

(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
2024年11月28日(28.11.2024)



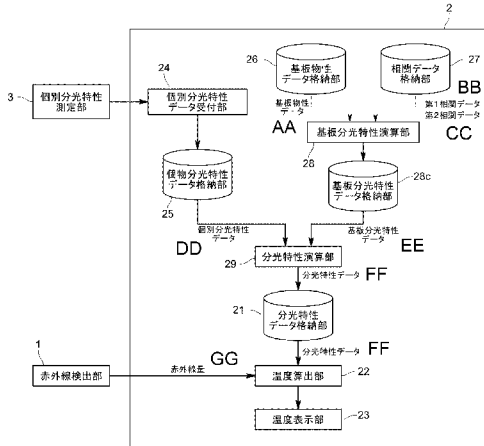
(10) 国際公開番号
WO 2024/241674 A1

- (51) 国際特許分類:
G01J 5/70 (2022.01) G01J 5/60 (2006.01)
G01J 5/00 (2022.01) H01L 21/66 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2024/010200
- (22) 国際出願日: 2024年3月15日(15.03.2024)
- (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 2023-085975 2023年5月25日(25.05.2023) JP
特願 2023-149273 2023年9月14日(14.09.2023) JP
- (71) 出願人: 株式会社堀場製作所(HORIBA, LTD.) [JP/JP]; 〒6018510 京都府京都市南区吉祥院宮の東町2番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 藤野 翔(FUJINO, Sho); 〒6018510 京都府京都市南区吉祥院宮の東町2番地 株式会社堀場製作所内 Kyoto (JP). 富永 浩二(TOMINAGA, Koji); 〒6018510 京都府京都市南区吉祥院宮の東町2番地 株式会社堀場製作所内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 西村 竜平, 外(NISHIMURA, Ryuhei et al.); 〒6008441 京都府京都市下京区四条町3 4 7番地1 CUBE西烏丸9階 Kyoto (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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,

(54) Title: RADIATION TEMPERATURE MEASUREMENT DEVICE, RADIATION TEMPERATURE MEASUREMENT METHOD, AND PROGRAM FOR RADIATION TEMPERATURE MEASUREMENT DEVICE

(54) 発明の名称: 放射温度測定装置、放射温度測定方法及び放射温度測定装置用プログラム

[図3]



- 1 Infrared detection unit
- 3 Individual spectral characteristic measurement unit
- 21 Spectral characteristic data storage unit
- 22 Temperature calculation unit
- 23 Temperature display unit
- 24 Individual spectral characteristic data reception unit
- 25 Individual spectral characteristic data storage unit
- 26 Substrate physical property data storage unit
- 27 Correlation data storage unit
- 28 Substrate spectral characteristic calculation unit
- 28C Substrate spectral characteristic data storage unit
- 29 Spectral characteristic calculation unit
- AA Substrate physical property data
- BB First correlation data
- CC Second correlation data
- DD Individual spectral characteristic data
- EE Substrate spectral characteristic data
- FF Spectral characteristic data
- GG Infrared ray amount

(57) Abstract: Provided is a radiation temperature measurement device that measures the temperature of an object-to-be-measured having a substrate and a thin film formed on the surface of the substrate, wherein the radiation temperature measurement device comprises: an infrared detection unit that detects the amount of infrared rays radiated from the object-to-be-measured; a substrate spectral characteristic data storage unit that stores substrate spectral characteristic data indicating the temperature characteristics of the spectral characteristics of the substrate; an individual spectral characteristic data reception unit that receives an input of individual spectral characteristic data indicating information pertaining to the reflectance and transmittance of the object-to-be-measured at a prescribed temperature; a spectral characteristic calcu-

WO 2024/241674 A1

CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア(AM, AZ, BY, KG, KZ, 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, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

lution unit that calculates the temperature characteristics of the spectral characteristics of the object-to-be-measured on the basis of the substrate spectral characteristic data and the individual spectral characteristic data; and a temperature calculation unit that calculates the temperature of the object-to-be-measured on the basis of the amount of infrared rays detected by the infrared detection unit and the temperature characteristics of the spectral characteristics of the object-to-be-measured calculated by the spectral characteristic calculation unit.

- (57) 要約: 基板と、当該基板の表面に形成された薄膜とを有する測定対象物の温度を測定するものであって、前記測定対象物から放射される赤外線量を検出する赤外線検出部と、前記基板の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データが格納された基板分光特性データ格納部と、前記測定対象物の所定温度における反射率及び透過率に関する情報を示す個別分光特性データの入力を受け付ける個別分光特性データ受付部と、前記基板分光特性データと前記個別分光特性データとに基づいて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する分光特性演算部と、前記赤外線検出部が検出した赤外線量と、前記分光特性演算部が算出した前記測定対象物の分光特性の温度特性とに基づいて、前記測定対象物の温度を算出する温度算出部とを備える放射温度測定装置。

明 細 書

発明の名称：

放射温度測定装置、放射温度測定方法及び放射温度測定装置用プログラム

技術分野

[0001] 本発明は、測定対象領域から出る赤外線を検出する赤外線センサ（例えばサーモパイル）で受光し、その受光した赤外線量によって、該測定対象領域の温度を測定する非接触式の放射温度測定装置、放射温度測定方法及び放射温度測定装置用プログラムに関するものである。

背景技術

[0002] 従来、測定対象領域から出る赤外線を検出する赤外線センサ（例えばサーモパイル）で検出し、その検出した赤外線量によって、測定対象領域の温度を測定する非接触式の放射温度測定装置が考えられている。

[0003] この放射温度測定装置では、測定対象領域から放射される赤外線のみならず、その背後から透過する赤外線を検出することにより、測定対象領域の温度を精度良く測定することが難しいことがある。

[0004] このような問題点を解消するものとして、特許文献1には、検出する赤外線波長帯域が互いに異なる2つの赤外線検出部を有し、これら2つの赤外線検出部により検出された赤外線量に基づいて、測定対象領域の温度を算出する放射温度測定装置が記載されている。

[0005] 具体的には、以下のようにして、測定対象領域の温度を算出している。

測定対象領域から赤外線検出部に入射する所定波長帯域の赤外線の総量は、測定対象領域からの赤外線A1と、その背後からの赤外線A2と、測定対象領域で反射した赤外線A3との和である。赤外線検出部と測定対象領域とが正対している場合には、A3は赤外線検出部からの赤外線であるため既知となる。したがって、A1とA2との比Rは、 $R = A1 / A2$ 、つまり、測定対象領域の放射率／透過率となる。

[0006] 2つの赤外線検出部において検出する赤外線波長帯域が異なるので、A1

とA2との比Rは、各赤外線検出器においてR1、R2となる。したがって、一方の赤外線検出部により検出された赤外線量及び他方の赤外線検出部により検出された赤外線量と、前記各波長帯域での既知の比R1及びR2とから、連立方程式又は2分法などを用いて、測定対象領域の温度を算出することができる。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：国際公開第2021/080002号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] しかしながら、上述した放射温度測定装置では、測定対象物の各波長帯域での比R1、R2は、温度測定の開始前に予め求めておく必要がある。測定対象物が、半導体製造で用いられるシリコンウエハのように基板の表面に薄膜が形成されているものである場合には、薄膜の材質及び膜厚によってその分光特性の温度特性は変化する。そのため、分光特性の温度特性を実際に取得するには、材質及び膜厚が異なるサンプル毎に複数温度での分光特性の測定が必要となり、測定対象物の温度測定の事前準備に膨大な時間がかかってしまうことがある。

[0009] 本発明は上述した課題に鑑みてなされたものであって、その主たる初期課題は、基板の表面に薄膜が形成されてなる測定対象物の温度を測定する放射温度測定装置において、温度測定前に行う測定対象物の分光特性の温度特性の取得にかかる時間を短縮することである。

課題を解決するための手段

[0010] 上記課題を解決すべく本発明者らが鋭意検討した結果、例えばシリコン基板の表面に薄膜が形成された半導体ウエハ等においては、基板自体の分光特性は温度依存性を有しているものの、基板の表面に形成される薄膜自体の分光特性の温度依存性は温度によらず一定とみなせるほどに小さいことに着目

した。そしてさらに鋭意検討を進めた結果、基板自体の分光特性の温度依存性さえ予め準備しておけば、任意の1点の温度における測定対象物の分光特性を測定するだけで薄膜自体の分光特性を推定することができ、これにより測定対象物の各温度における分光特性を推定できることを見出し、本発明に至った。

[0011] すなわち本発明に係る放射温度測定装置は、基板と、当該基板の表面に形成された薄膜とを有する測定対象物の温度を測定するものであって、前記測定対象物から放射される赤外線量を検出する赤外線検出部と、前記基板の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データが格納された基板分光特性データ格納部と、前記測定対象物の所定温度における反射率及び透過率に関する情報を示す個別分光特性データの入力を受け付ける個別分光特性データ受付部と、前記基板分光特性データと前記個別分光特性データとに基づいて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する分光特性演算部と、前記赤外線検出部が検出した赤外線量と、前記分光特性演算部が算出した前記測定対象物の分光特性の温度特性とに基づいて、前記測定対象物の温度を算出する温度算出部とを備えることを特徴とする。

[0012] このような構成であれば、ユーザは、所定温度における測定対象物の反射率と透過率を測定し、これらの測定結果を入力さえすれば、当該所定温度における測定対象物の反射率と透過率と、基板自体の分光特性の温度特性とに基づいて測定対象物の分光特性の温度特性が算出されるので、従来のように、材質及び膜厚が異なるサンプル毎に複数温度での分光特性の測定を行う必要がなく、測定対象物の温度測定の事前準備にかかる時間を大幅に短縮することができる。

[0013] 前記放射温度測定装置の具体的な実施の態様としては、前記分光特性演算部が、前記基板分光特性データが示す前記基板の分光特性の温度特性と、前記個別分光特性データが示す前記所定温度における前記測定対象物の反射率及び透過率とに基づいて、前記薄膜の所定温度における反射率及び透過率を算出し、当該算出した前記薄膜の所定温度における反射率及び透過率と、前

記基板分光特性データが示す前記基板の分光特性の温度特性とを用いて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出するものが望ましい。

[0014] また本発明者らがさらに検討したところ、基板自体の分光特性の温度依存性は基板の物性情報（例えば電気抵抗率）を用いることで実験則から簡単に算出できることを見出した。特に、基板の電気抵抗率（又は不純物濃度）と、屈折率及び消衰係数との間には密接な相関関係があり、この相関を利用することで、基板の電気抵抗率に基づいて、基板自体の分光特性の温度特性を算出できることを見出した。

そこで前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出するための前記放射温度測定装置の具体的態様としては、前記基板の物性に関する情報を示す基板物性データを記憶する基板物性データ格納部と、前記基板の電気抵抗率と温度と屈折率との相関を示す第1相関データと、前記基板の電気抵抗率と温度と消衰係数との相関を示す第2相関データとを格納する相関データ格納部と、前記基板物性データが示す前記基板の電気抵抗率と、前記第1相関データが示す相関と、前記第2相関データが示す相関とに基づいて、前記基板の分光特性の温度特性を算出する基板分光特性演算部とを更に備えるものが望ましい。

このようなものであれば、第1相関データと第2相関データを予め記憶しておけば、ユーザは基板の電気抵抗率（又は不純物濃度）を入力することで、基板の分光特性の温度特性を取得することができる。これにより、基板の分光特性の温度特性の情報が予め準備されていなくても、ユーザは簡単にその情報を取得することができる。

[0015] 本発明の放射温度測定装置は、チャンバに収容された前記測定対象物の温度を測定するものであることが考えられる。この構成の場合には、チャンバの影響により放射温度に誤差が生じてしまう。

この問題を解決するためには、前記放射温度測定装置は、チャンバに収容された前記測定対象物の温度を測定するものであり、前記温度算出部は、前記チャンバに起因する温度補正パラメータを用いて前記測定対象物の温度を

補正するのが好ましい。

- [0016] 前記測定対象物の背後から透過する赤外線の影響をキャンセルするための具体的な実施の態様としては、前記放射温度測定装置は、前記赤外線検出部が、波長帯が互いに異なる第1検知赤外線波長帯と第2検知赤外線波長帯のそれぞれにおいて前記測定対象物からの赤外線量を検出する第1赤外線検出部と第2赤外線検出部を備えており、前記温度算出部が、前記各赤外線検出部が検出した各赤外線量に基づいて、前記測定対象物の温度を算出することが望ましい。
- [0017] 放射温度測定装置の構成をコンパクトにするには、前記第1赤外線検出部と前記第2赤外線検出部間で、前記測定対象物から放出される赤外線を集光するための光学系が共通化されているのが好ましい。
- [0018] また前記放射温度測定装置の具体的な実施の態様としては、前記基板が単結晶材料からなるウエハであり、前記薄膜がSiO₂膜又はSiN膜を含むものであるのが望ましい。
- [0019] また本発明の放射温度測定方法は、基板と、当該基板の表面に形成された薄膜とを有する測定対象物の温度を測定する方法であって、前記測定対象物から放射される赤外線量を検出する赤外線検出ステップと、前記基板の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データを格納する基板分光特性データ格納ステップと、前記測定対象物の所定温度における反射率及び透過率に関する情報を示す個別分光特性データの入力を受け付ける個別分光特性データ受付ステップと、前記基板分光特性データと前記個別分光特性データとに基づいて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する分光特性演算ステップと、検出した前記赤外線量と、算出した前記測定対象物の分光特性の温度特性とに基づいて、前記測定対象物の温度を算出する温度算出ステップとを含むことを特徴とする。
- [0020] また本発明の放射温度測定装置用のプログラムは、基板と、当該基板の表面に形成された薄膜とを有する測定対象物の温度を測定する放射温度測定装置用のプログラムであって、前記測定対象物から放射される赤外線量を検出

