

明 細 書

発明の名称：

多結晶シリコン析出用シリコン芯線及びその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、多結晶シリコン析出用シリコン芯線、詳しくは、一对の鉛直棒部とこれら両鉛直棒部の各上端を繋ぐ横架部とで構成されてなる門型形状をした、前記シリコン芯線に関する。

背景技術

[0002] 多結晶シリコンは、半導体あるいは太陽光発電用ウェハーの原料として、有用に使用されている。こうした多結晶シリコンの製造方法は種々知られており、例えば、シーメンス法と呼ばれる方法が工業的に実施されている。

[0003] シーメンス法の典型を概説すれば、まず、反応炉内の底盤上に、一对の鉛直棒部とこれら両鉛直棒部の各上端を繋ぐ横架部とで構成されてなる、門型形状をしたシリコン芯線を設置し、その各端に芯線ホルダを介して金属電極を固定する。そして、金属電極に通電して上記シリコン芯線をシリコンの析出温度に加熱し、この状態で反応室内にトリクロロシラン (SiHCl_3) やモノシラン (SiH_4) 等のシラン化合物と還元ガスとからなるシリコン析出原料ガスを供給して、化学気相析出法により上記シリコン芯線上にシリコンを析出させる方法になる。この方法によれば、高純度な多結晶シリコンを、ロッドの形態で得ることができる。

[0004] シーメンス法で使用する、前記門型形状をしたシリコン芯線は、例えば、次の方法により製造されている。即ち、一对の鉛直棒部用シリコン棒のそれぞれの上端をV字形状の受け構造とし、ここに横架部用シリコン棒の各端部を載置して組み立てる方法である（特許文献1）。しかし、この方法で得られたシリコン芯線は、その角部が、鉛直棒部用シリコン棒の上端受け構造に、横架部用シリコン棒の端部が載置されただけの構造であるため、安定性に劣る。このため、多結晶シリコン析出時の初期通電では、高電圧によるアー

クが発生し易く、角部周辺が溶断することがあった。

[0005] 他方で、シリコン芯線としては、シリコン製の長棒部材を用いて、これを高温（800℃以上）に加熱して軟化させて湾曲させて得ることも行われている（特許文献2及び3）。この方法により得たシリコン芯線であれば一体構造であるため、前記初期通電時のアーク発生は抑制できる。しかし、前記長棒部材を、斯様に高温に加熱して折り曲げる操作は簡単ではなく、複雑な加熱処理装置が必要になり、設備費が大きくなる。しかも、この方法では、上記高温加熱時に、高活性となったシリコン表面が、装置の金属面や空気と接触して、シリコン芯線の金属汚染を引き起こす。

[0006] 門型形状のシリコン芯線の製法として、前記鉛直棒部用シリコン棒の上端と横架部用シリコン棒部の端部とを溶接することも考えられる。ここで、シリコン製部材の溶接は、高周波誘導加熱により行うのが一般的である。即ち、高周波誘導加熱は、交流電源に接続されたワークコイルの中に、導電体からなる被加熱物を挿入することで、被加熱物の表面付近に高密度の渦電流を発生させ、そのジュール熱で被加熱物の表面を自己発熱させる方法である。高周波誘導加熱することで、接合するシリコン製部材各端部の当接箇所付近には、熔融ドロップが生成され、これらが表面張力で一体化し冷却されることで溶接される。

[0007] しかし、高周波誘導加熱によるシリコン製部材の溶接は、これまで直溶接（直線状の溶接）しか知られておらず（特許文献4～6）、前記門型形状のシリコン芯線を得るために必要になる、直角溶接等の高角度での屈曲溶接は行われていなかった。これは、前記高周波誘導加熱するためには、被接合部をワークコイルで包囲する必要がある、この状態で被接合部が角度を有していると、該被接合部をワークコイルの包囲内に出し入れすることが難しくなり、該ワークコイルとの接触が生じ、シリコン芯線の金属汚染が引き起こされるからである。

[0008] さらに、上記高周波誘導加熱による溶接は、被接合部を予備加熱してから行うため、該被接合部の周囲にはカーボン部材製の予備ヒーターも配置しな

ければならず、シリコン製部材と予熱ヒーターとの接触によるシリコン芯線汚染の危険性を高めていた。

[0009] ここで、高周波誘導加熱による溶接に先だって、被接合部を予備加熱することが必要な理由は、シリコンの室温での比抵抗は $10000\ \Omega\text{cm}$ 以上であるため、室温下でシリコンに直接高周波をかけても渦電流が発生しないためである。このため、前記ワークコイルの包囲内には、被接合部との間隙に、上記予熱ヒーターも挿入することが必要になり、この状態で、まず、ワークコイルに高周波を負荷して、予熱ヒーターを少なくとも 1500°C に高周波誘導加熱して、被接合部を 100°C 以上に加熱する。これにより被接合部は、比抵抗が数 Ωcm に低下し渦電流も発生し始めるため、ここで予熱ヒーターを遠ざけて、ワークコイルからの高周波を、被接合部に集中させて溶接を遂行させる。

[0010] こうした中、斯様に被接合部を、高角度に屈曲溶接する場合であっても、ワークコイルやカーボン部材との接触の心配がなく、これを簡易に実施できる方法として、特許文献7による方法が提案された。即ち、特許文献7には、シリコン芯線の溶接部を直角溶接可能な方法として、

高周波発生器に接続され、交番磁界を出力するワークコイルを備え、該ワークコイルは、一方の端子から他方の端子に至るまでの形状が、シリコン芯線の溶接部を収容可能で、かつ、一方向に開放された空間を形成するように屈曲する部分を含み、前記空間において前記交番磁界による前記シリコン芯線の加熱が行われることを特徴とするシリコン芯線溶接装置を用いる方法が示されている（〔請求項1〕）。そして、特許文献7では、上記シリコン芯線溶接装置において、前記空間に出し入れ可能に設置され、前記空間に挿入した際に前記シリコン芯線の近傍に位置し、前記交番磁界により加熱されて前記シリコン芯線の予熱を行う予熱用カーボン部材を備える構造も開示されている（〔請求項4〕）。

