

明 細 書

発明の名称：

温度計測装置、温度計測方法、及び温度計測プログラム、並びにウェハ製造装置

技術分野

[0001] 本発明は温度計測装置、温度計測方法、及び温度計測プログラム、並びにウェハ製造装置に関し、間接的に計測対象物の温度を計測するに際して周囲の部材の輻射熱量の影響を除外して温度計測をするための温度計測装置、その方法及びプログラムであり、併せて温度計測装置を備えるウェハ製造装置である。

背景技術

[0002] 半導体の構成部材となるシリコンウェハの製造に際し、現在エピタキシャル成長の装置が多用されている。この装置においてシリコンウェハはチャンバ内に收容されており、シリコンウェハはチャンバの外部に設置されたパイロメータ（放射温度計）により、温度計測されている（特許文献1、2、3、4等参照）。

[0003] 従前の装置の場合、シリコンウェハの温度はチャンバの窓の部材を挟んでパイロメータにより計測されている。従って、実際に計測される温度の数値は、純粋に計測対象のシリコンウェハの温度ではなく、チャンバの窓の部材の輻射熱（放射輝度）も混じった計測値であった。

[0004] シリコンウェハのエピタキシャル成長の反応の場合、チャンバ内へ通気するガスの種類、流量等に応じた精密な加熱温度の制御が求められる。しかしながら、現状は間接的な温度計測に依存していた。現在、シリコンウェハに求められる加工精度はより精密化しているため、エピタキシャル成長の反応ばらつきが品質、歩留まりにも影響を与える。そのため、間接的な温度計測としつつ、極力純粋に計測対象のシリコンウェハの温度を計測する手法が求められている。

先行技術文献

特許文献

- [0005] 特許文献1：特表2009-507997号公報
特許文献2：特開2016-129162号公報
特許文献3：特開2018-44915号公報
特許文献4：特開2022-144083号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0006] 本発明は前述の点に鑑みなされたものであり、計測対象のシリコンウェハの温度を間接的に計測する状況下において、実測される放射輝度からチャンバの部材に起因する放射輝度の影響を除外することにより、より正確に計測対象の温度変化量を算出する温度計測装置、温度計測方法、及び温度計測プログラムを提供し、さらに、温度計測装置を備えることによりウェハ製造時の温度制御の精度を向上させるウェハ製造装置を提供する。

課題を解決するための手段

- [0007] すなわち、実施形態の温度計測装置は、計測対象物を内部に収容するエピタキシャル成長装置のチャンバと、計測対象物を加熱する加熱部と、計測対象物と対向するチャンバの位置に備えられるチャンバ窓部と、エピタキシャル成長装置のチャンバ窓部の外部に設置されチャンバ窓部を介しての計測対象物の温度計測とチャンバ窓部の温度計測をする温度計測部と、温度計測部の検出値から計測対象物の温度を算定する演算部とを備え、演算部は、温度計測部の検出値から算出される実測温度より、チャンバ窓部の温度変化量に対応する、チャンバ内にて加熱される計測対象物の温度変化量の換算データを生成する換算部と、チャンバ内における計測対象物に対する加熱条件を取得する条件取得部と、温度計測部の検出値を取得する検出値取得部と、換算データを用いて温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正して計測対象物の温度を推定する温度補正部とを備えることを特徴とする。

[0008] また、実施形態のウェハ製造装置は、シリコンウェハを内部に収容するエピタキシャル成長装置のチャンバと、シリコンウェハを加熱する加熱部と、シリコンウェハと対向するチャンバの位置に備えられる石英からなるチャンバ窓部と、エピタキシャル成長装置のチャンバ窓部の外部に設置されチャンバ窓部を介しての計測対象物の温度計測とチャンバ窓部の温度計測をする温度計測部と、温度計測部の検出値からシリコンウェハの温度を算定する演算部を備え、演算部は、温度計測部の検出値から算出される実測温度より、チャンバ窓部の温度変化量に対応する、チャンバ内にて加熱されるシリコンウェハの温度変化量の換算データを生成する換算部と、チャンバ内におけるシリコンウェハに対する加熱条件を取得する条件取得部と、温度計測部の検出値を取得する検出値取得部と、換算データを用いて温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正してシリコンウェハの温度を推定する温度補正部とを備えることを特徴とする。

[0009] さらに、ウェハ製造装置において、チャンバの外部にチャンバを冷却する調温部が備えられ、演算部は、温度補正部において推定されるシリコンウェハの温度に基づいて調温部の出力を制御する調温制御部を備えることとしてもよい。

発明の効果

[0010] 本発明の温度計測装置によると、計測対象物を内部に収容するエピタキシャル成長装置のチャンバと、計測対象物を加熱する加熱部と、計測対象物と対向するチャンバの位置に備えられるチャンバ窓部と、エピタキシャル成長装置のチャンバ窓部の外部に設置されチャンバ窓部を介しての計測対象物の温度計測とチャンバ窓部の温度計測をする温度計測部と、温度計測部の検出値から計測対象物の温度を算定する演算部とを備え、演算部は、温度計測部の検出値から算出される実測温度より、チャンバ窓部の温度変化量に対応する、チャンバ内にて加熱される計測対象物の温度変化量の換算データを生成する換算部と、チャンバ内における計測対象物に対する加熱条件を取得する条件取得部と、温度計測部の検出値を取得する検出値取得部と、換算データ

を用いて温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正して計測対象物の温度を推定する温度補正部とを備えるため、計測対象のシリコンウェハの温度を間接的に計測する状況下において、実測される放射輝度からチャンバの部材に起因する放射輝度の影響を除外することにより、より正確に計測対象物の温度変化量を算出することができる。また、ウェハ製造装置に適用することにより、計測対象物であるシリコンウェハの温度変化量を正確に算出することができる。

