたシリコン芯線に通電する電流値が、当該同心円よりも内側の同心円上に配置されたシリコン芯線に通電する電流値よりも大きくなるように、前記シリコン芯線のそれぞれに通電する電流値を制御することを特徴とする、多結晶シリコンロッドの製造方法。

[請求項2] 前記複数の同心円の最も内側の同心円から数えて k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線に流す電流を、

$$I_k = I_n \times (Q_k / Q_n)^\alpha \quad (0 < \alpha \leq 0.3)$$

を満たすように制御する製造方法であり、

前記式中、 n は、前記ベルジャ内の同心円の数を示す 1 より大きい整数であり、

k は、 $1 \leq k < n$ を満たす整数であり、

I_n は、前記複数の同心円の最も外側の同心円上に配置されたシリコン芯線に流す電流であり、

Q_n は、前記最も外側の同心円上に配置されたシリコン芯線から前記ベルジャの内壁への総輻射熱量であり、

Q_k は、前記 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線から前記内壁への総輻射熱量である、請求項 1 に記載の多結晶シリコンロッドの製造方法。

[請求項3] 前記 k 番目の同心円上に配置されたシリコン芯線が、当該同心円上および他の同心円上に配置されたシリコン芯線の輻射熱を遮蔽する割合である熱遮蔽率 S_k を、

$$S_k = R \times M_k / (2 \times r_k \times \pi) \text{ とし、}$$

前記 k 番目の同心円から、当該同心円の外側へ向かう輻射熱率 H_k

。を、

$$H_{k_o} = (1 - S_{k+1}) \times \cdots \times (1 - S_n) \text{ とし、}$$

前記 k 番目の同心円から、当該同心円の中心を通過して前記内壁へ向かう輻射熱率 H_{k_i} を、

$$H_{k_i} = \{ (1 - S_1) \times \cdots \times (1 - S_{k-1}) \}^2 \times (1 - S_k) \times (1 - S_{k+1}) \times \cdots \times (1 - S_n) \text{ とすると、}$$

前記 k 番目の同心円上におけるシリコン芯線から前記内壁への総輻射熱率 H_k は、

$$H_k = (1/2) \times H_{k_i} + (1/2) \times H_{k_o} = (1/2) \times [(1 - S_{k+1}) \times \cdots \times (1 - S_n) + \{ (1 - S_1) \times \cdots \times (1 - S_{k-1}) \}^2 \times (1 - S_k) \times (1 - S_{k+1}) \times \cdots \times (1 - S_n)] \text{ であり、}$$

前記最も外側の同心円上に配置されたシリコン芯線が、当該同心円上および他の同心円上に配置されたシリコン芯線の輻射熱を遮蔽する割合である熱遮蔽率 S_n を、

$$S_n = (R \times M_n) / (2 \times r_n \times \pi) \text{ とし、}$$

前記最も外側の同心円から、当該同心円の外側へ向かう輻射熱率 H_{n_o} を、

$$H_{n_o} = 1 \text{ とし、}$$

前記最も外側の同心円から、当該同心円の中心を通過して前記内壁へ向かう輻射熱率 H_{n_i} を、

$$H_{n_i} = \{ (1 - S_1) \times \cdots \times (1 - S_{n-1}) \}^2 \times (1 - S_n) \text{ とすると、}$$

前記最も外側の同心円上に配置されたシリコン芯線の総輻射熱率 H_n は、

$$H_n = (1/2) \times H_{n_i} + (1/2) \times H_{n_o} = (1/2) \times \{ 1 + \{ (1 - S_1) \times \cdots \times (1 - S_{n-1}) \}^2 \times (1 - S_n) \} \text{ であり、}$$

$$Q_k / Q_n = H_k / H_n \text{ とし、}$$

前記式中、 R は、成長過程のある時点における前記多結晶シリコンロッドの直径であり、

r_x は、前記最も内側の同心円から数えて x 番目（ただし、 x は、 $1 \leq x \leq n$ を満たす整数）の同心円の半径であり、

M_y は、前記最も内側の同心円から数えて y 番目（ただし、 y は、 $1 \leq y \leq n$ を満たす整数）の同心円上に配置した前記シリコン芯線の総数である、請求項 2 に記載の多結晶シリコンロッドの製造方法。