

(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
2014 年 12 月 11 日(11.12.2014)



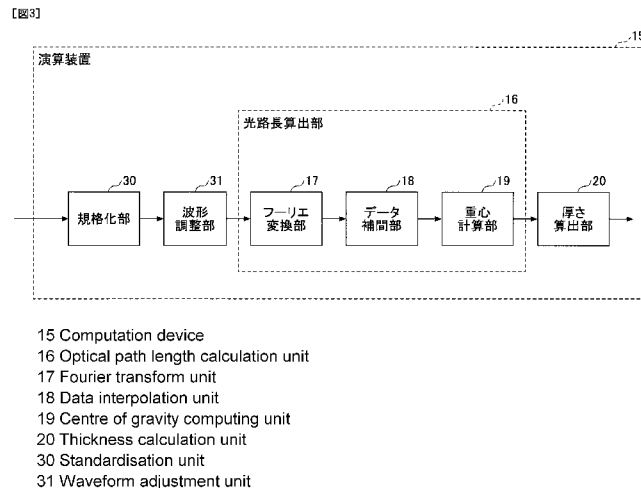
(10) 国際公開番号

WO 2014/196401 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 11/06 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/063859
- (22) 国際出願日: 2014 年 5 月 26 日(26.05.2014)
- (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 2013-121202 2013 年 6 月 7 日(07.06.2013) JP
- (71) 出願人: 東京エレクトロン株式会社 (TOKYO ELECTRON LIMITED) [JP/JP]; 〒1076325 東京都港区赤坂五丁目 3 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 永井 健治 (NAGAI, Kenji); 〒9813629 宮城県黒川郡大和町テクノヒルズ 1 番 東京エレクトロン宮城株式会社内 Miyagi (JP).
- (74) 代理人: 伊東 忠重, 外(ITOHO, Tadashige et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目 1 番 1 号丸の内 M Y P L A Z A (明治安田生命ビル) 1 6 階 Tokyo (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, 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, IR, IS, KE, KG, 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, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, 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, RW, SD, SL, 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, 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:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: METHOD FOR MEASURING THICKNESS OF OBJECT TO BE MEASURED

(54) 発明の名称: 測定対象物の厚さ計測方法



(57) Abstract: Provided is a measurement method wherein: measurement light having a wavelength that is transmitted by an object to be measured is output from a light source; a collimator or a focuser is moved, the measurement light output from the collimator or the like is emitted to the measurement position of a first main surface of the object to be measured, and reflected light from the first main surface and an opposing second main surface is incident to the collimator or the like; reflected light from the collimator or the like is incident to a light receiving element, the intensity of the light incident to the light receiving element is acquired, and the wavelength of the light incident to the light receiving element is swept; the interference intensity distribution, which is dependent on the wavelength and is the intensity distribution of the reflected light from the first main surface and the second main surface, is measured using the acquired light intensity and the swept light wavelength; and the thickness of the object to be measured is measured, in a state of non-contact with the object to be measured, on the basis of a waveform obtained by performing a Fourier transform on the interference intensity distribution.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2014/196401 A1

光源から測定対象物を透過する波長を有する測定光を出力し、コリメータ又はフォーカサーを移動させて、前記コリメータ等から前記出力した測定光を前記測定対象物の第1主面の計測位置へ出射し、前記第1主面及び対向する第2主面からの反射光を前記コリメータ等へ入射し、前記コリメータ等からの反射光を受光素子に入射し、前記受光素子に入射された光の強度を取得し、前記受光素子に入射された光の波長を掃引し、前記取得した光の強度及び前記掃引した光の波長を用いて、波長に依存した強度分布であって前記第1主面及び前記第2主面からの反射光の強度分布である干渉強度分布を測定し、前記干渉強度分布をフーリエ変換して得られる波形に基づいて前記測定対象物の厚さを前記測定対象物に非接触に計測する、ことを含む計測方法が提供される。

明 細 書

発明の名称：測定対象物の厚さ計測方法

技術分野

[0001] 測定対象物の厚さ計測方法に関する。

背景技術

[0002] 基板処理装置の内部には様々な装置が設けられている。例えば、基板は、載置台に設けられた静電チャック（ESC: Electrostatic Chuck）上に載置される。静電チャックは、導電性のシート状の電極層の表裏を誘電体層にて挟んだ構成を有する（例えば、特許文献1を参照）。基板は、直流電圧源から電極層に電圧を印加することにより生じるクーロン力によって静電チャックに吸着される。

[0003] 通常、静電チャックの製造例としては、図1のSTEP1に示したように、電極層110の表裏を誘電体層120、130によって挟んで積層させた状態で焼結させる方法が用いられることが多い。誘電体層120、130にセラミックを用いる場合、焼結する際、図1のSTEP2に示したように、静電チャック100は、圧力がかけられた状態で高温処理される。このため、圧力や熱応力等により静電チャック100に歪みが生じることがある。焼結後、図1のSTEP3に示したように、静電チャック100の表裏面は、研磨され平坦化される。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2013-9001号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、静電チャック100の表裏面が平坦化されても、例えば、図1のSTEP3に示したように焼結時に静電チャック100の内部が歪んだ状態では、誘電体層120、130の厚さは不均一になる。

- [0006] 一方、誘電体層 120、130 の厚さには高い均一性が要求される。例えば、誘電体層 120、130 の厚さが設計値よりも厚い場合、熱容量が大きくなるために熱応答性が悪くなり、基板の温度制御性が悪化する。また、静電力が弱くなるために基板に対して十分な吸着力が得られず、特に基板の裏面に供給する伝熱ガスの圧力が高い場合等に基板が静電チャック 100 から跳ねる要因となる。
- [0007] また、例えば、誘電体層 120、130 の厚さが設計値よりも薄い場合、静電チャック 100 に十分な機械的強度が得られない。また、絶縁性が十分でないために絶縁破壊を生じさせ、リーク電流や異常放電を発生させることがある。
- [0008] 以上のように、基板処理装置に取り付けられる静電チャック等の装置には、高い設計精度が求められる。よって、製造された装置の中から高い性能を有する装置を選別するためには、高精度で装置内の状態を計測する方法が望まれる。また、パーティクルや汚染防止対策の観点から非接触で装置内の状態を計測できることが好ましい。
- [0009] 上記課題に対して、一側面では、測定対象物の厚みを非接触で精度良く計測することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0010] 上記課題を解決するために、一の態様によれば、
- 第 1 主面及び前記第 1 主面に対向する第 2 主面を有する測定対象物の厚さを計測する方法であって、
- 光源から前記測定対象物を透過する波長を有する測定光を出力する第 1 のステップと、
- コリメータ又はフォーカサーを移動させて、前記コリメータ又はフォーカサーから前記出力した測定光を前記測定対象物の第 1 主面の計測位置へ出射し、前記第 1 主面及び前記第 2 主面からの反射光を前記コリメータ又はフォーカサーへ入射する第 2 のステップと、
- 前記コリメータ又はフォーカサーからの反射光を受光素子に入射し、前記

受光素子に入射された光の強度を取得し、前記受光素子に入射された光の波長を掃引する第3のステップと、

前記取得した光の強度及び前記掃引した光の波長を用いて、波長に依存した強度分布であって前記第1主面及び前記第2主面からの反射光の強度分布である干渉強度分布を測定する第4のステップと、

前記干渉強度分布をフーリエ変換して得られる波形に基づいて前記測定対象物の厚さを前記測定対象物に非接触に計測する第5のステップと、

を含むことを特徴とする計測方法が提供される。

発明の効果

[0011] 一の態様によれば、測定対象物の厚みを非接触で精度良く計測することができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]静電チャックの製造例を示す図である。

[図2]一実施形態に係る光干渉システムの全体構成図である。

[図3]図2に示す演算装置の機能ブロック図である。

[図4]波長変換フィルタにおける印加電圧と透過波長との関係の一例を示すグラフである。

[図5]「a」は、電圧の時間サンプリング、「b」は、光強度の時間サンプリング、「c」は、光強度と電圧との関係の一例を示すグラフである。

[図6]波長変換フィルタを用いた場合の波長－強度スペクトルの一例である。

[図7]入射光スペクトル及び反射光スペクトルを説明する概要図である。

[図8]反射光スペクトルのフーリエ変換を説明する概要図である。

[図9]誘電体最大計測厚さを説明する概要図である。

[図10]最小空間分解能を説明する概要図である。「a」は、位置に依存した強度分布を示すスペクトルである。「b」は、波数に依存した強度分布を示すスペクトルである。

[図11]「a」は、反射光スペクトルの一例である。「b」は、「a」に示す反射光スペクトルのFFT後のピーク波形である。

[図12]「a」は、反射光スペクトルの一例である。「b」は、「a」に示す反射光スペクトルのFFT後のピーク波形である。

[図13]「a」は、反射光スペクトルの一例である。「b」は、「a」に示す反射光スペクトルのFFT後のピーク波形である。

[図14]「a」及び「b」は、ガウス関数の一例である。「c」は、重心を好適に算出するために必要なガウス関数を説明する概要図である。

[図15]「a」は、反射光スペクトルの一例である。「b」は、ガウス関数の一例である。「c」は、「a」に示す反射光スペクトルを「b」に示すガウス関数で調整した後のスペクトルである。

[図16]「a」は、反射光スペクトルの一例である。「b」は、FFT後の波形である。「c」は、「b」に示す波形の一部拡大図である。

[図17]「a」は、反射光スペクトルの一例である。「b」は、FFT後の波形である。「c」は、「b」に示す波形の一部拡大図である。

[図18]光源の半値半幅とFFT後の波形の幅との関係を示すグラフである。

[図19]演算装置の動作を示すフローチャートである。

[図20]演算装置の動作を説明するためのグラフである。「a」が波長に依存した強度分布を示す光源スペクトルである。「b」が波長に依存した強度分布を示す反射光スペクトルである。「c」が波長の逆数に依存した強度分布を示す反射光スペクトルである。

[図21]演算装置の動作を説明するためのグラフである。「a」が波長の逆数に依存した強度分布を示す反射光スペクトルを線形補間したスペクトルである。「b」が「a」の反射光スペクトルを高速フーリエ変換したスペクトルである。「c」が「b」の一部拡大図である。

[図22]静電チャック表面のドット形状と光の入射を説明するための図である。

[図23]ドット内の一点から光を入射させた場合の厚さ計測結果を示した図である。

[図24]ドット内の複数点から光を入射させた場合の厚さ計測結果を示した図

である。

[図25]フォーカサーを用いて光を入射させた場合を説明するための図である。

[図26]誘電体層の異常放電発生ポイントと厚さ計測ポイントを示した図である。

[図27]「a」は、誘電体層の直径方向の厚さの計測結果を示し、「b」は、周方向の厚さの計測結果を示した図である。

[図28]「a」は、光源スペクトルの測定光のスペクトルの一例である。「b」は、反射光スペクトルの一例である。

[図29]「a」は、反射率の一例である。「b」は、ガウス関数の一例である。「c」は、調整後の反射光スペクトルの一例である。

[図30]光干渉システムの他の例を示す機能ブロック図である。

[図31]光干渉システムの他の例を示す機能ブロック図である。

[図32]光干渉システムの他の例を示す機能ブロック図である。

発明を実施するための形態

[0013] 以下、本発明を実施するための形態について図面を参照して説明する。なお、本明細書及び図面において、実質的に同一の構成については、同一の符号を付することにより重複した説明を省く。

[0014] [静電チャックの内部の計測]

図1に示した静電チャック100の誘電体層120、130の厚さには高い均一性が要求される。例えば、誘電体層120、130の厚さが設計値よりも厚い場合、熱容量が大きくなるために熱応答性が悪くなり、基板の温度制御性が悪化する。また、静電力が弱くなるために基板に対して十分な吸着力が得られず、特に基板の裏面に供給する伝熱ガスの圧力が高い場合等に基板が静電チャック100から跳ねることがある。

[0015] また、例えば、誘電体層120、130の厚さが設計値よりも薄い場合、静電チャック100に十分な機械的強度が得られない。また、絶縁性が十分でないために絶縁破壊を生じさせ、リーク電流や異常放電を発生させること

がある。

[0016] このように、誘電体層 120、130の厚さの均一性は、静電チャック 100の性能の良し悪しに繋がる。しかしながら、静電チャック 100の製造工程では、焼結時に静電チャック 100にかかる圧力や熱応力等によって内部に歪みが生じる場合がある（図 1のSTEP 2）。歪みがある状態で誘電体層 120、130の表面 120a、130aを研磨すると、誘電体層 120、130の表面 120a、130aは平坦になる。しかし、静電チャック 100の内部の歪みにより、誘電体層 120、130の厚さは不均一になる（図 1のSTEP 3）。

[0017] 誘電体層 120、130の厚さが均一で、高い性能を有する静電チャック 100を選別するためには、誘電体層 120の表面 120aから電極層 110の表面 110aまでの距離を高精度かつ非破壊で計測する方法が望まれる。また、誘電体層の厚さを計測する際、パーティクルや汚染防止対策の観点から非接触で計測されることが好ましい。

[0018] 誘電体層の厚さを計測する方法の一例としては、静電容量の計測値から計算する方法がある。しかし、この方法では、誘電体層の表面に計測用のプローブが接触するため、パーティクルや金属汚染が発生する場合がある。これに対して、パーティクルや金属汚染の対策としてプローブにキャップを付けて計測する方法がある。しかし、この場合、プローブの押し付け圧力によって計測された数値に誤差が生じてしまう可能性がある。また、静電チャック 100は積層構造であり、製造時に研磨による平坦化処理（図 1のSTEP 3参照）が行われるため、静電チャック 100の全体の厚さを計測しただけでは、静電チャック 100の内部に生じている歪みを計測することはできない。