図面の簡単な説明

- [0011] [図1]実施形態の温度計測装置を備えるウェハ製造装置の概略構成図である。
- [図2]温度計測装置の演算部の構成を示す概略ブロック図である。
- [図3]図2の演算部の機能構成を示す概略ブロック図である。
- [図4]計測対象物の温度計測時の概念図である。
- [図5]チャンバ窓部の調温部の動作に関するグラフであり、（a）温度計測部より計測対象物のウェハの温度を一定に維持する制御下において意図的に調温部の出力を段階的に変化させたときの加熱部（ハロゲンランプ）の出力を示すグラフであり、（b）その時の温度計測部により測定されたチャンバ窓部の温度変化のグラフであり、（c）はチャンバ窓部の温度と加熱部（ハロゲンランプ）の総出力との関係性を示すグラフである。
- [図6]チャンバ窓部の温度が変化した際の計測対象物のウェハの温度が見かけ上どの程度変化するか条件を設定して計算により算出したグラフである。
- [図7]実施形態の温度計測装置における処理手順を示すフローチャートである。
- 。
- [図8]実施形態の温度計測の実証例であり、（a）第1温度計測部の計測温度と調温部の速度を示すグラフであり、（b）第1温度計測部の計測温度と第2温度計測部の計測温度を示すグラフである。
- [図9]図8と係数を変更した際の温度計測の実証例であり、（a）第1温度計測部の計測温度と調温部の速度を示すグラフであり、（b）第1温度計測部の計測温度と第2温度計測部の計測温度を示すグラフである。

[図10]補正機能の有無による比較を示すグラフである。

発明を実施するための形態

- [0012] 実施形態の温度計測装置は、主に半導体用のシリコンウェハ等のウェハを製造するウェハ製造装置（具体的には、エピタキシャル装置またはエピタキシャル成長装置）に接続される。そして、温度計測装置はウェハをエピタキシャル成長させる際の当該ウェハの温度計測、加熱条件の制御に用いられる。
- [0013] 図1は実施形態の温度計測装置1と、当該温度計測装置1を備えるウェハ製造装置2の概略構成図である。すなわち、ウェハ製造装置2はシリコンウェハに対してエピタキシャル成長をさせるエピタキシャル成長装置のチャンバ11とコンピュータ10を組み合わせた装置となる。コンピュータ10に組み合わせられるチャンバ11の数は1台から複数台の適宜である。図示は便宜上1台のチャンバ11を開示している。
- [0014] チャンバ11は、適宜形状の空間を有し、内部のサセプタ13上に載置された1枚から複数枚のシリコンウェハ14の表面に結晶を生成させる装置（炉）である。そこで、結晶成長に必要なガスは原料ガスタンク（図示せず）からガス流入路16を通じてチャンバ11内に導入される。所定の反応後のガスはガス流出路17を通じてチャンバ11外に排出される。チャンバ11は光線透過性に優れた石英からなるチャンバ窓部18が設置される。石英のチャンバ窓部18（石英ドーム）は計測対象物であるシリコンウェハ14の直上位置の配置であり、シリコンウェハ14と対向する。
- [0015] チャンバ11において、シリコンウェハ14を所定温度で加熱し温度を維持してガスと反応させる加熱部25、26、27、28がチャンバ11外の適宜箇所に設置される。加熱部はハロゲンランプ、赤外線ランプ等の通電により発熱する熱源である。
- [0016] チャンバ11のサセプタ13に載置されているシリコンウェハ14（計測対象物、被加工物）の温度計測のため、温度計測部（第1温度計測部）21がチャンバ11の外部、具体的には、チャンバ窓部18の直上に設置される

。また、チャンバ窓部 1 8 自体の温度計測のため、温度計測部（第 2 温度計測部）2 2 がチャンバ 1 1 外部の適宜箇所に設置される。さらに、チャンバ 1 1 内のサセプタ 1 3 の温度計測のための温度計測部 2 4（第 3 温度計測部）がチャンバ 1 1 の下部 1 2 の適宜箇所に設置される。温度計測部 2 1, 2 2, 2 4 は、パイロメータ等と称される非接触温度計であり、シュテファン＝ボルツマンの法則、プランクの法則により物体の放射輝度量（放射熱量、放射率）を計測する機器である。さらに、加熱部 2 5 等による加熱からチャンバ 1 1 を冷却してチャンバ窓部 1 8 内の過剰な加熱を抑制するために調温部 2 3 が備えられる。調温部 2 3 はチャンバ 1 1 の表面に風を送り込む送風機（ブローア）等の器機である。

[0017] 図示の温度計測装置 1 及びウェハ製造装置 2 では、温度計測部 2 1 はチャンバ 1 1 に設置されるチャンバ窓部 1 8 の外側に配置され、当該チャンバ窓部 1 8 を介して計測対象物であるシリコンウェハ 1 4 の温度計測に用いられる。なお、温度計測部 2 1 に加えて、他の温度計測部がチャンバ 1 1 の外部に設置されてもよい。

[0018] ウェハ製造装置 2 では、温度計測部 2 1、調温部 2 3、加熱部 2 5, 2 6, 2 7, 2 8 等は、コンピュータ 1 0 に接続され、当該コンピュータ 1 0 との間で信号送信が行われる。なお、温度計測部 2 1, 2 2、調温部 2 3、加熱部 2 5, 2 6, 2 7, 2 8 への電力供給用の配線の図示は省略されている。

