

明 細 書

発明の名称： シリコン電磁鑄造装置

技術分野

[0001] 本発明は、主に太陽電池用シリコン基板のためのシリコン鑄塊を製造するシリコン電磁鑄造装置に関する。

背景技術

[0002] 地球規模的な環境問題を改善するための一つの方法として太陽電池の普及が進んできた。製造される太陽電池は資源量の豊富さおよび光電変換効率の高さからシリコン結晶を用いるものが大半であるが、そのなかでも電磁鑄造によって製造された多結晶シリコン基板を用いる太陽電池の生産が増加している。

[0003] このシリコンの電磁鑄造は、図5に示すように、炉体容器100内において、内部を冷却水で循環した銅製のるつぼ200と、そのるつぼ200の外周に設置された誘導コイル300'によって、シリコン塊Sをるつぼ200内で電磁力によって浮遊溶解して、シリコン塊Sを下方に連続的に引下げながら凝固させることによりシリコン鑄塊を製造する。

[0004] これによると水冷却されたるつぼ200の内部でシリコン塊Sを電磁力によって浮遊溶解するため、溶解シリコンS'はるつぼ200の内面と接触することがなく、溶解シリコンS'に対するるつぼ200からの不純物汚染を無くすることができる。また、シリコン塊Sを溶解するために用いるるつぼ200も溶解シリコンS'と接触することがないために損傷することが無く、恒久的なるつぼ200として使用することができる。

[0005] かくして、上記のシリコン電磁鑄造は、長大な長さのシリコン鑄塊を連続的に製造することによる生産性の高さ、安定かつ定常的な鑄造条件に起因するシリコン鑄塊の高品質性および均質性によって、工業的な生産法の一つになった。

発明の開示

発明が解決しようとする課題

- [0006] しかし、この電磁鑄造には次のような欠点が顕在化した。すなわち、生産性を高めるためにシリコン塊Sを大きく幅広にすると、誘導溶解するシリコン量が増大して溶解に必要な電力投入量が増大する。同時に、銅製のるつぼ200の幅広が大きくなり、誘導コイル300'の幅広も大きくなる。この結果、誘導コイル300'に負荷する電力量が増大して、同一の誘導周波数を保持した場合には、増加した必要電力量を供給するためには、誘導コイル300'の端子電圧が増大する。
- [0007] 例えば、20cmの幅広を持つシリコン塊Sを誘導コイル300'の巻き数を2ターンとして35kHzの誘導周波数を保持して誘導溶解する場合には、誘導電源出力が約250 kW必要になり、誘導コイル300'の端子電圧が約550 Vになる。しかし、35cmの幅広を持つシリコン塊Sを誘導コイル300'の巻き数を2ターンとして同様に35kHzの誘導周波数を保持して誘導溶解する場合には、誘導電源出力が450 kW必要になり、誘導コイル300'端子電圧が約1000 Vになる。
- [0008] ここで、問題が発生することが判明した。すなわち、シリコン電磁鑄造で溶解した溶解シリコンS'の酸化を防止するために炉体容器100内を1気圧の不活性ガスで満たしている。不活性ガスとして利用可能なものはアルゴン、ヘリウム等であるが、通常は経済的な理由からアルゴンガスが用いられる。しかし、アルゴンガスはイオン化電圧が低いためにアルゴンガスで満たした炉体容器100内の向き合った導電体間に電圧が負荷されると、その導電体間にアーク放電が容易に発生する。通常、誘導溶解の工業的装置においては1気圧下のアルゴン雰囲気では、近接して向き合った導電体間に600 V以上の電圧を負荷させた時にアーク放電が発生する。導電体間の電圧が高くなって強いアーク放電が発生するようになると、放電している導電体の表面が溶解、さらには蒸発するようになる。
- [0009] 一般に、電磁鑄造で誘導出力を増大する場合には、誘導コイル300'の端子電圧を高くすることによって電流を増加させて出力を増大させる。誘導

コイル300'に負荷される端子電圧は誘導コイル300'に電流を発生させて電磁誘導によって誘導コイル300'内にある冷却されたるつぼ200の表面層に電圧を惹起して電流を生じさせ、さらに銅るつぼ200に発生する電流は電磁誘導によって銅るつぼ200中にあるシリコン塊Sの表面層に電圧を生じる。

[0010] かくして、上記の35cmの幅広のシリコン鋳塊を製造しようとした場合には誘導コイル300'の端子電圧が高くなり、電磁誘導によって発生するつぼ200および溶解シリコンS'の表面層の電圧が高くなり、図6に示すように、向き合ったるつぼ200の表面層と溶解シリコンS'表面層との間でアーク放電Aが発生した。アーク放電Aが発生した水冷されたるつぼ200の表面はアーク放電Aの熱によって溶解、蒸発して深い溝が作られ、時間の経過とともに侵食が大きくなった。