[0019] また、誘電体層の厚みについては、前述のように高い設計精度が要求されている。つまり、「誘電体層が絶縁破壊を発生する下限の厚み」以上であって、「静電チャックによって基板を吸着可能な上限の厚み」以下でなければならない。一般的な静電チャックの場合、電極層 110の表面 110aから

誘電体層 120 の表面 120a までの数値は数百 μm 程度である。より望ましくは、約 200 μm 以上 400 μm 以下である。したがって、図 1 の STEP 3 に示した電極層 110 の歪み α の許容範囲も μm オーダーの分解能で測定する必要がある。このように、誘電体層の厚さを計測する方法には高精度な分解能が要求され、静電容量の計測値から誘電体層の厚さを計算する方法では困難である。

[0020] これに対して、本実施形態では、誘電体層の厚さを光学的に計測する方法を提案する。これにより、誘電体層を高精度かつ非接触に計測することができる。以下、本実施形態に係る誘電体層の厚さを計測する方法について説明する。

[0021] [システムの全体構成]

まず、本実施形態に係る光干渉システムについて、図 2 を参照しながら説明する。図 2 は、一実施形態に係る光干渉システムの全体構成図である。

[0022] 光干渉システム 1 は、一実施形態に係る誘電体層の厚さの計測方法を実行するシステムである。光干渉システム 1 は、OCT (Optical Coherence Tomography) を利用して測定対象物の厚さを計測する。

[0023] 光干渉システム 1 は、光源 10、光サーキュレータ 11、コリメータ 12、チューナブルフィルタ 40、受光素子 41、A/D 変換部 42、波長制御部 43 及び演算装置 15 を有している。なお、光源 10、光サーキュレータ 11、コリメータ 12、チューナブルフィルタ 40 及び受光素子 41 のそれぞれは、光ファイバーケーブルにより接続されている。

[0024] 光源 10 は、本実施形態の測定対象物である誘電体層 120 を透過する波長の測定光を出力する。光源 10 として、例えば SLD (Super Luminescent Diode) が用いられる。誘電体層 120 は、例えば板状を呈し、表面 120a 及び裏面 120b を有している。

[0025] 裏面 120b は、電極層 110 との接触面である。本実施形態では、測定対象物の一例として、静電チャック 100 に使用される誘電体層の厚さを計

測する。測定対象物の他の例としては、 SiO_2 （石英）又は Al_2O_3 （サファイア）等の誘電体の他、例えば Si （シリコン）が挙げられる。誘電体層120の表面120aは、測定対象物の第1主面の一例であり、誘電体層120の裏面120bは、測定対象物の第1主面に対向する第2主面の一例である。

[0026] 光サーキュレータ11は、光源10、コリメータ12及びチューナブルフィルタ40に接続されている。光サーキュレータ11は、光源10で発生した測定光をコリメータ12へ出射する。光サーキュレータ11に替えて、 2×1 又は 2×2 のフォトカップラを用いてもよい。

[0027] コリメータ12は、平行光線として調整された測定光を誘電体層120へ出射する。測定光は、誘電体層120の表面120aから誘電体層を透過し、誘電体層120の裏面120b（電極層との接触面）で反射する。コリメータ12は、誘電体層120からの反射光を入射する。反射光には、表面120aの反射光だけでなく裏面120bの反射光が含まれる。コリメータ12は、反射光を光サーキュレータ11へ出射する。光サーキュレータ11は、反射光をチューナブルフィルタ40へ出射する。なお、コリメータ12に替えてフォーカサーを使用してもよい。フォーカサーを使用した方が好ましい場合については後述する。

[0028] チューナブルフィルタ40は、入力光の波長を変更可能な波長可変フィルタである。チューナブルフィルタ40は、ファブリペロー方式、回折格子方式、干渉フィルタ方式、音響光学方式等、印加電圧や印加周波数を制御することによりフィルタを透過させた透過光の波長を制御できるものであれば何でもよい。印加電圧や印加周波数は後述する波長制御部43により制御される。チューナブルフィルタ40は、透過光を受光素子41へ出射する。

[0029] 受光素子41は、光を検出する素子であり、例えば光の強度に応じた信号を出力する。ここでは単一の受光素子41が用いられる。受光素子41として、例えばフォトダイオードや光電子増倍管が用いられる。受光素子41は出力信号をA/D変換部42へ出力する。

- [0030] A/D変換部42は、受光素子41のアナログ出力信号をデジタル信号に変換する。A/D変換タイミングは波長制御部43により制御される。A/D変換部42は、デジタル信号を演算装置15へ出力する。演算装置15は、PC等の機器で実現される制御部の一例である。
- [0031] 波長制御部43は、チューナブルフィルタ40に接続され、チューナブルフィルタ40への印加電圧を制御する。また、波長制御部43は、A/D変換部42に接続され、印加電圧の制御タイミングとA/D変換タイミングとの同期をとる。
- [0032] チューナブルフィルタ40、受光素子41、A/D変換部42及び波長制御部43によって、反射光の反射光スペクトル（干渉強度分布）が測定される。反射光スペクトルは、反射光の波長又は周波数に依存した強度分布を示す。A/D変換部42から演算装置15へ出力されるデジタル信号は、反射光スペクトルとなる。
- [0033] 演算装置15は、反射光スペクトルに基づいて誘電体層120の厚さを計測する。図3は、演算装置15の機能ブロック図である。図3に示すように、演算装置15は、規格化部30、波形調整部31、光路長算出部16及び厚さ算出部20を備えている。
- [0034] 規格化部30は、反射光スペクトルの波形を、予め取得された光源10の測定光のスペクトルを用いて規格化する。例えば、光源10の光源スペクトル（測定光のスペクトル）のプロファイルが歪んでいる場合や非対称である場合には、後述する処理後の信号も歪んでしまい、結果として精度の高い測定をすることができないおそれがある。このため、反射光スペクトルを光源スペクトルで除算して規格化する。すなわち、反射率の波形とする。規格化部30は、算出した波形を波形調整部31へ出力する。
- [0035] 波形調整部31は、波長に依存した窓関数を用いて波形を調整する。窓関数は、掃引部による波長掃引範囲によって定まる中心波長を最大とし、中心波長からの差が大きくなるほど漸次減衰する釣鐘型の関数である。中心波長は、例えば波長掃引範囲の中央値が採用される。窓関数としては、ガウス関

数、ローレンツ関数、及び、ガウス関数及びローレンツ関数の合成関数等が用いられる。波形調整部 31 は、窓関数を規格化部 30 により出力された反射率の波形に対して適用する。波形調整部 31 は、調整後の波形を光路長算出部 16 へ出力する。

[0036] 光路長算出部 16 は、フーリエ変換部 17、データ補間部 18 及び重心計算部 19 を備えている。フーリエ変換部 17 は、反射光スペクトルを高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) によりフーリエ変換する。例えば、時間領域におけるフーリエ変換であれば、周波数 (単位時間あたりの振動数) に依存した強度分布を示す反射光スペクトルを、時間に依存した強度分布を示す反射光スペクトルへ変換する。また、例えば、空間領域におけるフーリエ変換であれば、空間周波数 (単位長さあたりの振動数) に依存した強度分布を示す反射光スペクトルを、位置に依存した強度分布を示す反射光スペクトルへ変換する。データ補間部 18 は、フーリエ変換後の反射光スペクトルの所定のピーク値を含む範囲において、データ点を補間する。重心計算部 19 は、フーリエ変換後の反射光スペクトルの所定のピーク値の重心位置を計算する。光路長算出部 16 は、重心位置に基づいて光路長を算出する。

[0037] 厚さ算出部 20 は、光路長を測定対象物の素材の屈折率で割ることで、測定対象の厚さを算出する。たとえば、 Al_2O_3 の屈折率は、波長 $1\ \mu\text{m}$ において 1.8 である。 Si の屈折率は、波長 $4\ \mu\text{m}$ において 3.4 である。 SiO_2 の屈折率は、波長 $1\ \mu\text{m}$ において 1.5 である。

[0038] なお、規格化部 30 は、光源スペクトルが計測波長範囲内に収まる場合には備えなくても良い。この場合、波形調整部 31 は、A/D 変換部 42 により出力されたデジタル信号に対して窓関数を適用する。

[0039] 以下では、チューナブルフィルタ 40 及び A/D 変換部 42 を用いた波長掃引の動作原理について詳細を説明する。ここでは、以下の説明の理解を容易にするために、印加電圧を用いて波長を変更する場合を説明する。図 4 は、チューナブルフィルタ 40 における印加電圧と透過波長との関係を示すグ

ラフである。図4に示すように、予め印加電圧と透過光の波長との関係を取得しておく。次に、図5に示すように、A/D変換部42において時間サンプリングを行う。図5の「a」は、電圧Vに対して時間サンプリングしたグラフであり、図5の「b」は、光強度Iに対して時間サンプリングのグラフである。図5の「a」及び図5の「b」に基づいて、図5の「c」に示すように、電圧Vと光強度との関係を導出できる。なお、図5の「c」に示すグラフを計測結果から直接プロットしてもよい。図4に示すグラフ及び図5の「c」に示すグラフを用いて、波長と強度のスペクトルが取得できる。図6は、光スペクトルの一例である。なお、図6に示すグラフを測定結果から直接プロットしてもよい。図4～図6を用いて説明したように、チューナブルフィルタ40を用いることで、単一の受光素子を用いた場合であっても光スペクトルを取得することができる。

[0040] 上記構成を有する光干渉システム1によって、誘電体層120の表面120aと裏面120bとの光干渉を利用して誘電体層120の厚さを測定する（FFT周波数領域法）。以下、光干渉の原理について説明する。図7は、入射光スペクトル及び反射光スペクトルを説明する概要図である。図7に示すように、光源10からの測定光を入射光とする。入射光スペクトルの強度 $S(k)$ は、空間周波数 $1/\lambda$ （単位長さあたりの振動数）に依存する。光源10の波長を λ とすると波数 k は $2\pi/\lambda$ である。誘電体層120の厚さを d 、屈折率を n 、反射率を R とする。反射光Eは、複数の反射成分を重ねたものになる。

[0041] 例えば、E1は、表面120aにおける反射成分である。E2は、裏面120bにおける反射成分である。E3は、表面120aで一回、裏面120bで2回反射された反射成分である。なお、E4以降の反射成分は省略している。複数の成分が重なり、反射光スペクトルの強度 $I(k)$ が得られる。反射光スペクトルの強度 $I(k)$ は、入射光スペクトルの強度 $S(k)$ と以下の数式で示す関係がある。

[0042]

[数1]

$$I(k) \propto \{2R(1-R) - 2R(1-2R)\cos(2nkd) - 2R^2 \cos(4nkd)\} S(k) \quad \cdots (1)$$

上記の式1において、第2項は表裏面干渉の項である。第3項は表裏面多重干渉の項である。式1をフーリエ変換すると、位置に依存した反射光スペクトルを得ることができる。

[0043] 図8は、反射光スペクトル $I(k)$ のフーリエ変換を説明する概要図である。図8に示すように、空間領域フーリエ変換により、空間周波数 $1/\lambda$ を位置 x に変換している。位置 x に変換された反射光スペクトルの強度 $I(x)$ は、式1をフーリエ変換することにより、以下の通りとなる。

[0044] [数2]

$$I(x) = 2R(1-R) \cdot S(x) - R(1-2R) \cdot \{S(x+2nd) + S(x-2nd)\} - R^2 \cdot \{S(x+4nd) + S(x-4nd)\} \quad \cdots (2)$$

上記の式2に示すように、 $2nd$ ごとにピーク値が出現する。 $2nd$ は表裏面の光路差である。すなわち nd は、誘電体層の表裏面間の光路長である。光路長 nd に基づき誘電体層の厚さを算出することができる。なお、上記説明では空間領域フーリエ変換を用いたが、時間領域フーリエ変換を用いてもよい。周波数を ν とすると位置 x とは以下の関係を満たす。

[0045]

[数3]

$$2\pi \cdot \nu \cdot t = 2\pi \cdot \frac{\nu}{c} \cdot ct = 2\pi \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot x$$

次に、光干渉システム 1 の測定可能な最大の厚さ（最大計測厚さ）と反射光スペクトルのフーリエ変換後のデータ間隔について説明する。図 9 は、反射光について説明する概要図である。図 9 に示すように、厚さ d 、屈折率 n の誘電体層 120 において、表面の位置を 0、裏面の位置を x としている。このとき、FFT における時間 $\Delta \tau$ と角周波数 $\Delta \omega$ との関係は、以下のよう
に表される。

[0046] [数4]

$$\Delta \tau = \frac{2\pi}{\Delta \omega} \quad \cdots (3)$$

ここで、角周波数 ω 、 $\Delta \omega$ を、光源スペクトルの波長 λ 、半値半幅 $\Delta \lambda$ で表現すると、以下のようになる。

[0047] [数5]

$$\omega = 2\pi \cdot \nu = 2\pi \frac{c}{\lambda}, \quad \Delta \omega = -2\pi \cdot \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad \cdots (4)$$

周波数は正の値であるから、

[0048] [数6]

$$\Delta\omega = -2\pi \cdot \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda \Rightarrow 2\pi \cdot \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda \quad \dots (5)$$