[0011] シリコン芯線溶接装置の上記ワークコイル及び予熱用カーボン部材の構造、配置は、接合する端部同士が、直溶接の場合だけでなく、直角溶接であっ

ても、これらへの接触の危険性のないように巧みに工夫されている（特に、特許文献7、〔0055〕～〔0083〕、図8～10）。そして、同特許文献7には、上記シリコン芯線溶接装置を用いての溶接に際して、周囲に不活性ガスを充満させることも記載されているから（〔0062〕）、前記溶接時に接合部が高温下で空気と接触することも防止されている。

先行技術文献

特許文献

[0012] 特許文献1：中国実用新案公開第202379744号明細書

特許文献2：特開昭51-073924号公報

特許文献3：中国特許公開第101723369号明細書

特許文献4：特開昭63-242339号公報

特許文献5：特開2011-116634号公報

特許文献6：特開2012-62243号公報

特許文献7：特開2018-122340号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0013] しかしながら、上記特許文献7のシリコン芯線溶接装置を用いて製造したシリコン芯線であっても、鉛直棒部と横架部の端部同士が溶接された接合角部の表面金属濃度は、十分に低減できなかった。即ち、係る接合角部は、前記ワークコイルや予熱ヒーターとの接触が防止されて相当に高純度ではあるが、数～十数ppbw程度の表面金属濃度であった。近年、電子回路の高密度集積化が益々に進み、これに伴って、半導体用ウェハの原料である多結晶シリコンに対しても、金属汚染の低減要求は一層に高まっている。従って、多結晶シリコン析出用のシリコン芯線に対しても、その高純度化要求は極めて強いものがあり、前記接合角部の僅かの汚染も改善が求められていた。

[0014] 以上の背景にあって本発明は、前記門型形状をした、多結晶シリコン析出用シリコン芯線において、接合角部の表面金属濃度を、さらに高度に低減さ

せることを目的とする。

課題を解決するための手段

[0015] 本発明者等は、上記技術課題に鑑み、これを解決すべく鋭意研究を続けてきた。その結果、接合角部の表面金属汚染が、今まで以上に高度に低減されたシリコン芯線を製造することに成功し、本発明を完成するに至った。

[0016] 即ち、本発明は、一对の鉛直棒部とこれら両鉛直棒部の各上端を繋ぐ横架部とで構成されてなる門型形状をした、多結晶シリコンを析出させるためのシリコン芯線において、

前記鉛直棒部と横架部の各端部同士は溶接により接合されてなり、その接合角部の表面金属濃度が1 p p b w以下であることを特徴とする多結晶シリコン析出用シリコン芯線を提供する。

[0017] さらに、本発明は、上記多結晶シリコン析出用シリコン芯線の製造方法として、一对の鉛直棒部用シリコン棒と、横架部用シリコン棒とを門型形状に接合して多結晶シリコン析出用シリコン芯線を製造するに際して、

前記鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の各端部同士の接合を、不活性ガス雰囲気中で、

1) 金属濃度が1 p p m w以下であるカーボン部材からなる予熱ヒーターにより予備加熱した後、

2) 高周波誘導加熱して溶接する方法も提供する。

発明の効果

[0018] 本発明のシリコン芯線は、鉛直棒部と横架部の端部同士が溶接により一体に接合されており、角部の安定性に優れる。そのため、多結晶シリコン析出開始時の初期通電において、高電圧を流してもアークが発生せず、角部周辺が溶断し難い。

[0019] そして、上記接合角部の表面金属濃度が、1 p p b w以下の低さにある。従って、これを芯線とすれば、高純度な多結晶シリコンが得られ、これを原料に製造した単結晶シリコンは高純度なものになり、産業上極めて有用である。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]図1は、本発明の多結晶シリコン析出用シリコン芯線の典型例を示す正面図である。

[図2]図2は、シーメンス法による多結晶シリコンの製造を行う際に使用する、多結晶シリコン製造用反応炉の概略を示す断面図である。

[図3]図3は、多結晶シリコン析出用シリコン芯線の典型例の上部の正面図である。

[図4]図4は、特許文献7の図8aで示される、シリコン芯線溶接装置における、ワークコイル及び予熱用カーボン部材の構造を示す斜視図である。

[図5]図5は、本発明の多結晶シリコン析出用シリコン芯線における、その横架部が、少なくとも2本の横架部用シリコン棒分材が上方向屈曲形状に接合された場合の当該横架部の代表的態様（A；横架部用シリコン棒分材2本、B；横架部用シリコン棒分材3本）を示す正面図である。

発明を実施するための最良の形態

[0021] 本発明のシリコン芯線は、多結晶シリコン析出用のものであり、図1の典型例に示すように、一对の鉛直棒部（12a，12b）とこれら両鉛直棒部の各上端を繋ぐ横架部（13）とで構成された、門型形状をしている。上記鉛直棒部（12a，12b）と横架部（13）の各接合部（14a，14b）において、端部同士が溶接されている。上記シリコン芯線（11）は、単結晶シリコンインゴットから切り出した単結晶シリコン製であっても良いが、高温時にクリープ変形を起こし易い性状にある等の理由から、通常は、シーメンス法等により得られた多結晶シリコンロッドから切り出した多結晶シリコン製であるのが好ましい。多結晶シリコンロッドから切り出した鉛直棒部及び横架部は、表面をフッ硝酸溶液等でエッチングし純水で洗浄した後、乾燥して、使用するまでクリーンルームに保管すれば良い。

[0022] シリコン芯線を構成する、鉛直棒部（12a，12b）及び横架部（13）の形状としては、特に限定されず、例えば、円柱、楕円柱、四角柱、さらには四角以外の多角柱のいずれであってよい。また、シリコン芯線は、断面

積が $0.1 \sim 6 \text{ cm}^2$ であるのが好ましく、 $0.3 \sim 2 \text{ cm}^2$ であるのがより好ましい。前記鉛直棒部（12a, 12b）の長さは、通常 $0.5 \sim 3 \text{ m}$ 、より好ましくは $1 \sim 2.5 \text{ m}$ であり、横架部（13）の長さは通常 $0.15 \sim 0.40 \text{ m}$ 、より好ましくは $0.20 \sim 0.30 \text{ m}$ である。

[0023] 前記シリコン芯線を用いた、シーメンス法による多結晶シリコンの製造は、図2の断面図に示した多結晶シリコン製造用反応炉を用いた、以下の方法により行われる。多結晶シリコン製造用反応炉（21）は、底板〔底盤〕（22）と、底板（22）に対して着脱自在に連結されるベルジャー型のカバー（23）とを有している。底板（22）には、反応炉（21）内へ原料ガスを供給するための原料ガス供給口（26）と、反応器（21）内における反応後のガスである廃ガスを排出するための廃ガス排出口（27）とが嵌入されている。