[0019] 温度計測装置 1 は温度計測部 2 1 の検出値から計測対象物であるシリコンウェハ 1 4 の温度を算定するため、温度計測装置 1 は演算処理が可能な公知のコンピュータ 1 0 を備える。図 2 のブロック図のとおり、コンピュータ 1 0 は、ハードウェア的に、演算部 1 0 1（CPU、GPU 等）、ROM 1 0 2、RAM 1 0 3、記憶部 1 0 4 等が実装され、I/O（インプット・アウトプット・インターフェイス）1 0 5 等が適式に備えられる。コンピュータ 1 0 は、公知のパーソナルコンピュータ、スーパーコンピュータ、メインフレーム、ワークステーション、クラウドコンピューティングシステム等、種

々の電子計算機（計算リソース）により構成される。

[0020] また、図1のとおりコンピュータ10には、出力用のディスプレイ（モニタ）4、入力用のキーボード5及びマウス6が備えられる。これらは、I/O105に接続される。図1に開示の、温度計測部21、調温部23、加熱部25、26、27、28は、I/O105に接続される。

[0021] 温度計測装置1のコンピュータ10の各機能部をソフトウェアにより実現する場合、コンピュータ10は、各機能部を実現するソフトウェアであるプログラムの命令を実行することで実現される。このプログラムを格納する記録媒体は、「一時的でない有形の媒体」、例えば、CD、DVD、半導体メモリ、プログラマブルな論理回路などを用いることができる。また、このプログラムは、当該プログラムを伝送可能な任意の伝送媒体（通信ネットワーク、放送波等）を介して温度計測装置1のコンピュータ10に供給されてもよい。

[0022] 温度計測装置1のコンピュータ10の記憶部104には、HDDまたはSSD等の記憶装置が備えられる。または、記憶部104は外部のサーバ（図示せず）としても良い。記憶部104は、各種のデータ、情報、プログラム、同プログラムの実行に必要な各種のデータ等を記憶する。

[0023] 温度計測装置1のコンピュータ10の演算部101における各機能部は、図3の概略ブロック図のとおり示される。各機能部は、換算部110、条件取得部120、検出値取得部130、温度補正部140、温度制御を実行する構成として温度制御部150（計測対象物であるシリコンウェハ14の温度を制御するウェハ温度制御部）が機能部に備えられる。また、出力に必要な処理を実行する出力部が備えられる。温度計測装置1、ウェハ製造装置2における処理、実行は、ソフトウェア的に、メインメモリにロードされた温度計測プログラム等により実現される。

[0024] 換算部110は、温度計測部21の検出値から算出される実測温度より、チャンバ窓部18の温度変化量に対応する、チャンバ11内にて加熱されるシリコンウェハ14（計測対象物）の温度変化量の換算データを生成する。

より詳細には、換算部 110 は、温度計測部の検出値から算出される実測温度の実測温度変化量から、チャンバ窓部に起因する放射輝度量の影響を除外して計測対象物の対象温度変化量を推定する。そして、換算部 110 は、実測温度変化量と対象温度変化量との間の相関関係から換算データを生成する。

[0025] 温度計測部 21（第 1 温度計測部）の検出値から算出される実測温度の実測温度変化量は、いわゆる見かけ上の温度変化の計測である。しかし、自明ながらチャンバ 11 内のシリコンウェハ 14 の温度と一致しているとは言い難い。特に、チャンバ窓部 18 の部材が温度計測部 21 とシリコンウェハ 14 の途中に含まれていることから、チャンバ窓部 18 の部材による輻射熱の影響が不可避免的に生じる。厳密には加熱状態での実測の温度とシリコンウェハ 14 の温度との間にずれが生じている。換算部 110 はこのような温度のずれ補正（校正）するために換算データを生成する。

[0026] 条件取得部 120 は、チャンバ 11 内における計測対象物（シリコンウェハ 14）に対する加熱条件を取得する。実施形態は計測対象物をシリコンウェハとしているが、他の材質の基板のエピタキシャル成長の場合もある。この場合、材質毎に放射輝度量（放射熱量、放射率）等の基準値が相違する。そこで、加熱条件では、材質毎の基準値、温度上昇率（昇温速度）等の実際の計測対象物に対するエピタキシャル成長時の温度の情報が取得される。

[0027] 検出値取得部 130 は、温度計測部 21 の検出値を取得する。温度計測部 21 は、パイロメータ等の温度計測機器であり対象物体の放射輝度の量として計測する。そこで、計測時の放射輝度から対象の温度がコンピュータ 10 の演算部 101 において算出される。

[0028] 温度補正部 140 は、換算部 110 にて生成された換算データを用いて温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正して計測対象物の温度を推定する。温度計測部 21 の検出値から算出される実測温度の実測温度変化量に換算データによる補正が行われることにより、チャンバ窓部 18 に起因する放射輝度量の影響が除外される。そこで、計測対象物であるシリコンウェ

ハ１４のより正確な温度が推定される。

[0029] 図４の模式図に示されるように、パイロメータ等の温度計測部２１を用いてチャンバ１１の外部から計測対象物であるシリコンウェハ１４の温度を計測する場合、温度計測部２１が実測する放射輝度には、シリコンウェハ１４の放射輝度とともに、チャンバ１１を構成するチャンバ窓部１８に起因する放射輝度が含まれ、双方が混じった放射輝度が検出値として検出される。ここで、チャンバ窓部１８は石英であり材質は均一である。計測対象物であるシリコンウェハ１４に対する加熱条件から、石英のチャンバ窓部１８に起因する放射輝度の算出は可能である。そこで、温度計測部２１を通じていったん全体の放射輝度が算出され、事後的に石英のチャンバ窓部１８に起因する放射輝度の影響が換算データを通じて除外され、最終的に計測対象物であるシリコンウェハ１４の温度計測が可能となる。