する赤外線検出部と、前記基板の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データが格納された基板分光特性データ格納部と、前記測定対象物の所定温度における反射率及び透過率に関する情報を示す個別分光特性データの入力を受け付ける個別分光特性データ受付部と、前記基板分光特性データと前記個別分光特性データとに基づいて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する分光特性演算部と、前記赤外線検出部が検出した赤外線量と、前記分光特性演算部が算出した前記測定対象物の分光特性の温度特性とに基づいて、前記測定対象物の温度を算出する温度算出部としての機能をコンピュータに発揮させることを特徴とする。

[0021] このような、放射温度測定方法及び放射温度測定装置用プログラムであれば、上記した本発明の放射温度測定装置と同様の効果を奏し得る。

発明の効果

[0022] このように構成した本発明によれば、基板の表面に薄膜が形成されてなる測定対象物の温度を測定する放射温度測定装置において、温度測定前に行う測定対象物の分光特性の温度特性の取得にかかる時間を短縮することができる。

図面の簡単な説明

[0023] [図1]本実施形態における放射温度測定装置の全体構成を模式的に示す図。
[図2]同実施形態の赤外線検出部の構成を模式的に示す図。
[図3]同実施形態の放射温度測定装置の機能ブロック図。
[図4]同実施形態の個別分光特性測定部の構成を模式的に示す図。
[図5]基板の電気抵抗率と屈折率と温度との関係の一例を示す図。
[図6]基板の電気抵抗率と消衰係数と温度との関係の一例を示す図。
[図7]同実施形態の測定対象物における光の反射率及び透過率を説明する図。
[図8]他の実施形態の放射温度測定装置の機能ブロック図。
[図9]他の実施形態の放射温度測定装置の機能ブロック図。
[図10]他の実施形態の赤外線検出部の構成を模式的に示す図。
[図11]他の実施形態の赤外線検出部の構成を模式的に示す図。

[図12]他の実施形態の個別分光特性測定部の測定方法を説明する図。

[図13]一実施形態における温度算出部の演算原理を説明する図。

[図14]一実施形態における温度算出部の演算原理を説明する図。

[図15]一実施形態における温度算出部の演算原理を説明する図。

発明を実施するための形態

[0024] 以下、本発明の放射温度測定装置の一実施形態について図面を参照しながら説明する。

[0025] 本実施形態の放射温度測定装置100は、例えば半導体ウエハXを製造する半導体製造システムに組み込まれて使用されるものである。この放射温度測定装置100は、測定対象物である半導体ウエハXの温度を非接触で測定するものであり、図1に示すように、半導体ウエハXから放射される赤外線を検知する赤外線検出部1と、赤外線検出部1で検知した赤外線量に基づいて半導体ウエハXの温度を算出する演算装置2とを備えた非接触式のものである。この実施形態では、半導体ウエハXは、処理チャンバV内の所定位置に、静電チャック装置Cを用いて固定されている。放射温度測定装置100は、処理チャンバVの壁に形成された赤外線を透過する測定用窓V1を介して半導体ウエハXの温度を測定するよう構成されている。なお処理チャンバVでは、例えば成膜、エッチング、洗浄、表面改質、加熱又は冷却等の処理が行われる。

[0026] この放射温度測定装置100の詳細な構成を説明するに先立って、まずは、測定対象物である半導体ウエハXについて説明しておく。

[0027] この半導体ウエハXは、赤外線検出部1が検知可能な赤外線波長帯（以下、検知赤外線波長帯）において放射率が低く（透過率が高く）、背景にある物体（非対象物Zである）から対象物を透過して赤外線検出部1が有するセンサ素子11に入射する赤外線も存在しうるものである。具体的にこの半導体ウエハXは、単結晶シリコンからなる円形薄板状の基板X1（Si基板）と、当該基板X1の表面に形成（成膜）された、例えば二酸化ケイ素（SiO₂）や窒化ケイ素（SiN）等の誘電体膜からなる、薄膜X2とを備えるも

のである。薄膜X2は1層のみ形成されていてもよく、異なる多層が形成されていてもよい。薄膜X2の厚みは、赤外線透過させる程度の厚みが好ましく、例えば500nm以下（例えば400nm）が好ましいが、これに限らない。この半導体ウエハXは、基板X1における薄膜X2が形成されている一方の面を処理チャンバVの測定用窓V1に向けるとともに、その裏面を、静電チャック装置Cが有する平坦な吸着面に向けられるようにして配置されている。本実施形態では、半導体ウエハXの裏面側に設けられている静電チャック装置Cが非対象物Zである。

[0028] 次に、放射温度測定装置100の各部を説明する。

[0029] 赤外線検出部1は、図2に示すように、赤外線を検知するサーモパイルなどのセンサ素子11と、センサ素子11の前段に配置された光学系12と、これらセンサ素子11及び光学系12を収容する筐体13とを備えたものである。この赤外線検出部1は、半導体ウエハXの表面（具体的には薄膜X2の表面）に対向するように配置しており、半導体ウエハXからの赤外線を受光するように構成されている。

[0030] センサ素子11は、赤外線を吸収したときの温度変化を起電力の変化として検知する熱型のものであり、ここでは、熱電対を多数直列に並べて薄膜化したサーモパイルが用いられている。なお、このセンサ素子11としては、ポロメータや焦電型のような他の熱型のものでもよいし、あるいは、熱型ではなく量子型のものを用いても構わない。

[0031] 光学系12は、センサ素子11の前段に設けられたレンズ等から構成されたものである。レンズは、半導体ウエハXから放出される赤外線をセンサ素子11に集光するIRレンズであり、例えば平面視において直径10mm～22mm程度の略円形状をなすものである。なお、レンズの形状やサイズは上記のものに限らず適宜変更して構わない。

[0032] さらにこの実施形態の赤外線検出部1は、センサ素子11において受光される赤外線の波長帯を選択する波長選択機構14を光学系12の前段又は後段に備えている。この波長選択機構14は、透過する赤外線波長帯が互いに

異なる複数の光学フィルタ 14 a、14 b と、当該光学フィルタ 14 a、14 b のいずれかを、光路上に選択的に移動させる移動機構とを備えている。この波長選択機構 14 により光学フィルタ 14 a、14 b を切り替えることで、赤外線検出部 1 を、検知可能な波長帯である検知赤外線波長帯（第 1 検知赤外線波長帯及び第 2 検知赤外線波長帯）が互いに異なる複数の赤外線検出部 1（第 1 赤外線検出部 1 a、第 2 赤外線検出部 1 b ともいう）として機能させることができる。これにより、光学系 12 及び筐体 13 を、複数の赤外線検出部 1 a、1 b 間で共通化することができる。ここで「互いに異なる」とは、波長帯が一部重なっているものも含まれる。要は完全同一でなければよいという意味である。本実施形態では、第 1 検知赤外線波長帯を $7\ \mu\text{m}$ 以上 $9\ \mu\text{m}$ 以下とし、第 2 検知赤外線波長帯を $8\ \mu\text{m}$ 以上 $14\ \mu\text{m}$ 以下としているが、これに限らない。

[0033] 演算装置 2 は、CPU、内部メモリ、入出力インターフェース、A/D コンバータ等を備えた専用又は汎用のコンピュータであり、内部メモリに格納された所定のプログラムに基づき CPU 及び周辺機器が協働することによって、図 3 に示すように、分光特性データ格納部 21、温度算出部 22、温度表示部 23 としての機能を少なくとも発揮する。

[0034] 分光特性データ格納部 21 には、半導体ウエハ X の分光特性（透過率、反射率及び放射率の波長毎のエネルギー割合を示す特性であり、分光分布ともいう）の温度特性（温度変化に対応する分光特性の変化、すなわち各温度における分光特性を示すものであり、温度依存性ともいう）を示す分光特性データが格納されている。

[0035] 温度算出部 22 は、センサ素子 11 から出力される検知信号の値と、分光特性データ格納部 21 に格納されている分光特性データとに基づいて、半導体ウエハ X の温度を算出する機能を少なくとも発揮するものである。当該温度算出部 22 により算出された温度は、温度信号として出力される。

[0036] 温度表示部 23 は、ディスプレイ等を備えたもので、前記温度信号を受信して、前記ディスプレイに温度を表示するものである。なお、温度算出部 2

2や温度表示部23は、赤外線検出部1の近傍にある必要はなく、有線乃至無線で接続されていれば、その配置位置は問わない。また、前記温度信号を受信して、前記対象物の温度制御を行う温度制御装置（図示しない）を設け、当該放射温度測定装置100と温度制御装置とによって、温度計測制御システムを構成してもよい。

[0037] 次に、この温度算出部22による半導体ウエハXの温度算出方式の一例を具体的に説明する。

[0038] 温度算出部22は、第1赤外線検出部1a及び第2赤外線検出部1bからそれぞれ出力された検知信号の値（第1検知赤外線量及び第2検知赤外線量）と、分光特性データが示す半導体ウエハXの分光特性とに基づいて、半導体ウエハXの温度を算出するものである。

[0039] その算出原理は以下のとおりである。

各赤外線検出部1に入射する所定波長帯の赤外線の総量は、半導体ウエハXからの赤外線A1と、その背後からの赤外線A2、半導体ウエハXで反射した赤外線A3との和である。放射温度測定装置100と半導体ウエハXが正対している場合、A3は放射温度測定装置100からの赤外線であるため、既知となる。したがって、A1とA2との比 $R = A1 / A2$ は、半導体ウエハXの放射率／透過率となる。この比Rは、予め分光特性データ格納部21に格納されている。

[0040] そこで、異なる2波長帯からのデータ、すなわち第1検知赤外線量及び第2検知赤外線量と、前記各波長帯での既知な比R1及びR2から、連立方程式や2分法などで、対象物温度を算出する。

[0041] 次に、具体的な算出例を挙げる。

第1赤外線検出部1aの半導体ウエハXからの分光放射エネルギーを $E_1(T_x)$ 、第1赤外線検出部1aの半導体ウエハXの背景からの分光放射エネルギー $E_1(T_b)$ 、第2赤外線検出部1bの半導体ウエハXからの分光放射エネルギーを $E_2(T_x)$ 、第2赤外線検出部1bの半導体ウエハXの背景からの分光放射エネルギー $E_2(T_b)$ とすると、第1赤外線検出部1aで検知

される分光放射エネルギー（第1検知赤外線量） W_1 は、

$$W_1 = R_1 \cdot E_1(T_x) + (1 - R_1) \cdot E_1(T_b) \cdots (1)$$

第2赤外線検出部1bで検知される分光放射エネルギー W_2 は、

$$W_2 = R_2 \cdot E_2(T_x) + (1 - R_2) \cdot E_2(T_b) \cdots (2)$$

となる。

[0042] ここでは、 $R_1 \neq R_2$ となるように各検知赤外線波長帯が設定されており、未知数は半導体ウエハXの温度 T_x と、外乱温度 T_b の2つであることから、(1)式及び(2)式を用いることで、

$$E_1^{-1} [\{W_1 - R_1 \cdot E_1(T_x)\} / (1 - R_1)] = E_2^{-1} [\{W_2 - R_2 \cdot E_2(T_x)\} / (1 - R_2)] \cdots (3)$$

となる。

[0043] 温度算出部22は、(3)式に基づいて半導体ウエハXの温度を算出する。分光放射エネルギーと温度の関係 $E(T)$ は単調増加であるため、(3)式を満たす解は1つであることから、対象物温度 T_x を求めることができる。

[0044] このような構成の放射温度測定装置100によれば、測定対象物Xの背後に、測定視野領域を透過する赤外線を射出する非対象物Zがあり、しかも、その非対象物Zの温度が変化しても、その影響を排除できるようにすることができる。

[0045] しかして、本実施形態の放射温度測定装置100は、半導体ウエハXの分光特性の温度特性の取得作業にかかる時間を短縮すべく、所定温度における半導体ウエハXの透過率 r 及び反射率 t を測定する個別分光特性測定部3をさらに備え、演算装置2が、個別分光特性データ受付部24、個別分光特性データ格納部25、基板物性データ格納部26、相関データ格納部27、基板分光特性演算部28、基板分光特性データ格納部28c及び分光特性演算部29としての機能をさらに発揮するように構成されている。

[0046] 個別分光特性測定部3は、図1に示すように、処理チャンバVとは別に設けられている、処理チャンバVに搬入される前の半導体ウエハXの透過率 t

及び反射率 r を測定するものである。具体的にこの個別分光特性測定部 3 は、図 4 に示すように、半導体ウエハ X に所定波長帯域の赤外線照射する赤外光源 3 1 と、半導体ウエハ X で反射した赤外線を検出する反射率用センサ 3 2 と、半導体ウエハ X を透過した赤外線を検出する透過率用センサ 3 3 と、半導体ウエハ X の温度を調整する温調機構とを有している。

