

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2012 年 2 月 16 日(16.02.2012)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2012/020462 A1

- (51) 国際特許分類:
C01B 33/02 (2006.01) *C30B 29/06* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/006742
- (22) 国際出願日: 2010 年 11 月 17 日(17.11.2010)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2010-179964 2010 年 8 月 11 日(11.08.2010) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社 S U M C O (SUMCO CORPORATION) [JP/JP]; 〒1058634 東京都港区芝浦一丁目 2 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 海老 大輔 (EBI, Daisuke) [JP/JP]; 〒1058634 東京都港区芝浦一丁目 2 番 1 号株式会社 S U M C O 内 Tokyo (JP). 吉原 光夫 (YOSHIHARA, Mitsuo) [JP/JP]; 〒1058634 東京都港区芝浦一丁目 2 番 1 号株式会社 S U M C O 内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 森 道雄, 外 (MORI, Michio et al.); 〒6600892 兵庫県尼崎市東難波町五丁目 1 7 番 2 3 号森道雄特許事務所 Hyogo (JP).

- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

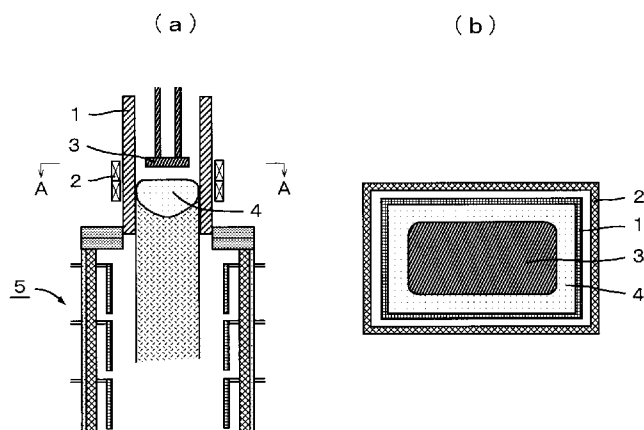
添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: ELECTROMAGNETIC CASTING APPARATUS FOR SILICON

(54) 発明の名称: シリコンの電磁铸造装置

[図1]



(57) Abstract: An electromagnetic casting apparatus for silicon, the apparatus affords stable production of polycrystalline silicon for use in substrate material for solar cells, has a bottomless cooling mold (1) and an induction coil (2) for heating. The apparatus lowers and solidifies silicon that has been melted by the induction coil by electromagnetic induction heating. The apparatus also has a plasma torch that produces a plasma transferred arc and a top heater (3) that uses the induction coil to heat by electromagnetic induction and is configured so that it can be made to face the surface of the molten silicon (4). Used in tandem with plasma heating, the present invention affords stable production, without causing cracking in the final solidification position, when producing high-quality polycrystalline silicon ingots for use as a solar cell substrate material.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2012/020462 A1



太陽電池の基板材として用いられる多結晶シリコンを安定して製造できる装置であり、無底冷却モールド（１）と、加熱用誘導コイル（２）を有し、前記誘導コイルによる電磁誘導加熱により溶融したシリコンを下方に引き下げ凝固させるシリコンの電磁鑄造装置であって、さらに、移行式プラズマアークを発生させるプラズマトーチを有し、かつ、溶融シリコン（４）表面に対向可能に構成された、前記誘導コイルによる電磁誘導によって発熱するトップヒーター（３）を備える電磁鑄造装置である。プラズマ加熱を併用して、太陽電池の基板材としての高品質の多結晶シリコンインゴットを製造するに際し、最終凝固位置においてクラックを生じさせずに安定して製造することができる。

明 細 書

発明の名称：シリコンの電磁鑄造装置

技術分野

[0001] 本発明は、電磁誘導による連続鑄造技術を適用してシリコンインゴットを製造するシリコンの電磁鑄造装置に関し、特に、プラズマアークによるプラズマ加熱を併用して、太陽電池の基板材として用いられる多結晶シリコンを安定して製造することができるシリコンの電磁鑄造装置に関する。

背景技術

[0002] 周方向に分割された無底の冷却モールドが取り付けられた電磁誘導による連続鑄造装置（以下、「電磁鑄造装置」という）を使用すれば、溶解された物質（ここでは、溶融シリコン）とモールドとはほとんど接触しないので、不純物汚染のない鑄塊（シリコンインゴット）を製造することができる。モールドからの汚染がないので、モールドの材質として高純度材料を使用する必要がないという利点もあり、また、連続して鑄造することができるので、製造コストの大幅な低下が可能である。したがって、電磁鑄造装置は、従来から太陽電池の基板材として用いられる多結晶シリコンの製造に適用されてきた。

[0003] 図6は、多結晶シリコンの製造に好適な電磁鑄造装置の構成例を模式的に示す図である。同図に示すように、加熱用誘導コイル2の内側に、内部を水冷できる縦方向に長い銅製の板状片が、誘導コイル2の巻き軸方向と平行に、かつ誘導コイル2内では相互に絶縁された状態で配列されており、この板状片によって囲まれた空間がモールド（すなわち、側壁部が水冷されている無底の冷却モールド）1を構成する。冷却モールド1には、通常、板状片を銅片とした水冷銅モールドが用いられる。

[0004] 加熱用誘導コイル2の下端位置（すなわち、冷却モールド1の底部に相当する位置）には下方に移動できる支持台7が設置されている。また、加熱用誘導コイル2の下側には、凝固した鑄塊（シリコンインゴット）8を加熱し

て、急激な冷却を防ぐための保温装置 5 が設置されており、保温装置 5 の下側には、均熱筒 9 が取り付けられている。シリコンインゴット 8 は引抜き装置（図示せず）により下方に引き抜かれる。

[0005] 冷却モールド 1 の上方には、溶解中に原料をモールド 1 内に投入できる原料投入機 10 が設置されている。さらに、この例では、モールド 1 の上方に、必要に応じて原料シリコンを加熱するための発熱体 11 が取り付けられている。発熱体 11 としてプラズマトーチを配置し、必要に応じてプラズマアークによる加熱を行うのが望ましい。