従って、

[0049] [数7]

$$\Delta\tau = \frac{2\pi \cdot \lambda^2}{2\pi \cdot c \cdot \Delta\lambda} = \frac{\lambda^2}{c \cdot \Delta\lambda} \quad \dots (6)$$

である。

[0050] 屈折率 n (平均屈折率 n_{ave}) の誘電体層 120 中を光が時間 $\Delta\tau$ で移動する距離を $\Delta x'$ とすると、距離 $\Delta x'$ は、上記式 3 及び式 5 を用いて、以下のように表現される。

[0051] [数8]

$$\Delta x' = \frac{c}{n_{ave}} \cdot \Delta\tau = \frac{\lambda^2}{n_{ave} \cdot \Delta\lambda} \quad \dots (7)$$

表面を透過し裏面で反射するため、往復距離を考慮して $\Delta x' = 2 \Delta x$ とする。以上より、FFT後の反射光スペクトルのデータ間隔 Δx は以下の通りとなる。

[0052] [数9]

$$\Delta x = \frac{c}{2 \cdot n_{ave}} \cdot \Delta \tau = \frac{\lambda^2}{2 \cdot n_{ave} \cdot \Delta \lambda} \quad \cdots (8)$$

周波数領域法では、実際のスペクトル強度 $I(k)$ は、波長軸方向のサンプリング数 N_s の離散的な値となる。従って、FFT後のデータは、 Δx 間隔の $N_s / 2$ 個の離散的なデータとなる。従って、最大計測光学厚さ x_{max} は、以下の式で表すことができる。

[0053] [数10]

$$x_{max} = \frac{\lambda^2}{2 n_{ave} \cdot \Delta \lambda} \cdot \frac{N_s}{2} = \frac{\lambda^2}{4 n_{ave} \cdot \Delta \lambda} \cdot N_s \quad \cdots (9)$$

これは実空間の座標に変換したときの値であり、FFT後の分光スペクトルのデータはこの値の $2 n_{ave}$ 倍となる。従って、FFT後の空間における最大計測光学厚さ X_{max} 、及びデータ間隔 ΔX は、以下の式で表すことができる。

[0054] [数11]

$$X_{max} = 2 \cdot n_{ave} \cdot x_{max} = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \Delta \lambda} \cdot N_s \quad \cdots (10)$$

[0055]

[数12]

$$\Delta X = 2 \cdot n_{ave} \cdot \Delta x = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \quad \cdots (11)$$

これらは媒質の屈折率によらない一般式であり、測定系の条件のみで決定される。実際の測定系においては、 $\Delta \lambda$ はF F Tの最小周期と考えることができるため、ここでは、 $\Delta \lambda$ は分光器の測定波長範囲、または波長スキャンレンジと考えることができる。波長スパン（測定波長域）を Δw 、分光器の中心波長を λ_0 とすると、式12，13は以下の式で表される。

[0056] [数13]

$$X_{max} = \frac{\lambda_0^2}{2 \cdot \Delta w} \cdot N_s \quad \cdots (12)$$

[0057] [数14]

$$\Delta X = \frac{\lambda_0^2}{\Delta w} \quad \cdots (13)$$

ここで具体的な例を用いて、測定対象物の厚さについて検討する。例えば従来のCCDアレイを用いた手法を採用した場合であって、波長 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 、サンプリング数 $N_s = 512$ 、波長スパン $\Delta w = 40 \text{ nm}$ とすると、式12より最大計測光学厚さ X_{max} は 15.4 mm となる。これをSi (n =

3. 65) に適用すると、厚さ $d = 2.1 \text{ mm}$ となる。また、 Q_z ($n = 1.47$) に適用すると、厚さ $d = 5.2 \text{ mm}$ となる。また、サファイア ($n = 1.8$) に適用すると、厚さ $d = 4.3 \text{ mm}$ となる。

[0058] 式 12 により、より厚い測定対象物を測定するためには、波長 λ_0 を長くする手法、波長スパン Δw を狭くする手法が考えられる。しかし、波長 λ_0 をできるだけ長く設定した場合であっても約 10% 長くする程度が限界である。また、波長スパン Δw をできるだけ狭く設定する場合であっても 1 桁小さくする程度が限界である。このため、これらのパラメータを変更する手法では、 S_i に換算して数十 mm オーダーの厚さを測定することができない。

[0059] 一方、式 12 により、サンプリング数 N_s を大きくすれば、より厚い媒質を計測することができる。従来の CCD センサ等であれば、サンプリング数 N_s は配列数であるため固定値であり、変更することが容易ではない。これに対して、チューナブルフィルタ 40 で反射光の波長を掃引して単一の受光素子 41 で検出することにより、波長軸方向のサンプリング数 N_s をいかようにも設定することができる。例えばサンプリング数 N_s を 5000 等に設定した場合には、512 個を配列させた CCD アレイに比べて 10 倍程度の厚い測定対象物を測定することができる。

[0060] また、式 12 により、分光器の波長範囲 Δw を広くすれば、FFT 後のデータ間隔 ΔX を小さくすることができる。これにより、データ間隔を小さくすることと、計測可能厚さを厚くすることとは、両立しないことがわかる。以上は、屈折率によらない一般式である。よって、屈折率 n_{ave} の媒質中においての実スケールに変換する場合は、それぞれ $2 n_{ave}$ で除すればよい。

[0061] 次に、最小空間分解能について考察する。図 10 は、最小空間分解能を説明する概要図である。図 10 の「b」は、ガウス関数で近似できる光源の波数 k に依存した強度分布を示すスペクトルである。図 10 の「b」に示すスペクトルの強度 $S(k)$ は、ピーク値の波数を k_0 、ピーク値の強度を $1 / \Delta k \cdot (\pi)^{1/2}$ 、半値半幅を Δk とすると、以下の式で表すことができる。

[0062] [数15]

$$S(k) = \frac{1}{\Delta k \sqrt{\pi}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{k - k_0}{\Delta k} \right)^2 \right] = \frac{1}{\Delta k \sqrt{\pi}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{k - k_0}{\Delta k'} \right)^2 \cdot \ln 2 \right] \quad \cdots (14)$$

なお、

[0063] [数16]

$$\Delta k = \frac{\Delta k'}{\sqrt{\ln 2}} \quad \cdots (15)$$

である。また、

[0064] [数17]

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda \quad \cdots (16)$$

との関係が成立する。式15, 16を用いて半値半幅 Δk は以下のように表現できる。

[0065]

[数18]

$$\Delta k = \frac{2\pi \cdot \Delta \lambda}{\lambda^2 \sqrt{\ln 2}} \quad \cdots (17)$$

一方、図10の「b」に示すスペクトルをFFT変換すると図10の「a」に示すスペクトルとなる。図10の「a」は、位置xに依存した強度分布を示すガウス関数のスペクトルである。図10の「a」に示すスペクトルの強度S(x)は、ピーク値の位置を0、ピークの強度を1とすると、以下の式で表すことができる。

[0066] [数19]

$$S(x) = \exp(-x^2 \cdot \Delta k^2) = \exp\left[-\left(\frac{x}{\Delta x'_g}\right)^2 \cdot \ln 2\right] \quad \cdots (18)$$

なお、半値半幅 Δk と、S(x)の半値半幅 Δx_g は以下の関係を満たす。

[0067] [数20]

$$\Delta k^2 = \frac{\ln 2}{\Delta x_g^2} \quad \cdots (19)$$

半値半幅を l_c とすると、式19に基づいて、S(x)の半値半幅 Δx_g は以下の式で表現できる。

[0068]

[数21]

$$\Delta x_g = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\Delta k} = \frac{\ln 2}{2\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} = \frac{l_c}{2} \quad \dots (20)$$

強度 $S(x)$ のスペクトルの半値半幅 l_c がコヒーレンス長となる。空間の最小分解能は、 l_c であり、光源 10 のスペクトルの中心波長と半値幅で決定される。

[0069] 次に、上述した最大計測光学厚さ x_{max} に基づいて、必要なサンプリング数 N_s の条件を導出する。光源 10 の中心波長を λ_0 、光源スペクトルの半値半幅を $\Delta \lambda$ 、チューナブルフィルタ 40 の波長掃引範囲である波長スパンを Δw 、誘電体層 120 の屈折率を n とすると、式 9 に基づいて、最大計測光学厚さ x_{max} は以下の式で表される。

[0070] [数22]

$$x_{max} = \frac{\lambda_0^2}{4 \cdot n \cdot \Delta w} \cdot N_s \quad \dots (21)$$

ここで、最大計測厚さ d と最大計測光学厚さ x_{max} とは、以下の条件を満たす必要がある。

[0071]

[数23]

$$d < x_{\max} = \frac{\lambda_0^2}{4 \cdot n \cdot \Delta w} \cdot N_s \quad \dots (22)$$

すなわち、以下の関係を満たすサンプリング数 N_s が必要となる。

[0072] [数24]

$$N_s > \frac{4 \cdot n \cdot d \cdot \Delta w}{\lambda_0^2} \quad \dots (23)$$

例えば、最大計測厚さ $d = 0.775 \text{ mm}$ 、光源 10 の中心波長 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 、誘電体層 120 の屈折率 $n = 3.7$ であれば、以下ようになる。

[0073] [数25]

$$\frac{\Delta w}{N_s} < 2 \times 10^{-10} \quad \dots (24)$$

なお、波長スパン $\Delta w \text{ [m]}$ を $\Delta w' \text{ [nm]}$ へ変換して表現すると、以下のようになる。

[0074]

[数26]

$$\Delta w' [nm] < 0.2 N_s \quad \cdots (25)$$

光干渉システム1にあっては、式25に示す関係を満たす波長スパン $\Delta w'$

[nm]で掃引するとともにサンプリング数 N_s でサンプリングを行う。例えば、波長スパン $\Delta w'$ [nm]が40nmである場合には、サンプリング数 N_s が200より大きい値となるようにサンプリングを行う。

[0075] 次に、測定対象物の厚さ方向の空間分解能について検討する。例えば、波長域が1200nm～2000nmのSuper Continuum光源を用いた場合、コヒーレンス長は、数式20を用いて0.7 μ mとなる。コヒーレンス長は、ガウス関数の半値半幅となるため、空間分解能はその2倍の1.4 μ m程度とすることができる。一方、周波数ドメイン方式では、SC光源を用いた場合、FFT後のデータ間隔 Δx は、式13を用いて3.2 μ mとなる。実空間のデータ間隔 Δx は、FFT後のデータ間隔 Δx を屈折率 n で除算することにより得られるため、例えば、Si（屈折率3.6）であれば $\Delta x = 0.9\mu$ m、 Q_z （屈折率1.46）であれば $\Delta x = 1.46\mu$ mとなる。このため、Siであれば1 μ m程度、 Q_z であれば2 μ m程度の分解能となる。

[0076] 周波数ドメイン方式を利用した測定対象物の厚さの計測では、FFT後の2ndの位置を正確に求めるために、あえてある程度の幅を持つ2nd信号の重み付け重心を計算する。そして、重み付け重心の位置の変化に基づいて光路長2ndの変化を検出する。ここで、重み付け重心を高精度に求めるためには、FFT後の2ndの信号形状がガウス関数に近く、かつ、半値全幅2 Γ 内に少なくとも3個以上の複数のサンプリング点が必要となる。また、2ndの信号形状がガウス関数となるには、光源スペクトル自体もガウス関数となる必要がある。すなわち、Gaussianスペクトル光源で、かつ

、検出範囲内にガウス関数の裾部分が十分に含まれる必要がある。例えば、図 1 1 の「a」に示す反射光スペクトルは、ガウス関数に近いスペクトルの一例である。図 1 1 の「b」は、図 1 1 の「a」に示す反射光スペクトルの F F T 後の信号である。このような反射光スペクトルであれば、F F T 後の信号形状がガウス関数に近く、裾部分も検出範囲 1 5 4 0 ~ 1 5 8 0 n m 内に十分含まれているため、適切に重心位置を求めることができる。しかしながら、図 1 2 の「a」に示す反射光スペクトルのように、裾部分が検出範囲から大きくはみ出している場合には、図 1 2 の「b」に示す信号のようにピークが鋭くなり、重心位置の精度が低下する。また、図 1 3 の「a」に示す反射光スペクトルのように、検出範囲の中心と反射光スペクトルの中心波長が異なる場合には、図 1 3 の「b」に示す信号のように形状がガウス関数とはならず、重心位置の精度が低下する。

[0077] G a u s s i a n スペクトル光源や、任意の G a u s s i a n スペクトル光源のための光学フィルタの設計は困難であるため、F F T の実行前にデータ自体を加工することが考えられる。すなわち、任意のスペクトルを有する光源を用いて、サンプルからの反射光スペクトルを得た後、F F T の実行前に、窓関数を用いて反射スペクトルを加工することが考えられる。加工後の信号を反射光スペクトルとして取り扱うことで、F F T の重心の精度を精度良く求めることができる。

[0078] 窓関数としては例えばガウス関数が用いられる。以下ではガウス関数の一例を説明する。ガウス関数としては、面積を 1 に規格化するものと、高さを 1 に規格化するものがある。図 1 4 の「a」は、面積を 1 に規格化するガウス関数の一例である。中心波長を λ_0 、半値半幅を $\Delta \lambda_{\text{HWHM}}$ とすると、図 1 4 の「a」に示すガウス関数は以下のように表現される。

[0079]