[0011] アーク放電Aによってるつぼ200の表面が溶解、蒸発すると、るつぼ200の銅が溶解シリコンS'に入り、鋳造後のシリコン鋳塊の純度が著しく低下して半導体性能の少数キャリアの拡散長を低下させる。シリコン鋳塊の少数キャリアの低下は太陽電池の光電変換効率を低下させる。

[0012] また、るつぼ200もアーク放電Aによって表面の侵食が大きくなると、平坦な表面に大きく深い溝が発生するようになり、表面の微小領域では平常的な電磁気的な作用が阻害されて電磁鋳造の溶解、凝固操作に異状を来すことになった。そして、この問題の発生によって、しばしば、正常な鋳造動作が中断されるようになった。

[0013] 本発明は、上述の問題に鑑みてなされたものであって、高品質なシリコン鋳塊を簡単かつ確実に製造することができるシリコン電磁鋳造装置の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明は、上記目的を達成するために、炉体容器と、炉体容器の内部に設けられた導電性のるつぼと、該るつぼの外周に設けられた誘導コイルとを備え、前記炉体容器内を所定の気体にて一定圧力にして、前記誘導コイルに電

圧を負荷することにより前記るつぼ内のシリコンを誘導発熱させて溶解したあとに凝固させるシリコン電磁鑄造装置において、前記誘導コイルは複数の異なる誘導周波数の誘導コイルが上下に配置されてなることを特徴とする。

[0015] これによれば複数の異なる誘導周波数の誘導コイルを用いるために、各誘導コイルに負荷される誘導周波数および誘導出力の選定の組み合わせによって、各誘導周波数における誘導コイルの端子電圧を所定電圧以下（例えば、900V以下、好ましくは600V以下）にしながら、各誘導コイルの合計出力として大きな誘導出力を得ることができる。

[0016] また、前記複数の異なる誘導周波数の誘導コイルのうち、下側に配置された誘導コイルは高周波の誘導周波数を有するのが好ましい。これによれば誘導周波数の選定において、高品質シリコン鑄塊の製造に必要な条件、すなわち、溶解シリコンの攪拌の抑制と固体鑄塊の発熱効果に必要な高周波数の誘導出力を下側の誘導コイルの誘導周波数として選定し、他の上側の誘導コイルについては、この誘導コイルの位置が凝固界面から遠く、誘導周波数の効果が凝固界面には波及しにくくなるために、るつぼ内におけるアーク放電の発生を抑制しながら、各誘導コイルの合計出力を効率的に増加させることができる。

[0017] また、前記下側に配置された誘導コイルの誘導周波数は25～30 kHz以上であるのが好ましい。これによれば下側の高周波の誘導コイルにおいて、溶解シリコンの攪拌の抑制と固体鑄塊の発熱効果に必要な高周波数の誘導出力を効率的に増加させることができる。

[0018] また、前記複数の異なる誘導周波数の各誘導コイルの間に磁気遮蔽板が設けられているのが好ましい。これによれば各誘導コイルの間において不要な電磁作用を防止することができる。

[0019] また、各誘導コイルは、負荷される端子電圧が900V以下であるのがよい。これによれば誘導効率の関係から溶解シリコン表面層の電圧を600V以下にすることができる。

[0020] また、各誘導コイルは、負荷される端子電圧が600V以下であればさらに

よい。これによれば溶解シリコン表面層の電圧を確実に600V以下にすることができるとができる。

- [0021] また、前記するつぼの上方にプラズマトーチが設けられ、該プラズマトーチによりつぼ内の溶解したシリコンにプラズマジェット加熱を付加するのが好ましい。これによればつぼ内のシリコン塊に対して溶解させるための溶解熱を効率的に供給することができる。

発明の効果

- [0022] 本発明によれば、複数の異なる誘導周波数の誘導コイルを用いるために、各誘導コイルに負荷される誘導周波数および誘導出力の選定の組み合わせによって、各誘導周波数における誘導コイルの端子電圧を所定電圧以下（例えば、900V以下、好ましくは600V以下）にしながら、各誘導コイルの合計出力として大きな誘導出力を得ることができる。このため高品質で、ひいては幅広のシリコン鋳塊を簡単かつ確実に製造することが可能となる。

図面の簡単な説明

- [0023] [図1]第1の実施形態に係る本装置の構成概略図である。
[図2]本装置の要部拡大図である。
[図3]本装置の図2におけるIII-III線断面図である。
[図4]第2の実施形態に係る本装置の要部拡大図である。
[図5]従来の装置の構成概略図である。
[図6]従来の装置におけるアーク放電の状態を示す図である。