[0006] これらの諸装置は、熔融シリコン 4 および高温のシリコンインゴット 8 が大気と直接触れることがないように、密閉容器 6 内に設置され、通常は、容器 6 内を不活性ガスで置換して、若干の加圧状態で連続鋳造が行えるように構成されている。

[0007] 多結晶シリコンの製造に際しては、モールド 1 にシリコン原料を充填し、加熱用誘導コイル 2 に高周波誘導電流を通じると、原料は発熱し、溶解する。モールド 1 内の熔融シリコン 4 は、誘導電流により板状片と反発し、モールド 1 の側壁とは接触しない。熔融シリコン 4 が十分均一化した後、支持台 7 を少しずつ下方に移動させていけば、誘導コイル 2 から離れることにより冷却が始まり、モールド 1 内の熔融シリコン 4 に向けての一方向性凝固が進行してモールド断面と同じ形状の断面を有するシリコンインゴット 8 が形成される。

[0008] 支持台 7 の下方への移動分に対応して熔融シリコン 4 の量が減少するので、その分の原料シリコンを原料投入機 10 から供給し、熔融シリコン 4 の上面が常に同じ高さレベルを保つようにして、加熱溶解、引き抜き、原料供給を継続していくことにより、多結晶シリコンインゴット 8 を連続して製造することができる。

[0009] この電磁鋳造装置を用いて製造される多結晶シリコンの品質、特に太陽電池の基板として用いたときの変換効率（入射した光のエネルギーに対し、電気エネルギーに変換して取り出すことができるエネルギーの割合）を高める

ために、従来から多くの技術開発がなされている。

[0010] 例えば、特許文献 1 には、誘導コイルに供給される交流電流の周波数を 25 ～ 35 kHz とする多結晶シリコンの鑄造方法が開示されている。同文献に記載の鑄造方法によれば、交流電流の周波数を上昇させることにより、熔融シリコンに表皮効果を生じさせて表面の電流密度を高め、それに伴いインゴットの表面温度を高温に維持して表面からの冷却による凝固開始を遅らせ、インゴット表面におけるチル層（結晶粒径が小さく、結晶欠陥が多いため、半導体特性が良くない）の成長を抑制することができる。さらに、コイル電流を低くできるので、熔融シリコンに作用する電磁攪拌力を低減させて熔融シリコンの攪拌を抑制でき、その結果、粒径の大きな結晶の成長を促進させて、太陽電池としての変換効率を高めることができるとしている。

[0011] 特許文献 2 には、誘導コイルによる電磁誘導加熱と移行式プラズマアークによるプラズマ加熱を併用して太陽電池としての品質を向上させたシリコン連続鑄造方法が開示されている。同文献に記載の鑄造方法によれば、鑄造途中の原料溶解にプラズマ加熱を併用することにより電磁誘導加熱の負担を軽減でき、電磁力による熔融シリコンの熱対流が抑制され、下方への熱流速が抑制されることにより、固液界面が平坦化される。その結果、凝固直後のシリコン鑄塊の半径方向の温度勾配が低減し、結晶内部に発生する熱応力が緩和され、太陽電池の変換効率を悪化させる結晶欠陥の発生が抑制されるとしている。

[0012] このような電磁誘導による鑄造方法によれば、太陽電池の基板として用いたときの変換効率の高い多結晶シリコンインゴットを製造することが可能である。しかしながら、実際の操業では、鑄造を終了する最終凝固の際に、モールド内の熔融シリコンの上面から凝固が始まり、中心部の熔融シリコンは最後に凝固することとなる。その結果、当該凝固した部分の体積膨張によりインゴットの最終凝固部位に割れ（クラック）が発生し、その部分を使用不能部分として切除しなければならないため、歩留りが低下する。

[0013] この問題の解決法として、特許文献 3 では、鑄造を終了する際に、誘導コ

イルによる電磁誘導を受けて自己発熱する発熱体を無底るつぼ内に残るシリコン融液に上方から対向させ、シリコン融液の上面からの凝固を防ぎつつ、シリコン融液の凝固を終了するシリコンの連続鑄造方法が提案されている。同文献に記載の鑄造方法によれば、残融液凝固部分のクラック発生を防ぐことができ、この部分に他の部分と変わらない結晶方向性を与えて、鑄塊（インゴット）の全体にわたって高品質を付与することができ、シリコン鑄塊の製造歩留り向上に大きな効果を発揮するとしている。

[0014] しかし、この特許文献3に記載されるシリコンの連続鑄造方法は、シリコン原料の溶解を、プラズマアークによるプラズマ加熱やその他の加熱方式を併用せず、電磁誘導加熱のみにより行う方法であり、プラズマ加熱を補助熱源として用いる電磁鑄造への適用については確認を要する。

[0015] また、特許文献3に記載の連続鑄造方法では、その実施例に記載されるように、製造されたインゴットの寸法が85mm角および117mm角であり、例えば、一辺の長さが300mm以上の大型のインゴットを製造する場合に支障なく適用し得るか否かも不明である。

先行技術文献

特許文献

[0016] 特許文献1：特開2008-174397号公報

特許文献2：特開2001-19593号公報

特許文献3：特開平4-285095号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0017] 本発明は、前掲の特許文献1または2に開示される鑄造方法を適用し、プラズマアークによるプラズマ加熱を併用して、太陽電池の基板材として用いられる高品質の多結晶シリコンインゴットを製造するに際し、一辺の長さが300mm以上の大型のインゴットを製造する場合であっても、最終凝固位置においてクラックを生じさせずに安定して製造することができるシリコン