[0024] 上記原料ガスは、シラン化合物のガスおよび水素を含む混合ガスである。シラン化合物としては、例えば、トリクロロシラン（ SiHCl_3 ）等のクロロシラン化合物、およびモノシラン（ SiH_4 ）等が挙げられる。

[0025] また、底板（22）には、少なくとも一対の金属電極（24）が設けられている。上記金属電極（24）に、前記シリコン芯線（28）が芯線ホルダ（図示省略）を介して接続される。金属電極（24）は、電力供給部（25）と通電可能に接続されている。これによりシリコン芯線（28）が通電加熱され、該シリコン芯線の表面上に、多結晶シリコンが析出し、多結晶シリコンロッド（29）が形成される。

[0026] 本発明の最大の特徴は、前記多結晶シリコン析出用シリコン芯線において、鉛直棒部（12a, 12b）と横架部（13）の端部同士の接合角部（15a, 15b）の表面金属濃度を 1 ppbw 以下の低さとした点にある。表面金属濃度は $0.1 \sim 0.8 \text{ ppbw}$ であるのが、より好ましい。

[0027] 鉛直棒部と横架部の端部同士の溶接では、溶接させる鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の各端部の当接箇所付近が溶融ドロップとなり、これが表面張力で一体化後冷却されて接合部（14a, 14b）が形成される

。シリコン芯線において上記接合角部は、この溶融ドロップが一体化した接合部を含む角部領域である。溶融ドロップとなり、その後冷却し接合された箇所は、該溶融を経たことで、シリコン芯線において、他の切り出し面よりも、平滑性に優れ、且つより金属光沢感があり、容易に見分けることができる。一般には、接合部付近は、単結晶または双晶等の複数の結晶から成る混晶体であり、対して他の表面部分が数～数百ミクロンの結晶粒から成る多結晶体であることから、接合部は結晶性が高められた部分として、他の部分から区別できる。

[0028] 前記したように、鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の端部同士を、高周波誘導加熱により溶接する場合、特許文献7に示される方法でも、溶接部の表面金属濃度が高くなり、得られる接合角部において該表面金属濃度を十分には低くできない。これに対して、本発明では、後述する、高周波誘導加熱によるシリコン芯線溶接装置において、予熱ヒーターのカーボン部材を、低金属濃度のものとすることにより、該接合角部の表面金属濃度の低下を実現したものである。

[0029] なお、シリコン芯線において、接合角部以外の部分の表面金属濃度も、1 p p b w以下であるのが好ましく、0.1～0.8 p p b wであるのがより好ましく、0.1～0.5 p p b wであるのが特に好ましい。

[0030] 本発明において、表面金属濃度の対象である金属元素は、鉄、クロム、ニッケル、ナトリウム、マグネシウム、アルミニウム、カリウム、カルシウム、コバルト、銅、亜鉛、タングステン、チタン、モリブデン、バナジウム、マンガン、ストロンチウム、バリウムの18元素である。このうち、鉄、クロム、ニッケル、及びチタンの各濃度が低いことが好適であり、具体的には、鉄濃度が0.2 p p b w以下、クロム濃度が0.1 p p b w以下、及びニッケル濃度が0.05 p p b w以下、チタン濃度が0.2 p p b w以下である。特に好ましくは、鉄濃度が0.01～0.15 p p b w、クロム濃度が0.01～0.08 p p b w、ニッケル濃度が0.01～0.03 p p b w、及びチタン濃度が0.01～0.15 p p b wである。

- [0031] 本発明において、シリコン芯線の接合角部の表面金属濃度の測定法は、実施例において詳述する。また、後述のように、複数の横架部用シリコン棒分材を接合して得られる横架部の接合角部（分材どうしの接合部）の表面金属濃度も同様の測定法による。
- [0032] 接合角部の表面金属濃度の測定法の概略は、以下のとおりである。接合角部を含む分析用試料体と、分析用試料体と略同重量のブランク試料体（接合角部を含まない）とを、同一のシリコン芯線から切り出す。分析用試料体を観察し、接合角部の溶接部分の重量を見積もる。なお、前述したように、接合部（溶接部分）は、外観が他の部分とは明白に異なるため、判別は容易である。試料の切り出しは、シリコン芯線の所定位置に多結晶シリコン片を用いて切込傷を刻み、その周囲を打撃することで簡易に実行できる。
- [0033] 表面金属濃度の測定は、この分析用試料体およびブランク試料体について、表面から100マイクロメートル分の深さ部分を、フッ酸と硝酸の混合溶液（フッ硝酸溶液）により溶解させ、該溶解液中の金属成分量（重量）を、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）により測定することで行う。即ち、分析用試料体およびブランク試料体金属成分量、重量および測定角部の溶接部の重量から、後述する実施例の方法に従い、接合角部の溶接部の表面金属濃度を求めることができる。すなわち、本発明の接合角部の表面金属濃度とは、接合角部の溶接部における表面金属濃度を言う。
- [0034] 上記表面金属濃度の測定において、前記分析用試料体の表面を100マイクロメートルの深さで、フッ硝酸溶液により溶解させる方法は、予め、制御された形状およびサイズを有する多結晶シリコン小片群を溶解槽内に存在させ、溶解処理前後の該多結晶シリコン小片群の重量変化を測定し、実際の被溶解処理体の溶解処理での溶解深さを制御する方法により行えば良い。多結晶シリコン小片群の重量変化から溶解速度を算出し、これを元に分析用試料体およびブランク試料体の溶解処理時間を調節して、目的の溶解深さとすれば良い。この方法は、WO2018/198947号パンフレットにより公知であり、詳細は、その記載に準じて実施すれば良い。

[0035] 本発明のシリコン芯線は、前記接合角部の低い表面金属濃度が達成される限り、その製造方法は特に制限されない。好適な製造方法を示せば、前記鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の各端部同士の接合を、不活性ガス雰囲気中で、