[0030] これより、換算部１１０における換算データの生成について説明する。ここで言う換算データとは、温度計測部２１の検出値から算出される実測温度の実測温度変化量から、チャンバ窓部１８に起因する放射輝度量の影響を除外してシリコンウェハ１４の対象温度変化量を推定して、実測温度変化量と対象温度変化量との間に成立する相関関係を示すデータであり所定の換算式等の数値計算により処理可能なデータである。

[0031] 対象温度変化量とは、チャンバ窓部１８の温度変化量に対する計測対象物であるシリコンウェハ１４の見かけ上の温度変化量を言う。例えば、チャンバ窓部１８の温度がある温度から１０℃昇温（＋１０℃）したときの計測対象物の見かけ上の昇温量である。

[0032] 現状、パイロメータ等の温度計測機器を用いチャンバ窓部を通して温度が計測され、この計測温度が計測対象物であるシリコンウェハの温度とみなされている。しかしながら、前述の説明のとおり、チャンバ窓部の温度が変化すると、見かけ上のシリコンウェハの温度に変化が生じる。そうすると、チャンバに導入するガスの種類に応じてエピタキシャル成長を行う場合のシリコンウェハに対する加熱温度制御において、チャンバ窓部の温度が昇降温の

繰り返し等の設備の履歴により、経時的に変化した場合、制御すべきシリコンウェハの温度が見かけ上変化するため、結果的に実質的なシリコンウェハ温度が変化してしまい、理想的なエピタキシャル成長が形成されない可能性がある。

[0033] 図5のグラフは温度計測部21（第1温度計測部）によりシリコンウェハの温度を一定に維持する制御下において、意図的に調温部の動作を変量させた試験に関連するグラフである。図5（a）は、横軸を時系列とし、調温部の速度を段階的（階段状）に変量させた際の加熱部（ハロゲンランプ）の総出力の変化のグラフである。次に図5（b）は、横軸を時系列とし、時系列に伴う調温部の速度を段階的（階段状）に変量させた際のチャンバ窓部の温度の変化のグラフである。ブローアから噴き出す風の速度に応じてチャンバ窓部の温度は変化している。

[0034] 図5（c）はチャンバ窓部の温度と加熱部（ハロゲンランプ）の総出力との関係性を示すグラフである。チャンバ窓部を通して計測する温度を一定に維持する制御下において、チャンバ窓部の温度と加熱部（ハロゲンランプ）の出力との間に良好な相関となることが示される。すなわち、チャンバ窓部の温度を意図的に変化させると、シリコンウェハの温度を一定に維持する制御下において、チャンバ窓部の温度変化の影響により見かけ上のシリコンウェハの温度が変化し、結果的に加熱部（ハロゲンランプ）の出力が変化する。

[0035] 図5の調温部の動作に関連するグラフは、補正係数を決めるための予備試験の意味合いを有する。調温部（ファン）の速度（つまり風量）を意図的に変化させてチャンバ窓部の温度が変化しても、出力が一定になるように（見かけ上のシリコンウェハの温度に変化が生じないように）、チャンバ窓部における温度変化を補正する係数を決定すれば良いこととなる。

[0036] そこで、実施形態の温度計測装置1及びウェハ製造装置2は、チャンバ窓部の温度変化量と実際のシリコンウェハの温度変化量との間に不可避免的に生じるずれを予め換算データを用いつつ計算により推定して、エピタキシャル

成長に必要なシリコンウェハの理想的な加熱温度に近づけるように温度制御する特徴を有する。

[0037] 実施形態の換算部 110 における算出課程は以下のとおりである。温度 T_w 、放射率 ε_w の計測対象物であるシリコンウェハからの放射輝度 (I_w) は式 (1) として示され、温度 T_d 、放射率 ε_d の石英から形成されるチャンバ窓部 18 からの放射輝度 (I_d) は式 (2) として示される。温度計測用パイロメータの計測波長に依存した放射輝度は、下記の 2 つの放射輝度の合成である。式中、 λ はパイロメータ (温度計測部 21) のモニタリング波長であり、 $3.4 \mu m$ である。以降の式中の「 $C1$ 」は hc^2 であり、 $C2$ は hc である。 h はプランク定数、 c は光速である。

[0038] [数1]

$$I_w = \varepsilon_w \left(\frac{2C1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda(T_w + 273.15)}\right) - 1} \right) \quad \dots (1)$$

[0039] [数2]

$$I_d = \varepsilon_d \left(\frac{2C1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda(T_d + 273.15)}\right) - 1} \right) \quad \dots (2)$$

[0040] 石英から形成されるチャンバ窓部 18 の温度変動 (ΔT_d) による放射輝度変動 (ΔI_d) は式 (3) となる。式 (2) と式 (3) から式 (4) が導出される。

[0041] [数3]

$$I_d + \Delta I_d = \varepsilon_d \left(\frac{2C1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda(T_d + \Delta T_d + 273.15)}\right) - 1} \right) \quad \dots (3)$$

[0042]

[数4]

$$\Delta I_d = \varepsilon_d \frac{2C_1}{\lambda^5} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_d + \Delta T_d + 273.15)}\right) - 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_d + 273.15)}\right) - 1} \right) \dots (4)$$

[0043] 式(4)の ΔI_d により、見かけ上のシリコンウェハの温度変化について、 ΔT_w による放射輝度 $I_w(T_w + \Delta T_w)$ との関係は式(5)として表される。また、実際にシリコンウェハ温度が $T_w + \Delta T_w$ の時の放射輝度は式(6)として表される。