[0047] 赤外光源 3 1 は、第 1 赤外線検出部 1 a 及び第 2 赤外線検出部 1 b のそれぞれに対応して 2 つ設けられている。本実施形態では、各赤外光源 3 1 は、2 つの赤外線検出部 1 の検出波長帯域の両方を含む波長帯域の赤外線を照射するものである。なお、一方の赤外光源 3 1 は、一方の赤外線検出部 1 の検出波長帯域（第 1 検知赤外線波長帯）の全部又は一部の赤外線を照射するものとし、他方の赤外光源 3 1 は、他方の赤外線検出部 1 の検出波長帯域（第 2 検知赤外線波長帯）の全部又は一部の赤外線を照射するものとしても良い。

[0048] 反射率用センサ 3 2 及び透過率用センサ 3 3 も 2 つの赤外線検出部 1 それぞれに対応して 2 つ設けられている。一方の反射率用センサ 3 2 及び透過率用センサ 3 3 は、一方の赤外光源 3 1 の赤外線を検出するものであり、他方の反射率用センサ 3 2 及び透過率用センサ 3 3 は、他方の赤外光源 3 1 の赤外線を検出するものである。ここでは、反射率用センサ 3 2 及び透過率用センサ 3 3 の前方に各赤外線検出部 1 の検出波長帯域の赤外線を透過させるフィルタ 3 4 を設けている。

[0049] 温調機構は、半導体ウエハ X の表面に対向するように設けられており、半導体ウエハ X を任意の一定温度（常温）に調節可能なものである。本実施形態の温調機構は、半導体ウエハ X の表面を約 29℃（前記した所定温度である）にするように設定されているが、例えば 200℃等の高温に昇温しておこなってもよい。

[0050] 各反射率用センサ 3 2 及び各透過率用センサ 3 3 の検出信号、すなわち、設定された温度（約 29℃）における各検出波長帯域の透過率 t 及び反射率 r を示す検出信号は、個別分光特性データとして個別分光特性データ受付部

24に出力され、個別分光特性データ格納部25に格納される。

[0051] 基板物性データ格納部26は、半導体ウエハXを構成する基板X1の物性に関する情報を示す基板物性データを格納している。基板物性データは、基板X1の電気抵抗率($\Omega \cdot \text{cm}$)と厚み(mm)に関する情報を少なくとも含んでおり、その他に不純物濃度等に関する情報を含んでいてもよい。この基本物性データは、放射温度の測定前にユーザにより予め入力されている。

[0052] 相関データ格納部27は、基板X1の電気抵抗率(又は不純物濃度)と温度と屈折率との相関を示す第1相関データと、基板X1の電気抵抗率(又は不純物濃度)と温度と消衰係数との相関を示す第2相関データと、を格納している。第1相関データ及び第2相関データは、いずれも実験により求まるものであり、放射温度の測定前に予め相関データ格納部27に格納されている。

[0053] 第1相関データが示す相関は、例えば、基板X1の温度及び電気抵抗率(又は不純物濃度)から基板X1の屈折率を演算する演算モデル(すなわち、温度及び電気抵抗率を変数とする関数)であってもよく、基板X1の温度及び電気抵抗率と基板X1の屈折率との相関を機械学習により算出した機械学習モデルであってもよい。この第1相関データが示す相関は、例えば電気抵抗率(又は不純物濃度)が異なる膨大な数のサンプルを準備し、その屈折率を複数の温度で測定することにより得られる膨大な数のデータ(図5に例示する)に基づいて予め算出されるものである。

[0054] 第2相関データが示す相関は、例えば、基板X1の温度及び電気抵抗率(又は不純物濃度)から基板X1の消衰係数を演算する演算モデル(すなわち、温度及び電気抵抗率を変数とする関数)であってもよく、基板X1の温度及び電気抵抗率と基板X1の消衰係数との相関を機械学習により算出した機械学習モデルであってもよい。この第2相関データが示す相関は、例えば電気抵抗率(又は不純物濃度)が異なる膨大な数のサンプルを準備し、その消衰係数を複数の温度で測定することにより得られる膨大な数のデータ(図6に例示する)に基づいて予め算出されるものである。

[0055] 基板分光特性演算部 28 は、基板物性データ格納部 26 に格納されている基板物性データと、相関データ格納部 27 に格納されている各相関データとに基づいて、基板 X1 自体の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データを演算により算出する。

[0056] 分光特性演算部 29 は、個別分光特性データ格納部 25 に格納されている個別分光特性データと、基板分光特性データ格納部 28c に格納されている基板分光特性データとに基づいて、半導体ウエハ X の分光特性の温度特性を示す分光特性データを演算により算出する。

[0057] より具体的に基板分光特性演算部 28 は、基板物性データが示す基板 X1 の物性に関する情報（具体的には、電気抵抗率及び厚み）と、第 1 相関データが示す相関と、第 2 相関データが示す相関とを用いて、基板 X1 自体の分光特性の温度特性を算出する。そして分光特性演算部 29 は、基板分光特性演算部 28 が算出した基板 X1 の分光特性の温度特性と、個別分光特性データが示す所定温度における半導体ウエハ X の透過率 t 及び反射率 r とを用いて、薄膜 X2 の情報を算出する。この薄膜 X2 の情報は、当該所定温度における薄膜 X2 と空気との界面における反射率及び透過率に関する情報である。そして分光特性演算部 29 は、算出した所定温度における薄膜 X2 の情報と、基板分光特性データ格納部 28c に格納されている基板 X1 自体の各温度における分光特性とを用いて、半導体ウエハ X の分光特性の温度特性を算出する。

以下、半導体ウエハ X の分光特性の温度特性の具体的な算出例を挙げる。

[0058] (ステップ 1) 基板 X1 の分光特性の温度特性の算出

基板分光特性演算部 28 は、基板物性データが示す基板 X1 の物性に関する情報（具体的には、電気抵抗率及び厚み）と、第 1 相関データ及び第 2 相関データが示す相関と、下の (4) - (6) 式とを用いて、基板 X1 自体の分光特性（少なくとも、透過率及び反射率の波長毎のエネルギー割合を示す特性）の温度特性を算出する。

[0059] $T_i = e^{-4\pi k d / \lambda} \dots (4)$

$$R_0 = \{n_0 - (n^2 + k^2)^{1/2}\}^2 / \{n_0 + (n^2 + k^2)^{1/2}\}^2 \quad \cdot \cdot \cdot (5)$$

$$T_0 = 1 - R_0 \quad \cdot \cdot \cdot (6)$$

[0060] ここで、

T_i : 基板 X 1 の透過率、

R_0 : 基板 X 1 と空気との界面での反射率、

T_0 : 基板 X 1 と空気との界面での透過率、

k : 基板 X 1 の消衰係数、

d : ウエハ厚み (m)、

λ : 波長 (m)、

n : 基板 X 1 の屈折率

n_0 : 空気の屈折率

である。

[0061] 具体的に基板分光特性演算部 28 は、基板 X 1 の電気抵抗率を、第 1 相関データ及び第 2 相関データが示す相関に適用して、基板 X 1 の消衰係数 k 及び屈折率 n を算出し、当該算出した消衰係数 k 及び屈折率 n と基板 X 1 の厚みを (4) 式 - (6) 式に適用することで、基板 X 1 自体の分光特性を算出する。基板分光特性演算部 28 は、このような演算を複数の温度毎に実施することで、基板 X 1 の分光特性の温度特性を算出する。そして、算出した基板 X 1 の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データを、基板分光特性データ格納部 28c に格納する。

[0062] (ステップ 2) 薄膜 X 2 の情報の算出

次いで分光特性演算部 29 は、基板分光特性データが示す基板 X 1 の分光特性の温度特性と、個別分光特性データが示す所定温度における半導体ウエハ X の透過率 t 及び反射率 r と、を用いて薄膜 X 2 の情報を算出する。ここで算出する薄膜 X 2 の情報は、所定温度における、空気側から見た半導体ウエハ X の表面 (薄膜 X 2 の表面) と空気との界面での反射率 R_f と、空気側から見た半導体ウエハ X の表面と空気との界面での透過率 T_f である。

[0063] 具体的な演算例を示す。図 7 に示すように、
 空気側から見た半導体ウエハ X の表面（薄膜 X 2 の表面）と空気との界面での反射率を R_f 、
 基板 X 1 側から見た半導体ウエハ X の表面と空気との界面での反射率を R_g 、
 、
 空気側から見た半導体ウエハ X の表面と空気との界面での透過率を T_f 、
 とすると、基板 X 1 界面における多重反射による反射成分の和（すなわち、半導体ウエハ X の反射率） R と、基板 X 1 界面における多重反射による透過成分の和（すなわち、半導体ウエハ X の透過率） T は、それぞれ下の（7）式及び（8）式となる。

$$\begin{aligned}
 [0064] \quad R &= \sum R_j \\
 &= R_f + T_f^2 T_i^2 R_0 (1 + T_i^2 R_0 R_g + T_i^4 R_0^2 R_g^2 + T_i^6 R_0^3 R_g^3 + \dots) \\
 &= R_f + T_f^2 T_i^2 R_0 / (1 - T_i^2 R_0 R_g) \quad \dots (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [0065] \quad T &= \sum T_j \\
 &= T_0 T_f T_i (1 + T_i^2 R_0 R_g + T_i^4 R_0^2 R_g^2 + T_i^6 R_0^3 R_g^3 + \dots) \\
 &= T_0 T_f T_i / (1 - T_i^2 R_0 R_g) \quad \dots (8)
 \end{aligned}$$

[0066] （7）式及び（8）式を、 R_f 及び T_f について解くと、それぞれ下の（9）式及び（10）式となる。

$$[0067] \quad R_f = (R T_0^2 - T^2 R_0) / (T_0^2 - T^2 R_0^2 T_i^2) \quad \dots (9)$$

$$T_f = (1 - T_i^2 R_0 R_f) T / T_0 T_i \quad \dots (10)$$

[0068] ここで、 R 及び T としては、個別分光特性データとして個別分光特性データ格納部 25 に格納されている、所定温度における半導体ウエハ X の反射率 r 及び透過率 t を使用する。 T_0 、 R_0 及び T_i は基板 X 1 自体の分光特性であり、上述のステップ 1 において算出され、基板分光特性データ格納部 28c に格納されているものである。分光特性演算部 29 は、所定温度における R 、 T 、 T_0 、 R_0 及び T_i を（6）式及び（7）式に当てはめて、所定温度における薄膜 X 2 の反射率 R_f 及び透過率 T_f を算出する。

[0069] (ステップ3) 半導体ウエハXの分光特性の温度特性の算出

分光特性演算部29は、算出した基板X1の各温度における反射率 R_0 及び透過率 T_0 、 T_i と、算出した薄膜X2の所定温度における反射率 R_f 及び透過率 T_f とを用いて、半導体ウエハXの分光特性の温度特性を算出する。具体的には、算出した基板X1と薄膜X2の分光特性の情報を(7)式及び(8)式に当てはめることで、半導体ウエハXの反射率R及び透過率Tを算出する。このような演算を複数の温度毎に実施することで、半導体ウエハの分光特性の温度特性を算出する。ここで、ステップ2で算出した薄膜X2の情報 R_f 及び T_f は、所定温度における薄膜X2の反射率及び透過率を示すものであるが、薄膜X2自体の分光特性は温度依存性が非常に小さいため、各温度において同値とみなして計算することができる。

[0070] 次に、複数の半導体ウエハXの放射温度測定方法について説明する。

まず、対象となる半導体ウエハXを、分光特性測定用のチャンバに搬送する。分光特性測定用のチャンバに設けられた個別分光特性測定部3は、半導体ウエハXの、所定温度における反射率 r 及び透過率 t を測定する。この測定された反射率 r 及び透過率 t を示す分光特性データは、個別分光特性データ格納部25に格納される。このように本実施形態では、処理チャンバVに搬送される前に半導体ウエハXの個別分光特性を測定する。

[0071] また、ユーザは、半導体ウエハXの基板X1の物性に関する情報(具体的には厚み及び電気抵抗率(又は不純物濃度))を演算装置2に入力する。入力された基板X1の物性に関する情報は、基板物性データ格納部26に格納される。

[0072] 基板分光特性演算部28は、入力された基板物性情報と、予め格納されている複数の相関データとを用いて、基板X1の分光特性の温度特性を算出する。そして分光特性演算部29は、測定された個別分光特性と、算出された基板分光特性とを用いて、半導体ウエハXの分光特性の温度特性を算出し、分光特性データ格納部21に格納する。

[0073] 次に、個別分光特性が測定された半導体ウエハXを処理チャンバVに搬送

する。ここで、第1赤外線検出部1a及び第2赤外線検出部1bは、処理チャンバVに形成された測定用窓V1から半導体ウエハXからの赤外線を検出する。そして、温度算出部22は、各赤外線検出部1により得られた赤外線量と、算出した分光特性の温度特性とに基づいて、半導体ウエハXの温度を算出する。

[0074] このように構成した本実施形態の放射温度測定装置100によれば、ユーザは、例えば厚みや電気抵抗率等の基板X1の物性に関する情報と、所定温度における半導体ウエハXの反射率 r と透過率 t を測定し、これらの測定結果を入力さえすれば、半導体ウエハXの分光特性の温度特性を取得することができるので、従来のように、材質及び膜厚が異なるサンプル毎に複数温度での分光特性の測定を行う必要がなく、半導体ウエハXの温度測定の事前準備にかかる時間を大幅に短縮することができる。