1) 金属濃度が1 ppm以下であるカーボン部材からなる予熱ヒーターにより予備加熱した後、

2) 高周波誘導加熱して溶接することにより行う方法である。

[0036] この製造方法において、被接合部を、カーボン部材からなる予熱ヒーターにより予備加熱した後、不活性ガス雰囲気中で高周波誘導加熱して溶接する方法は、前記特許文献7に記載された方法に準じて実施すれば良い。この方法では、前記鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の端部同士からなる被接合部を、予熱ヒーター及び高周波誘導加熱のワークコイルと、終始接触させることなく溶接することが可能であり、上記各加熱部材との接触による金属汚染を抑制でき特に好ましい。

[0037] 具体的には、特許文献7の〔実施形態2〕として図8に示される、ワークコイル及び予熱用カーボン部材の構造のシリコン芯線溶接装置を用いるのが好ましい。特許文献7の図8(a)を、本願の図4として転記する。即ち、図4は、特許文献7で図8(a)として示される、シリコン芯線溶接装置における、ワークコイル及び予熱用カーボン部材の構造を示す斜視図もとにした図である。図4に示すように、第1逆U字形状部(44a)、および第2逆U字形状部(44b)を形成して屈曲するワークコイル(43)に対して、コの字形状を形成した予熱ヒーター(41)を、前記第1逆U字形状部(44a)が成す面、および第2逆U字形状部(44b)が成す面と平行になるようにワークコイル(43)の内側に、コの字形状の開口部を進行方向に向けて挿入できる。その際、シリコン製部材(P1, P2〔鉛直棒部用シリコン棒, 横架部用シリコン棒〕)の被接合部(45)は、予熱ヒーター(41)のコの字の中に納まり、予熱ヒーター(41)は被接合部(45)を挟む。つまり、ワークコイル(43)はシリコン芯線(P1・P2)を挿入す

る部分と、予熱ヒーター（４１）を挿入する部分が開放されており、シリコン芯線（Ｐ１・Ｐ２）の被接合部（４５）は、予熱ヒーター（４１）及びワークコイル（４３）とが接触することなく出し入れできる。この結果、予熱ヒーター（４１）を用いる場合であっても、直溶接だけでなく、直角溶接等の高角度での屈曲溶接が可能である。

[0038] 本発明のシリコン芯線を得るためには、上記製造方法において、予備ヒーターを構成するカーボン部材を、金属濃度が１ppmw以下のものにすることが重要である。カーボン部材において、より好ましい金属含有量は、０．１～０．４ppmw、特に好ましくは０．１～０．３ppmwである。この構成により、得られるシリコン芯線は、前記予熱ヒーターと単に接触しないだけでなく、予熱時の高温環境下においても金属不純物の揮発が抑制されて、前記規定した低い表面金属濃度が達成できる。

[0039] 前記特許文献７に示されるシリコン芯線溶接装置を用いた被接合部（４５）の溶接では、予備加熱において、予熱ヒーター（４１）は、その外側のワークコイル（４３）からの高周波誘導加熱により、少なくとも１５００℃の高温に灼熱化されるため、この際に予熱ヒーター（４１）を形成するカーボン部材中に金属元素が含有されていると、これが揮発して金属蒸気として放散される。被接合部（４５）は、予熱ヒーター（４１）に近接して存在するため、この金属蒸気との接触が、従来のシリコン芯線において、接合角部の表面が金属汚染されている原因であった。本発明は、この事実を突き止め、予熱ヒーターを形成するカーボン部材を前記低金属含有量のものとするすることで、この汚染を高度に防止したものである。

[0040] カーボン部材中に含有される対象の金属元素も、鉄、クロム、ニッケル、ナトリウム、マグネシウム、アルミニウム、カリウム、カルシウム、コバルト、銅、亜鉛、タングステン、チタン、モリブデン、バナジウム、マンガン、ストロンチウム、バリウムの１８元素である。このうち、鉄、クロム、ニッケル、及びチタンの各濃度が低いことが好適であり、具体的には、鉄濃度が５０ppbw以下、クロム濃度が５ppbw以下、及びニッケル濃度が５

0 p p b w以下、及びチタン濃度が3 0 p p b w以下であるのが好ましい。
特に好ましくは、鉄濃度が1～4 0 p p b w、クロム濃度が1～4 p p b w、
ニッケル濃度が1～4 5 p p b w、及びチタン濃度が1～2 0 p p b wで
ある。

[0041] 本発明において、カーボン部材中の金属含有量は、燃焼灰化方法で求めた
値をいう。即ち、燃焼灰化方法は、カーボン試料を白金ボードに取り、酸素
雰囲気下で加熱して燃焼させて灰化し、残渣を硝酸に溶解して、I C P－M
Sで元素を定量する測定方法である。

[0042] ヒーター用途等に用いられるカーボン部材の金属含有量は、一般には1 0
～2 0 p p m w程度であり、本発明が規定するほどに金属含有量が低いもの
を、上記シリコン芯線の溶接用に使用した例は知られてない。こうした金属
含有量が低いカーボン部材は、市販品の中から斯様な高純度品を選定して使
用しても良いし、本発明が規定する値を超えるものに対して、高温塩素化処
理して、該金属含有量を本発明の規定する範囲内まで低減させて使用しても
良い。

[0043] なお、予熱ヒーターを構成するカーボン部材の厚みは、被接合体とワーク
コイルとの間隙に挿入のし易さと、機械的強度を勘案して、1. 0～1. 5
m mであるのが好ましい。

[0044] また、高周波誘導加熱のワークコイルは、外径が1～3 m m φであるのが
好ましい。ワークコイルは、冷却する理由から、管状とし、管内を水流で冷
却できる構造とするのが好ましい。

[0045] 上記製造方法では、前記被接合部の接合は、1) 予備加熱も、2) 高周波
誘導加熱も、不活性ガス雰囲気中で実施する。不活性ガスとしては、アルゴ
ン、ヘリウム等が使用できる。これら不活性ガスは、シリコン芯線溶接装置
にシリコン芯線の被接合部を設置し、予備加熱を実施するに先だって、装置
内の雰囲気を、不活性ガスに置換することで導入すれば良い。高周波誘導加
熱が終了するまで、装置内には、不活性ガスを、一方の壁からに所定の流量
で注入し、反対方向の壁から排出する流通方式とするのも好適な態様である