[0044] [数5]

$$\begin{aligned} I_w(T_w + \Delta T_w) &= I_w + \Delta I_d \\ &= \frac{2C_1}{\lambda^5} \left(\frac{\varepsilon_w}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_w + 273.15)}\right) - 1} + \frac{\varepsilon_d}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_d + \Delta T_d + 273.15)}\right) - 1} - \frac{\varepsilon_d}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_d + 273.15)}\right) - 1} \right) \dots (5) \end{aligned}$$

[0045] [数6]

$$I_w(T_w + \Delta T_w) = \varepsilon_w \left(\frac{2C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_w + \Delta T_w + 273.15)}\right) - 1} \right) \dots (6)$$

[0046] ΔT_d と ΔT_w の関係は式(7)から求められる。

[0047] [数7]

$$\begin{aligned} &\varepsilon_w \left(\frac{2C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_w + \Delta T_w + 273.15)}\right) - 1} \right) \\ &= \frac{2C_1}{\lambda^5} \left(\frac{\varepsilon_w}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_w + 273.15)}\right) - 1} + \frac{\varepsilon_d}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_d + \Delta T_d + 273.15)}\right) - 1} - \frac{\varepsilon_d}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda(T_d + 273.15)}\right) - 1} \right) \dots (7) \end{aligned}$$

[0048] 式(8)以降は、式(7)の計算をさらに進めた式変形である。式(8)、式(9)、式(10)は式(7)の右辺側を簡略化する置換である。式(11)について、式(12)ないし式(16)の順に変形することにより、式(17)を得ることができる。

[0049]

[数8]

$$A = \exp\left(\frac{C2}{\lambda(Tw+273.15)}\right) \cdot \cdot \cdot (8)$$

[0050] [数9]

$$B = \exp\left(\frac{C2}{\lambda(Td+\Delta Td+273.15)}\right) \cdot \cdot \cdot (9)$$

[0051] [数10]

$$C = \exp\left(\frac{C2}{\lambda(Td+273.15)}\right) \cdot \cdot \cdot (10)$$

[0052] [数11]

$$\varepsilon_w \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda(Tw+\Delta Tw+273.15)}\right) - 1} \right) = \frac{\varepsilon_w}{A-1} + \frac{\varepsilon_d}{B-1} - \frac{\varepsilon_d}{C-1} \cdot \cdot \cdot (11)$$

[0053] [数12]

$$\frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda(Tw+\Delta Tw+273.15)}\right) - 1} = \frac{1}{A-1} + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_w} \left(\frac{1}{B-1} - \frac{1}{C-1} \right) \cdot \cdot \cdot (12)$$

[0054] [数13]

$$\exp\left(\frac{C2}{\lambda(Tw+\Delta Tw+273.15)}\right) - 1 = \frac{1}{\frac{1}{A-1} + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_w} \left(\frac{1}{B-1} - \frac{1}{C-1} \right)} \cdot \cdot \cdot (13)$$

[0055] [数14]

$$\frac{C2}{\lambda(Tw+\Delta Tw+273.15)} = \text{LN}\left(\frac{1}{\frac{1}{A-1} + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_w} \left(\frac{1}{B-1} - \frac{1}{C-1} \right)} + 1\right) \cdot \cdot \cdot (14)$$

[0056]

[数15]

$$\frac{\lambda(T_w + \Delta T_w + 273.15)}{C2}$$

$$= \frac{1}{\text{LN}\left(\frac{1}{\frac{1}{A-1} + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_w}\left(\frac{1}{B-1} - \frac{1}{C-1}\right)} + 1\right)} \cdot \cdot \cdot (15)$$

[0057] [数16]

$$\frac{\lambda(T_w + \Delta T_w + 273.15)}{C2}$$

$$= \frac{1}{\text{LN}\left(\frac{1}{\frac{1}{A-1} + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_w}\left(\frac{1}{B-1} - \frac{1}{C-1}\right)} + 1\right)} \cdot \cdot \cdot (16)$$

[0058] [数17]

$$\Delta T_w = \frac{C2}{\lambda} \frac{1}{\text{LN}\left(\frac{1}{\frac{1}{A-1} + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_w}\left(\frac{1}{B-1} - \frac{1}{C-1}\right)} + 1\right)} - (T_w + 273.15) \cdot \cdot \cdot (17)$$

[0059] 最終的に、式（17）から見かけ上のシリコンウェハの温度変化量の ΔT_w が求められる。このように、実施形態の温度計測装置1及びウェハ製造装置2においては、温度計測部21を用いる石英から形成されるチャンバ窓部18を介在させた温度計測状態であっても、チャンバ窓部18の放射輝度の影響を除外して計測対象物であるシリコンウェハの温度変化の把握が可能となる。

[0060] チャンバ窓部18の温度変化と計測対象物であるシリコンウェハの温度変化との相関性について計算すると、図6のグラフとなる。

[0061] 横軸はチャンバ窓部18における温度変化量（℃）であり、縦軸はシリコンウェハ14における見かけ上の温度変化量（℃）である。双方の相関性は

極めて高く（ほぼ直線として近似できる）、当該加熱条件における換算データとして機能する。

[0062] 当該加熱条件において、シリコンウェハの温度 T_w は 1100°C 、チャンバ窓部の温度 T_d は 550°C 、シリコンウェハの放射率 ε_w は 0.6 、チャンバ窓部の放射率 ε_d は 0.95 、式（８）に関し $A-1$ は 20.8 、式（１０）に関し $C-1$ は 169.9 とした。なお、他のシリコンウェハの温度、チャンバ窓部の温度の実証においても、同様の高い相関性が見られる。