[数27]

$$I(\lambda) = R \left\{ 1 + (1-R)^2 - 2(1-R) \cos \left(2n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \right) \right\} \cdot S(\lambda) \quad \cdots (26)$$

$$S(\lambda) = \frac{1}{\Delta\lambda_{HWHM}} \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_{HWHM}} \right)^2 \right] \cdot \ln 2 \quad \cdots (27)$$

また、図14の「b」は、高さを1に規格化するガウス関数の一例である。

中心波長を λ_0 、半値半幅を $\Delta\lambda_{HWHM}$ とすると、図14の「b」に示すガウス関数は以下のように表現される。

[0080] [数28]

$$I(\lambda) = R \left\{ 1 + (1-R)^2 - 2(1-R) \cos \left(2n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \right) \right\} \cdot S(\lambda) \quad \cdots (28)$$

$$S(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_{HWHM}} \right)^2 \right] \cdot \ln 2 \quad \cdots (29)$$

窓関数として用いられるガウス関数は、図14の「c」に示すように、半値全幅内に3つのサンプリング点が入るように波形を変形しているものが採用される。このため、以下の関係を満たす必要がある。

[0081] [数29]

$$\frac{\ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} > \Delta X = \frac{\lambda_0^2}{\Delta w} \quad \cdots (30)$$

変形すると、

[0082] [数30]

$$\Delta\lambda < \frac{\ln 2}{\pi} \cdot \Delta w \quad \cdots (31)$$

となる。式31より、測定範囲の波長域 Δw が40nmであるとする、8.8nm以下の半値半幅を有する光源が必要となるため、8.8nm以下の半値半幅のガウス関数を窓関数に設定する。なお、図14の「c」に示すガウス関数が高さを1に規格化するガウス関数として、式31を満たす場合には、式29を用いて測定領域の端の強度を求めることができる。すなわち、 $\lambda - \lambda_0 = 20\text{nm}$ 、 $\Delta\lambda_{\text{HWHM}} = 8.8\text{nm}$ とすると、 2.7867×10^{-2} となる。このように、測定領域の端が97%程度減衰していれば、FFT後の2nd信号の形状もガウス関数に近くなるといえる。窓関数を用いることで、光源の波長、スペクトル幅、分光器等の測定系の中心波長、帯域等を気にすることなく測定することができる。

[0083] 以下では、具体的に窓関数を用いた場合を説明する。図15の「a」は、中心波長 $\lambda_0 = 1548\text{nm}$ 、半値半幅 $\Delta\lambda_{\text{HWHM}} = 30\text{nm}$ 、サンプル厚さ $d = 775\mu\text{m}$ 、サンプルの屈折率 $n = 3.7$ とした場合の反射光スペクトルの一例である。図15の「b」は、ガウス関数の一例であり、半値半幅 $\Delta\lambda_{\text{HWHM}} = 5\text{nm}$ である。図15の「c」は、図15の「a」に示す反射光スペクトルに、図15の「b」に示すガウス関数を適用して得られる信号である。

[0084] 図16の「a」（すなわち図15の「a」）に示すように、中心波長 $\lambda_0 = 1548\text{nm}$ 、半値半幅 $\Delta\lambda_{\text{HWHM}} = 30\text{nm}$ 、サンプル厚さ $d = 775\mu\text{m}$ 、サンプルの屈折率 $n = 3.7$ とした場合の反射光スペクトルを用いた場合には、FFT後の2nd信号は、図16の「b」に示すものとなる。図16の「c」は、図16の「b」のピーク部分の拡大図である。このように、ピ

ーク自体が1つのサンプリング点のみで決定されているため、重心位置の精度が低下する。

[0085] これに対して、図17の「a」（すなわち図15の「c」）に示すように、窓関数を適用した後の信号を用いることで、FFT後の2nd信号は、図17の「b」及び図17の「c」に示すように幅を持ったピークを有することとなる。このため、重心位置の精度を向上させることができる。

[0086] また、図18は、光源の半値半幅 $\Delta\lambda_{\text{HWHM}}$ とFFT後の波形の幅との関係を示すグラフである。図18に示すように、光源の半値半幅 $\Delta\lambda_{\text{HWHM}}$ の大きさを変更すると、FFT後の2ndの波形の幅が変化する。FFT後のピーク形状を構成する点が多い程、重心の計算精度が向上する。すなわち、光源の半値半幅 $\Delta\lambda_{\text{HWHM}}$ が小さくなるほどFFT後の2ndの波形の幅を大きくすることができる。

[0087] （誘電体層の厚さを計測する方法）

次に、光干渉システム1を用いて誘電体層の厚さを計測する方法について説明する。図19は、光干渉システム1の動作を示すフローチャートである。図19に示す制御処理は、例えば光源10及び演算装置15の電源がオンされたタイミングから所定の間隔で繰り返し実行される。なお、図19の実行前に、チューナブルフィルタ40の事前設定が済んでいるものとする。すなわち、事前に、例えば図6に示すような印加電圧（又は印加周波数）と透過光の波長との関係が取得されているものとする。

[0088] 図19に示すように、反射光スペクトルの入力処理から開始する（S10）。光源10は、測定光を発生する。例えば、図20の「a」に示すスペクトルの測定光となる。受光素子41は、誘電体層120の表面120a及び裏面120bで反射した反射光のスペクトルを取得する。すなわち、チューナブルフィルタ40によって波長掃引しつつ、受光素子41で検出する。これにより、例えば、図20の「b」に示すスペクトルの反射光となる。光路長算出部16は、受光素子41から反射光のスペクトルを入力する。S10の処理が終了すると、波形調整処理へ移行する（S11）。

[0089] S 1 1 の処理では、波形調整部 3 1 が波形を調整する。すなわち、上述した窓関数を反射光スペクトルに適用する。S 1 1 の処理が終了すると、座標変換処理へ移行する（S 1 2）。

[0090] S 1 2 の処理では、光路長算出部 1 6 が、S 1 1 の処理で得られたスペクトルの座標軸を、波長 λ から空間周波数（ $1/\lambda$ ）へ変換する。例えば、図 20 の「c」に示すスペクトルとなる。S 1 2 の処理が終了すると、第 1 データ補間処理へ移行する（S 1 4）。

[0091] S 1 4 の処理では、光路長算出部 1 6 が、S 1 2 の処理で得られたスペクトルのデータ補間を行う。例えば、サンプリング数を N_s とし、スペクトルのデータとして、空間周波数の配列を $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N_s-1})$ とし、強度の配列を $(y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N_s-1})$ とする。まず、光路長算出部 1 6 は、空間周波数の配列を等間隔に再配列する。例えば、再配列後の空間周波数の配列に含まれる空間周波数を X_i とすると、以下の式を用いて再配列を行う。

[0092] [数31]

$$X_i = x_0 + \frac{x_{N_s-1} - x_0}{N_s - 1} \cdot i \quad \dots (32)$$

次に、光路長算出部 1 6 は、再配列後の空間周波数 X_i における強度を、線形補間で計算する。このときの強度を Y_i とすると、以下の式を用いて算出する。

[0093]

[数32]

$$Y_i = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} \cdot (X_i - x_j) \quad \cdots (33)$$

ただし、 j は $X_i > x_j$ となる最大の整数である。これにより、例えば図 21 の「a」に示すスペクトルとなる。S 14 の処理が終了すると、FFT 処理へ移行する (S 16)。

[0094] S 16 の処理では、フーリエ変換部 17 が、S 14 の処理で補間されたスペクトルをフーリエ変換する (フーリエ変換工程)。これにより、例えば、図 21 の「b」に示すように、縦軸が振幅、横軸が位相のスペクトルとなる。S 16 の処理が終了すると、フィルタリング処理へ移行する (S 18)。

[0095] S 18 の処理では、光路長算出部 16 が、S 16 の処理で得られたスペクトルから $X = 0$ のピーク値をフィルタリングする。例えば、 $X = 0$ から $X = Z$ (所定値) までの範囲の強度データ Y に 0 を代入する。S 18 の処理が終了すると、抽出処理へ移行する (S 20)。

[0096] S 20 の処理では、光路長算出部 16 が、S 18 の処理で得られたスペクトルから $X = 2nd$ のピーク値を抽出する。例えば、ピークの最大値を Y_i とした場合、 Y_{i-10} からデータ点を 20 点抽出する。これは、ピークの中心から裾までのデータを抽出するためである。例えば、ピークの最大値を 1 としたときに、最大値から 0.5 までの範囲が含まれるように抽出する。例えば、図 21 の「c」に示すスペクトルが抽出される。S 20 の処理が終了すると、第 2 データ補間処理へ移行する (S 22)。

[0097] S 22 の処理では、データ補間部 18 が、S 20 の処理で得られた $2nd$ ピークのデータを補間する (データ補間工程)。データ補間部 18 は、例えばデータ点間を補間数 N_A で等間隔に線形補間する。補間数 N_A は、例えば必要な精度に基づいて予め設定される。

[0098] 例えば、以下の数式を用いてデータ補間を行う。

[0099] [数33]

$$Y_i = (y_{j+1} - y_j) \cdot \frac{X_i - X_j}{X_{j+1} - X_j} \quad \dots (34)$$

ここで、 j は強度の配列に用いた指標である。データ補間部 18 は、上記式 32 を $i = 0 \sim N - 1$ の範囲で実行する。すなわち、S20 の処理で得られた 20 点の間隔全てを対象にして算出する。このように、フーリエ変換後のデータ間隔を、必要な分割数（補間数 N_A ）で分割し、分割数に応じたデータ数を線形補間する。S22 の処理が終了すると、抽出処理へ移行する（S24）。

[0100] S24 の処理では、重心計算部 19 が、S22 の処理で補間されたデータから重心の計算に利用するデータ範囲のみを抽出する。例えば、重心計算部 19 は、重心計算に使用する閾値を $A\%$ とし、ピークの最大強度 $Y_{MAX} \times A$ 以下の強度データ Y に 0 を代入する。S24 の処理が終了すると、重心計算処理へ移行する（S26）。

[0101] S26 の処理では、重心計算部 19 が、S24 の処理で補間されたデータから重み付け重心を計算する（重み付け重心計算工程）。例えば、以下の式を用いる。

[0102]

[数34]

$$2 \cdot n \cdot d = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i \cdot X_i)}{\sum_{i=1}^N Y_i} \quad \dots (35)$$

なお、Nは重心範囲抽出後のデータ点数である。式35を用いることで光路長ndを算出することができる。S26の処理が終了すると、厚さ計算処理へ移行する（S28）。

[0103] S28の処理では、厚さ算出部20が、S26の処理で得られた光路長ndを測定対象物（ここでは、誘電体層120）の素材の屈折率で割ることで、測定対象の厚さを算出する（厚さ算出工程）。S28の処理が終了すると、図19に示す制御処理を終了する。

[0104] 以上で図19に示す制御処理を終了する。図19に示す制御処理を実行することで、反射光スペクトルのサンプリング数を任意に設定しつつ、ガウス関数を用いて精度のよい反射光スペクトルとすることができる。さらに、少ないデータ点であっても高精度に測定対象物の厚さを測定することができる。データ補間工程にて直線補間をすることで、FFT後の信号プロファイルに依存することなく、重心位置を決定することができ、高精度で測定対象物の厚さを計測することができる。本実施形態の計測方法による誘電体層120の厚さの計測精度は $-6 \mu\text{m} \sim +6 \mu\text{m}$ の範囲であり、誘電体層120の厚みのばらつきの許容範囲の3%以下となるため、十分な精度が得られていることが分かる。

[0105] 以上、一実施形態に係る光干渉システム1及びその方法によれば、窓関数を用いてフーリエ変換前の波形をフーリエ変換に適した波形とすることができるので、フーリエ変換後のピーク波形にある程度の幅を持たせることが可

能となる。よって、ピーク位置の検出精度を向上させることができる。なお、以上に説明した補間方法は、線形補間に限られず、多項式補間であってもよい。

[0106] [ドットパターンニング後の評価]

静電チャック１００の表面には、ドット形状の凸部が均等に形成されている場合がある。そこで、表面がドット形状の静電チャック１００についても、本実施形態に係る誘電体層の厚さの計測方法を使用してその精度を評価した。以下では、ドット形状の凸部が均等に形成されている静電チャック１００に近似した構成にするために、静電チャック１００の表面をドット形状（円状）にパターンニングした後、本実施形態の計測方法を用いて誘電体層の厚さを評価した。

[0107] パターンニングでは、図２２の「a」及び図２２の「b」に示したように、ドット１２０c内の表面１２０c1は、鏡面とし、ドット１２０c外の表面１２０dはサンドブラスト処理により砂面のまま残す。例えば、図２２の「a」には、ドット１２０cの表面１２０c1から誘電体層１２０の底面までの厚さdが示されている。

[0108] また、コリメータ１２からドット１２０cの表面１２０c1までの距離２００mmが示されている。しかし、コリメータ１２からドット１２０cの表面１２０c1までの距離はこれに限られない。

[0109] 図２２の「b」に示したように、ドット外の砂面となっている表面１２０dに測定光（赤外光）を当てると、測定光は散乱してしまう。このため、図２２の「a」に示したように、コリメータ１２の水平移動が可能な調整機構１２aを使用して、コリメータ１２を水平移動させ、ドット１２０cの表面１２０c1から誘電体層１２０に光を入射させるようにする。このように、表面にドット形状が形成されている静電チャック１００の誘電体層１２０の厚さの計測では、コリメータ１２を移動させてドット形状が形成された位置をスキヤニングし、ドット１２０c内から光を入射する。なお、調整機構１２aは、水平移動とともにコリメータ１２の角度調整が可能である。これに