符号の説明

- [0024] 1・・・本装置
100・・・炉体容器
200・・・るつぼ
300・・・誘導コイル
310・・・上方側の誘導コイル
320・・・下方側の誘導コイル
330・・・磁気遮蔽板

４００・・・黒鉛台

５００・・・上下動装置

６００・・・温度制御炉

７００・・・原料供給器

発明を実施するための最良の形態

[0025] [実施形態１]

次に本発明の第１の実施形態について図１～図３を参照しつつ説明する。

[0026] <全体構成>

図１は、本発明の第１の実施形態に係るシリコン電磁鑄造装置（以下、本装置１という）の構成概略図、図２は本装置１の要部拡大図、図３は本装置の図２におけるⅢ－Ⅲ線断面図である。

[0027] 本装置１は、炉体容器１００と、炉体容器１００の内部に設けられたるつぼ２００と、るつぼ２００の外周に設けられた誘導コイル３００と、シリコン塊Ｓを載置する黒鉛台４００と、黒鉛台４００を上下に移動させる上下動装置５００と、溶解シリコンＳ'の凝固を制御する温度制御炉６００と、るつぼ２００の上方に設けられた原料供給器７００とを備えてなる。これら各部材については、誘導コイル３００を除いて、従来の装置と同様の構成のものである。

[0028] なお、シリコンについては、加熱前の状態をシリコン塊Ｓ、加熱後の溶解した状態を溶解シリコンＳ'、冷却後の凝固した状態をシリコン鑄塊と呼ぶこととする。

[0029] <炉体容器の構成>

前記炉体容器１００は、前記るつぼ２００や誘導コイル３００などを覆う態様で設けられた密閉容器である。

[0030] この炉体容器１００の上部には送入口１１０が形成されるとともに、下部には排気口１２０が形成されている。鑄造時には、炉体容器１００内を真空ポンプ（図示略）により０.１Ｔorrまで減圧したあと、送入口１１０から所定の気体（例えば、アルゴンガス）を大気圧まで送入するようになっている。

[0031] また、炉体容器 100 の底壁 130 には挿通孔 130a が穿設され、前記上下動装置 500 が挿通されている。この挿通孔 130a は、炉体容器 100 を密閉容器とするためにゴムなどからなるシーリング部材 140 が設けられるのがよい。

[0032] <るつぼの構成>

前記るつぼ 200 は、銅製からなり、内部を冷却水が循環してるつぼ 200 を冷却するようになっている。

[0033] このるつぼ 200 は、図 3 に示すように、周方向に電氣的に絶縁するために、複数のセグメントに周方向に分割されている。また、各るつぼ 200 のセグメントの間には雲母等の電氣的絶縁材が挿入されるのがよい。

[0034] <誘導コイルの構成>

前記誘導コイル 300 は、電圧が負荷されることにより、前記るつぼ 200 内のシリコン塊 S を誘導発熱させて溶解させるものである。

[0035] この誘導コイル 300 は、2 個の異なる誘導周波数の誘導コイル 310、320 が上下に配置されてなる。

[0036] また、前記 2 個の異なる誘導周波数の各誘導コイル 310、320 の間には、互いの磁気作用を遮断するための磁気遮蔽板 330 が設けられている。

[0037] また、各誘導コイル 310、320 に負荷する端子電圧を好ましくは 900V 以下、さらに好ましくは 600V 以下にするのがよい。これは以下の理由による。

[0038] 一般に、水冷された銅製のるつぼ 200 を用いる当該電磁鑄造法では、誘導コイル 310、320 に入力された電力はるつぼ 200 を媒体としてるつぼ 200 中で溶解する溶解シリコン S' に 60~65 パーセントの電力の割合で伝達される。すなわち、誘導効率が 60~65 パーセントになる。よって、誘導コイルの 310、320 の端子に 900V の電圧が負荷されたときには、溶解シリコン S' の表面層の電圧は比例的に 600V 程度に降下する。前記したように、通常、電磁鑄造装置においては 1 気圧下のアルゴン雰囲気では、近接して向き合った導電体間に 600V 以上の電圧を負荷させた時にアーク放電

が発生する。よって、誘導溶解時に完全にアーク放電を抑制する誘導コイルの端子電圧は600V以下が好ましいが、対面する銅るつぼ200面と溶解シリコンS'の表面層との間のアーク放電を防止するためにはコイル端子電圧が900Vであってもよい。

[0039] また、下方側の誘導コイル320は高周波の誘導周波数を有するのがよい。そして、この高周波の誘導周波数は、25～30 kHz以上であるのが好ましい。これは以下の理由による。