[0063] チャンバ窓部の温度に基づいてシリコンウェハの温度の補正を行う場合、温度計測部（第１温度計測部）２１とは別に設置された温度計測部（第２温度計測部）２２の計測結果に基づいて、シリコンウェハの設定温度に対し、石英のチャンバ窓部１８の基準となる温度が決められる。石英のチャンバ窓部１８の温度の実測結果と同窓部の基準温度の差が算出される。そこで、直線回帰（一次相関）に基づいた係数によりシリコンウェハの温度は補正される。

[0064] 実際の設備・材料では、放射率（ ε_d 、 ε_w ）のばらつき、チャンバ等の設備毎のばらつきが不可避である。そのため、チャンバ窓部の温度補正の値に変動が生じると想定される。この点を踏まえ、信頼できる数の数の実際の製造段階におけるプロセスランニング時の温度計測のデータを基礎として、チャンバ窓部の基準温度が決定される。その上で、計算に基づいて求めた補正值に、係数を乗じて調整が行われる。なお、シリコンウェハの基準温度には、制御したい設定温度が該当する。

[0065] 温度補正は、図６に示される近似的に一次相関（直線回帰）の換算式が用いられる。一次相関（直線回帰）の係数の決定に際しては、予め計算により決定した値により補正が可能な状態に設定される。当該状態において、温度計測部２１（第１温度計測部）によりシリコンウェハの温度を一定に維持する制御をしながら調温部の速度（風速）を変化させてチャンバ窓部の温度を変化させながら、加熱部（ハロゲンランプ）の総出力をモニタリングして総出力に変動が無いように補正係数が決まればよい。総出力に変動が見られる

場合、総出力の変動が低減するように、設定した補正值に乗ずる係数が調整され、最終的に総出力の変動が最も小さくなる係数が見出される。あるいは、出力一定の状態で、調温部（ブロー、ファン）の速度（つまり風量）を意図的に変化させてチャンバ窓部の温度が変化しても、シリコンウェハの温度が変化しないように、補正する係数が決定されても良い。

[0066] 図6のグラフにおいて、横軸のチャンバ窓部18における温度変化量（℃）を「 ΔT_w 」とし、縦軸のシリコンウェハ14における温度変化量（℃）を「 ΔT_d 」とすると、直線回帰から、「 $\Delta T_w = a \times \Delta T_d$ 」の式として表現される。 a は係数である。 a は、調温部（ブロー）の風速を変化させた際に、総出力の変動が無くなるように設定される。

[0067] 一連の説明のとおり、換算データを用いて温度計測部21の検出値から算出される実測温度を補正して計測対象物であるシリコンウェハの温度変化の推定が可能となった。そこで、実施形態の温度計測装置1、特にウェハ製造装置2にあっては、演算部101に加温度制御部150が備えられる。温度制御部150は、温度補正部140において推定される計測対象物であるシリコンウェハ14の温度を制御する。

[0068] これより、図7のフローチャートを用い、実施形態の温度計測装置1、ウェハ製造装置2のコンピュータ10（演算部101）における温度計測プログラムを説明する。温度計測方法は、温度計測プログラムに基づいて、コンピュータ10の演算部101（演算素子）により実行される。

[0069] 温度計測プログラムは、図2のコンピュータ10に対して、換算機能、条件取得機能、検出値取得機能、温度補正機能、さらには温度制御機能等を実行させる。説明を省略するものの、出力機能等の装置上必要な機能も当然に含まれて実行される。各機能は前述の温度計測装置1の説明と重複するため、詳細は省略する。

[0070] 図7のフローチャートより、コンピュータ10の演算部101（演算素子）の処理は、換算ステップ（S110）、条件取得ステップ（S120）、検出値取得ステップ（S130）、温度補正ステップ（S140）、温度制

御ステップ（S 1 5 0）の各種ステップを備える。むろん、コンピュータ 1 0 自体の可動に必要な各種ステップは当然に含まれる。

[0071] 換算機能は、温度計測部 2 1 の検出値から算出される実測温度より、チャンバ窓部 1 8 の温度変化量に対応する、チャンバ 1 1 内にて加熱される計測対象物（シリコンウェハ 1 4）の温度変化量の換算データを生成する（S 1 1 0；換算ステップ）。条件取得機能は、チャンバ 1 1 内における計測対象物（シリコンウェハ 1 4）に対する加熱条件を取得する（S 1 2 0；条件取得ステップ）。検出値取得機能は、温度計測部 2 1 の検出値を取得する（S 1 3 0；検出値取得ステップ）。温度補正機能は、換算データを用いて温度計測部 2 1 の検出値から算出される実測温度を補正して計測対象物（シリコンウェハ 1 4）の温度を推定する（S 1 4 0；温度補正ステップ）。さらに、温度制御を必要とする装置構成の場合、温度制御機能が付加される。温度制御機能は、温度補正部 1 4 0 において推定される計測対象物（シリコンウェハ 1 4）の温度に基づいて加熱部 2 5, 2 6, 2 7, 2 8 の出力を制御する（S 1 5 0；温度制御ステップ）。

[0072] 上述した本発明のコンピュータプログラムは、プロセッサが読み取り可能な記録媒体に記録されていてよく、記録媒体としては、「一時的でない有形の媒体」、例えば、ディスク、カード、半導体メモリ、プログラマブルな論理回路などを用いることができる。

[0073] なお、上記コンピュータプログラムは、例えば、ActionScript、JavaScript（登録商標）などのスクリプト言語、Objective-C、Java（登録商標）などのオブジェクト指向プログラミング言語、HTML5などのマークアップ言語などを用いて実装できる。

実施例

[0074] 発明者らは、前述の実施形態にて開示の温度計測装置、温度計測方法、温度計測プログラムを駆使し、実際に温度計測装置（パイロメータ）を備えるウェハ製造装置においてシリコンウェハに対してエピタキシャル成長を実行し、計測した。そして、実施形態の温度計測装置（方法、プログラム）の有