より、コリメータ 12 から出力される測定光の誘電体層 120 への入射角を調整できる。

[0110] 図 1 の S T E P 3 に示したように、誘電体層 120 の表面 120 a は研磨により平坦化されているが、電極層 110 が歪んでいる場合、誘電体層 120 の表面 120 a から電極層 110 (誘電体層 120 の裏面 120 b) までの距離は均一ではない。このとき、反射光の強度は、一般的に静電チャック 100 に垂直に入射している場合に最大となるが、図 19 の S 16 の F F T 処理後の信号が最大になるとは限らない。計測精度を高めるためには、F F T 処理後の信号強度が最も強くなるコリメータ 12 の入射角をその都度採用することが好ましい。

[0111] F F T 処理では、矩形窓、ガウス窓、ハミング窓等の窓関数を用いる。窓関数(ここでは、矩形窓)を用いた場合、有限区間外の波形は 0 と認識され、有限区間終端部分の波形形状がいびつになる。この結果、F F T 処理後の信号強度のピークの分解能とダイナミックレンジとの間にトレードオフが存在することになる。

[0112] よって、本実施形態では、計測精度を高めるためには、調整機構 12 a によって角度調整を行って、F F T 処理後の信号強度が最も強くなる角度にコリメータ 12 の入射角を制御することが好ましい。

[0113] (ドット内の一点から光を入射させた場合の厚さ計測精度)

以下では、調整機構 12 a によってコリメータ 12 を水平移動させ、誘電体層 120 上に形成されたドット 120 c 内の一点から光を入射させ、本実施形態に係る誘電体層の厚さ計測方法を用いて誘電体層 120 の厚さを計測した。その結果を図 23 に示す。横軸は、計測時間(秒)を示し、縦軸は、計測した結果得られた誘電体層 120 の厚さ d (μm) を示す。この結果によれば、厚さ d の平均は、 $385.97\mu\text{m}$ であり、定常状態での測定精度は、 $\pm 0.787\mu\text{m}$ であった。

[0114] 前述したように、誘電体層の厚みは、「誘電体層が絶縁破壊を発生する下限の厚み」以上であって、「静電チャックによって基板を吸着可能な上限の

厚み」以下でなければならない。つまり、誘電体層の厚みについては高い設計精度が求められる。これは、一般的な静電チャックの場合、電極層 110 の表面 110a から誘電体層 120 の表面 120a までの数値は、数百 μm 程度である。より望ましくは、約 200 μm 以上 400 μm 以下であることを示す。したがって、図 1 の STEP 3 に示した電極層 110 の歪み α の許容範囲も μm オーダーの分解能で測定する必要がある。このように、誘電体層の厚さを計測する方法には高精度な分解能が要求される。

[0115] よって、演算装置 15（制御部）は、計測された誘電体層 120 の厚さが 200 μm 以上 400 μm 以下であるかを判定し、その厚さが 200 μm より小さい又は 400 μm より大きい値であった場合には、警告を表示するようにしてもよい。ただし、これに限られず、演算装置 15 は、計測された誘電体層 120 の厚さが、予め定められた範囲内にあるかを判定してもよい。予め定められた範囲は、数百 μm 程度の範囲であってもよい。判定の結果、計測された誘電体層 120 の厚さが、予め定められた範囲に含まれない場合、警告を表示してもよい。

[0116] 同様に、演算装置 15（制御部）は、誘電体層 120 の厚さの最大値（Max）と最小値（Min）との差が 200 μm 以下であるかを判定し、200 μm より大きい場合には、警告を表示するようにしてもよい。ただし、これに限られず、演算装置 15 は、計測された誘電体層 120 の厚さの最大値と最小値との差が、予め定められた閾値以下であるかを判定してもよい。予め定められた閾値は、数百 μm 程度の値であってもよい。判定の結果、計測された誘電体層 120 の厚さの最大値と最小値との差が、予め定められた閾値以下である場合、警告を表示してもよい。

[0117] 以上から、本実施形態に係る誘電体層の厚さの計測方法に対しても測定対象物を μm オーダーの高精度な計測ができることが要求されている。これに対して、図 23 に示した定常状態での誘電体層 120 の厚さ d の測定精度は、 $\pm 0.787 \mu\text{m}$ であり、 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の精度である。これは、本実施形態に係る誘電体層の厚さ計測方法が、誘電体層の厚さの計測に対して十分な

精度を有していることを示す。

[0118] (ドット内の複数点から光を入射させた場合の厚さ計測精度)

次に、調整機構 12a によってコリメータ 12 を水平方向に微調整させ、同一ドット 120c 内の複数点から光を入射させた場合の誘電体層 120 の厚さを計測した。その結果を図 24 に示す。横軸は、計測時間 (秒) を示し、縦軸は、計測した結果得られた誘電体層 120 の厚さ d (μm) を示す。この結果によれば、厚さ d は、最小値 (Min) と最大値 (Max) との間で約 $11\mu\text{m}$ 変動した。よって、同一ドット内で測定位置を移動させた場合の誘電体層 120 の厚さ d の測定精度は、 $\pm 5.5\mu\text{m}$ であった。これは、本実施形態に係る誘電体層の厚さ計測方法は、表面にドット形状を有する誘電体層の厚さの計測に対して、十分な精度を有していることを示す。これによれば、図 25 の「b」に示したように、一つのドット 120c 内の平面性を計測することができる。これにより、静電チャック 100 とウェハとの接触面積による吸着力を予測できる。

[0119] (ドット形状とフォーカサー)

以上の厚さ計測では、コリメータ 12 を用いた。コリメータ 12 は、平行光線として調整された測定光を誘電体層 120 へ出射する。よって、コリメータ 12 は、測定対象物までの距離が長いときに有用である。一方、図 25 に示したように、フォーカサー 13 は、測定光を集光し、誘電体層 120 へ出射する。よって、フォーカサー 13 は、測定対象物までの距離が固定されているときに有用である。例えば、図 25 の「a」では、焦点距離 200mm 、ビーム径 1mm のフォーカサー 13 を使用し、スポット径を $100\mu\text{m}$ とした例が示されている。図 25 の「b」に示したように、許容できるドット 120 の表面の歪みは静電チャック 100 を水平とした場合、およそ 0.3 度となる。

[0120] よって、フォーカサー 13 を利用すれば、表面に凹凸のある形状の測定対象物であっても、ピンポイントの厚み計測が可能となる。つまり、本実施形態に係る誘電体層の厚さ計測方法によれば、フォーカサー 13 を用いること

により、表面にドット形状を有する静電チャック 100 においても、誘電体層 120 の厚さを高精度に計測することができる。

[0121] 加えて、図 25 の「a」に示したドット径は、2 mm 程度であるが、図 25 の「c」に示したように、将来的には、ドット径は数百 μm 程度になる可能性がある。このように、フォーカサー 13 を利用すれば、微細なドット 120c に測定光を入射することができるため、ピンポイントの厚み計測が可能となる。

[0122] (誘電体層の面内厚み分布)

次に、本実施形態に係る誘電体層の厚さ計測方法を用いて、異常放電が発生した誘電体層の厚さを計測した。誘電体層 120 は円筒状であり、図 26 の「a」に示したように、誘電体層 120 の表面は円形である。誘電体層 120 の表面には、ドット 120c が規則的に複数形成されている。

[0123] 誘電体層 120 の上部右側 (Y 軸 -60°) の最外周には、異常放電の発生位置が示されている。図 26 の「b」は、本実施形態における計測位置を示す。計測位置は、ノッチ位置を Y 軸 -180° として Y 軸 $+0^\circ$ に向かうライン A の軸、ライン A に対して -120° 回転させたライン B の軸、ライン A に対して -60° 回転させたライン C の軸である。各ライン上に位置するドット 120c に測定光を入射させる。各ライン上 (つまり、直径方向) に位置するドット 120c は、誘電体層 120 の中心位置 O と、その中心位置 O から半径 50 mm、半径 100 mm、半径 145.5 mm の各周と各ラインが交差する位置に設けられている。よって、各ラインのドット 120c 上の計測位置は、7箇所となる。

[0124] その計測結果を図 27 の「a」に示す。図 27 の「a」では、横軸に中心位置 O、中心位置 O から $\pm 50\text{ mm}$ 、 $\pm 100\text{ mm}$ 、 $\pm 145.5\text{ mm}$ の各計測位置を示し、縦軸に各計測位置における誘電体層 120 の厚さの計測結果を示す。これによれば、誘電体層 120 の厚さは、概ね $300\text{ }\mu\text{m} \sim 470\text{ }\mu\text{m}$ であり、誘電体層 120 の厚さのバラツキは、電極層 110 の歪みの許容範囲である $200\text{ }\mu\text{m}$ 以内に収まっている。ところが、異常放電の発生

位置近傍のドット位置 120c2 では、誘電体層 120 の厚さは約 240 μ m と最も薄かった。

[0125] また、中心位置 O から半径 50 mm、半径 100 mm、半径 145.5 mm の各周方向に位置するドット 120c の計測結果を図 27 の「b」に示す。ノッチ位置 (180°) を中心として周方向に位置する複数点のドット位置において誘電体層 120 の厚さの計測が行われた。計測位置 (ドット位置) の個数は、外周側程多くなっている。

[0126] この結果、誘電体層 120 の厚さのバラツキは、半径 50 mm、半径 100 mm の周方向では小さく、半径 145.5 mm の最外周では大きい。つまり、誘電体層 120 の最外周 (半径 145.5 mm) の電極層 110 の歪みは、それより内周側に位置する電極層 110 の歪みよりも大きいことを示している。特に、異常放電の発生位置では、電極層 110 の歪みが最も大きく、誘電体層 120 の厚さが最も薄い。以上に示した図 27 の「a」及び図 27 の「b」の結果から、異常放電の発生位置と最も誘電体層 120 の厚さが薄くなった計測位置とが一致した。

[0127] さらに、計測後、誘電体層 120 の表面を研磨することで、誘電体層 120 の厚さの計測を行った。その結果、本実施形態に係る誘電体層の厚さ計測方法による数値の妥当性が確認された。以上から、本実施形態に係る誘電体層の厚さ計測方法によれば、測定対象物を精度良くかつ非接触で計測することができることが証明された。

[0128] 以上、光干渉システム及び誘電体層の厚さの計測方法についてその一実施形態を説明したが、本発明に係る光干渉システム及び誘電体層の厚さの計測方法は、上記実施形態に限定されるものではなく、本発明の範囲内で種々の変形及び改良が可能である。また、上記実施例及び変形例を矛盾しない範囲で組み合わせることができる。

[0129] 例えば、図 19 に示す制御処理の実行前に、光源スペクトルを事前に取得して記録しておき、S11 に示す調整処理の前に、規格化部 30 によって反射光スペクトルを規格化してもよい。例えば、図 28 の「a」に示す光源ス

ペクトルを予め取得しているものとする。そして、図28の「b」に示すSi基板の反射光スペクトルを取得したものとする。規格化部30は、光源スペクトルを用いて反射光スペクトルを規格化する。例えば、反射光スペクトルを光源スペクトルで除算して、反射率とする。図29の「a」は反射率に規格化したスペクトルの例である。図29の「a」に示すスペクトルに、図29の「b」に示すガウス関数を積算すると、図29の「c」に示すスペクトルとなる。これにより、FFT後の信号は、完全なガウス関数となる。

[0130] また、図2に示すA/D変換部42及び波長制御部43を演算装置15に組み込んでもよい。また、図2に示すチューナブルフィルタ40は、光源10と光サーキュレータ11との間に設けてもよいし、光サーキュレータ11とコリメータ12との間に設けてもよい。また、図2では、チューナブルフィルタ40を用いる例を説明したが、可動グレーティングの分光器を用いる場合であってもよい。図30は、分光器14aが可動グレーティングのスペクトルメータ及び単一の受光素子を備えており、演算装置15及びスペクトルメータが協働して透過光の波長 λ を制御する。また、図31に示すように、可動グレーティングの分光器として光スペクトラムアナライザを用いてもよい。この場合には、波長-強度のスペクトルが直接取得できる。さらに、図32に示すように、演算装置15が光源10の波長を制御してもよい。例えば、測定対象物の素材等により光源10の波長を変更する。このように、波長の掃引部は何であってもよい。

[0131] 光源としては、測定光と参照光との干渉が測定できれば、任意の光を使用することが可能である。光源からの光は、少なくとも測定対象物の表面と裏面との間の距離（通常は800～1500 μm 程度）からの反射光が干渉を生じない程度の光が好ましい。具体的には例えば低コヒーレンス光を用いることが好ましい。低コヒーレンス光とは、コヒーレンス長の短い光をいう。低コヒーレンス光の中心波長は例えば0.3～20 μm が好ましく、更に0.5～5 μm がより好ましい。また、コヒーレンス長としては、例えば0.1～100 μm が好ましく、更に3 μm 以下がより好ましい。このような低

コヒーレンス光を光源として使用することにより、余計な干渉による障害を回避でき、測定対象物の表面又は内部層からの反射光に基づく参照光との干渉を容易に測定することができる。

[0132] 上記低コヒーレンス光を使用した光源としては、例えばSLD (Super Luminescent Diode)、LED、高輝度ランプ (タングステンランプ、キセノンランプなど)、超広帯域波長光源等を使用することができる。これらの低コヒーレンス光源の中でも、輝度の高いSLD (波長、例えば1300nm) を光源として用いることが好ましい。