の電磁鑄造装置を提供することを目的としている。

課題を解決するための手段

- [0018] 上記の課題を解決するために、本発明者らは、断面形状が345mm×345mmまたは345mm×505mmの水冷銅モールドが設置された、電磁誘導加熱とプラズマ加熱を併用することができる電磁鑄造装置を使用して多結晶シリコンの連続鑄造を行った。その際、鑄造を終了する最終の原料供給後の凝固工程で、プラズマの使用を終了した後に、加熱用誘導コイルによる電磁誘導によって発熱する発熱体を使用して、上方から保温しながら最終凝固を行った。なお、本明細書では、モールドの上方に取り付けられている加熱装置を発熱体と称しているので（前記図1参照）、最終の凝固工程でプラズマ終了後に使用する発熱体を、以下、「トップヒーター」と記す。
- [0019] 前記鑄造の結果、インゴット全体にわたって高品質の多結晶シリコンが得られたが、インゴットの最終凝固部位に、凝固による体積膨張に起因するとみられるクラックが発生する場合もあることが判明した。クラックが発生するのは、誘導コイルに供給される交流電流の周波数を25～35kHzとした場合に多い。
- [0020] この検討結果を踏まえ、トップヒーターを使用して溶融シリコンの最終凝固を行うときのトップヒーターの発熱状態と、それによる溶融シリコン表面における加熱状態を検討した。
- [0021] 図1は、溶融シリコンの最終凝固時におけるトップヒーターの配置位置を示す図で、(a)は縦断面図、(b)は(a)のA-A矢視図である。同図に示すように、水冷銅モールド1の外周に加熱用誘導コイル2が配設され、誘導コイル2による電磁誘導によって自己発熱するトップヒーター3が、モールド1内の溶融シリコン4の直上で融液表面に対向して配置されている。トップヒーター3が溶融シリコン4の表面と向き合う面の形状は、溶融シリコン4の液面を広く覆うことができるように、モールド1の断面形状（この場合は、矩形）と相似する矩形である。なお、誘導コイル2の下側にはシリコンインゴットの急激な冷却を防ぐための保温装置5が設置されている。

- [0022] 図2は、トップヒーターにおける発熱状態を模式的に示す図で、(a)は加熱用誘導コイルに通電して加熱する前の状態を、(b)は加熱後の状態を表す。同図の(b)に示すように、トップヒーター3の外周に誘導電流が発生するので、トップヒーター3の外周(斜線を付した部分)が主に発熱し、溶融シリコン4の温度も外周部の近傍で最も高温になる。
- [0023] 図3は、前記図2に示した発熱状態のトップヒーターを使用した場合におけるモールド内の溶融シリコンの表面における加熱状態を説明する図である。同図に示すように、トップヒーター3の外周(斜線を付した部分)の直下およびその近傍(すなわち、溶融シリコン4の外周部近傍; 符号aを付した部分)で溶融シリコンの温度が高くなり、溶融シリコン4の外周部よりも内側(中心部近傍の上面; 符号bを付した部分)では温度が低くなる。
- [0024] 溶融シリコンの凝固は温度の低い部分から始まるので、溶融シリコン4の中心部近傍の上面(符号bを付した部分)から凝固が始まり、その下方に残存する溶融シリコン(特にその中心部)が最後に凝固することとなる。その結果、当該最後に凝固した部分の体積膨張によりインゴットの最終凝固部位にクラックが発生する。
- [0025] 前記鑄造の際に、インゴットの最終凝固部位にクラックが発生した場合は、溶融シリコンの表面における加熱状態が図3に示した状態にあったものと考えられる。
- [0026] そこで、本発明者らは、トップヒーターの発熱する外周部分が増えてその熱がシリコンの中心部近傍にも及ぶように、3分割したトップヒーターを使用することを試みた。そのときのトップヒーターの発熱状態と、それによる溶融シリコン表面における加熱状態は、後述する図4、図5に示すが、溶融シリコン表面の中心部近傍で温度が低くならず、溶融シリコンの表面全体が高温となる。そして、実際に鑄造を行ったところ、クラックの発生は認められず、良好な結果が得られた。
- [0027] 本発明はこのような知見に基づいてなされたもので、下記のシリコンの電磁鑄造装置を要旨とする。

すなわち、軸方向の一部が周方向で複数に分割された導電性の無底冷却モールドと、このモールドを取り囲む誘導コイルを有し、前記誘導コイルによる電磁誘導加熱により溶融したシリコンを下方に引き下げ凝固させるシリコンの電磁鑄造装置であって、さらに、加熱源として、前記冷却モールドの上方に昇降可能に設置された、移行式プラズマアークを発生させるためのプラズマトーチを有し、かつ、前記冷却モールド内の溶融シリコン表面に対向可能に構成された、前記誘導コイルによる電磁誘導によって発熱するトップヒーターを備えることを特徴とする電磁鑄造装置である。

[0028] ここで、「溶融シリコン表面に対向可能」とは、溶融シリコン表面とトップヒーター（溶融シリコン表面と対向するトップヒーターの下面を指す）とが、例えば30～100mm程度の近距離で向き合うことができることを意味する。

[0029] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置において、前記トップヒーターが、プラズマトーチに吊り下げられる構造を有するものであれば、トップヒーターの移動、昇降を、簡素な設備および操作で比較的容易に行うことができるので望ましい。

[0030] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置において、前記トップヒーターが2個以上に分割されたものであれば、最終凝固時に、溶融シリコンの表面全体の温度を高めて、高品質の多結晶シリコンを得ることができるので望ましい。

[0031] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置において、前記誘導コイルに通電される交流電流の周波数が25～35kHzであれば、特に太陽電池としての変換効率の高い高品質の多結晶シリコンが得られる。

[0032] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置においては、冷却モールドとして一辺の長さが300mm以上の方形のモールドが使用された場合であっても、インゴットの最終凝固部位にクラックを発生させず、安定して高品質の多結晶シリコンを製造することができる。

発明の効果

[0033] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置は、プラズマアークによるプラズマ加熱

を併用して、多結晶シリコンインゴットを製造する装置であり、最終凝固時に、熔融シリコン表面を加熱するトップヒーターを備えている。この装置を使用すれば、最終凝固位置においてクラックを生じさせずに、太陽電池の基板材として用いられる高品質の多結晶シリコンインゴットを製造することができる。

大型のインゴットを製造する場合であっても、安定して製造することが可能であり、インゴットの製造歩留りを向上させることができる。

図面の簡単な説明

[0034] [図1] 図1は、熔融シリコンの最終凝固時におけるトップヒーターの配置位置を示す図で、図1(a)は縦断面図、図1(b)は図1(a)のA-A矢視図である。