[0040] 一般的に、電磁誘導による溶解シリコンS'の加熱においては、溶解シリコンS'の表面層の磁場浸透深さに相当する領域で、磁束密度と電流密度の関係によって溶解シリコンS'を内側に押す力が発生し、この力によって溶解シリコンS'が浮遊溶解されると同時に溶解シリコンS'は攪拌される。低周波数側では相対的に溶解シリコンS'を攪拌する力が大きくなって溶解シリコンS'の十分な攪拌が得られ、高周波数側では攪拌作用が小さくなって静的な溶解状態が維持される。

[0041] また、同時に、溶解シリコンS'の表面層の磁場浸透深さに相当する領域では、低周波数側では電流の流れる表面層深さが大きくなって表面から深さ方向に幅広い範囲が加熱される。他方、高周波数側では電流の流れる表面層深さが小さくなって表面層では加熱される範囲が狭くなる。よって、同一の誘導加熱量を印加した場合には、低周波数側の表面層の幅広い加熱領域では単位体積あたりの加熱強度は相対的に小さく、高周波数側では表面層の狭い加熱領域において単位体積あたりの加熱強度は大きくなる。すなわち、高周波数を選定することによって表面層で強加熱が行われる。

[0042] また、誘導コイルの誘導周波数の選定においては、特に25～30 kHzの誘導周波数を境にして、低周波数側では溶解シリコンS'の攪拌が強くなり、溶解シリコンS'の対流熱移動が促進されて凝固界面に熱が移動するために、凝固界面が下方に拡張して深い凝固界面が形成される。深い凝固界面を形成しながらシリコン凝固が定常的に進行すると、凝固したシリコン鋳塊内部では鋳塊表面層と鋳塊内部で温度差が生じて鋳塊内部に内部応力が発生す

る。

[0043] また、低周波数側では鋳塊表面層の加熱強度が弱いために、鋳塊表面層の温度を保持するためには不十分になり鋳塊表面層の温度を容易に低下させ、鋳塊表面層と鋳塊内部の温度差を大きくする方向に働く。すなわち、低周波数側においては、溶解シリコンS'に対する強い攪拌作用および凝固した固体鋳塊の表面層における弱い加熱強度が原因になって凝固界面が深くなる。下方に大きく拡張した凝固界面は凝固シリコン鋳塊中の内部応力を大きくして結晶欠陥を発生させ、その結果として、少数キャリアーの拡散長を小さくして多結晶シリコンの半導体としての品質を低下させた。

[0044] 他方、25～30kHz以上の高い周波数側では、溶解シリコンS'に対する攪拌力が弱く静的な溶解シリコンS'が保持され、凝固界面への対流熱移動が少なくなり、凝固界面が下方に拡張しにくく、浅い凝固界面が形成された。同時に、凝固したシリコンの鋳塊表面層は高い周波数によって加熱強度が高いために表面層の温度低下が小さくなり、鋳塊内部では鋳塊表面と鋳塊内部の温度差が小さくなる。こうして、高周波数側でのシリコン鋳塊の凝固では、凝固界面を下方に大きく拡張させることなく浅い凝固界面を形成して、鋳塊の表面層と内部との温度差を小さくして鋳塊中の内部応力の発生を小さくした。この結果、鋳塊中には結晶欠陥が生じにくくなり、多結晶シリコン半導体の少数キャリアーの拡散長を大きくして太陽電池の性能を高めることができた。

[0045] このように、シリコン電磁鋳造においては、シリコン鋳塊の幅広を大きくして生産性を高めるためには誘導出力の増大が必要であり、特に下方側の誘導コイルを高周波の誘導周波数とするのが好ましく、さらに太陽電池のための半導体の品質をより高めるためには誘導周波数を25～30kHz以上にするのが好ましいのである。

[0046] <その他の部材の構成>

前記温度制御炉600は、溶解シリコンS'を緩やかに冷却して凝固させるためのものである。一般に、上方から下方に向けて所定の温度勾配を保持

しており、最終的には溶解シリコンS'を所定温度まで緩やかに冷却するようになっている。

[0047] 前記黒鉛台400は、黒鉛からなる台座である。鑄造時には上下動装置500により下側の誘導コイルの高さまで配置されたあと、装入されたシリコン塊Sが台上に載置される。そして、炉体容器100内を中心線に沿って下降することにより、溶解シリコンS'を下降させながら凝固させるようになっている。

[0048] 前記上下動装置500は、前記黒鉛台400を炉体容器100の中心線に沿って上下に移動させるものである。この上下の移動については、別に設けられた駆動装置（図示略）により鑄造条件に応じて上下に適宜移動するようになっている。