。

- [0046] また、1) 予備加熱に関し、予熱ヒーターは、被接合部に対して、近接した位置に存在するのが、加熱効率を向上させる観点から好ましいが、余りに近すぎると、シリコン製の被接合部が加熱されて膨張したときに接触の虞も生じるため、通常、0.5 mm～1.5 mm、より好ましくは0.7 mm～1.2 mmの間隔とするのが好ましい。
- [0047] 同様の理由から、2) 高周波誘導加熱のワークコイルも、被接合部に対して、近接した位置に存在するのが好ましく、通常、0.5 mm～1.5 mm、より好ましくは0.7 mm～1.2 mmの間隔とするのが好ましい。
- [0048] 前記1) 予備加熱では、前記したとおり予熱ヒーターを、その外側のワークコイルから高周波誘導加熱する等して、少なくとも1500℃、より好適には1500～2000℃の高温に加熱して、被接合部を100℃以上の温度、より好適には200～300℃の温度まで加熱する。被接合部を100℃以上に加熱することで比抵抗が低下し、渦電流が生じる状態となり、被接合部の高周波誘導加熱が可能になる。加熱時間は、通常、2～5分から採択される。
- [0049] 続く、2) 高周波誘導加熱では、前記特許文献7に示されるシリコン芯線溶接装置を用いた被接合部の溶接であれば、予熱ヒーターを被接合部から遠ざけることで、ワークコイルからの高周波を、被接合部に集中させ、被接合部の表面付近に高密度の渦電流を発生させ、そのジュール熱で被加熱物の表面を自己発熱させ、鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の端部同士を溶接させる。加熱時間は、通常、10～40秒から採択される。
- [0050] 高周波誘導加熱は、前記1) 予備加熱で予熱ヒーターを加熱する場合も含めて、狭い空間内で作用させるため、その周波数は高いほど好ましい。具体的には、1 MHz以上が好ましく、1.5～3 MHzがより好ましく、2～2.5 MHzが特に好ましい。最大出力は、1 KW以上が好ましく、3～10 KWがより好ましく、特に好ましくは4～6 KWである。
- [0051] 鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の各端部同士の接合は、両端

部の所望の箇所を如何様に当接させて溶接させても良い。鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒とをより強固に溶接できるため、前記図 1 に示されたシリコン芯線の態様の如くに、鉛直棒部（12a, 12b）用シリコン棒の上端部の内側面に、横架部（13）用シリコン棒の側端面を当接させる態様か、またはその反対の関係、即ち、鉛直棒部用シリコン棒の上端面に、横架部用シリコン棒の側端部の下方側面を当接させる態様で溶接するのが特に好ましい。

[0052] 以上の構成にある、本発明の多結晶シリコン析出用シリコン芯線は、横架部を、少なくとも 2 本の横架部用シリコン棒分材が上方向屈曲形状に接合された構造とするのが、好適な態様である。即ち、一对の鉛直棒部の各上端に、直棒状の横架部が水平に連結する構造、換言すれば、鉛直棒部の端部と横架部の端部とが直角に屈曲して接合した構造の場合、これを芯線として用いた多結晶シリコンの析出では、係る接合角部の内側表面において熱輻射が大きくなり、この部分近辺で過熱が生じ、析出が不安定になり、所謂、ポップコーンと呼ばれる異常析出部が発生し易くなる。この改善には、前記横架部を上方向への屈曲形状として、該鉛直棒部の端部と横架部の端部との接合角部の角度を、直角よりも緩やかな曲がりにし、接合角部の内側表面における熱輻射を緩和するのが有効である。

[0053] このため、従来のシリコン芯線においては、係る横架部を、前記高温加熱による軟化状態での上方向へ湾曲加工させたものを使用することも行われている。しかし、前記したように斯様な高温での湾曲加工は操作が簡単ではない。従って、この横架部を、少なくとも 2 本の横架部用シリコン棒分材が上方向屈曲形状に溶接により接合された態様とし、これにより鉛直棒部と横架部の端部同士の各接合角部の角度をいずれも前記直角より大きく形成し、上述のポップコーンの発生抑制効果を発揮させるのが好適である。斯様に鉛直棒部と横架部の端部同士の各接合角部の角度がいずれも直角より大きく形成されている場合、横架部途中の少なくとも 1 箇所に存在する接合角部の角度は、いずれも 90 度以上 170 度以下であるのが好ましい。

[0054] 上記構造を具体的に詳述すれば、図5のシリコン芯線上部(51)の正面図Aに示すとおり、横架部(53)は2本の横架部用シリコン棒分材(53a, 53b)とが接合角部(55a, 55b)において溶接され、上方向屈曲形状で接合されている。これにより鉛直棒部(52a, 52b)と横架部(53)の端部同士の各接合角部(54a, 54b)は直角より大きい角度で接合されたものになっている。図5の正面図Bでは、横架部(53)は3本の横架部用シリコン棒分材(53a, 53b, 53c)が、上方向屈曲形状で接合され、これにより鉛直棒部(52a, 52b)と横架部(53)の端部同士の各接合角部(54a, 54b)は直角より大きい角度で接合されたものになっている。

[0055] ここで、上記鉛直棒部(52a, 52b)と横架部(53)とによる接合角部(54a, 54b)の角度 α は、直角より大きい角度であり、角度 α が大きいほど、この部分で熱輻射による異常析出を抑えることができ好ましい。しかし、角度 α が大きくなりすぎると、横架部用シリコン棒分材(53a, 53b, 53c)が接合されて形成される、横架部途中の接合角部(55a, 55b)の角度 β が小さくなり、この横架部途中接合角部でやはり熱輻射による異常析出が生じる虞がある。従って、この鉛直棒部(52a, 52b)と横架部(53)とによる接合角部(54a, 54b)の角度は、130度以上で170度以下であれば、すべての接合角部(鉛直棒部と横架部との接合角部、及び横架部途中の接合角部)を上記好適角度に調整でき、ポップコーンの発生抑制効果を高度に発揮できる。以下、鉛直棒部と横架部との接合角部を「鉛直棒部・横架部接合角部」と記載し、横架部途中の接合角部を「横架部途中接合角部」と記載することがある。

[0056] 横架部途中の接合角部の角度は、正面図Aの横架部用シリコン棒分材が2本(53a, 53b)の態様であれば、該接合角部(56a)が1箇所であり、鉛直棒部(52a, 52b)と横架部(53)の端部同士の各接合角部(55a, 55b)において、それぞれの直角を超えた分の合計角度を、180度から減じた値になる。横架部用シリコン棒分材が3本以上の態様では