[0075] なお、本発明は前記実施形態に限られるものではない。

[0076] 例えば、他の実施形態の放射温度測定装置100では、温度算出部22は、半導体ウエハXを収容する処理チャンバVの特性であるチャンバ特性情報を加味して半導体ウエハXの温度を算出してもよい。この場合、演算装置2は、図8に示すように、チャンバ特性情報を格納するチャンバ特性データ格納部2Cとしての機能をさらに発揮してよい。チャンバ特性情報とは、処理チャンバVに起因する温度補正パラメータに関するものであり、具体的にはチャンバVに存在する部品の表面の材質（反射率等）や入射光量比等である。このチャンバ特性情報は、放射温度の測定前にユーザにより予め入力されている。温度算出部22は、算出された分光特性データに温度補正パラメータを合わせ込み、その温度補正パラメータが合わせ込まれた分光特性データを用いることによって半導体ウエハXの温度を算出してもよい。温度算出部22は、算出した分光特性データにより半導体ウエハXの温度を算出し、その算出した温度を温度補正パラメータを用いて補正するようにしてもよい。

[0077] また他の実施形態の放射温度測定装置100では、相関データ格納部27は、基板の電気抵抗率（又は不純物濃度）及び厚みと、基板の分光特性の温

度特性との相関を示す第3相関データを格納していてもよい。第3相関データが示す相関は、厚み及び電気抵抗率が異なる多数のサンプル基板を準備し、当該多数のサンプル基板の透過率及び反射率を異なる複数の温度で測定することにより求められたものである。相関データ格納部27には、第3相関データとして、測定により得られた基板の電気抵抗率（又は不純物濃度）及び厚みと、これに対応する基板の分光特性の温度特性を示す膨大な数のデータが格納されている。

そしてこの他の実施形態では、分光特性演算部29は、基板物性データが示す基板X1の物性に関する情報（電気抵抗率及び厚み）を、第3相関データに当てはめることで、基板X1自体の分光特性の温度特性を算出するように構成されてもよい。

[0078] また前記実施形態の放射温度測定装置100は、基板分光特性を算出するように構成されていたがこれに限らない。他の実施形態では、基板X1の分光特性を示す基板分光特性データが、基板分光特性データ格納部28cに予め格納されていてもよい。この場合、演算装置2は、図9に示すように、基板物性データ格納部26、相関データ格納部27及び基板分光特性演算部28としての機能の一部又は全部を発揮しなくてもよい。

[0079] また他の実施形態の放射温度測定装置100では、第1相関データは、基板X1の電気抵抗率（又は不純物濃度）と温度とドーピング種と屈折率との相関を示すものであってよく、同様に第2相関データは、基板X1の電気抵抗率（又は不純物濃度）と温度とドーピング種と消衰係数との相関を示すものであってよい。ドーピング種とは、例えば基板X1がP型かN型かを示す情報である。そしてこの実施形態では、基板物性データ格納部26は、基板物性データとして、基板X1のドーピング種に関する情報をユーザから受け付け、これを格納してよい。そして分光特性演算部29は、基板X1の厚み及び電気抵抗率に加えて、ドーピング種に関する情報も加味して、半導体ウエハXの反射率R及び透過率Tを算出するように構成されてよい。

[0080] また、前記実施形態の放射温度測定装置100は、波長選択機構14を用

いることで、単一の赤外線検出部 1 を、検知可能な波長帯である検知赤外線波長帯が互いに異なる複数の赤外線検出部 1（第 1 赤外線検出部 1 a、第 2 赤外線検出部 1 b ともいう）として機能させていたがこれに限らない。他の実施形態の放射温度測定装置 100 は、図 10 に示すように、物理的に異なる一対の赤外線検出部 1 a、1 b を備え、それぞれの光学系 12 a、12 b の前段又は後段に、透過する赤外線波長帯が互いに異なる光学フィルタ 14 a、14 b を設けてあってもよい。そして、このことによって、各赤外線検出部 1 a、1 b の検知可能な波長帯である検知赤外線波長帯（第 1 検知赤外線波長帯及び第 2 検知赤外線波長帯）が互いに異なるように構成してもよい。

[0081] さらに、他の実施形態放射温度測定装置 100 は、例えば、図 11 に示すように、ビームスプリッタ 15 を設けて、測定対象物 X からの赤外線を 2 つに分け、それぞれを各赤外線検出部 1 a、1 b に導入するようにしてもよい。なお、符号 16 はミラーである。このようにすれば、前述した複数の光学フィルタ 14 a、14 b を切り替える方式の波長選択機構 14 を用いるよりも、短時間で測定を行うことができる。

[0082] 前記実施形態の測定対象物は、 $R1 \neq R2$ となる材料であり、基材の表面に薄膜 X2 が成膜されたものであれば半導体ウエハ X に限られない。

また前記実施形態の放射温度測定装置 100 は、半導体製造システムに組み込まれたものであったが、半導体製造システムに組み込まれない単体構成のものであってもよい。

[0083] 前記実施形態において基板 X1 はシリコン基板であったがこれに限らない。他の実施形態において基板 X1 は、赤外線を透過させるものであれば、例えば単結晶 Ge（ゲルマニウム）ウエハや、複数の元素を材料にした化合物ウエハ等、半導体プロセスで使用されるウエハであってよい。

[0084] また他の実施形態における個別分光特性測定部 3 による半導体ウエハ X の透過率 r 及び反射率 t の測定方法について説明する。この測定方法では、図 12 に示すように、(1) 熱源 31 と透過率用センサ 33 との間に半導体ウ

エハXのみを配置して各センサ32、33で放射エネルギーを測定する第1測定と、(2)熱源31と透過率用センサ33との間に半導体ウエハXを配置し、さらに熱源31と半導体ウエハXとの間に遮蔽板を配置して、各センサ32、33で放射エネルギーを測定する第2測定と、(3)熱源31と透過率用センサ33との間に半導体ウエハXを配置することなく各センサ32、33で放射エネルギーを測定する第3測定とを行う。そして第1測定～第3測定により得られる各センサ32、33の測定値を用いて、所定温度における半導体ウエハの反射率 r 及び透過率 t を算出する。

[0085] 具体的には、各測定において反射率用センサ32で測定される放射エネルギー E_1 、 E_3 、 E_5 と、透過率用センサ33で測定される放射エネルギー E_2 、 E_4 、 E_6 は、次の(i)～(vi)式で表すことができる。

[0086] ・第1測定

$$E_1 = \varepsilon \cdot F_1(T_x) + t \cdot F_1(T_{amb}) + r \cdot F_1(T_r) - F_1(T_{s1}) \quad (i)$$

$$E_2 = \varepsilon \cdot F_2(T_x) + t \cdot F_2(T_r) + r \cdot F_2(T_{amb}) - F_2(T_{s2}) \quad (ii)$$

・第2測定

$$E_3 = \varepsilon \cdot F_1(T_x) + t \cdot F_1(T_{amb}) + r \cdot F_1(T_{amb}) - F_1(T_{s1}) \quad (iii)$$

$$E_4 = \varepsilon \cdot F_2(T_x) + t \cdot F_2(T_{amb}) + r \cdot F_2(T_{amb}) - F_2(T_{s2}) \quad (iv)$$

・第3測定

$$E_5 = F_1(T_{amb}) - F_1(T_{s1}) \quad (v)$$

$$E_6 = F_2(T_r) - F_2(T_{s2}) \quad (vi)$$

[0087] T_{s1} ：反射率用センサ32の温度、 T_{s2} ：透過率用センサ33の温度、 T_x ：半導体ウエハの温度、 T_{amb} ：周囲温度、 T_r ：熱源31の温度、 ε ：放射率、 r ：反射率、 t ：透過率である。

[0088] ここで、反射率用センサ32及び透過率用センサ33の前方には共通のフ

フィルタが配置され、赤外線センサの感度及びオフセット電圧が異なるため、 $F_1(T) = \alpha \cdot F_2(T) + \beta$ とすると、(i)式～(vi)式から、次の(vii)式～(ix)式が導かれる。

α : 赤外線センサの感度比

β : 赤外線センサのオフセット電圧差

である。

$$[0089] \quad E_1 - E_3 = r \cdot \alpha \cdot \{F_2(T_r) - F_2(T_{amb})\} \quad (vii)$$

$$E_2 - E_4 = t \cdot \{F_2(T_r) - F_2(T_{amb})\} \quad (viii)$$

$$E_6 - E_5 = [F_2(T_r) - \{\alpha \cdot F_2(T_{amb}) + \beta\}] - \{\alpha \cdot F_2(T_{s1}) + \beta - F_2(T_{s2})\} \quad (ix)$$

[0090] そして、(vii)式～(ix)式を反射率 r 及び透過率 t について解くことで、下の(x)式及び(xi)式が導出される

$$\text{反射率 } r = (E_1 - E_3) / \{\alpha \cdot (E_6 - E_5)\} \quad (x)$$

$$\text{透過率 } t = (E_2 - E_4) / (E_6 - E_5) \quad (xi)$$

[0091] 第1測定～第3測定において反射率用センサ32及び透過率用センサ33で測定された放射エネルギー $E_1 \sim E_6$ を、(x)式及び(xi)式に適用することで、所定温度における反射率 r 及び透過率 t を算出することができる。

[0092] ところで前述のように、温度算出部22が(3)式に基づいて2分法等により半導体ウエハXの温度 T_x を算出する場合、条件によっては(3)式を満たす解が2つになることがある。例えば、 $E_1(T_x) \neq E_2(T_x)$ であって、且つ R_1 と R_2 の差が小さい場合、(3)式の右辺と左辺は図13に示すグラフのような関係となることもあり、この場合には(3)式を満たす解は、 $T_x = 50^\circ\text{C}$ ($T_b = 300^\circ\text{C}$) と、 $T_x = 75^\circ\text{C}$ ($T_b = 290^\circ\text{C}$) の2つになってしまう。特に半導体ウエハXの温度 T_x よりも外乱温度 T_b が過度に高い場合に、このように2つの解が生じることがある。

[0093] そこで本発明者が鋭意検討したところ、第1検知赤外線波長帯における測定対象物の放射率 ε_1 と第2検知赤外線波長帯における放射率 ε_2 との差 ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) の最大値の絶対値が0.4以上となる条件下においては、半導体ウエ

ハXの温度 T_x と外乱温度 T_b の大小関係、及び各赤外線波長帯における放射率 ε_1 、 ε_2 の絶対値によらず、(3)式を満たす解が1つとなり、温度 T_x を精度よく測定できることが分かった。具体的には、第1検知赤外線波長帯と第2検知赤外線波長帯は異なるため、(3)式における対象物温度 T_x の変化に対する左辺と右辺の傾きも若干異なる。図13の条件において、比 R_1 と比 R_2 の差が小さい場合、対象物温度 $0\sim 100^\circ\text{C}$ において、左辺と右辺の傾きの違いが小さくなり、これにより解が2つ生じることになる。一方で、第1検知赤外線波長帯における測定対象物の放射率 ε_1 と第2検知赤外線波長帯における放射率 ε_2 との差 $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ が大きくなると、対象物温度 T_x に対する左辺と右辺の傾きの差を大きくすることができるので、(3)式を満たす解が1つになると考えられる。

[0094] そこで他の実施形態では、第1検知赤外線波長帯における測定対象物の放射率 ε_1 と第2検知赤外線波長帯における放射率 ε_2 との差が0.4以上となるように、第1検知赤外線波長帯、第2検知赤外線波長帯、又は測定対象物を選択することが好ましく、0.5以上となるように選択することがより好ましい。例えば、前記実施形態のように第1検知赤外線波長帯を $7\mu\text{m}$ 以上 $9\mu\text{m}$ 以下であり、第2検知赤外線波長帯を $8\mu\text{m}$ 以上 $14\mu\text{m}$ 以下である場合、測定対象物がSiC半導体であれば、図14に示すように、第1検知赤外線波長帯における測定対象物の放射率 ε_1 と第2検知赤外線波長帯における放射率 ε_2 との差が0.4以上となり、また図15に示すように(3)式を満たす解が1つとなり、外乱温度 T_b が高くても温度 T_x を精度よく算出できることがわかった。

[0095] その他、本発明は前記実施形態に限られず、その趣旨を逸脱しない範囲で種々の変形が可能であるのは言うまでもない。

産業上の利用可能性

[0096] 基板の表面に薄膜が形成されてなる測定対象物の温度を測定する放射温度測定装置において、温度測定前に行う測定対象物の分光特性の温度特性の取得にかかる時間を短縮する。

符号の説明

- [0097] 1 0 0 . . . 放射温度測定装置
- 1 . . . 赤外線検出部
- 2 2 . . . 温度算出部
- 2 4 . . . 個別分光特性データ受付部
- 2 8 c . . . 基板分光特性データ格納部
- 2 9 . . . 分光特性演算部
- X . . . 半導体ウエハ
- X 1 . . . 基板
- X 2 . . . 薄膜