[0133] 基板処理装置に本発明に係る光干渉システム1を搭載することで、ウェハ、フォーカスリング及び対向電極の厚さを計測できる。なお、処理室内に収容されているフォーカスリング又は対向電極等のチャンバ内パーツを測定対象物とする場合には、これらのパーツが測定光に対して透過性を有する材質で形成されている必要がある。例えば、チャンバ内パーツの材質として、シリコン、石英又はサファイア等が用いられる。

[0134] 本国際出願は、2013年6月7日に出願された日本国特許出願2013-121202号に基づく優先権を主張するものであり、その全内容を本国際出願に援用する。

符号の説明

[0135] 1…光干渉システム、10…光源、11…光サーキュレータ、12…コリメータ、13…フォーカサー、15…演算装置、16…光路長算出部、17…フーリエ変換部、18…データ補間部、19…重心計算部、20…厚さ算出部、30…規格化部、31…波形調整部、40…チューナブルフィルタ、41…受光素子、42…A/D変換部、43…波長制御部、100…静電チャック、110…電極層、120、130…誘電体層

請求の範囲

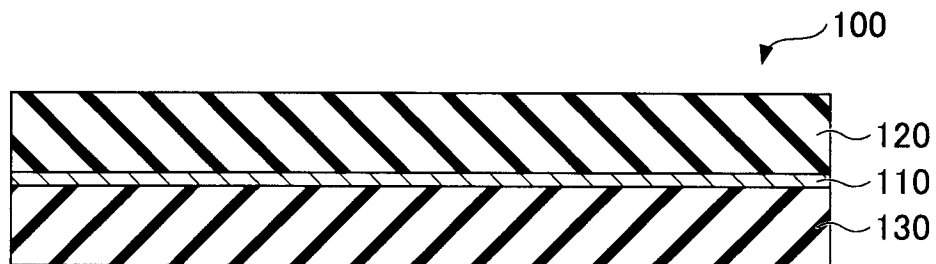
- [請求項1] 第1主面及び前記第1主面に対向する第2主面を有する測定対象物の厚さを計測する方法であって、
- 光源から前記測定対象物を透過する波長を有する測定光を出力する第1のステップと、
- コリメータ又はフォーカサーを移動させて、前記コリメータ又はフォーカサーから前記出力した測定光を前記測定対象物の第1主面の計測位置へ出射し、前記第1主面及び前記第2主面からの反射光を前記コリメータ又はフォーカサーへ入射する第2のステップと、
- 前記コリメータ又はフォーカサーからの反射光を受光素子に入射し、前記受光素子に入射された光の強度を取得し、前記受光素子に入射された光の波長を掃引する第3のステップと、
- 前記取得した光の強度及び前記掃引した光の波長を用いて、波長に依存した強度分布であって前記第1主面及び前記第2主面からの反射光の強度分布である干渉強度分布を測定する第4のステップと、
- 前記干渉強度分布をフーリエ変換して得られる波形に基づいて前記測定対象物の厚さを前記測定対象物に非接触に計測する第5のステップと、
- を含むことを特徴とする計測方法。
- [請求項2] 前記第2のステップは、
- 前記測定対象物の第1主面の複数の計測位置に測定光を出射するように、前記コリメータ又はフォーカサーを移動させる、
- ことを特徴とする請求項1に記載の計測方法。
- [請求項3] 前記第2のステップは、
- 前記測定対象物の第1主面に形成された複数の凸部のそれぞれに測定光を出射するように、前記コリメータ又はフォーカサーを移動させる、
- ことを特徴とする請求項2に記載の計測方法。

- [請求項4] 前記第2のステップは、
前記測定対象物の第1主面に形成された一の凸部内の複数の計測位置に測定光を出射するように、前記フォーカサーを移動させる、
ことを特徴とする請求項2に記載の計測方法。
- [請求項5] 前記測定対象物は静電チャックの電極層上に設けられた誘電体層であり、
前記第5のステップは、
前記計測された誘電体層の厚さが予め定められた範囲内であることを判定する、
ことを特徴とする請求項2に記載の計測方法。
- [請求項6] 前記第5のステップは、
前記計測された誘電体層の厚さが $200\mu\text{m}$ 以上 $400\mu\text{m}$ 以下であることを判定する、
ことを特徴とする請求項5に記載の計測方法。
- [請求項7] 前記測定対象物は静電チャックの電極層上に設けられた誘電体層であり、
前記第5のステップは、
前記計測された誘電体層の厚さの最大値と最小値との差が予め定められた閾値以下であることを判定する、
ことを特徴とする請求項2に記載の計測方法。
- [請求項8] 前記第5のステップは、
前記計測された誘電体層の厚さの最大値と最小値との差が $200\mu\text{m}$ 以下であることを判定する、
ことを特徴とする請求項7に記載の計測方法。
- [請求項9] 前記第2のステップは、
FFT処理後の信号強度に基づき前記コリメータ又はフォーカサーの角度を制御し、前記測定対象物の第1主面の計測位置へ測定光を所定の入射角で出射する、

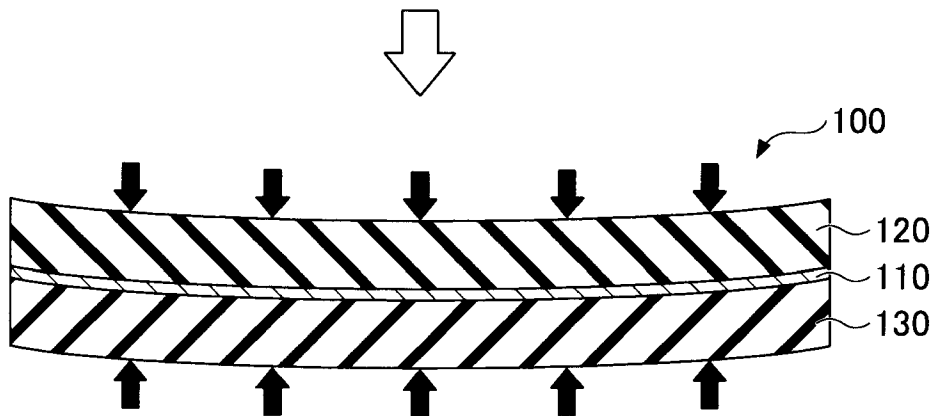
ことを特徴とする請求項 1 に記載の計測方法。

[図1]