、該接合角部（56a, 56b）が2箇所以上となる。各接合部の角部は実測してもよく、写真を撮影し、画像から求めてもよい。

[0057] 本発明において最も好ましい横架部の態様は、横架部が、3～6本の横架部用シリコン棒分材を接合して形成されており、鉛直棒部と横架部の端部同士の各接合角部 α 、及び横架部途中の各接合角部のそれぞれの角度 β がいずれも130度以上170度以下の範囲にある態様である。

[0058] さらに本発明では、係る横架部途中の各接合角部の表面金属濃度も、それぞれ1ppbw以下、より好ましくは0.1～0.8ppbwとするのが、高純度な多結晶シリコンを製造する観点から特に好適である。

[0059] この低い表面金属濃度とするための、各横架部用シリコン棒分材の端部同士の接合も、前記前記鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒での接合の場合と同様に、当該被接合部を、不活性ガス雰囲気中で、

1) 金属濃度が1ppmw以下であるカーボン部材からなる予熱ヒーターにより予備加熱した後、

2) 高周波誘導加熱して溶接する方法より実施すれば良好に達成しうる。

実施例

[0060] 本発明を更に具体的に説明するため、以下に実施例を示すが、本発明はかかる実施例に限定されるものではない。なお、実施例及び比較例において、各物性値はそれぞれ以下の方法により求めた。

[0061] 1) シリコン芯線における、接合角部の表面金属濃度

シリコン芯線の、測定対象とする接合角部から分析用試料体を、図3に示す方法に従って採取した。即ち、接合角部（32）内において、角頂部（33）から、鉛直棒部の外端側辺を、横架部（34）の軸方向に対する垂直方向長さXの約1.2倍分の長さ（1.2X）だけ下がった位置（A1）での軸方向に対する垂直断面（分析用試料体の鉛直棒部側断面；35）と、前記角頂部（33）から、横架部の外端側辺を、鉛直棒部（36）軸方向に対する垂直方向長さYの約1.2倍分の長さ（1.2Y）だけ、他方の接合角部側へ横移動した位置（A2）での軸方向に対する垂直断面（分析用試料体の

横架部側断面；37）とで形成される分析用試料体（38）を切り出した。この切り出しは、シリコン芯線の前記A1及びA2の各位置に、多結晶シリコン片を用いて切込傷（39）を刻み、その周囲を打撃することで実施した。測定対象とする接合角部から分析用試料体における接合部の幅をノギスで測定し記録する。また、溶接する前の接合部の断面積を記録しておく。更に、シリコン芯線の接合部を有しない部分を、分析用試料体とほぼ同じ重量の長さだけ切出し、ブランク用試料体を切り出した。各試料体の重量を測定する。

[0062] 次いで、この分析用試料体とブランク試料体を、フッ硝酸溶液槽（室温）に浸漬して、その表面を100マイクロメートルの深さで溶解させた。この溶解深さは、WO2018/198947号パンフレットに記載の方法に準じて、必要な溶解処理時間を求め実施した。得られたそれぞれの溶解液について、金属成分量（重量）を、ICP-MSにより測定することで行い、得られた各金属成分量を各試料体の重量で除することにより、分析試料体の表面金属濃度 C_a （ppbw）とブランク試料体の表面金属濃度 C_b （ppbw）を求める。分析試料体中の溶接部の重量 W_a は、溶接部の幅 d と溶接面の断面積 S とシリコンの比重2.33から求め、分析試料体中の非溶接部の重量 W_b は、分析試料体の重量 W に対して、 $W_b = W - W_a$ の関係にあることから、 W_b を求める。溶接部の表面金属成分濃度 N と分析試料体の表面金属濃度 C_a とブランク試料の表面金属成分濃度 C_b と W_a と W_b とは、

$$N = C_a \times W / W_a - C_b \times W_b / W_a$$
 の関係にあることから、接合角部の溶接部の表面金属濃度 N （ppbw）を求めた。

[0063] 簡単な計算例を以下に示す。分析試料体の重量 W は1.0g、溶接部重量 W_a は0.1gであり、分析試料体の非溶接部の重量 W_b が0.9gであり、分析試料体表面金属濃度 C_a が1ppbw、ブランク試料体の表面金属濃度 C_b が0.1ppbwの場合、以下の計算から接合角部の溶接部の表面金属濃度 N が求められる。

（計算例）

重量： 分析試料体 $W = 1.0 \text{ g}$ 、溶接部 $W_a = 0.1 \text{ g}$ 、非溶接部 $W_b = 0.9 \text{ g}$

ICP-MS測定値： 分析試料体 $C_a = 1 \text{ ppbw}$ 、ブランク試料体 $C_b = 0.1 \text{ ppbw}$

溶接部の表面金属濃度 $N = 1 \text{ ppbw} \times (1 \text{ g} / 0.1 \text{ g}) - 0.1 \text{ ppbw} \times (0.9 \text{ g} / 0.1 \text{ g}) = 10 - 0.9 = 9.1 \text{ ppbw}$

[0064] 2) カーボン部材中の金属含有量

カーボン部材から採取した試料片約 1 g を、白金ボードに取り、酸素雰囲気下で加熱して燃焼させて灰化し、残渣を硝酸 5 mL に溶解して、ICP-MSで、鉄、クロム、ニッケル、ナトリウム、マグネシウム、アルミニウム、カリウム、カルシウム、コバルト、銅、亜鉛、タングステン、チタン、モリブデン、バナジウム、マンガン、ストロンチウム、バリウムの18元素の金属元素重量を求め、試料片の重量を除いてカーボン部材中の金属含有量を得た。

[0065] 3) 多結晶シリコンロッドを製造した際の、ポップコーンを含まない多結晶シリコンの収率

図2の断面図に示した多結晶シリコン製造用反応炉に対して、底板に、多結晶シリコン析出用シリコン芯線を8個立設させ、初期通電後、ベルジャー内に、トリクロロシランおよび水素を含む混合ガスからなる原料ガスを供給し、シーメンズ法による、前記各シリコン芯線への多結晶シリコンの析出反応を継続した。直径を 150 mm の太さまで成長させた後、得られた各多結晶シリコンロッドを取り出し、それぞれについて表面観察し、ポップコーンを含む部分とポップコーンを含まない部分とに区分けして、ポップコーンを含む部分から表面のポップコーンを除去した多結晶シリコンの重量にポップコーンを含まない部分の重量を加えたものを析出反応で得られた全多結晶シリコンの重量で割ったものを、ポップコーンを含まない多結晶シリコンの収率として評価した。