請求の範囲

- [請求項1] 基板と、当該基板の表面に形成された薄膜とを有する測定対象物の温度を測定するものであって、
- 前記測定対象物から放射される赤外線量を検出する赤外線検出部と、
- 前記基板の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データが格納された基板分光特性データ格納部と、
- 前記測定対象物の所定温度における反射率及び透過率に関する情報を示す個別分光特性データの入力を受け付ける個別分光特性データ受付部と、
- 前記基板分光特性データと前記個別分光特性データとに基づいて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する分光特性演算部と、
- 前記赤外線検出部が検出した赤外線量と、前記分光特性演算部が算出した前記測定対象物の分光特性の温度特性とに基づいて、前記測定対象物の温度を算出する温度算出部とを備える放射温度測定装置。
- [請求項2] 前記分光特性演算部が、
- 前記基板分光特性データが示す前記基板の分光特性の温度特性と、前記個別分光特性データが示す前記所定温度における前記測定対象物の反射率及び透過率とに基づいて、前記薄膜の所定温度における反射率及び透過率を算出し、
- 当該算出した前記薄膜の所定温度における反射率及び透過率と、前記基板分光特性データが示す前記基板の分光特性の温度特性とを用いて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する請求項1に記載の放射温度測定装置。
- [請求項3] 前記基板の物性に関する情報を示す基板物性データを記憶する基板物性データ格納部と、
- 前記基板の電気抵抗率と温度と屈折率との相関を示す第1相関データと、前記基板の電気抵抗率と温度と消衰係数との相関を示す第2相

関データとを格納する相関データ格納部と、

前記基板物性データが示す前記基板の電気抵抗率と、前記第1相関データが示す相関と、前記第2相関データが示す相関とに基づいて、前記基板の分光特性の温度特性を算出する基板分光特性演算部とを更に備える請求項1又は2に記載の放射温度測定装置。

[請求項4] チャンバに収容された前記測定対象物の温度を測定するものであり

、

前記温度算出部は、前記チャンバに起因する温度補正パラメータを用いて前記測定対象物の温度を補正する、請求項1～3のいずれか一項に記載の放射温度測定装置。

[請求項5] 前記赤外線検出部が、波長帯が互いに異なる第1検知赤外線波長帯と第2検知赤外線波長帯のそれぞれにおいて前記測定対象物からの赤外線量を検出する第1赤外線検出部と第2赤外線検出部を備えており

、

前記温度算出部が、前記各赤外線検出部が検出した各赤外線量に基づいて、前記測定対象物の温度を算出する請求項1～4のいずれか一項に記載の放射温度測定装置。

[請求項6] 前記第1赤外線検出部と前記第2赤外線検出部間で、前記測定対象物から放出される赤外線を集光するための光学系が共通化されている請求項5に記載の放射温度測定装置。

[請求項7] 前記基板が単結晶材料からなるウエハであり、前記薄膜がSiO₂膜又はSiN膜を含むものである請求項1～6のいずれか一項に記載の放射温度測定装置。

[請求項8] 基板と、当該基板の表面に形成された薄膜とを有する測定対象物の温度を測定する方法であって、

前記測定対象物から放射される赤外線量を検出する赤外線検出ステップと、

前記基板の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データを格納す

る基板分光特性データ格納ステップと、

前記測定対象物の所定温度における反射率及び透過率に関する情報を示す個別分光特性データの入力を受け付ける個別分光特性データ受付ステップと、

前記基板分光特性データと前記個別分光特性データとに基づいて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する分光特性演算ステップと、

検出した前記赤外線量と、算出した前記測定対象物の分光特性の温度特性とに基づいて、前記測定対象物の温度を算出する温度算出ステップとを含む放射温度測定方法。

[請求項9]

基板と、当該基板の表面に形成された薄膜とを有する測定対象物の温度を測定する放射温度測定装置用のプログラムであって、

前記測定対象物から放射される赤外線量を検出する赤外線検出部と、

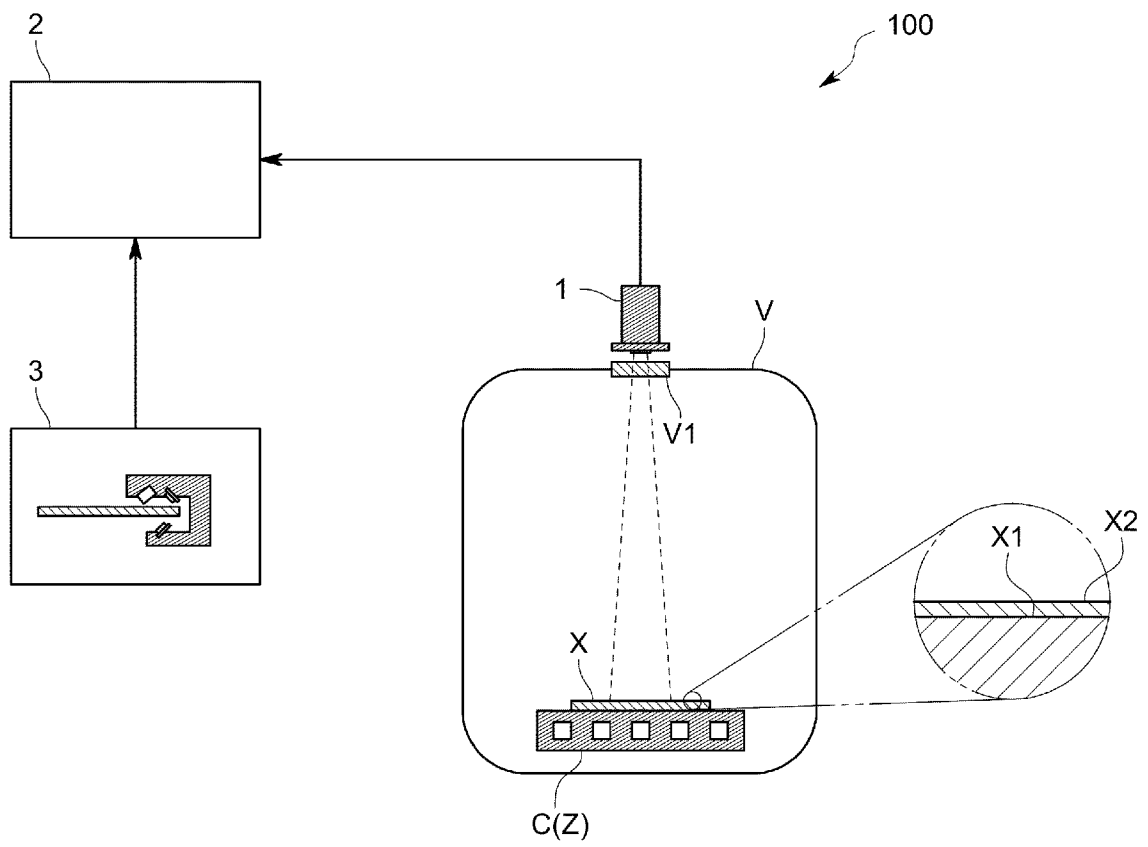
前記基板の分光特性の温度特性を示す基板分光特性データが格納された基板分光特性データ格納部と、

前記測定対象物の所定温度における反射率及び透過率に関する情報を示す個別分光特性データの入力を受け付ける個別分光特性データ受付部と、

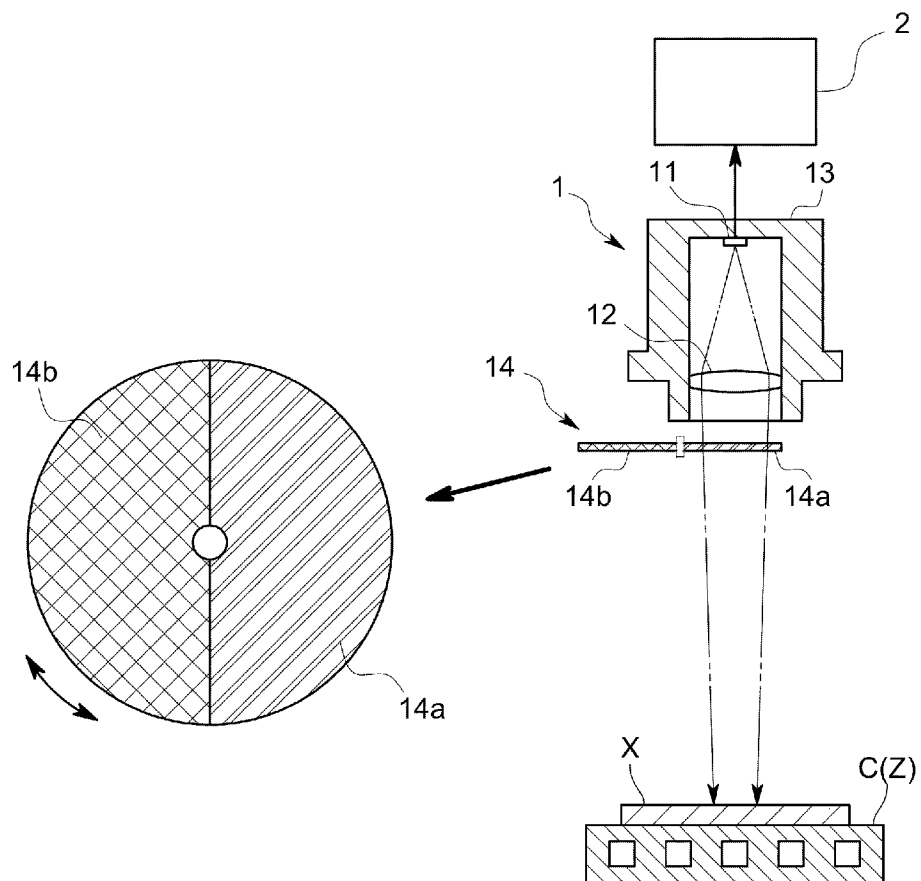
前記基板分光特性データと前記個別分光特性データとに基づいて、前記測定対象物の分光特性の温度特性を算出する分光特性演算部と、

前記赤外線検出部が検出した赤外線量と、前記分光特性演算部が算出した前記測定対象物の分光特性の温度特性とに基づいて、前記測定対象物の温度を算出する温度算出部としての機能をコンピュータに発揮させる放射温度測定装置用プログラム。

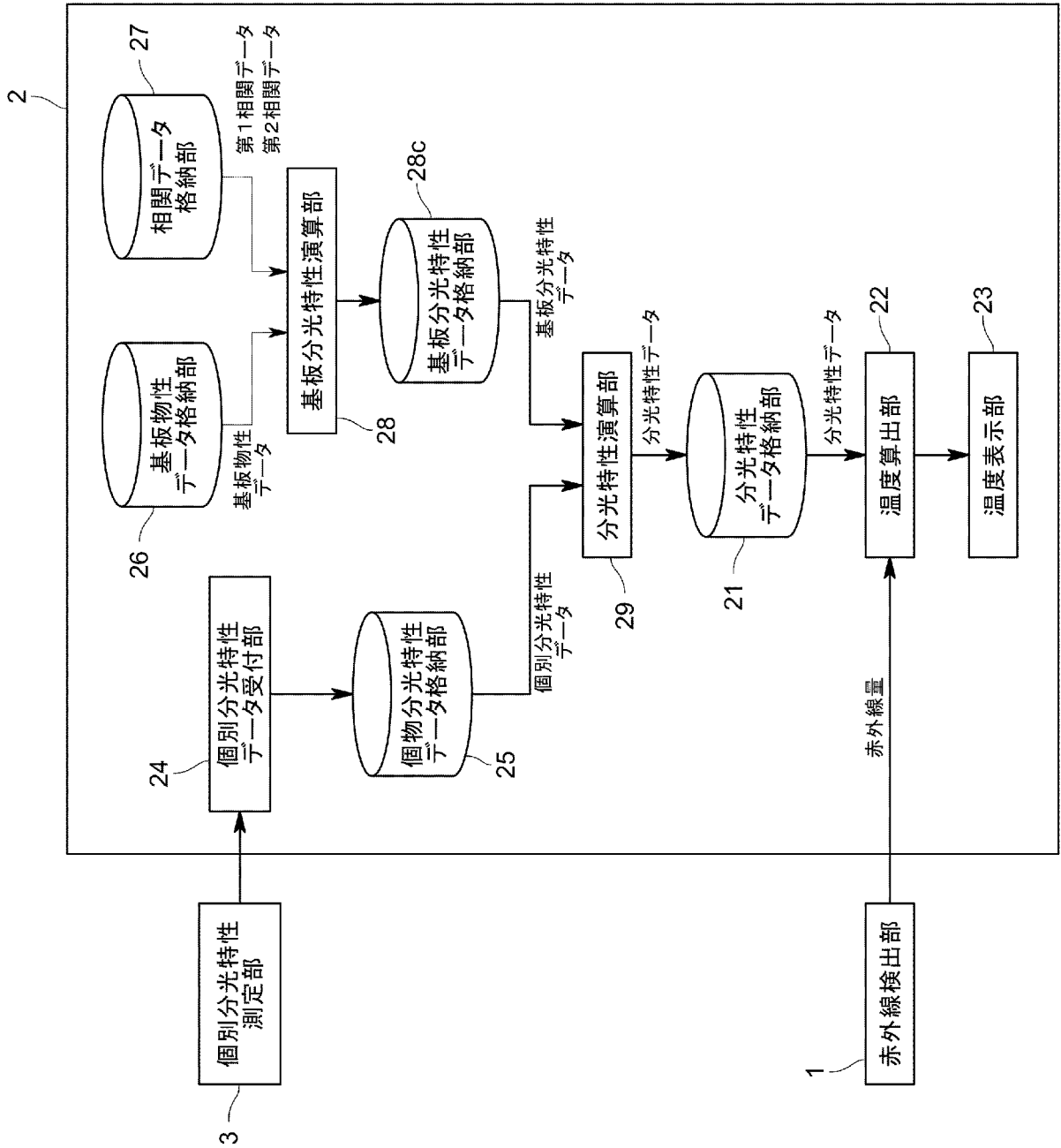
[図1]