[0049] 前記原料供給容器700は、原料となるシリコン塊Sや黒鉛塊を上方からるつぼ200内に装入するものである。まずは所定重量のシリコン塊Sを装入したあと、その上面に黒鉛塊を装入する。この黒鉛塊は、シリコンの発熱を補助するものであり、誘導コイルを通電すると、まず黒鉛塊が発熱して昇温したあと、下方のシリコン塊Sが黒鉛の輻射熱により発熱して昇温する。シリコン塊Sが所定温度以上になるとシリコン塊Sの電気抵抗値が下がり、シリコン塊S中の誘導電流が増加して自己発熱を開始する。シリコン塊Sが自己発熱を開始すると同時に、上方の黒鉛塊はるつぼ200から上方に引き抜かれる。

[0050] なお、本実施形態では、誘導コイル300を上下二つの誘導コイル310、320から構成したが、3つ以上の誘導コイルから構成してもよい。

[0051] [実施形態2]

次に本発明の第2の実施形態について図4を参照しつつ説明する。

[0052] 図4は、本実施形態に係る本装置1の要部拡大図である。

[0053] 本実施形態では、炉体容器100内であって、かつるつぼ200の上方にプラズマトーチ800が設けられている。

[0054] このプラズマトーチ800は、鑄造時においてシリコンの発熱を加速させ

るものである。そして、例えば直径が10cmの円筒状に形成され、内部の負極電極およびトーチ全体を水冷却し、上下方向および水平方向の運動が可能である。

[0055] 鑄造に際しては、プラズマトーチ800をその先端がシリコン塊Sに接近するように下降させ、アルゴンなどの所定の気体をプラズマトーチ800に流入させて直流プラズマをプラズマトーチ800の陰極と溶解シリコンS'の陽極の間に点火する。その後、誘導コイル310、320とともに徐々に投入電力を増加して、シリコンの加熱を加速させることができる。

[0056] なお、その他の部材については、第1の実施形態（図1～図3）に示すものと同一なので、同一の符号を付してその説明を省略する。

実施例 1

[0057] 縦方向に電氣的に絶縁分割され、かつ内部を冷却水で循環した導電性のるつぼ200と該るつぼ200の外周に設置された誘導コイル300によってシリコン塊Sを溶解したあと、下方に引下げながら凝固させる本装置1であって、異なる誘導周波数をもつ二つの誘導コイル310、320を用いる本装置1において、シリコン電磁鑄造の実施例を以下のように行なった。

[0058] 本実施例では、図1に示すものと同様にして、内圧が制御可能な炉体容器100内に入るるつぼ200と該るつぼ200を取り囲む二つの誘導コイル310、320を上下に設置し、また、該るつぼ200の直下にシリコン塊Sの凝固させる温度を制御する温度制御炉600を設置し、さらに黒鉛台400を上下に移動させる得る上下動装置500を設置して、シリコン塊Sを連続的に引き下げるようにした。

[0059] また、炉体容器100の上方には、シリコン塊Sや黒鉛塊などを供給する原料供給器700を設置した。該黒鉛塊は、シリコン塊Sの初期溶解時に、るつぼ200内の誘導コイル300の高さレベルに上方から装入して誘導発熱させて、シリコン塊Sを補助的に加熱するためのものである。

[0060] また、シリコン塊Sの鑄造方向に対する横断面は正方形で、その幅広長さは35cmである。よって、水平方向の横断面が正方形であるるつぼ200の

内幅径を35 cm、外幅径を41.6 cmとして、るつぼ200を縦方向に電氣的に絶縁するための分割数を60とした。60に分割したるつぼ200の各セグメントの長さは70 cmで、内部に冷却水を循環するように加工され、各セグメント間には電氣的絶縁材の雲母を挿入した。るつぼ200内の冷却水は合計で毎分500リットルの流量とした。

- [0061] また、二つの誘導コイル310、320は上下に配設され、上方側の誘導コイル310は正方形の2ターンで内幅径が42.6 cm、高さが15 cmで、最大出力350kWの誘導電源に接続され、誘導周波数を10 kHzに設定した。また、下方側の誘導コイル320は上方側の誘導コイル310と同一の形状であるが、最大出力150kWの誘導電源に接続され、誘導周波数を35kHzに設定した。併設した二つの誘導コイル310、320はるつぼ200の高さ方向の中心に設置され、上方側の誘導コイル310と下方側の誘導コイル320の間には厚さ3 mmの銅製の磁気遮蔽板330が設置され、この銅製磁気遮蔽板330の外周を蛇管によって水冷した。
- [0062] 本実施例の操作手順は以下のとおりである。最初に、引き下げ方向に対する横断面が正方形で幅広がり35 cmの黒鉛台400の上面が下方側の誘導コイル320の下端位置と同一になるように上下動装置500に乗せてるつぼ200中に下方から挿入し、黒鉛台400の上面に50 kgのシリコン塊Sを装入了。装入了シリコン塊Sの上面から2 cm上方には、引き下げ方向に対する横断面が正方形で、その幅広がり30 cm、高さが7 cmの黒鉛塊をるつぼ200の上方から挿入した。
- [0063] そして、炉体容器100内を真空ポンプによって0.1 Torrまで減圧した後、アルゴンガスを大気圧まで炉体容器100内に送入了、次に、周波数10 kHzの上方側の誘導コイル310には誘導出力を印加して200 kWになるまで順次増加させた。次いで、35 kHzの下方側の誘導コイル320にも誘導出力を印加して100 kWまで増加させた。上記の誘導出力においては、上方側の誘導コイル310の端子電圧は170 V、下方側の誘導コイル320の端子電圧は280 Vであった。