[0066] 実施例 1

シーメンス法により得られた高純度な多結晶シリコンロッドから切り出すことにより、断面が8 mm角の正方形からなる、長さ 1 5 0 0 mmの鉛直棒部用シリコン棒の2本と、長さ2 5 0 mmの横架部用シリコン棒の1本を用意した。これら鉛直棒部用シリコン棒及び横架部用シリコン棒を、クリーンルーム内に設置された表面洗浄装置で、フッ硝酸溶液によりエッチング処理したのち、純水で洗浄し、乾燥した後、同じクリーンルーム内に保管した。

[0067] 高周波誘導加熱によるシリコン芯線溶接装置として、特許文献7の〔実施態様2〕の態様にある、ワークコイル及び予熱用カーボン部が、図4に示される構造にあるものを用いた。ここで、上記予熱ヒーターを構成するカーボン部材は、金属濃度が2 1 5 p p b wで、このうち、鉄が3 4 p p b wで、クロムが3 p p b wで、ニッケルが4 2 p p b wで、チタンが1 7 p p b wであった。

[0068] このシリコン芯線溶接装置により、前記一对の鉛直棒部用シリコン棒と、横架部用シリコン棒とを門型形状に接合して、多結晶シリコン析出用シリコン芯線を製造した。高周波誘導加熱の周波数は、2 M H zで、最大出力が5 k Wであった。ワークコイルは外径約2 m m ϕ の管状であり、管内には冷却用の水が流れる構造であった。また、第1逆U字形状部(4 4 a)、第2逆U字形状部(4 4 b)、及び対抗するこれら両逆U字形状部(4 4 a, 4 4 b)の間隔は、いずれも1 0 m mであった。さらに、予熱ヒーター(4 1)を構成するカーボン部材の厚みは1. 0 m mであった。なお、これらワークコイル(4 3)及び予熱ヒーター(4 1)が収容される、溶接チャンバーはS U S製立方体構造で、天上壁が開閉可能な構造であった。

[0069] このシリコン芯線溶接装置において、ワークコイル(4 3)の、第1逆U字形状部(4 4 a)が成す面、および第2逆U字形状部(4 4 b)が成す面と平行になるように、該ワークコイル(4 3)の内側に、予熱ヒーター(4 1)のコの字形状の開口部を進行方向に向けて挿入した。

[0070] 次に、一对の内の一本の鉛直棒部用シリコン棒の一端と、横架部用シリコ

ン棒の一端を、図3に示した形態に、直角に当接させ、被接合部とした。前記予熱ヒーター（41）の前処理を施した後の溶接チャンバー内に、上記当接された鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒を収容し、その被接合部（45）を、ワークコイル（43）における上方の開放空間より挿入し、前記予熱ヒーターのコの字形状の中に設置した。この被接合部（45）の設置操作において、該被接合部（45）は、予熱ヒーター（41）及びワークコイル（43）と全く接触することはなかった。

[0071] 上記被接合部（45）の設置の後、溶接チャンバーを密閉し、チャンバー内にアルゴンを充填した後、一方の壁から、20L／分の流量で反対の壁へ流通させた。そして、1）予熱ヒーターによる予備加熱を開始した。高周波誘導加熱の周波数は2MHzであり、最大出力は5KWであった。係る高周波誘導加熱により、ワークコイル（33）の内側において、予熱用ヒーターが灼熱（おおよそ1500～2000℃）した。約3分後、シリコン棒からなる被接合部（45）に高周波が作用するようになり、高周波の電圧降下が生じたため、これを予備加熱の終期として、予熱ヒーター（41）を、ワークコイル（43）の内側から退避させた。

[0072] 斯様に予熱ヒーター（41）を、ワークコイル（43）の内側から退避させることにより、ワークコイル（43）からの高周波は、被接合部（45）に集中するものになり、該被接合部（45）の2）高周波誘導加熱が開始された。被接合部（45）にシリコンの熔融液が目視で確認されたことで、これを2）高周波誘導加熱の終期として、高周波の出力をゼロまで下げ、被接合部（45）を冷却した。10分経過後、溶接チャンバーを開口し、ワークコイル（43）内の上記被接合部（45）を、該ワークコイルにおける上方の開放空間より退避させ、これにより溶接された鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の接合体を、溶接チャンバー外に取り出した。

[0073] この接合体について、横架部用シリコン棒の、鉛直棒部用シリコン棒と接合されていない他端と、前記一对の鉛直棒部用シリコン棒の残りの一本の端部との接合を、同様の高周波誘導加熱による溶接操作により実施した。得ら

れた多結晶シリコン析出用シリコン芯線について、鉛直棒部の端部と横架部の端部との接合角部（鉛直棒部・横架部接合角部；15a, 15b）の表面金属濃度を測定したところ、表1に示すように、極めて低い値であった。この結果、両接合角部において、表面金属汚染が高度に抑制された多結晶シリコン析出用シリコン芯線を製造することができた。

[0074]

[表1]

鉛直棒部・横架部接合角部	接合角部の各表面金属濃度(ppbw)																	表面金属 総濃度 (ppbw)	
	Na	Mg	Al	K	Ca	Cr	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	W	Ti	Mo	V	Mn	Sr		Ba
15a	0.02	0.02	0.05	0.03	0.01	0.02	0.08	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.11	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.49
15b	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.04	0.06	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.08	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.46

[0075] この多結晶シリコン析出用シリコン芯線を用いて、シーメンス法により、多結晶シリコンロッドを製造した際の、該多結晶シリコンロッドにおける、

ポップコーンを含まない多結晶シリコンの収率を求めたところ、81%であった。

[0076] 比較例 1 ～ 4

実施例 1 において、使用するシリコン芯線溶接装置において、予熱ヒーターを構成するカーボン部材の金属濃度を表 2 に示す各値のものに変える以外は同様に実施して、多結晶シリコン析出用シリコン芯線を製造した。これを製造する過程で得られた、鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の接合体について、測定された、接合角部の表面金属濃度を表 2 に併せて示した。

[0077]

[表2]