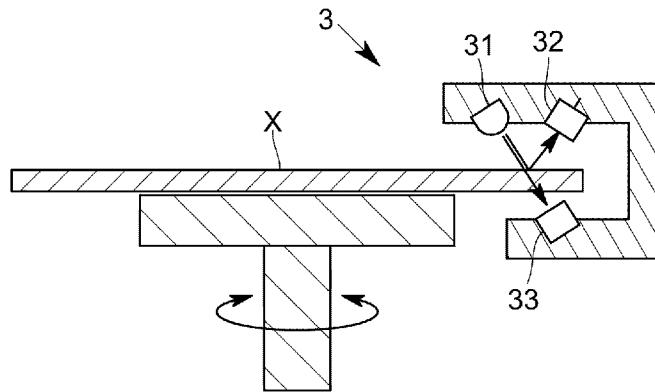
[図2]



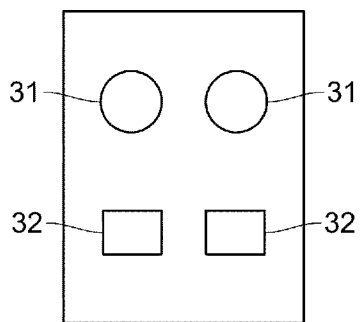
[図3]



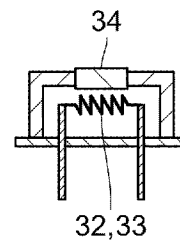
[図4]



(a) 個別分光特性測定部を模式的に示す断面図

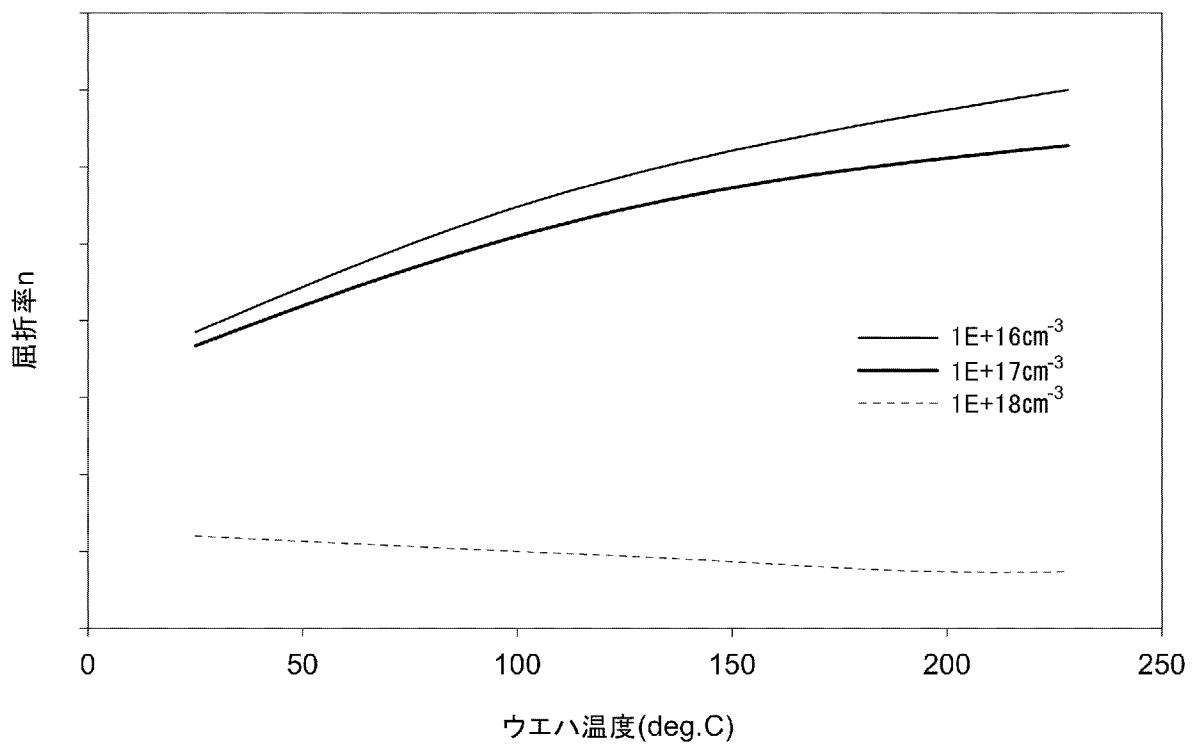


(b) 赤外光源及び反射率用センサの配置

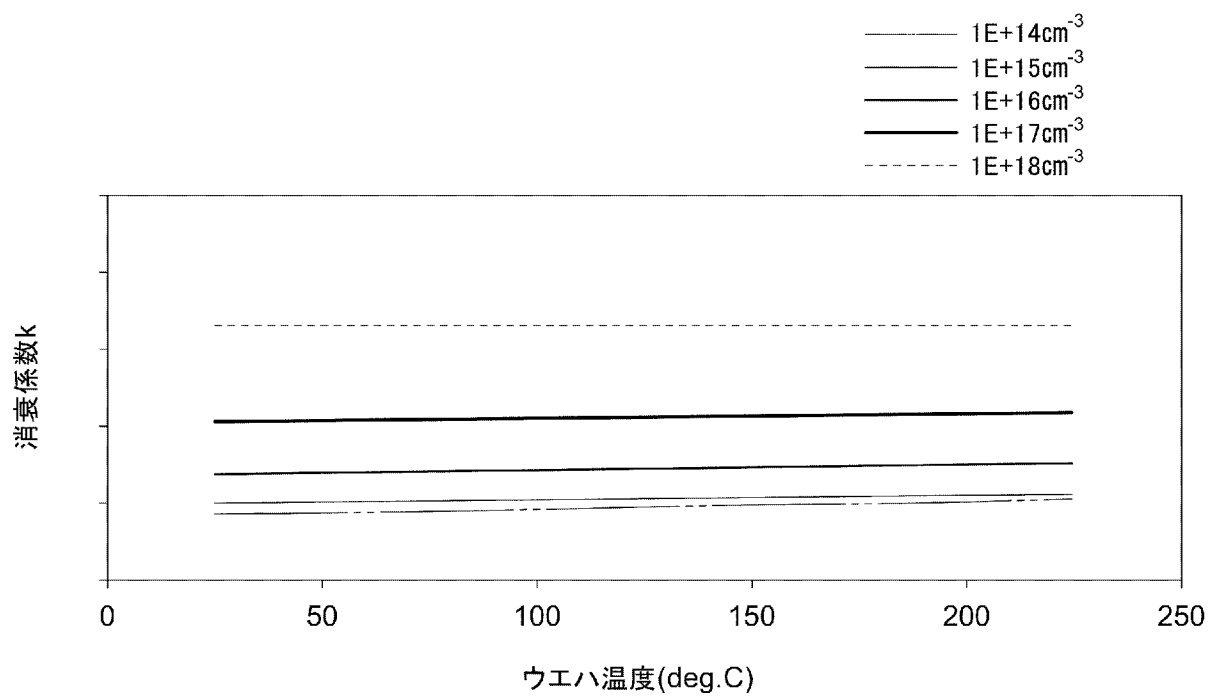


(c) 各センサを模式的に示す断面図

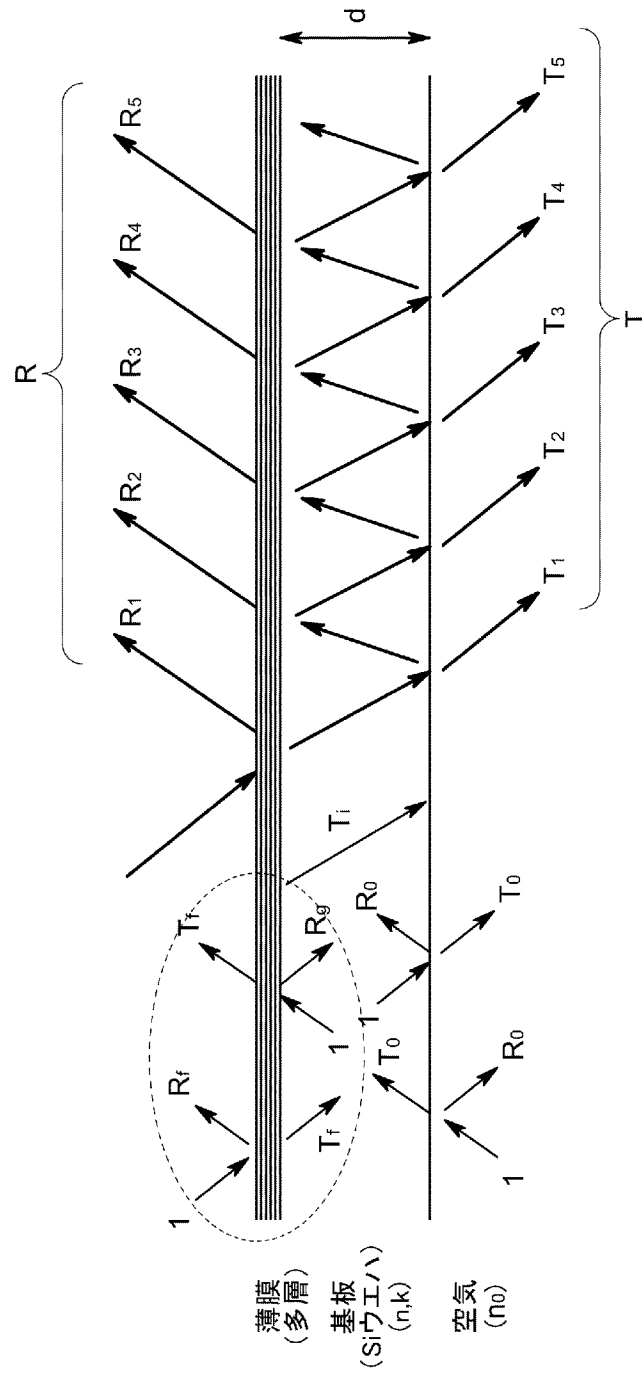
[図5]



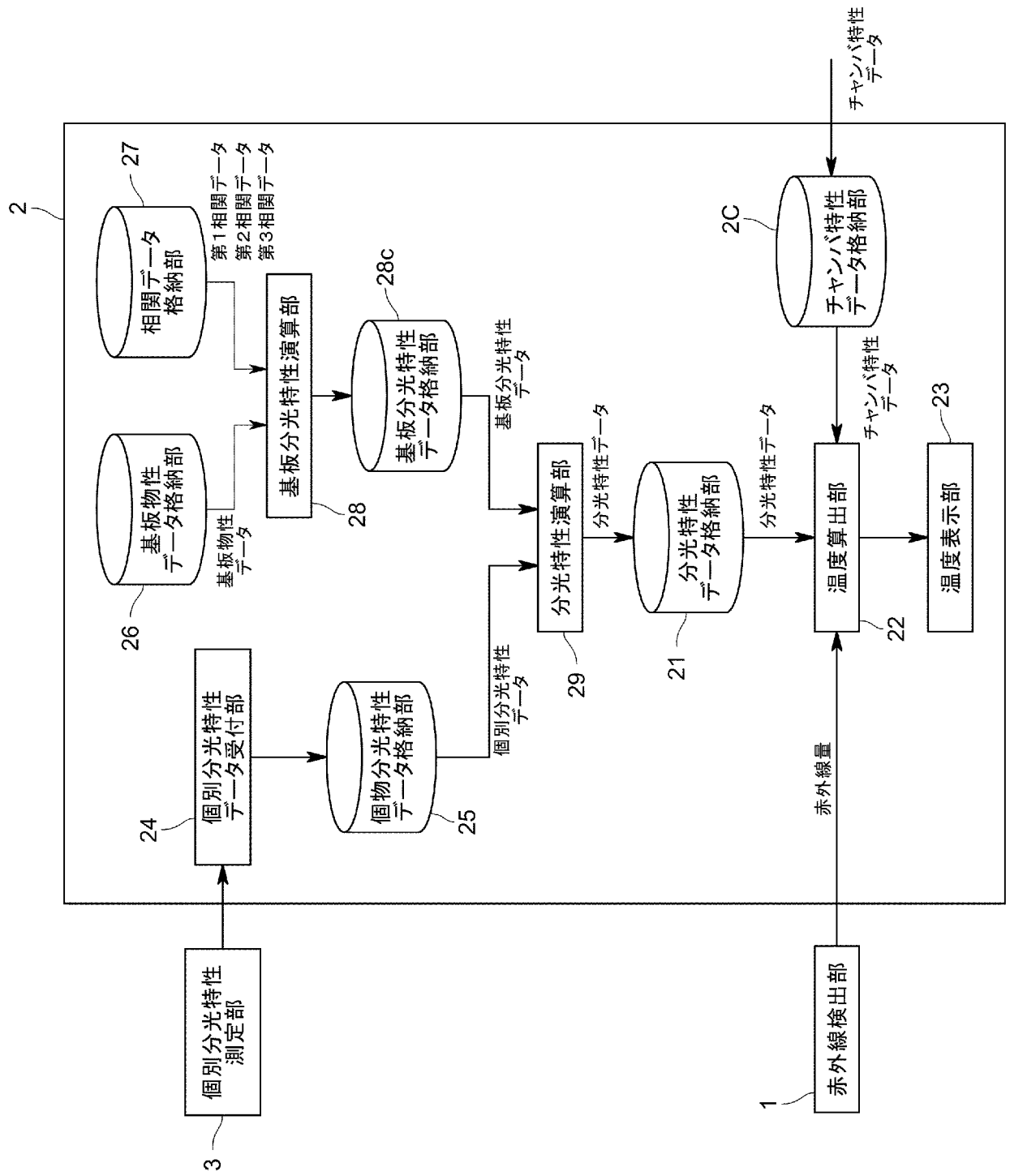
[図6]