- [0064] このように二つの誘導コイル 310、320に通電すると、まず、シリコン塊 S の上方に挿入された黒鉛塊が誘導発熱して昇温して赤色になり、次に、装入されたシリコン塊 S が赤色になった黒鉛塊の輻射熱によって昇温した。該シリコン塊 S の温度が約 500 °C になるとシリコン塊 S の電気抵抗値が下がり、シリコン塊 S 中の誘導電流が増加して自己発熱を開始した。シリコン塊 S が自己発熱を開始すると同時に、上記黒鉛塊を冷却するつぼ 200 から上方に引き抜き抜いた。
- [0065] さらに誘導出力を、上方側の誘導コイル 310 については 350 kW まで、下方側の誘導コイル 320 については 150 kW まで、それぞれ増加させてシリコンの溶解を加速させた。自己発熱を開始したシリコン塊 S はさらに昇温して、間もなくすると完全に溶解した。溶解シリコン S' がるつぼ 200 の内面壁と対面する側面は電磁力を受けて溶解シリコン S' は冷却するつぼ 200 と非接触で離間した。上記の増加した誘導出力における各誘導コイルの最大端子電圧は、上方側の誘導コイル 310 では 280 V、下方側の誘導コイル 320 では 490 V になった。
- [0066] 初期に装入したシリコンが完全に溶解して安定的に保持された後、るつぼ 200 の直下に設置されたシリコン鑄塊の温度制御炉 600 を昇温してシリコン鑄塊の下降方向に約 35°C/cm の温度勾配を保持させた。
- [0067] そして、1 から 20 mm に整粒されたシリコン原料を上方に位置する原料供給器 700 からるつぼ 200 中へ連続的に装入しながら、溶解シリコン S' を保持している上下動装置 500 を下降させて鑄造を開始した。上下動装置 500 の下降が始まり、溶解シリコン S' が下方側の誘導コイル 320 の下端の位置よりも下降すると熔融シリコン S' が受ける電磁力が減少して冷却されて凝固した。このとき、凝固したシリコン鑄塊の表面層は下方側の誘導コイル 320 に距離的に近いために下方側の誘導コイル 320 からの誘導作用を受けて赤熱し、急冷却されない。
- [0068] かくして、連続的なシリコン原料の供給と連続的なシリコン塊 S の凝固が同時になされた連続鑄造を実施した。本実施例においては鑄造速度を毎分 2.0

mmで行い、定常的な鑄造時の誘導電源出力は、上方側の誘導コイル310においては約260 kW、下方側の誘導コイル320においては約80 kWで、各誘導コイル310、320の端子電圧は、上方側の誘導コイル310では約200 V、下方側の誘導コイル320では約250 Vであった。鑄造は鑄塊の全長が200 cmになると停止された。

[0069] 上記の手順で鑄造した鑄塊を室温まで冷却した後に鑄塊を炉内から取り出して、るつぼ200の内面を調査した。その結果、アーク放電が起きた形跡はまったく見られずに、るつぼ200の内面はるつぼ200を製作したときと同様に平坦な形状であった。

[0070] さらに、当該シリコン鑄塊から太陽電池の試作をするために太陽電池用基板が作成されて太陽電池性能が試験された。すなわち、ダイヤモンド切断機によって15 cm正方形の断面で長さが40 cmのシリコンブロックが切り出され、これをワイヤーソーライス法によって厚さが200ミクロンメートルのシリコン多結晶基板に加工された。さらに、当該シリコン多結晶基板の100枚が抜き取られ、これが太陽電池に試作された。太陽電池の試作工程では水素パッシベーション技術が用いられ、太陽電池変換効率の平均値は100枚の平均値で15.1 %が得られた。本実施例によって、本発明によって作製されたシリコン鑄塊が高品質な太陽電池基板を提供できることが確認された。