[図2] 図2は、トップヒーターにおける発熱状態を模式的に示す図で、図2(a)は加熱用誘導コイルに通電して加熱する前の状態を、図2(b)は加熱後の状態を表す。

[図3] 図3は、図2に示した発熱状態のトップヒーターを使用した場合のモールド内の熔融シリコンの表面における加熱状態を説明する図である。

[図4] 図4は、本発明の電磁鑄造方法で用いる分割したトップヒーターにおける発熱状態を模式的に示す図で、図4(a)は加熱用誘導コイルに通電して加熱する前の状態を、図4(b)は加熱後の状態を表す。

[図5] 図5は、図4に示した発熱状態のトップヒーターを使用した場合のモールド内の熔融シリコンの表面における加熱状態を説明する図である。

[図6] 図6は、多結晶シリコンの製造に好適な電磁鑄造装置の構成例を模式的に示す図である。

発明を実施するための形態

[0035] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置は、軸方向の一部が周方向で複数に分割された導電性の無底冷却モールドと、このモールドを取り囲む誘導コイルを有する電磁鑄造装置であることを前提としている。

[0036] このような電磁鑄造装置を前提とするのは、太陽電池の基板材として用い

られる多結晶シリコンを製造するに際し、モールド内で、熔融シリコンとモールドとをほとんど接触させずに鑄造を行い、モールドからの金属汚染がなく、変換効率を良好に維持できるシリコンインゴットを製造することができるからである。モールドの材質として高純度材料を使用する必要がなく、また、連続して鑄造することができるので、製造コストの大幅な低減も可能である。

[0037] 本発明の電磁鑄造装置の特徴は、さらに、加熱源として、前記冷却モールドの上方に昇降可能に設置された、移行式プラズマアークを発生させるためのプラズマトーチを有し、かつ、前記誘導コイルによる電磁誘導によって発熱するトップヒーターを備えることにある。トップヒーターは冷却モールド内の熔融シリコン表面に対向可能に構成されている。

[0038] 本発明の電磁鑄造装置が移行式プラズマアークを発生させるプラズマトーチを有することとするのは、前掲の特許文献2にも記載されているように、電磁力による熔融シリコンの熱対流を抑制して、太陽電池としての品質（特に、変換効率）を向上させた多結晶シリコンを製造するためである。移行式プラズマアークを発生させるプラズマトーチは、従来使用されているものを用いればよい。

[0039] また、トップヒーターを備えることとするのは、鑄造を終了する最終の原料供給後の凝固工程で、上方から熔融シリコン表面を保温しながら最終凝固を行わせ、インゴットの最終凝固部位におけるクラックの発生を防止して、インゴット全体にわたって高品質の多結晶シリコンを得るためである。そのための熱源として、モールドの外周に設置されている誘導コイルによる電磁誘導によってトップヒーターを発熱させ、これを利用する。

[0040] トップヒーターが冷却モールド内の熔融シリコン表面に対向可能に構成されていることと規定するのは、誘導コイルによる電磁誘導によって発熱させ、かつ、その熱を熔融シリコン表面に近距離から放射させてモールド内の熔融シリコン表面を保温するためである。トップヒーターが熔融シリコン表面から遠いと、電磁誘導を受けにくいため十分に発熱せず、輻射熱の減衰も大

きい。

- [0041] 前記溶融シリコン表面に対向可能にする構成は、特定の方式に限定されない。モールドの上方には、プラズマトーチが設置されているので、トップヒーターをモールドの上方に配置しておき、必要時に降下させる方式を採用するわけにはゆかないが、例えば、別に設けたトップヒーターの待機位置から、水平移動と昇降移動を組み合わせることで前記溶融シリコン表面に対向する位置まで移動させる方式であれば、採用可能と考えられる。しかしその場合は、モールド上方におけるプラズマトーチの昇降機構やトップヒーターの水平、昇降移動機器の配置、およびプラズマトーチとトップヒーターの入れ替え操作等が煩雑にならざるを得ない。
- [0042] そこで、本発明者らは、プラズマトーチを保持するとともに昇降させるプラズマトーチの昇降機構を利用する方式を採用することとした。すなわち、前記トップヒーターが、プラズマトーチに吊り下げられる構造を有するものであれば、トップヒーターをプラズマトーチに吊り下げ、プラズマトーチの昇降機構により降下させて、トップヒーターを冷却モールド内の溶融シリコン表面に対向させることが可能になる。
- [0043] より具体的には、例えば、プラズマトーチの適切な箇所にフックを取り付けておき、トップヒーターにはフックに引っ掛ける治具を取り付けてトップヒーターを吊り下げられる構造（トップヒーターの発熱部がプラズマトーチの下端よりも下方に位置する構造）とし、側方のトップヒーター待機位置から旋回可能なアームにトップヒーターを吊り下げ、アームを旋回してトップヒーターをプラズマトーチ昇降機のフックに吊り下げる方式が採用できる。この方式によれば、プラズマトーチ昇降機構をトップヒーターの昇降に共用することができ、プラズマトーチとトップヒーターの移動、昇降を、簡素な設備および操作で比較的容易に行うことができる。また、凝固したインゴットの下方向への移動に伴う溶融シリコン液面位置の降下に追従してトップヒーターを降下させることも十分可能である。
- [0044] その場合、トップヒーター吊り下げ用の固定部品を炭素繊維材で構成する

ことにより、当該固定部品と発電体本体の放電を回避して固定部品の寿命を延長させることができる。

[0045] トップヒーターとしては、誘導電流により発熱する程度の抵抗があること、高耐熱で、熱変形に耐えられること等が必要であり、黒鉛などの他、モリブデン等の金属も使用可能である。しかし、金属はインゴットを汚染して太陽電池としての変換効率を低下させるので、カーボンのソリッド材（緻密な炭素質の材料）が望ましい。また、炭素繊維材もトップヒーターの素材として好適である。