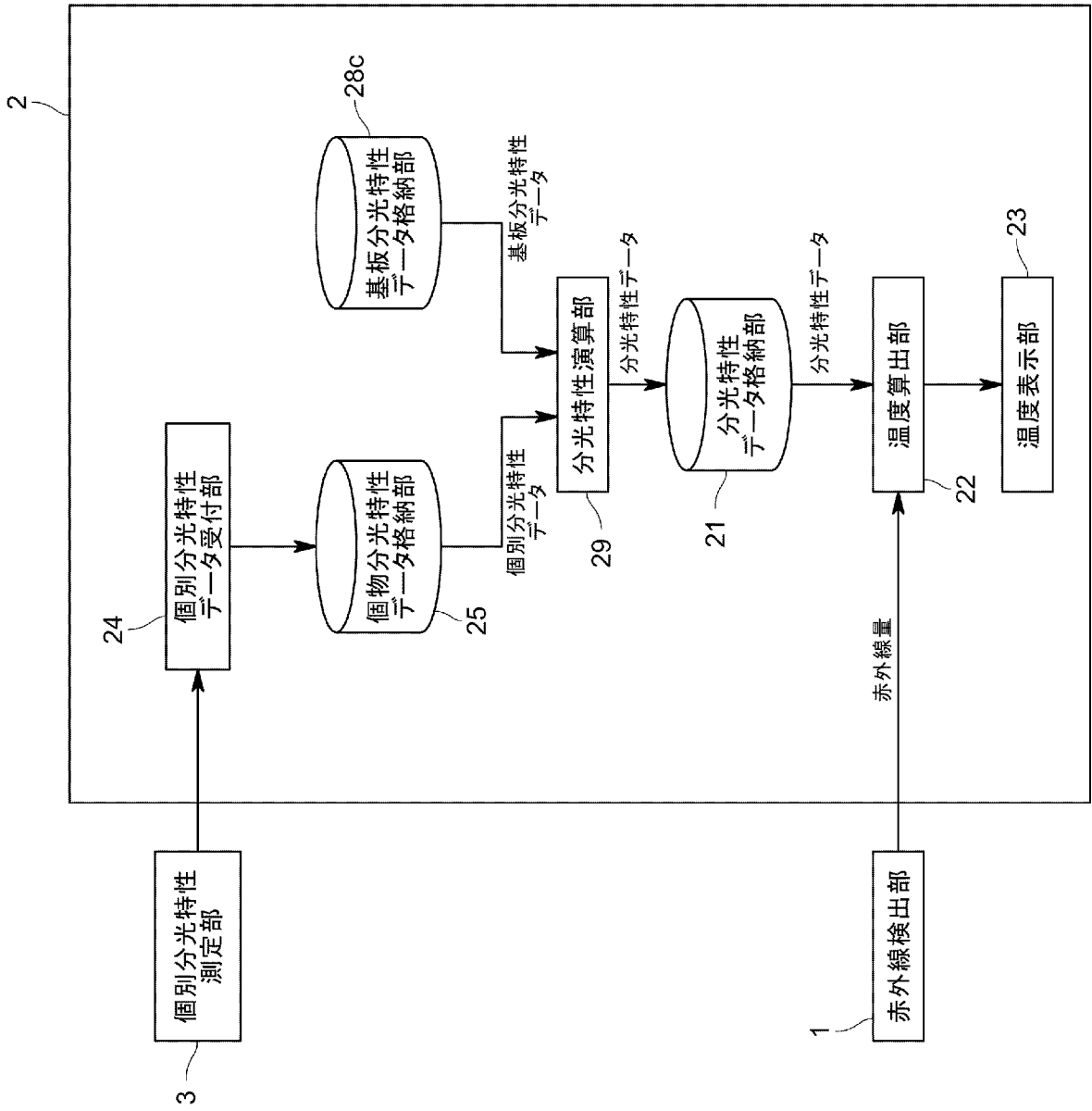
[図7]



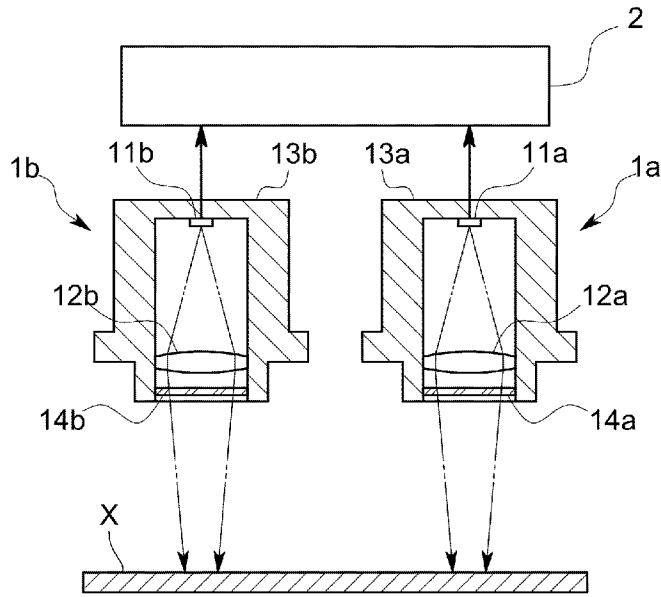
[図8]



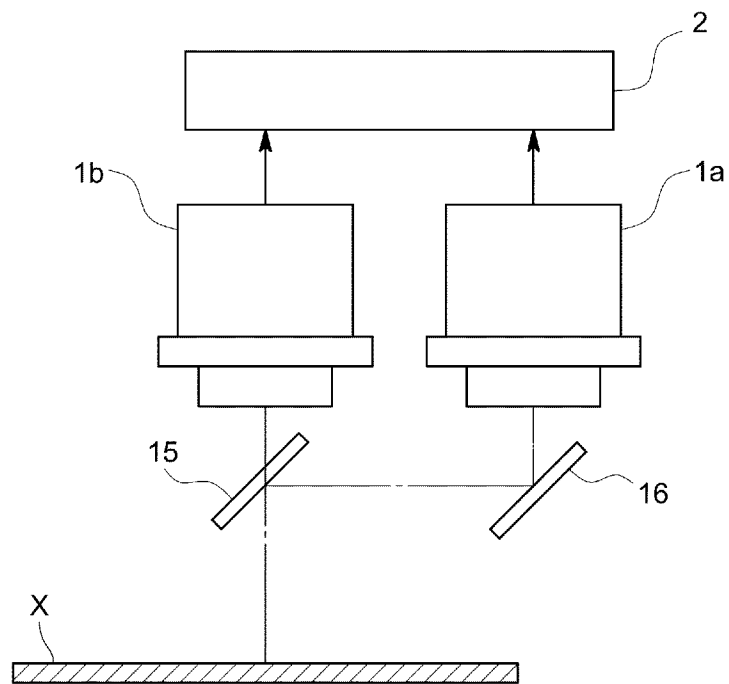
[図9]



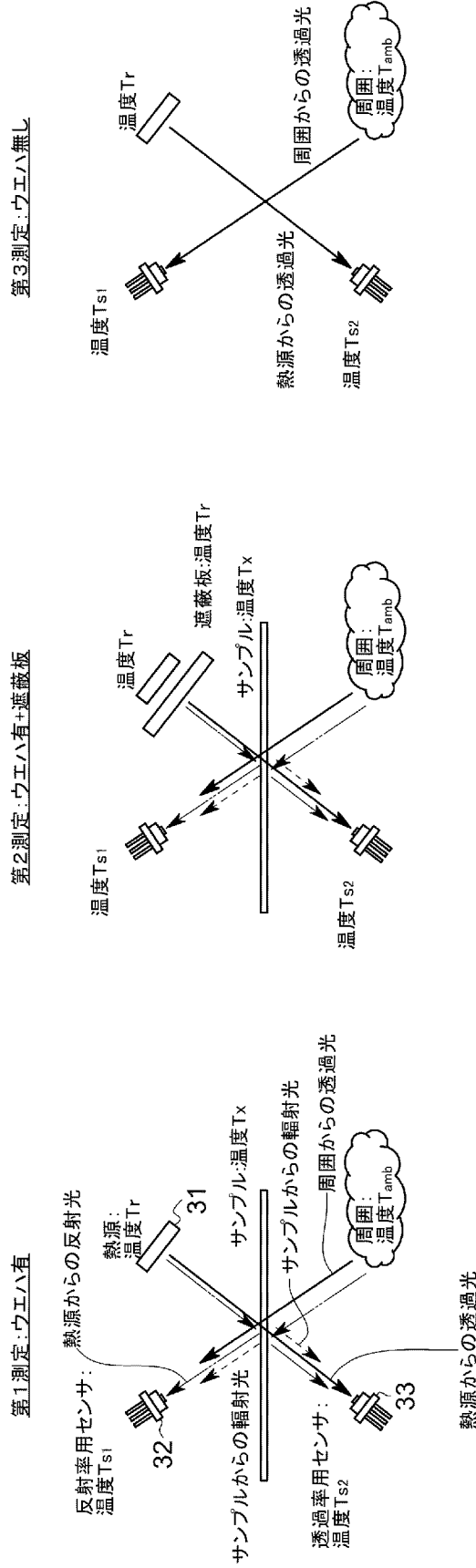
[図10]



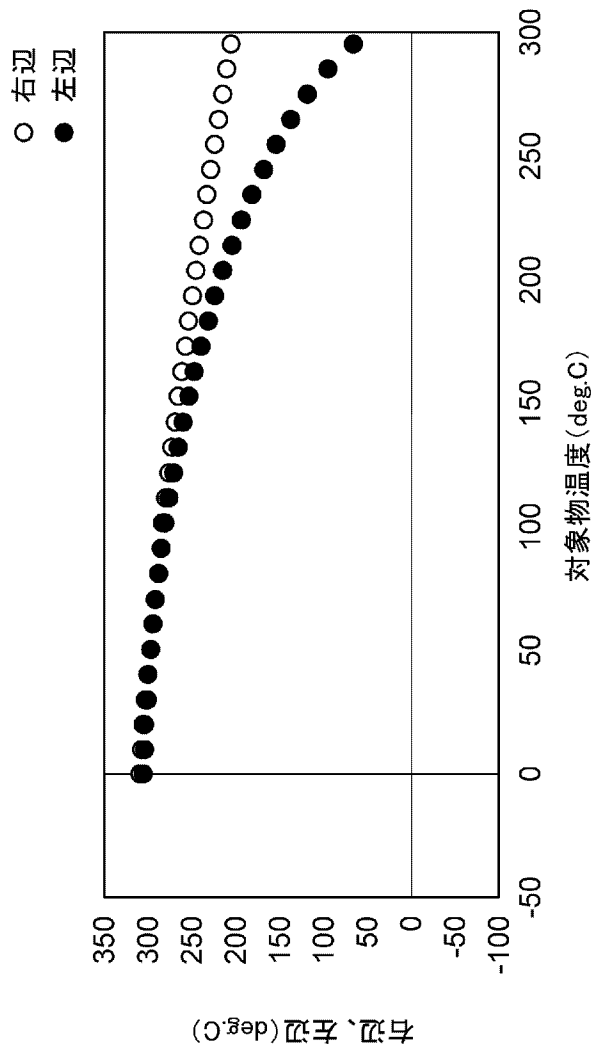
[図11]



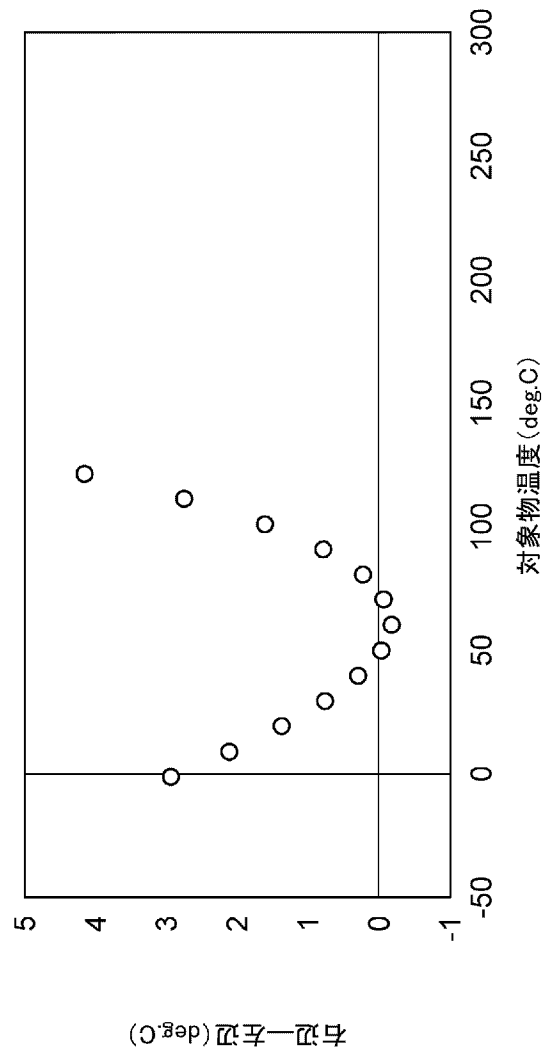
[図12]