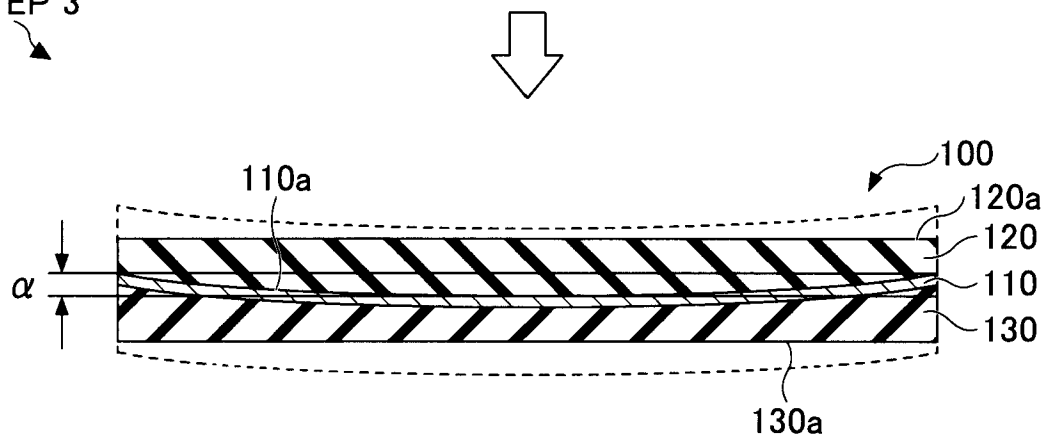
STEP 1

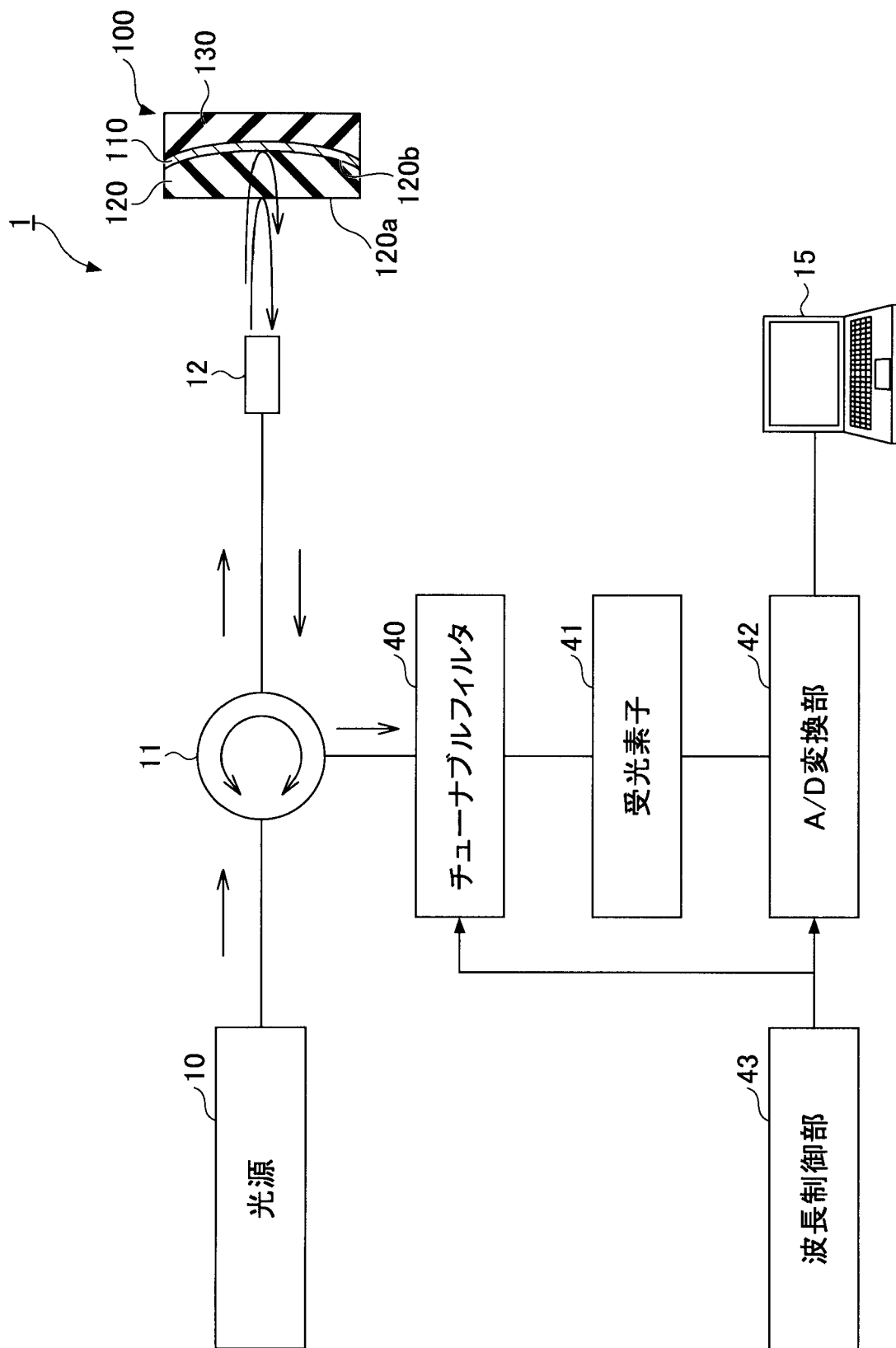


STEP 2

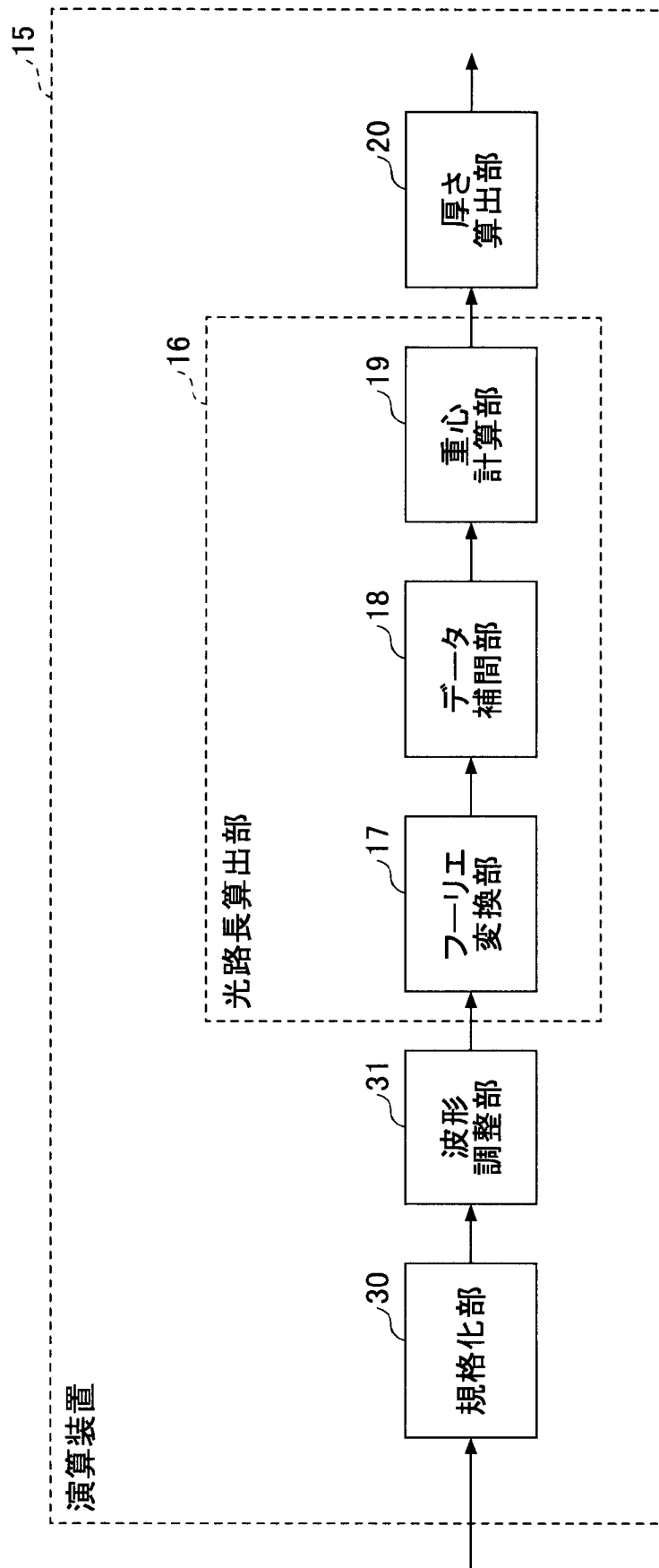


STEP 3

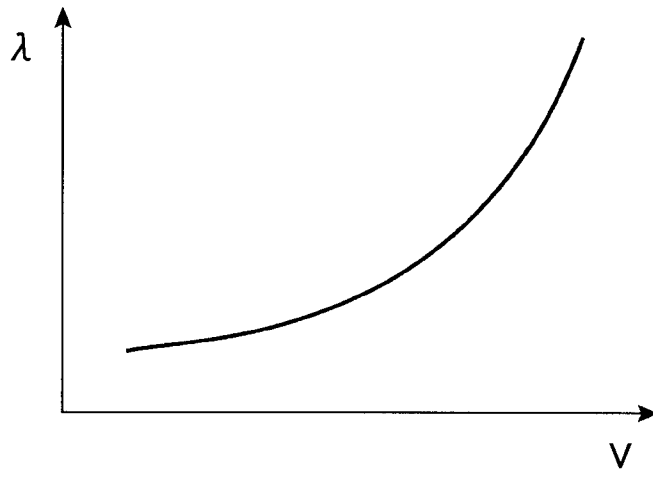




[図3]

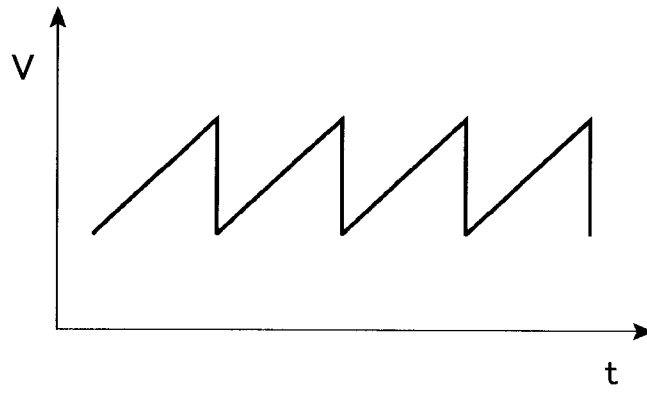


[図4]

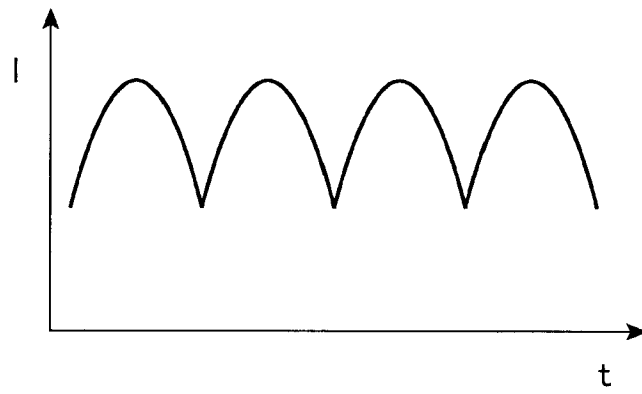


[図5]

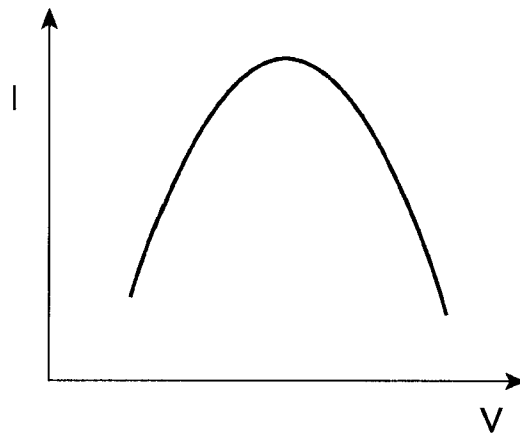
「a」



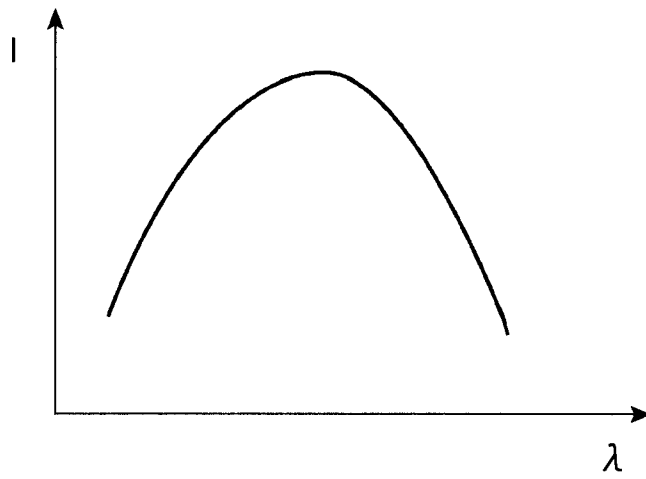
「b」



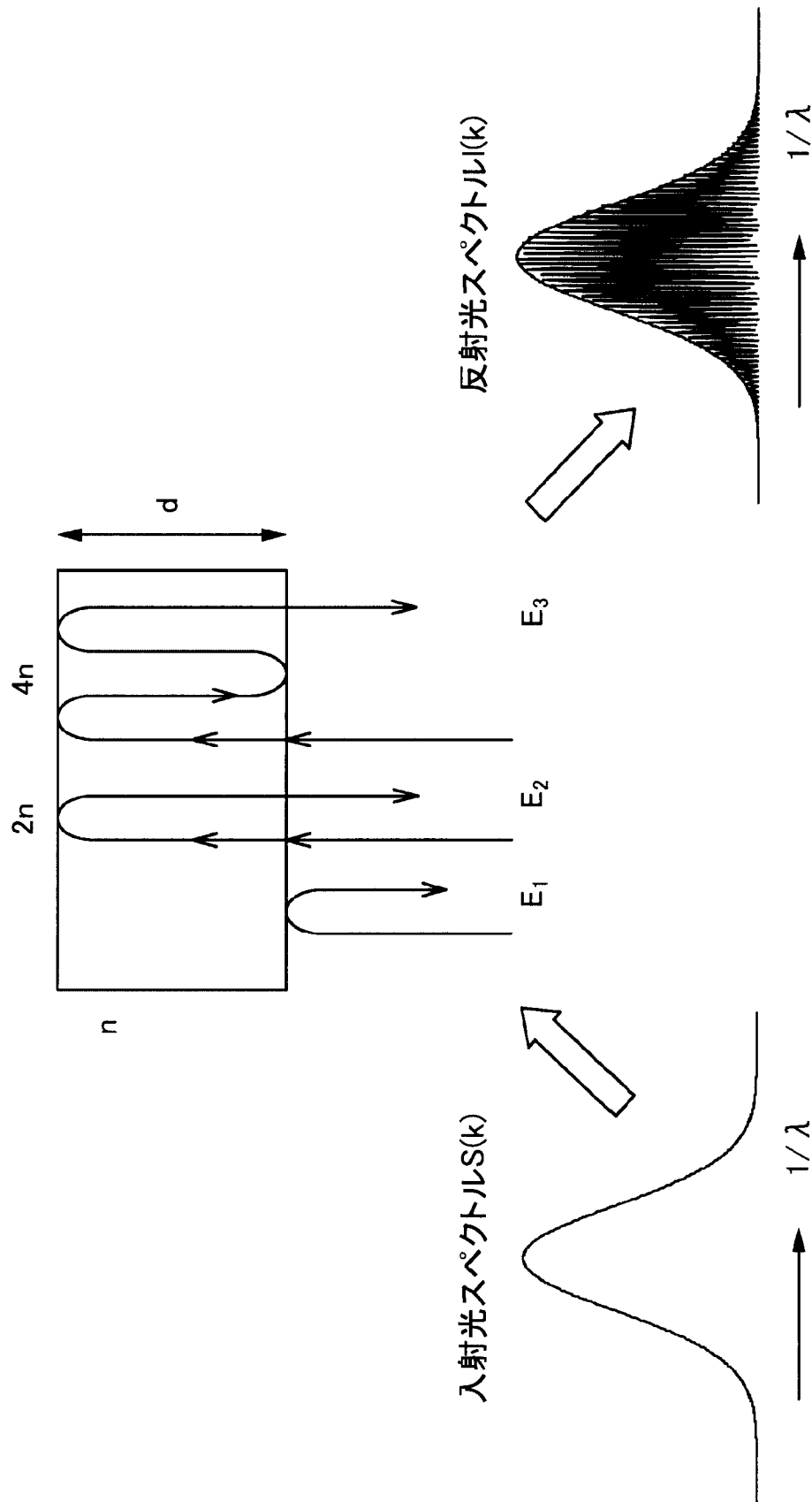
「c」



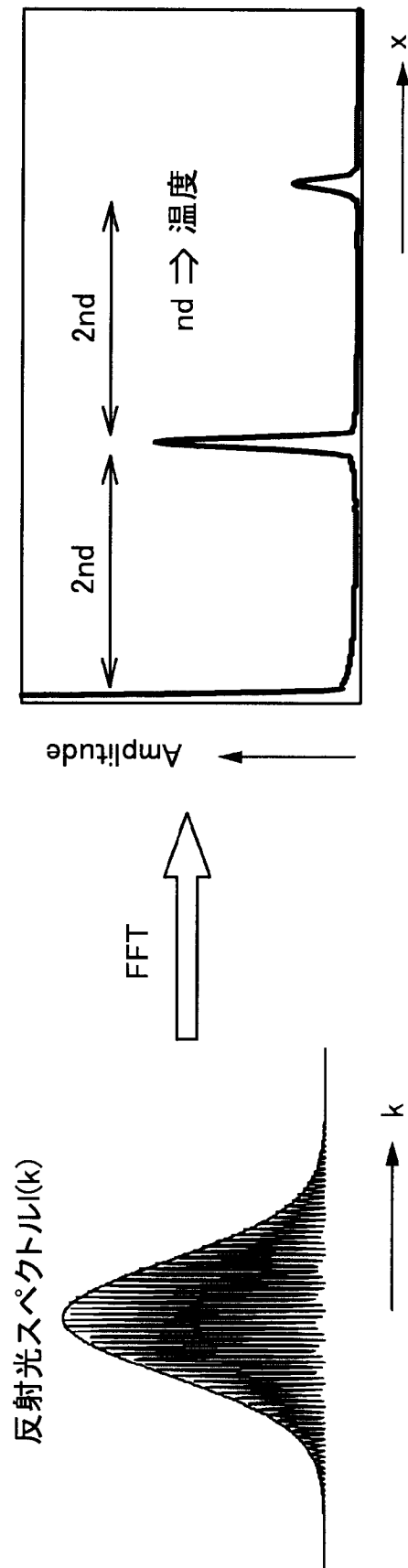
[図6]