[0046] トップヒーターが溶融シリコンの表面と向き合う面の形状は、モールドの断面形状（通常は、正方形または矩形）より若干小さい相似形とするのがよい。溶融シリコンの液面全体を覆うことができるようにするためである。その場合、トップヒーターの角部は、曲率半径 R が10mm以上となるようにするのが望ましい。角部における割れや欠けの発生を抑えるためである。

[0047] トップヒーターが溶融シリコンの表面と向き合う面の溶融シリコン表面に対する面積比（占有面積比）は、60～70%とするのが望ましい。電磁誘導により発熱したトップヒーター外周からの輻射熱は一定の拡がりをもって溶融シリコンの表面に達するので、占有面積比が60～70%であれば、溶融シリコンの全面を十分高温にすることができる。

[0048] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置において、前記トップヒーターが2個以上に分割されたものとするのが望ましい。

[0049] 図4は、本発明の電磁鑄造方法で用いる分割したトップヒーターにおける発熱状態を模式的に示す図で、（a）は加熱用誘導コイルに通電して加熱する前の状態を、（b）は加熱後の状態を表す。図4に示した例はトップヒーターを3個に分割した場合で、同図の（b）に示すように、分割したそれぞれのトップヒーター3の外周に誘導電流が発生するので、各トップヒーター3の外周（斜線を付した部分）が主に発熱する。その結果、溶融シリコン4の温度は、外周部近傍だけではなく、外周部より内側でも高温になる。

[0050] 図5は、図4に示した発熱状態のトップヒーターを使用した場合における

モールド内の熔融シリコンの表面における加熱状態を説明する図である。同図に示すように、分割したそれぞれのトップヒーター 3 の外周（斜線を付した部分）の直下およびその近傍の熔融シリコン 4 の温度が高くなるので、モールド 1 内の熔融シリコン 4 の表面全体（符号 a を付した部分）で高温となる。その結果、凝固が下方から上方へと一方向に進行するので、高品質の多結晶シリコンを得ることができる。

- [0051] トップヒーターの分割を 2 個以上とするのは、分割数が最小の 2 個であっても、分割したそれぞれのトップヒーターの外周に誘導電流が発生して各トップヒーターの外周が発熱し、その熱が熔融シリコンの中心部近傍にも及び、中心部近傍が高温となって、一方向凝固が起こりやすくなるからである。
- [0052] トップヒーターの分割数の上限は特に定めない。モールドの大きさが限られており、設備構成上の制約等から上限は自ずと定まるからである。熔融シリコンの表面全体を高温状態にするという観点からは多い方が有利であり、望ましいが、4 分割を超えると、トップヒーター自体の構成が複雑になり、設備費も嵩むので得策ではない。また、分割による効果にも上限があると推測される。なお、分割されたトップヒーターの各部の寸法は、同一であっても、異なってもよい。
- [0053] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置において、前記誘導コイルに通電される交流電流の周波数が 25 ～ 35 kHz であれば、前掲の特許文献 1 に記載されるように、特に太陽電池としての変換効率の高い高品質の多結晶シリコンが得られるので望ましい。誘導コイルに供給される交流電流の周波数は、従来は 10 kHz 程度であったが、交流電流の周波数を上昇させることにより、熔融シリコン表面の電流密度を高め、インゴットの表面温度を高温に維持してインゴット表面におけるチル層（結晶粒径が小さく、結晶欠陥が多い）の成長を抑制することができるからである。
- [0054] この場合、最終の凝固工程において、前記の分割されたトップヒーターを使用すれば、熔融シリコンの表面全体を高温に維持し易く、安定した鑄造が行える。

- [0055] また、本発明のシリコンの電磁鑄造装置においては、冷却モールドとして一辺の長さが300mm以上の大型の方形モールドが使用された場合であっても、インゴットの最終凝固部位にクラックを発生させず、安定して高品質の多結晶シリコンインゴットを製造することができる。
- [0056] トップヒーターは、外周部のみが発熱するため、大型の方形モールドを使用した場合、熔融シリコンの表面全体を高温に維持するのは困難である。しかし、特に前記の分割されたトップヒーターを使用すれば、分割されたそれぞれのトップヒーターの外周が発熱し、その熱が熔融シリコンの中心部近傍にも及ぶこととなるので、熔融シリコンの表面全体の高温維持が可能となる。
- [0057] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置を使用してシリコンインゴットを製造するに際しては、基本的には通常の操作方法に準ずるが、鑄造を終了する最終の凝固工程で、プラズマの使用を終了した後に、トップヒーターを熔融シリコン表面に対向させ、誘導コイルによる電磁誘導によって発熱させて、上方から熔融シリコン表面を保温しながら最終凝固を行えばよい。
- [0058] 以上説明したように、本発明のシリコンの電磁鑄造装置を使用すれば、プラズマアークによるプラズマ加熱を併用して、多結晶シリコンインゴットを製造するに際し、最終凝固位置においてクラックを生じさせずに、太陽電池の基板材として用いられる高品質の多結晶シリコンインゴットを製造することができる。

大型のインゴットを製造する場合であっても、安定して製造することが可能であり、インゴットの製造歩留りを向上させることができる。

実施例

- [0059] 移行式プラズマアークを発生させるためのプラズマトーチを有し、かつ、前記図4および図5に要部の概略構成を示したトップヒーターを備える本発明の電磁鑄造装置を使用して、断面寸法が345mm×345mm、または345mm×505mmで、長さがそれぞれ4mのシリコンインゴットを製造し、インゴットの最終凝固部におけるクラックの発生の有無を調査した。

なお、比較のために、トップヒーターを取り付けずに鑄造を行った場合についても、同様の調査を実施した。

[0060] 使用したトップヒーターは、炭素質で、分割しないもの、2分割したもの、または3分割したものを使用した。なお、使用したトップヒーターの熔融シリコン表面に対する占有面積比は、いずれも前述の望ましい面積比（60～70%）を満たすものとした。また、誘導コイルに通電される交流電流の周波数は30kHz、または12kHzとした。

[0061] 調査結果を表1に示す。表1において、インゴットの最終凝固部におけるクラック発生率は、クラック発生の有無を肉眼観察により調査し、調査対象インゴット数に対するクラック発生インゴット数の比（百分率）で示した。なお、表1の試験No. 4、8および12が、トップヒーターを取り付けずに最終凝固を終了した比較例である。