実施例 2

[0071] 縦方向に電氣的に絶縁分割され、かつ内部を冷却水で循環した導電性のるつぼ200と該るつぼ200の外周に設置された誘導コイル300によってシリコン塊Sを溶解したあと、下方に引下げながら凝固させる本装置1であって、異なる誘導周波数をもつ二つの誘導コイル310、320を用いるとともに、プラズマトーチ800が設けられた本装置1において、シリコン電磁鑄造の実施例を以下のように行なった。

[0072] 本実施例では、図4に示すように、内圧が制御可能な炉体容器100内にるつぼ200と該るつぼ200を取り囲む二つの誘導コイル310、320を上下に設置し、また、該るつぼ200の直下にシリコン塊Sの凝固させる

温度を制御する温度制御炉600を設置し、さらに黒鉛台400を上下に移動させる得る上下動装置500を設置して、シリコン塊Sを連続的に引き下げるようにした。

[0073] また、炉体容器100の上方には、シリコン塊Sや黒鉛塊などを供給する原料供給器700を設置した。該黒鉛塊は、シリコン塊Sの初期溶解時に、るつぼ200内の誘導コイル高さレベルに上方から装入して誘導発熱させて、シリコン塊Sを補助的に加熱するためのものである。

[0074] また、プラズマトーチ800をるつぼ200の上方に設置し、溶解シリコンS'の上方からプラズマジェット加熱を付加するものとした。

[0075] また、シリコン塊Sの鑄造方向に対する横断面は正方形で、その幅広長さは51cmである。よって、水平方向の横断面が正方形であるるつぼ200の内幅径を51cm、外幅径を57cmとして、るつぼ200を縦方向に電氣的に絶縁するための分割数を84とした。84に分割したるつぼ200の各セグメントの長さは80cmで、内部に冷却水を循環するように加工され、各セグメント間には電氣的絶縁材の雲母を挿入した。るつぼ200内の冷却水は合計で毎分700リットルの流量とした。

[0076] また、二つの誘導コイル310、320は上下に配設され、上方側の誘導コイル310は正方形の2ターンで内幅径が58cm、高さが15cmで、最大出力550kWの誘導電源に接続され、誘導周波数を10kHzに設定した。また、下方側の誘導コイル320は上方側の誘導コイル310と同一の形状であるが、最大出力200kWの誘導電源に接続され、誘導周波数を35kHzに設定した。併設した二つの誘導コイル310、320はるつぼ200の高さ方向の中心に設置され、上方側の誘導コイル310と下方側の誘導コイル320の間には厚さ3mmの銅製の磁気遮蔽板330が設置され、この銅製磁気遮蔽板330の外周を蛇管によって水冷した。

[0077] また、溶解シリコンS'の上方からプラズマジェット加熱を付加するために、溶解シリコンS'を陽極とするプラズマトーチ800を100kWの直流電源に接続した。プラズマトーチ800は直径が10cmの円筒状で、内部の負極

電極およびトーチ全体を水冷却し、プラズマトーチ 800 は上下左右に移動可能なものとした。

- [0078] 本実施例の操作手順は以下のとおりである。最初に、引き下げ方向に対する横断面が正方形で幅広がり 51 cm の黒鉛台 400 の上面が下方側の誘導コイル 320 の下端位置と同一になるように上下動装置 500 に乗せてるつぼ 200 中に下方から挿入し、黒鉛台 400 の上面に 110 kg のシリコン塊 S を装入した。
- [0079] 次に、プラズマトーチ 800 をその先端が黒鉛台 400 上のシリコン塊 S に接近するように下降させ、さらにアルゴンをプラズマトーチに毎分 250 リットル流入させて直流プラズマをプラズマトーチ 800 の陰極とシリコン塊 S の陽極の間に点火した。プラズマの点火を確認した後、二つの誘導コイル 310、320 に電圧を付加して通電を開始した。
- [0080] そして、プラズマの点火と誘導コイルの電圧の付加を開始してから徐々に投入電力を増加してシリコン塊 S の溶解を加速した。プラズマジェットの出力は、電流 7000 アンペア、電圧 125 V まで上昇させ、上方側の誘導コイル 310 には誘導周波数 10 kHz、誘導出力 550 kW、コイル端子電圧 380 V、下方側の誘導コイル 320 には誘導周波数 35 kHz、誘導出力 200 kW、コイル端子電圧 560 V が最高で負荷した。
- [0081] シリコン塊 S の昇温、溶解が早まり、まもなくシリコン塊 S が完全に溶解した。さらにシリコン原料を原料供給器 700 から投入して溶解シリコン S' の量が 180 kg になるまで投入を継続した。プラズマジェット 800 の照射を受け、かつるつぼ 200 内で誘導溶解された溶解シリコン S' の溶湯の状態は安定しており、溶解シリコン S' がるつぼ 200 の内面壁と対面する側面は電磁力を受けてるつぼ 200 と非接触で離間した。
- [0082] シリコン塊 S の初期溶解作業が終了して溶解シリコン S' が安定的に保持された後、るつぼ 200 の直下に設置された鋳塊の温度制御炉 600 を昇温してシリコン鋳塊の下降方向に約 35°C/cm の温度勾配を保持させた。
- [0083] そして、1 から 20 mm に整粒されたシリコン原料を上方に位置する原料供