効性を検証した。

[0075] 図8と図9は、前述の計算式より導出される各数値に基づき、図6の直線回帰（「 $\Delta T_w = a \times \Delta T_d$ 」）の式として表現される「係数a」を変更した際の温度計測値の結果である。図8、図9において、共に（a）は第1温度計測部の計測温度と調温部の速度を示すグラフである（横軸：時刻、左縦軸：温度（℃）、右縦軸：温度（K））。また、図8、図9において、（b）第1温度計測部の計測温度と第2温度計測部の計測温度を示すグラフである（横軸：時刻、左縦軸：温度（℃）、右縦軸：温度（℃））。

[0076] 図8（a）より、調温部（ブロー）の速度は段階的に減少すると、係数補正を行っていない第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）の計測温度（いわゆる見かけの温度）は上昇する。つまり、調温部（ブロー）の可動が弱くなると（風量低下すると）、風冷効果が下がり、温度上昇となる。図8（b）より、第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）の計測温度は、調温部の速度の変化に伴って変化するチャンバ窓部（石英ドーム）の温度変化に対応している。なお、図9（a）、図9（b）も同様のグラフの変化である。

[0077] ここで、図8は係数を0.2に調整した際の結果である。図8（a）、（b）中の破線枠囲みの箇所は、第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）のパイロメータの計測値に補正を試みた時点の温度の値である。図8（a）では、調温部（ブロー）の速度に依存せず、各補正時点ではほぼ一定の温度値を示した。また、図8（b）では、第2温度計測部（チャンバ窓部計測用）（石英ドーム計測用）の温度値の変化に影響されることなく、各補正時点ではほぼ一定の温度値を示した。

[0078] 図8の状況と比較して、図9は係数を0.1に調整した際の結果である。図9（a）、（b）中の破線枠囲みの箇所は、第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）のパイロメータの計測値に補正を試みた時点の温度の値である。図9（a）では、調温部（ブロー）の速度に連動（速度低下）してチャンバの温度は変化（温度上昇）している。そこで、チャンバの温度に連動して各補正時点での温度値は上昇した。図9（b）では、第2温度計測部（チャ

ンバ窓部計測用）（石英ドーム計測用）の温度値の変化（温度上昇）に影響されて、各補正時点の温度値が上昇した。図9の係数値の条件によると、チャンバ（石英ドーム）の温度変化が、その内部のシリコンウェハの温度を計測する際に与える影響を排除しきれていない。

[0079] 従って、図8と図9のグラフの比較から、チャンバ（石英ドーム）の内部にて加熱されるシリコンウェハの温度を第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）のパイロメータを通じて測定する際、適切な係数値の選択により、チャンバ（石英ドーム）の温度値等の影響を軽減して、より正確な温度値を算出することができた。

[0080] 図10のグラフのうち、上段は第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）のパイロメータによる温度計測値と、第2温度計測部（チャンバ窓部計測用）（石英ドーム計測用）の温度計測値の時系列変化の様子である。そして、下段は第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）のパイロメータによる温度計測値と、加熱部の出力値（kW）の時系列変化の様子である。ここで、図の左方向は第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）について前述の補正機能を作動させたときのグラフ波形であり、図面中央から右側は、同第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）について前述の補正機能を停止させたときのグラフ波形である。

[0081] 実際のシリコンウェハのエピタキシャル成長のプロセスにおいて、チャンバ（石英ドーム）の温度はプロセス温度の昇降温に伴って変化する。補正機能を停止の場合（作動させない）、シリコンウェハの温度が安定した後もチャンバ（石英ドーム）の温度変化に伴い、加熱出力が減少した（下段の右側の斜め破線参照）。この現象は、チャンバ（石英ドーム）の温度の温度上昇に伴い、実際のシリコンウェハの温度よりも当該シリコンウェハを測定している放射温度計（パイロメータ）の測定温度が見かけ上高くなる。すると、シリコンウェハの見かけ上の温度上昇を受けて加熱部の出力が低下する。そうすると、実際は加熱部の出力を維持ないし向上させる必要があるにも関わらず、逆にシリコンウェハに加えられる熱量が低下する問題が生じる。

[0082] このような問題に対し、第2温度計測部（チャンバ窓部計測用）（石英ドーム計測用）の温度計測値を踏まえながら、第1温度計測部（シリコンウェハ計測用）の温度計測値に対して補正機能が作動することにより、チャンバ（石英ドーム）の温度変化の影響を軽減し、その内部のシリコンウェハのみを正確に推定して必要な加熱を行うことができる。図10の下段の左側の破線のとおり、補正機能作動中では、加熱出力は一定に保てれていることから明らかである。

符号の説明

- [0083]
- 1 温度計測装置
 - 2 ウェハ製造装置
 - 4 ディスプレイ（モニタ）
 - 10 コンピュータ
 - 11 チャンバ
 - 12 チャンバ下部
 - 13 サセプタ
 - 14 シリコンウェハ
 - 18 チャンバ窓部
 - 21 温度計測部（第1温度計測部）
 - 22 温度計測部（第2温度計測部）
 - 23 調温部
 - 25, 26, 27, 28 加熱部
 - 101 演算部
 - 102 ROM
 - 103 RAM
 - 104 記憶部
 - 105 I/O
 - 110 換算部
 - 120 条件取得部