[0062] [表1]

表 1

試験 No.	トップヒーター	インゴット寸法 (mm)	誘導コイル 周波数 (kHz)	最終凝固部における クラック発生率 (%)
1	分割せず	345×505	30	89
2	2分割	"	"	32
3	3分割	"	"	0
4	トップヒーターなし	"	"	100
5	分割せず	345×345	30	55
6	2分割	"	"	0
7	3分割	"	"	0
8	トップヒーターなし	"	"	100
9	分割せず	345×345	12	7
10	2分割	"	"	0
11	3分割	"	"	0
12	トップヒーターなし	"	"	100

[0063] 表1の試験No. 1～4、試験No. 5～8および試験No. 9～12の各グループ別にみると、いずれのグループにおいても、トップヒーターなしの場合は例外なくクラックが発生した。これに対し、トップヒーターを使用

することにより、分割の有無には関係なくクラック発生率が低減し、トップヒーターを2分割、さらには3分割することにより、クラック発生率がより一層低下していることが表1から明らかである。

[0064] 試験N o. 1～4のグループと試験N o. 5～8のグループの違いはインゴットの寸法であるが、インゴットの断面積が大きい試験N o. 1～4のグループでは、試験N o. 5～8のグループに比べてトップヒーターからの輻射熱が溶融シリコンの全面（特に、中心部近傍）に到達しにくく、トップヒーターを3分割して漸くクラック発生率が0%になった。

[0065] 試験N o. 5～8のグループと試験N o. 9～12のグループの違いは誘導コイルに供給する電流の周波数であるが、当該周波数が30kHzの試験N o. 5～8のグループでは、試験N o. 9～12のグループに比べて、分割しないトップヒーターを使用した場合のクラック発生率に大きな差が生じた。これは、周波数を上昇させたことにより、誘導電流がトップヒーターの表層のみに発生し、溶融シリコン表面の、特に中心部近傍の温度を十分に高められなかったことによるものと考えられる。

産業上の利用可能性

[0066] 本発明のシリコンの電磁鑄造装置によれば、プラズマアークによるプラズマ加熱を併用して、多結晶シリコンインゴットを製造するに際し、最終凝固位置においてクラックを生じさせずに、太陽電池の基板材として用いられる高品質の多結晶シリコンインゴットを安定して製造することができる。

したがって、本発明は、太陽電池の製造分野において有効に利用することができる、自然エネルギー利用技術の進展に大きく寄与することができる。

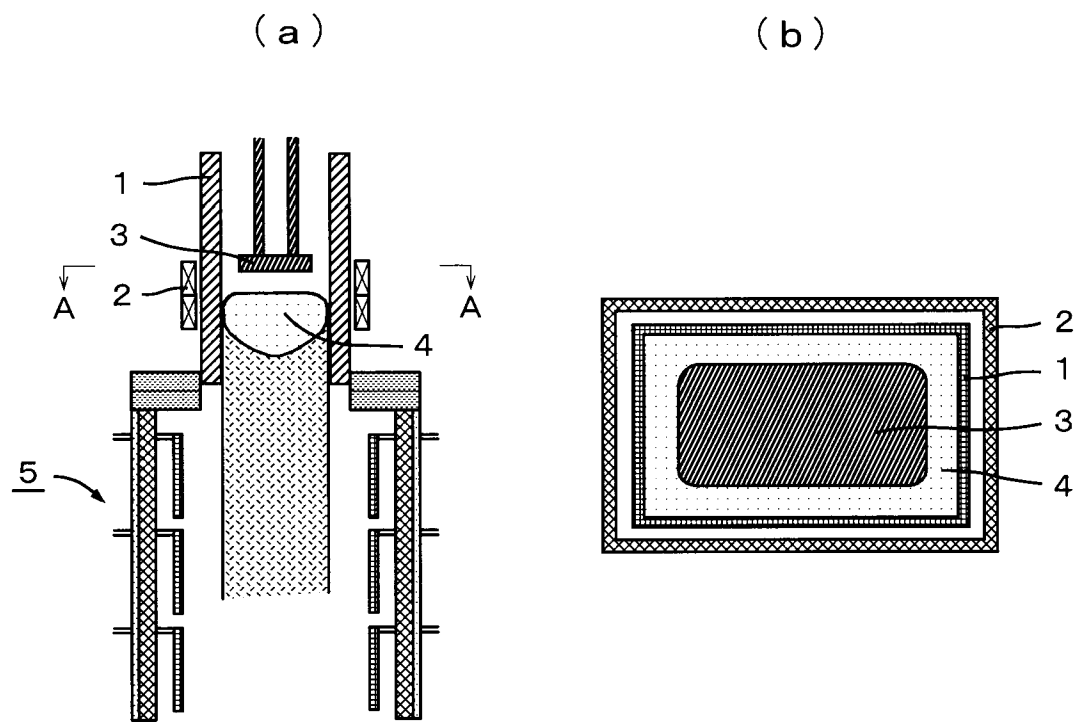
符号の説明

[0067] 1：モールド、 2：加熱用誘導コイル、 3：トップヒーター、
4：溶融シリコン、 5：保温装置、 6：密閉容器、
7：支持台、 8：鑄塊（シリコンインゴット）、 9：均熱筒、
10：原料投入機、 11：発熱体