給器 700 からるつぼ 200 中へ連続的に装入しながら、溶解シリコン S' を保持している上下動装置 500 を下降させて鑄造を開始した。上下動装置 500 の下降が始まり、溶融シリコン S' が下方側の誘導コイル 320 の下端の位置よりも下降すると溶融シリコン S' が受ける電磁力が減少して冷却されて凝固した。このとき、凝固したシリコン鑄塊の表面層は下方側の誘導コイル 320 に距離的に近いために下方側の誘導コイル 320 からの誘導作用を受けて赤熱して、急冷却されない。

[0084] かくして、連続的な原料の供給と連続的な鑄塊の凝固が同時になされた連続鑄造を実施した。本実施例においては鑄造速度を毎分 1.7 mm で行い、定常的な鑄造時の誘導電源出力は、プラズマジェット出力約 80 kW、上方側の誘導コイル 310 の出力は約 350 kW、下方側の誘導コイル 320 の出力は約 150 kW で、各誘導コイル 310、320 の端子電圧は、上方側の誘導コイル 310 では約 250 V、下方側の誘導コイル 320 では約 470 V であった。鑄造は鑄塊の全長が 200 cm になると停止された。

[0085] 上記の手順で鑄造した鑄塊を室温まで冷却した後、るつぼ 200 の内を調査した。その結果、アーク放電が起きた形跡はまったく見られず、るつぼ 200 の内面は銅るつぼ 200 を製作したときと同様に平坦な形状であった。

[0086] さらに、当該シリコン鑄塊から太陽電池の試作をするために太陽電池用基板が作成されて太陽電池性能が試験された。すなわち、15 cm 正方形の面積で、厚さが 200 ミクロンメートルのシリコン多結晶基板が鑄塊から加工され、太陽電池に試作された。太陽電池の試作は抜き取った 100 枚の基板について行なわれ、太陽電池変換効率の平均値は 100 枚の平均値で 15.2 % が得られた。本実施例によっても、本発明によって製造されたシリコン鑄塊が高品質な太陽電池基板を提供できることが確認された。

産業上の利用可能性

[0087] 本発明は、太陽電池用シリコン基板のための高品質なシリコン鑄塊を製造するために、シリコン塊を誘導発熱により溶解してシリコン鑄塊を製造するシリコン電磁鑄造に適用可能である。

請求の範囲

- [請求項1] 炉体容器と、炉体容器の内部に設けられた導電性のるつぼと、該るつぼの外周に設けられた誘導コイルとを備え、前記炉体容器内を所定の気体にて一定圧力にして、前記誘導コイルに電圧を負荷することにより前記るつぼ内のシリコンを誘導発熱させて溶解したあとに凝固させるシリコン電磁鑄造装置において、前記誘導コイルは複数の異なる誘導周波数の誘導コイルが上下に配置されてなることを特徴とするシリコン電磁鑄造装置。
- [請求項2] 前記複数の異なる誘導周波数の誘導コイルのうち、下側に配置された誘導コイルは高周波の誘導周波数を有する請求項1に記載のシリコン電磁鑄造装置。
- [請求項3] 前記下側に配置された誘導コイルの誘導周波数は25～30 kHz以上である請求項2に記載のシリコン電磁鑄造装置。
- [請求項4] 前記複数の異なる誘導周波数の各誘導コイルの間に磁気遮蔽板が設けられている請求項1から請求項3のいずれかに記載のシリコン電磁鑄造装置。
- [請求項5] 各誘導コイルは、負荷される端子電圧が900V以下である請求項1から請求項4のいずれかに記載のシリコン電磁鑄造装置。
- [請求項6] 各誘導コイルは、負荷される端子電圧が600V以下である請求項1から請求項5のいずれかに記載のシリコン電磁鑄造装置。
- [請求項7] 前記るつぼの上方にプラズマトーチが設けられ、該プラズマトーチによりるつぼ内の溶解したシリコンにプラズマジェット加熱を付加する請求項1から請求項6のいずれかに記載のシリコン電磁鑄造装置。