[図13]

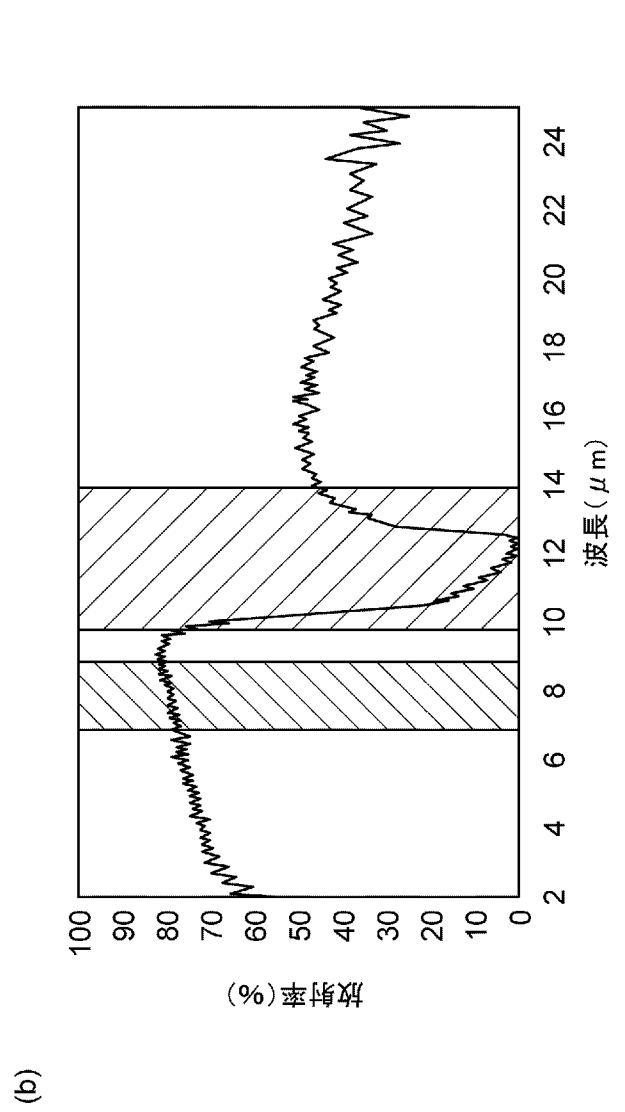
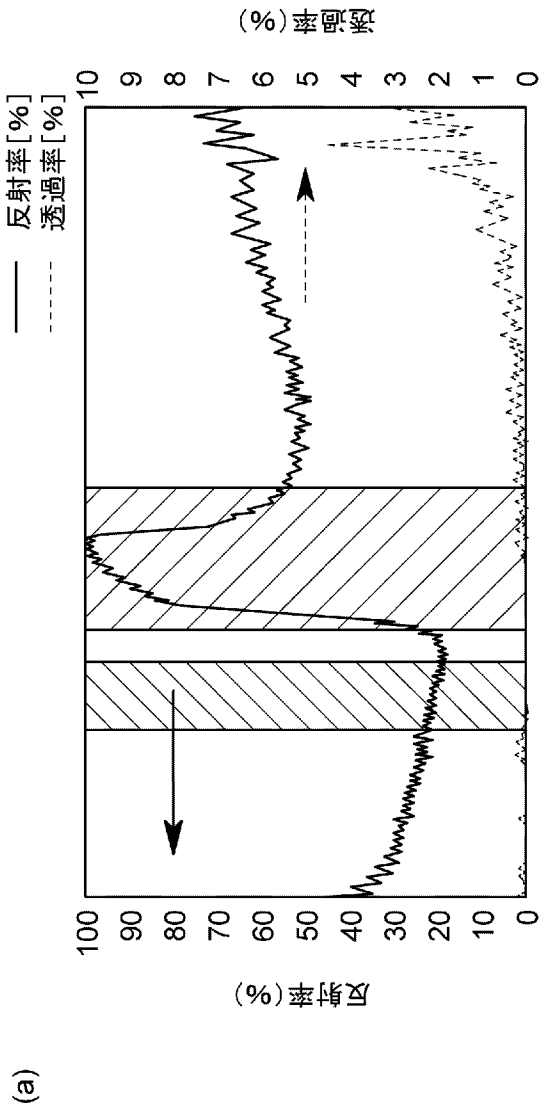


(a)

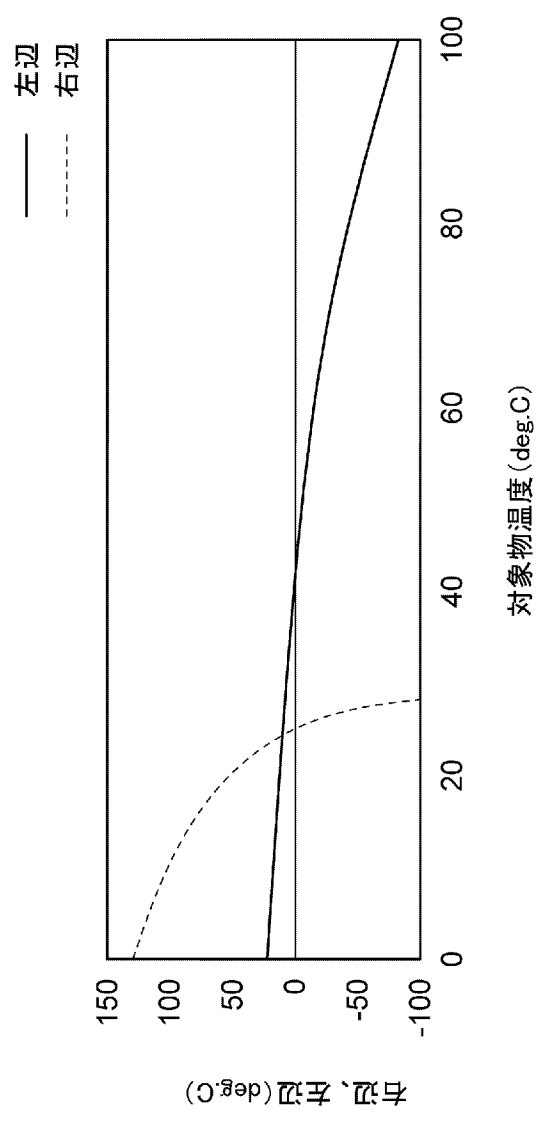


(b)

[図14]



[图15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2024/010200

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>G01J 5/70</i> (2022.01)i; <i>G01J 5/00</i> (2022.01)i; <i>G01J 5/60</i> (2006.01)i; <i>H01L 21/66</i> (2006.01)i FI: G01J5/70 C; G01J5/00 101C; G01J5/60 E; G01J5/70 Z; H01L21/66 L; H01L21/66 X		
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) G01J 5/00-5/90; G01K 13/00; H01L 21/203; H01L 21/26-21/268; H01L 21/322-21/326; H01L 21/363; H01L 21/42-21/428; H01L 21/477-21/479; H01L 21/64-21/66		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2024 Registered utility model specifications of Japan 1996-2024 Published registered utility model applications of Japan 1994-2024		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2022/215417 A1 (HORIBA, LTD.) 13 October 2022 (2022-10-13) paragraphs [0009], [0021]-[0041], [0048], fig. 1-4	1, 4-9
A		2-3
Y	JP 04-130746 A (HITACHI, LTD.) 01 May 1992 (1992-05-01) page 3, lower left column, lines 11-18, fig. 9-13	1, 4-9
A		2-3
Y	JP 06-241907 A (TOKAI CARBON CO., LTD.) 02 September 1994 (1994-09-02) paragraph [0018], fig. 1	6
A	JP 2002-122480 A (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 26 April 2002 (2002-04-26) entire text, fig. 1-12	1-9
A	JP 2000-256848 A (CANON KABUSHIKI KAISHA) 19 September 2000 (2000-09-19) entire text, fig. 1-5	1-9
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 "D" document cited by the applicant in the international application "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 19 May 2024		Date of mailing of the international search report 28 May 2024
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2024/010200

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2000-121447 A (TOKYO ELECTRON LIMITED) 28 April 2000 (2000-04-28) entire text, fig. 1-9	1-9
A	井内徹, シリコン半導体ウエハのin situ温度計測, 計測と制御, 2008, vol. 47, no. 5, pages 395-402, (IUCHI, Tohru, In Situ Temperature Measurement of Silicon Semiconductor Wafers, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers) entire text, fig. 1-13	1-9
A	JP 04-069531 A (TOKYO ELECTRON LIMITED) 04 March 1992 (1992-03-04) entire text, fig. 1-2	1-9
A	US 4956538 A (TEXAS INSTRUMENTS, INCORPORATED) 11 September 1990 (1990-09-11) entire text, fig. 1-3	1-9
A	渡辺智司 他, 放射温度計による半導体熱処理装置内のウエハ温度計測, 計測自動制御学会論文集, 1989, vol. 25, no. 9, pages 925-931, (WATANABE, Tomoji et al., Radiation Thermometry of Silicon-Wafer in Semiconductor Heat-Treatment Equipment, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers) entire text, fig. 1-9	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/JP2024/010200

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2022/215417	A1	13 October 2022	EP 4303547 A1 paragraphs [0010], [0023]- [0045], [0053], fig. 1-4	
JP	04-130746	A	01 May 1992	(Family: none)	
JP	06-241907	A	02 September 1994	(Family: none)	
JP	2002-122480	A	26 April 2002	(Family: none)	
JP	2000-256848	A	19 September 2000	(Family: none)	
JP	2000-121447	A	28 April 2000	US 6283630 B1	
JP	04-069531	A	04 March 1992	(Family: none)	
US	4956538	A	11 September 1990	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01J 5/70(2022.01)i; G01J 5/00(2022.01)i; G01J 5/60(2006.01)i; H01L 21/66(2006.01)i FI: G01J5/70 C; G01J5/00 101C; G01J5/60 E; G01J5/70 Z; H01L21/66 L; H01L21/66 X		
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（IPC）） G01J 5/00-5/90; G01K 13/00; H01L 21/203; H01L 21/26-21/268; H01L 21/322-21/326; H01L 21/363; H01L 21/42-21/428; H01L 21/477-21/479; H01L 21/64-21/66 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 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2024年 日本国実用新案登録公報 1996-2024年 日本国登録実用新案公報 1994-2024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）		
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	WO 2022/215417 A1 (株式会社堀場製作所) 13.10.2022 (2022-10-13) 段落番号【0009】、【0021】-【0041】、【0048】、第1-4 図	1, 4-9 2-3
Y A	JP 04-130746 A (株式会社日立製作所) 01.05.1992 (1992-05-01) 第3頁左下欄第11-18行、第9-13図	1, 4-9 2-3
Y A	JP 06-241907 A (東海カーボン株式会社) 02.09.1994 (1994-09-02) 段落番号【0018】、第1図	6 1-9
A	JP 2002-122480 A (株式会社東芝) 26.04.2002 (2002-04-26) 全文、第1-12図	1-9
A	JP 2000-256848 A (キヤノン株式会社) 19.09.2000 (2000-09-19) 全文、第1-5図	1-9
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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、一般的技术水準を示すもの “D” 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献 “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抵 触するものではなく、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 19.05.2024	国際調査報告の発送日 28.05.2024	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 平田 佳規 2W 9807 電話番号 03-3581-1101 内線 3258	

C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリ*	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
A	JP 2000-121447 A (東京エレクトロン株式会社) 28.04.2000 (2000 - 04 - 28) 全文, 第 1 - 9 図	1 - 9
A	井内 徹, シリコン半導体ウエハのin situ温度計測, 計測と制御, 2008, 第47巻 第5号, 第395-402頁 全文, 第 1 - 13 図	1 - 9
A	JP 04-069531 A (東京エレクトロン株式会社) 04.03.1992 (1992 - 03 - 04) 全文, 第 1 - 2 図	1 - 9
A	US 4956538 A (TEXAS INSTRUMENTS, INCORPORATED) 11.09.1990 (1990 - 09 - 11) 全文, 第 1 - 3 図	1 - 9
A	渡辺 智司 他, 放射温度計による半導体熱処理装置内のウエハ温度計測, 計測自動 制御学会論文集, 1989, 第25巻 第9号, 第925-931頁 全文, 第 1 - 9 図	1 - 9

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2024/010200

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2022/215417	A1	13.10.2022	EP 4303547 A1 段落番号【0010】， 【0023】－【0045】，【0053】，第1 －4図	
JP	04-130746	A	01.05.1992	(ファミリーなし)	
JP	06-241907	A	02.09.1994	(ファミリーなし)	
JP	2002-122480	A	26.04.2002	(ファミリーなし)	
JP	2000-256848	A	19.09.2000	(ファミリーなし)	
JP	2000-121447	A	28.04.2000	US 6283630 B1	
JP	04-069531	A	04.03.1992	(ファミリーなし)	
US	4956538	A	11.09.1990	(ファミリーなし)	