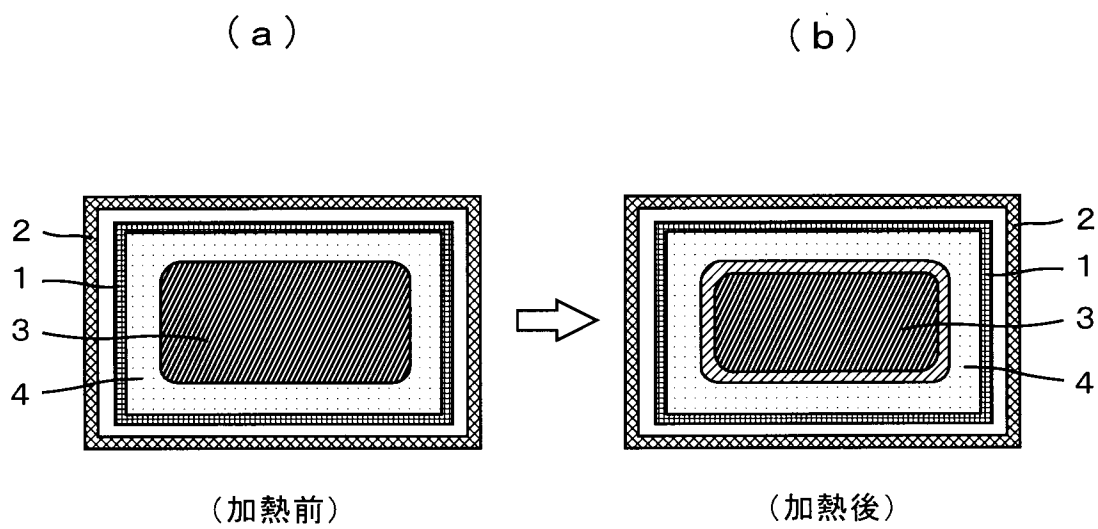
請求の範囲

- [請求項1] 軸方向の一部が周方向で複数に分割された導電性の無底冷却モールドと、このモールドを取り囲む誘導コイルを有し、前記誘導コイルによる電磁誘導加熱により溶融したシリコンを下方に引き下げ凝固させるシリコンの電磁鑄造装置であって、
- さらに、加熱源として、前記冷却モールドの上方に昇降可能に設置された、移行式プラズマアークを発生させるためのプラズマトーチを有し、
- かつ、前記冷却モールド内の溶融シリコン表面に対向可能に構成された、前記誘導コイルによる電磁誘導によって発熱するトップヒーターを備えることを特徴とするシリコンの電磁鑄造装置。
- [請求項2] 前記トップヒーターが、プラズマトーチに吊り下げられる構造を有することを特徴とする請求項1に記載のシリコンの電磁鑄造装置。
- [請求項3] 前記トップヒーターが2個以上に分割されていることを特徴とする請求項1または2に記載のシリコンの電磁鑄造装置。
- [請求項4] 前記誘導コイルに通電される交流電流の周波数が、25～35kHzであることを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載のシリコンの電磁鑄造装置。
- [請求項5] 前記冷却モールドが、一辺の長さが300mm以上の方形のモールドであることを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載のシリコンの電磁鑄造装置。

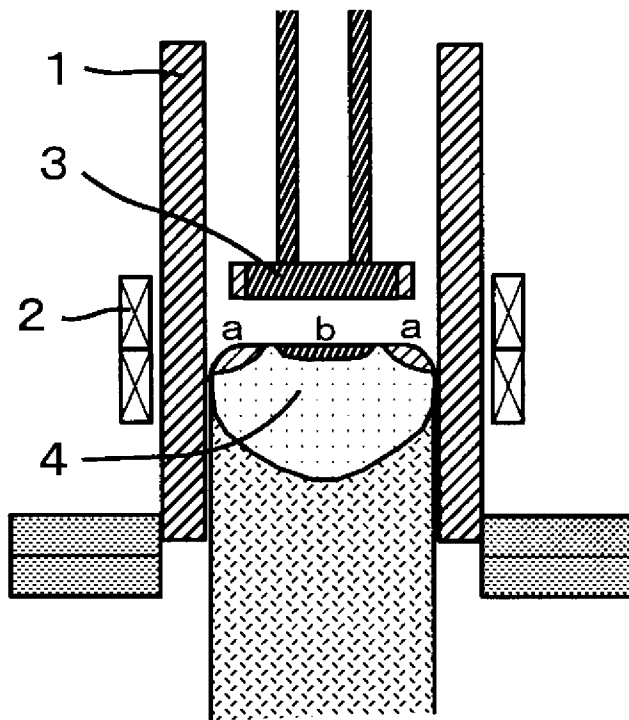
[図1]



[図2]



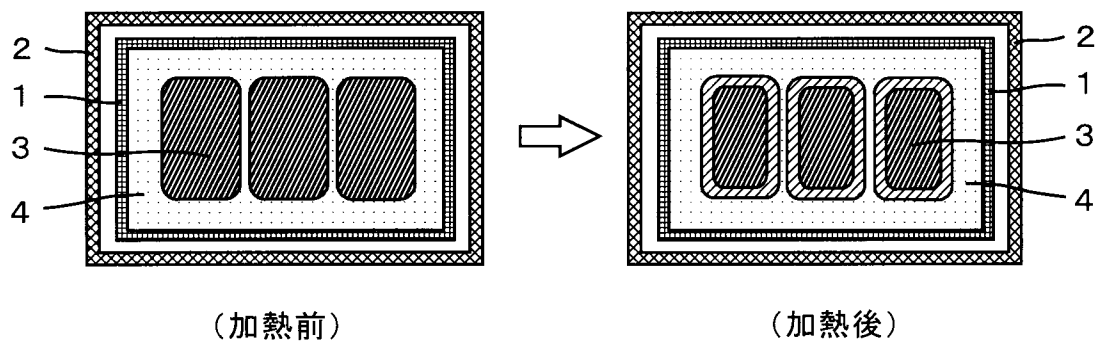
[図3]