	カーボン中の各金属濃度 (ppmw)				カーボン中の 総金属濃度 (ppmw)	鉛直棒部・横架部接合角部	溶接部の各表面金属濃度 (ppbw)				表面金属総濃度 (ppbw)
	Fe	Cr	Ni	Ti			Cr	Fe	Ni	Ti	
比較例1	2.6	0.5	0.8	0.8	6.7	15a	0.08	2.65	0.88	0.18	4.6
						15b	0.07	2.74	0.92	0.22	4.9
比較例2	1.2	3.4	8.6	0.06	16.3	15a	1.66	1.85	1.37	0.47	6.6
						15b	2.10	1.62	1.15	0.39	6.5
比較例3	1.1	0.5	2.3	0.5	5.5	15a	0.77	1.44	0.08	0.18	3.8
						15b	0.67	1.52	0.10	0.33	3.9
比較例4	0.5	0.5	1.3	6.6	10.9	15a	0.08	0.18	1.11	2.41	4.7
						15b	0.07	0.12	1.43	3.33	5.8

[0078] 実施例2～6

実施例1において、横架部用シリコン棒として、複数の横架部用シリコン

棒分材が上方向屈曲形状に溶接により接合した形態のものを用いて、多結晶シリコン析出用シリコン芯線を製造した。横架部用シリコン棒分材の数は表3に示した数であり、得られる横架部において、軸方向途中の接合角部の角度（横架部途中接合角度；56a, 56b, 56c, 56d, 56e）はそれぞれの角部で均等に同一角度で割り振られた、表3に示した値とした。また、該横架部の各端部を鉛直棒部用シリコン棒の各端部と接合させる際の各接合角部（鉛直棒部・横架部接合角部；55a, 55b）も、それぞれ表3に示した値とした。

なお、各横架部用シリコン棒分材の端部同士の接合操作は、実施例1における、鉛直棒部用シリコン棒と横架部用シリコン棒の各端部の溶接と同様に実施し、その他のシリコン芯線を製造するための操作も実施例1と同じにした。

[0079] 得られた各多結晶シリコン析出用シリコン芯線について、鉛直棒部・横架部接合角部、及び横架部途中接合角度の各表面金属濃度を表3として示した。

[0080] さらに、これら各多結晶シリコン析出用シリコン芯線を用いて、シーメンズ法により、多結晶シリコンロッドを製造した際の、該多結晶シリコンロッドにおける、ポップコーンを含まない多結晶シリコンの収率を求めた結果を、表3にそれぞれ併せて示した。

[0081]

[表3]

	実施例	機架部用シリコン棒分材 の数	機架部途中接合角部の 各角度	鉛直棒部・機架部接合角部 の各角度	接合部	溶接部の各表面金属濃度 (ppbw)					表面金属総濃度 (ppbw)	収率 (%)
						Cr	Fe	Ni	Ti			
実施例 2	2	2	100度	130度	鉛直棒部・機架部接合角部 55a	0.07	0.08	0.02	0.07	0.47	91	
					鉛直棒部・機架部接合角部 55b	0.08	0.12	0.02	0.14	0.66		
					機架部途中接合角部 56a	0.07	0.09	0.02	0.09	0.51		
実施例 3	3	135度	135度	鉛直棒部・機架部接合角部 55a	0.06	0.08	0.01	0.05	0.45	94		
				鉛直棒部・機架部接合角部 55b	0.06	0.11	0.01	0.09	0.66			
				機架部途中接合角部 56a	0.07	0.14	0.01	0.06	0.69			
				機架部途中接合角部 56b	0.06	0.13	0.02	0.08	0.73			
実施例 4	4	150度	165度	鉛直棒部・機架部接合角部 55a	0.07	0.1	0.01	0.11	0.71	97		
				鉛直棒部・機架部接合角部 55b	0.06	0.10	0.01	0.13	0.81			
				機架部途中接合角部 56a	0.07	0.09	0.01	0.11	0.65			
				機架部途中接合角部 56b	0.05	0.07	0.02	0.09	0.47			
				機架部途中接合角部 56c	0.06	0.11	0.01	0.12	0.41			
				機架部途中接合角部 56d	0.07	0.12	0.02	0.01	0.56			
				機架部途中接合角部 56e	0.08	0.08	0.03	0.08	0.67			
実施例 5	2	60度	150度	鉛直棒部・機架部接合角部 55a	0.06	0.13	0.02	0.08	0.51	81		
				鉛直棒部・機架部接合角部 55b	0.07	0.09	0.01	0.09	0.43			
実施例 6	3	100度	170度	機架部途中接合角部 56a	0.07	0.08	0.03	0.10	0.61	82		
				鉛直棒部・機架部接合角部 55a	0.08	0.09	0.01	0.11	0.78			
				鉛直棒部・機架部接合角部 55b	0.06	0.11	0.01	0.12	0.82			
				機架部途中接合角部 56a	0.06	0.13	0.01	0.08	0.81			
				機架部途中接合角部 56b	0.08	0.08	0.02	0.11	0.8			

符号の説明

[0082] 1 1 ; シリコン芯線

1 2 a, 1 2 b ; 鉛直棒部
1 3 ; 横架部
1 4 a, 1 4 b ; 接合部 (溶接部分)
1 5 a, 1 5 b ; 鉛直棒部・横架部接合角部
2 1 ; 多結晶シリコン製造用反応炉
2 2 ; 底板〔底盤〕
2 3 ; ベルジャー型のカバー
2 4 ; 金属電極
2 5 ; 電力供給部
2 6 ; 原料ガス供給口
2 7 ; 廃ガス排出口
2 8 ; 多結晶シリコンロッド
3 1 ; シリコン芯線上部
3 2 ; 接合角部
3 3 ; 角頂部
3 4 ; 横架部
3 5 ; 分析用試料体の鉛直棒部側断面
3 6 ; 鉛直棒部
3 7 ; 分析用試料体の横架部側断面
3 8 ; 分析用試料体
4 1 ; 予熱ヒーター
4 3 ; ワークコイル
4 4 a ; 第1逆U字形状部
4 4 b ; 第2逆U字形状部
4 5 ; 被接合部
P 1, P 2 ; シリコン芯線
5 1 ; シリコン芯線上部
5 2 a, 5 2 b ; 鉛直棒部

5 3 ; 横架部

5 3 a, 5 3 b, 5 3 c ; 横架部用シリコン棒分材

5 4 ; 接合部

5 5 a, 5 5 b ; 鉛直棒部・横架部接合角部

5 6 a, 5 6 b, 5 6 c, 5 6 d, 5 6 e ; 横架部途中接合角部

α ; 鉛直棒部・横架部接合角部の角度

β ; 横架部途中接合角部の角度