1 3 0 検出値取得部

1 4 0 温度補正部

1 5 0 温度制御部

請求の範囲

- [請求項1] 計測対象物を内部に収容するエピタキシャル成長装置のチャンバと、前記計測対象物を加熱する加熱部と、前記計測対象物と対向する前記チャンバの位置に備えられるチャンバ窓部と、前記エピタキシャル成長装置の前記チャンバ窓部の外部に設置され前記チャンバ窓部を介しての前記計測対象物の温度計測と前記チャンバ窓部の温度計測をする温度計測部と、前記温度計測部の検出値から前記計測対象物の温度を算定する演算部と、を備え、
- 前記演算部は、
- 前記温度計測部の検出値から算出される実測温度より、前記チャンバ窓部の温度変化量に対応する、前記チャンバ内にて加熱される前記計測対象物の温度変化量の換算データを生成する換算部と、
- 前記チャンバ内における前記計測対象物に対する加熱条件を取得する条件取得部と、
- 前記温度計測部の検出値を取得する検出値取得部と、
- 前記換算データを用いて前記温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正して前記計測対象物の温度を推定する温度補正部と、
- を備えることを特徴とする温度計測装置。
- [請求項2] 前記換算部は、
- 前記温度計測部の検出値から算出される実測温度の実測温度変化量から、前記チャンバ窓部に起因する放射輝度量の影響を除外して前記計測対象物の対象温度変化量を推定し、
- 前記実測温度変化量と前記対象温度変化量との間の相関関係から前記換算データを生成する請求項1に記載の温度計測装置。
- [請求項3] 前記加熱部は前記チャンバの外部に備えられ、
- 前記演算部は、
- 前記温度補正部において推定される前記計測対象物の温度に基づいて前記加熱部の出力を制御する温度制御部を備える請求項1に記載

の温度計測装置。

[請求項4] 前記計測対象物はシリコンウェハである請求項1に記載の温度計測装置。

[請求項5] 前記チャンバ窓部は石英からなる請求項1に記載の温度計測装置。

[請求項6] 前記チャンバの外部に前記チャンバを冷却する調温部が備えられる請求項1に記載の温度計測装置。

[請求項7] 計測対象物を内部に収容するエピタキシャル成長装置のチャンバと、前記計測対象物を加熱する加熱部と、前記計測対象物と対向する前記チャンバの位置に備えられるチャンバ窓部と、前記エピタキシャル成長装置の前記チャンバ窓部の外部に設置され前記チャンバ窓部を介しての前記計測対象物の温度計測と前記チャンバ窓部の温度計測をする温度計測部と、前記温度計測部の検出値から前記計測対象物の温度を算定する演算部と、を備える温度計測装置における温度計測方法であって、

前記演算部は、

前記温度計測部の検出値から算出される実測温度より、前記チャンバ窓部の温度変化量に対応する、前記チャンバ内にて加熱される前記計測対象物の温度変化量の換算データを生成する換算ステップと、

前記チャンバ内における前記計測対象物に対する加熱条件を取得する条件取得ステップと、

前記温度計測部の検出値を取得する検出値取得ステップと、

前記換算データを用いて前記温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正して前記計測対象物の温度を推定する温度補正ステップと、を実行する

ことを特徴とする温度計測方法。

[請求項8] 計測対象物を内部に収容するエピタキシャル成長装置のチャンバと、前記計測対象物を加熱する加熱部と、前記計測対象物と対向する前記チャンバの位置に備えられるチャンバ窓部と、前記エピタキシャル

成長装置の前記チャンバ窓部の外部に設置され前記チャンバ窓部を介しての前記計測対象物の温度計測と前記チャンバ窓部の温度計測をする温度計測部と、前記温度計測部の検出値から前記計測対象物の温度を算定する演算部と、を備える温度計測装置における温度計測プログラムであって、

前記演算部は、

前記温度計測部の検出値から算出される実測温度より、前記チャンバ窓部の温度変化量に対応する、前記チャンバ内にて加熱される前記計測対象物の温度変化量の換算データを生成する換算機能と、

前記チャンバ内における前記計測対象物に対する加熱条件を取得する条件取得機能と、

前記温度計測部の検出値を取得する検出値取得機能と、

前記換算データを用いて前記温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正して前記計測対象物の温度を推定する温度補正機能と、を実現する

ことを特徴とする温度計測プログラム。

[請求項9]

シリコンウェハを内部に収容するエピタキシャル成長装置のチャンバと、

前記シリコンウェハを加熱する加熱部と、

前記シリコンウェハと対向する前記チャンバの位置に備えられる石英からなるチャンバ窓部と、

前記エピタキシャル成長装置の前記チャンバ窓部の外部に設置され前記チャンバ窓部を介しての前記計測対象物の温度計測と前記チャンバ窓部の温度計測をする温度計測部と、

前記温度計測部の検出値から前記シリコンウェハの温度を算定する演算部と、を備え、

前記演算部は、

前記温度計測部の検出値から算出される実測温度より、前記チャ

ンバ窓部の温度変化量に対応する、前記チャンバ内にて加熱される前記シリコンウェハの温度変化量の換算データを生成する換算部と、

前記チャンバ内における前記シリコンウェハに対する加熱条件を取得する条件取得部と、

前記温度計測部の検出値を取得する検出値取得部と、

前記換算データを用いて前記温度計測部の検出値から算出される実測温度を補正して前記シリコンウェハの温度を推定する温度補正部と、を備える

ことを特徴とするウェハ製造装置。

[請求項10] 前記加熱部は前記チャンバの外部に備えられ、

前記演算部は、

前記温度補正部において推定される前記計測対象物の温度に基づいて前記加熱部の出力を制御する温度制御部を備える請求項9に記載のウェハ製造装置。

[請求項11] 前記チャンバの外部に前記チャンバを冷却する調温部が備えられる請求項9に記載のウェハ製造装置。

[請求項12] 前記調温制御部はフィードバック制御を行う請求項10に記載のウェハ製造装置。