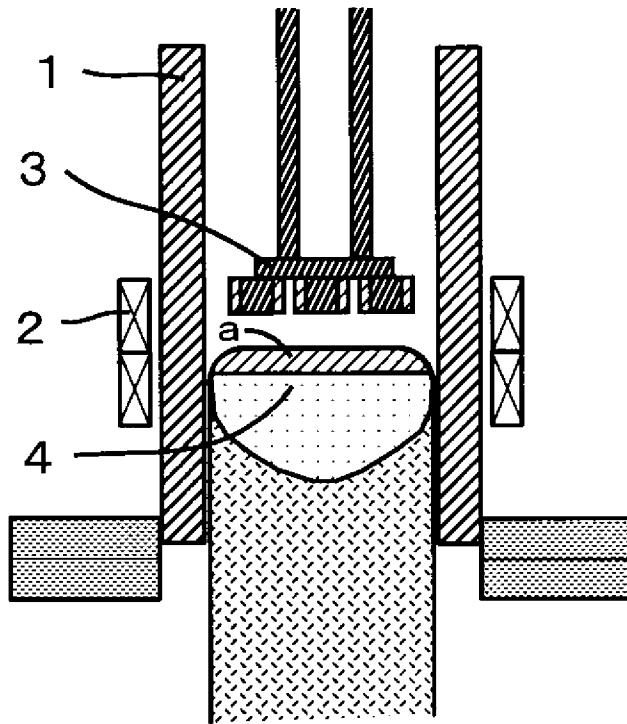
[図4]

(a)

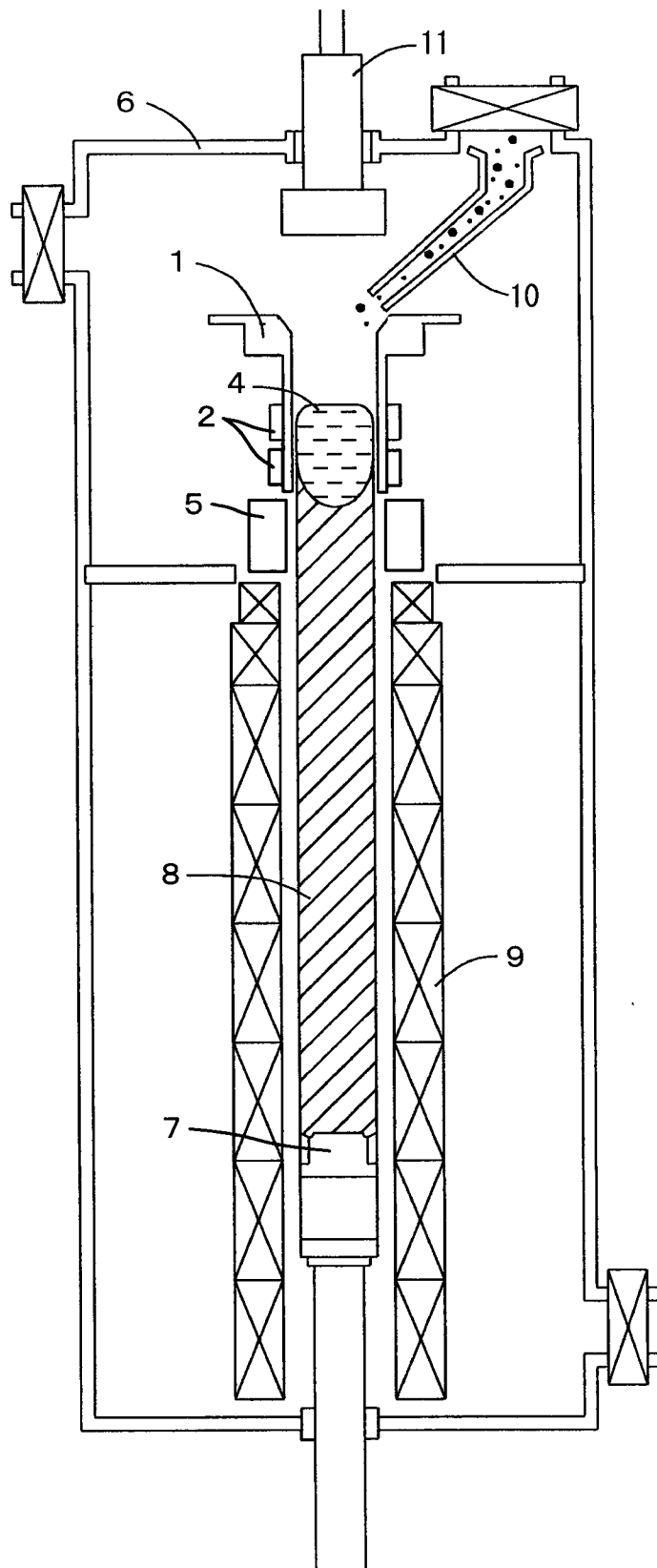
(b)



[図5]



[図6]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/006742

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C01B33/02 (2006.01) i, C30B29/06 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C01B33/02, C30B29/06

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2010
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2010	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2010

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, JSTPlus (JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 4-285095 A (Osaka Titanium Co., Ltd.), 09 October 1992 (09.10.1992), claims; paragraph [0009]; fig. 1 (Family: none)	1, 2, 4, 5 3
Y	JP 2001-19593 A (Sumitomo Sitix of Amagasaki, Inc.), 23 January 2001 (23.01.2001), paragraphs [0032] to [0040]; fig. 1 (Family: none)	1, 2, 4, 5
Y	JP 2008-174397 A (SUMCO Solar Corp.), 31 July 2008 (31.07.2008), claims & US 2008/0210156 A1 & EP 1947221 A2	4, 5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
07 December, 2010 (07.12.10)

Date of mailing of the international search report
21 December, 2010 (21.12.10)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. C01B33/02 (2006.01)i, C30B29/06 (2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. C01B33/02, C30B29/06

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 0 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 0 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 0 年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

WPI, JSTPlus (JDreamII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 4-285095 A (大阪チタニウム製造株式会社) 1992. 10. 09, 特許請求の範囲, 段落【0009】, 図 1 (ファミリーなし)	1, 2, 4, 5 3
Y	JP 2001-19593 A (株式会社住友シチックス尼崎) 2001. 01. 23, 段落【0032】 - 【0040】, 図 1 (ファミリーなし)	1, 2, 4, 5
Y	JP 2008-174397 A (SUMCOソーラー株式会社) 2008. 07. 31, 特許請求の範囲 & US 2008/0210156 A1 & EP 1947221 A2	4, 5

C 欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

0 7 . 1 2 . 2 0 1 0

国際調査報告の発送日

2 1 . 1 2 . 2 0 1 0

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官 (権限のある職員)

田 中 則 充

4 G

9 7 3 0

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 4 1 6