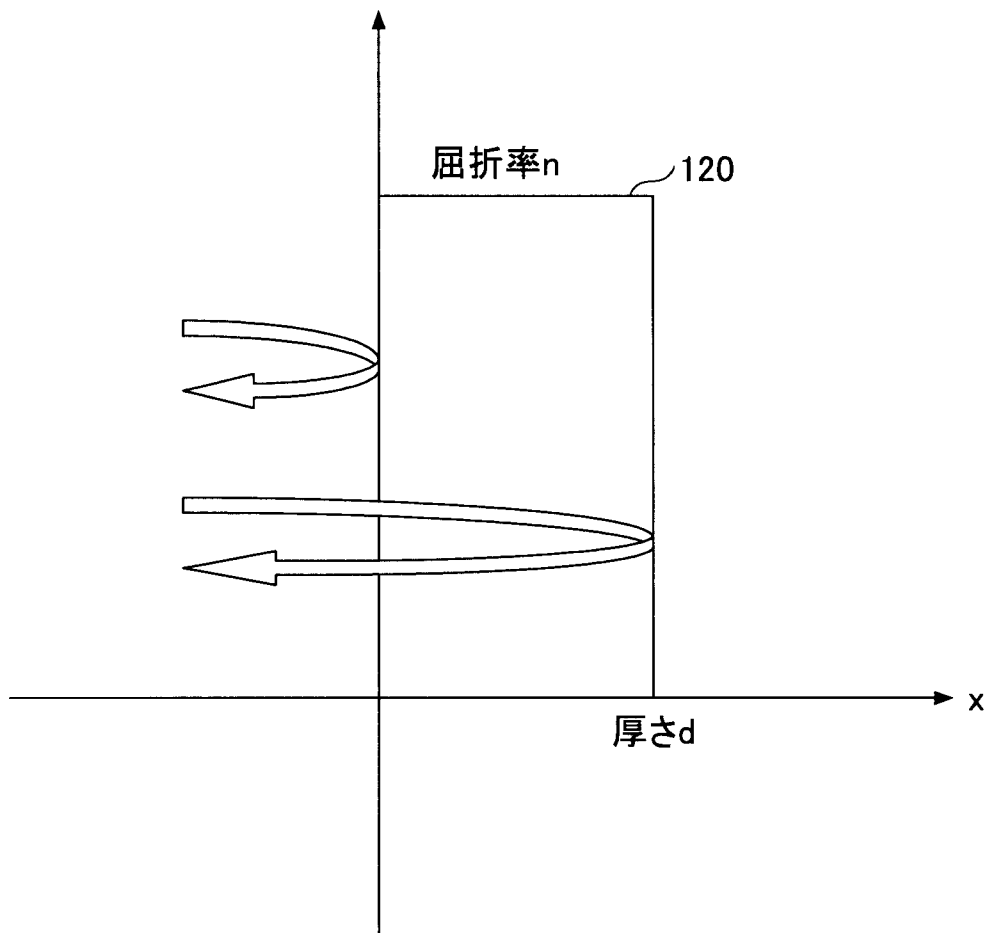
[図7]



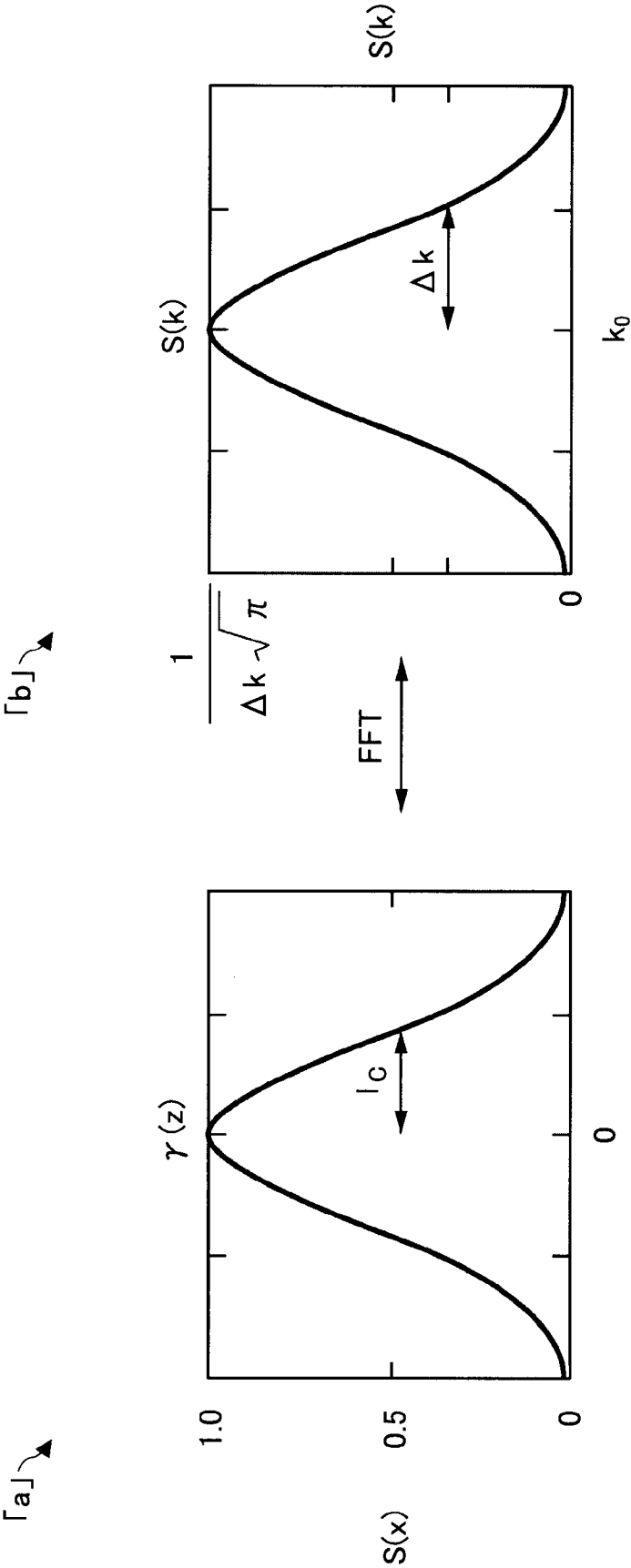
[図8]



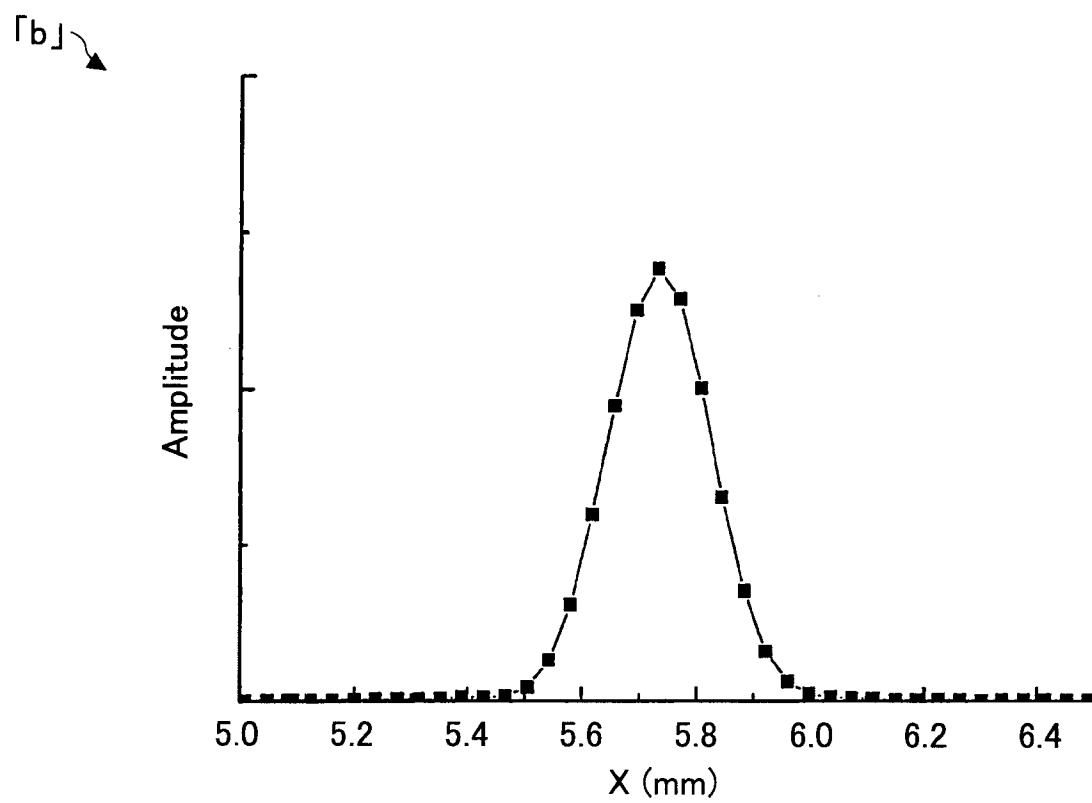
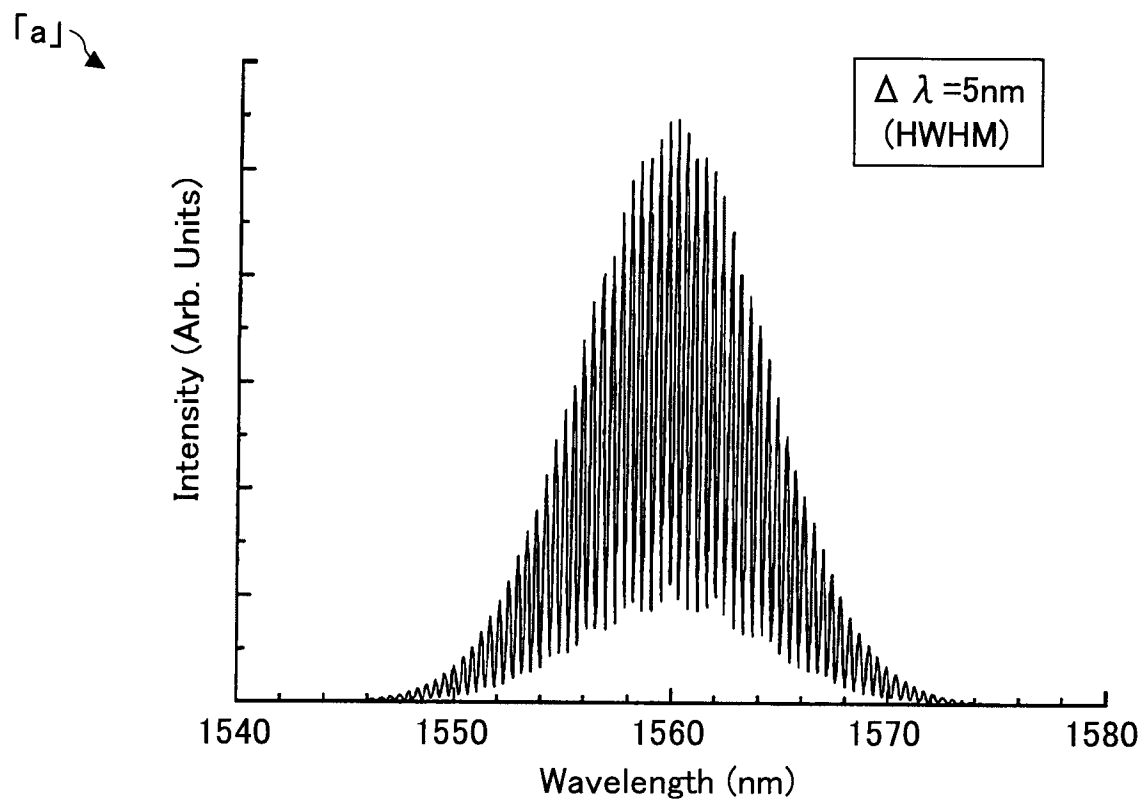
[図9]



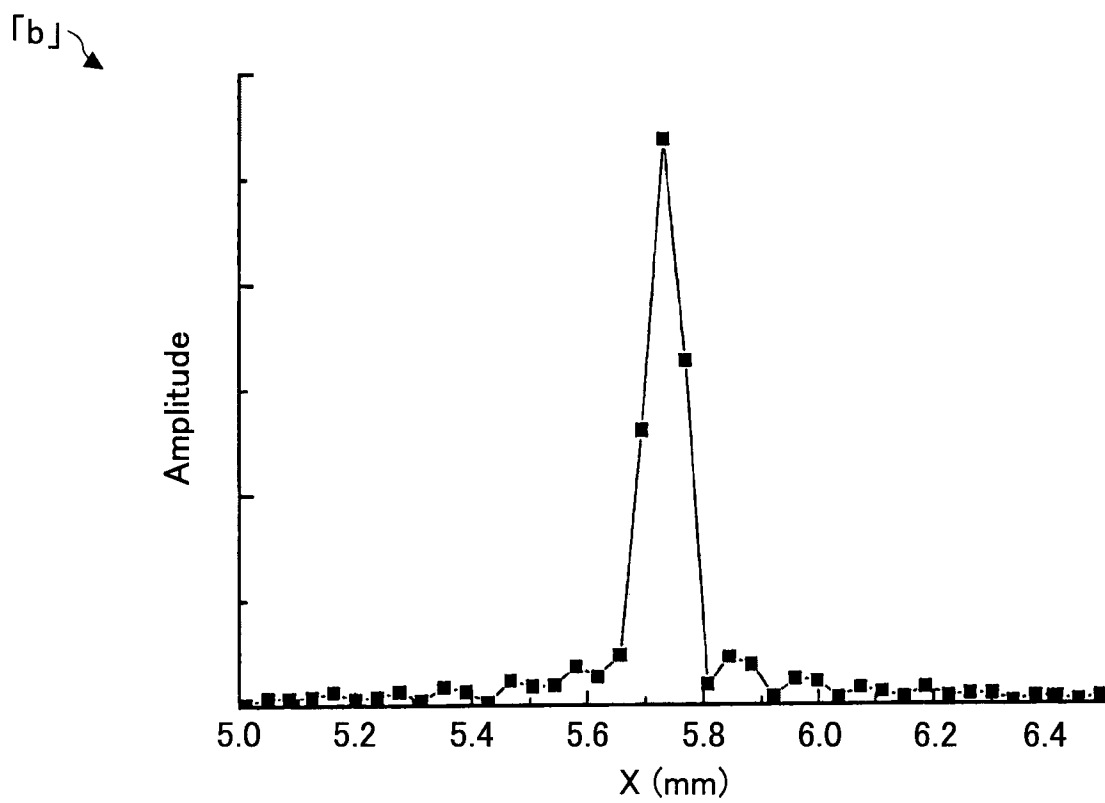
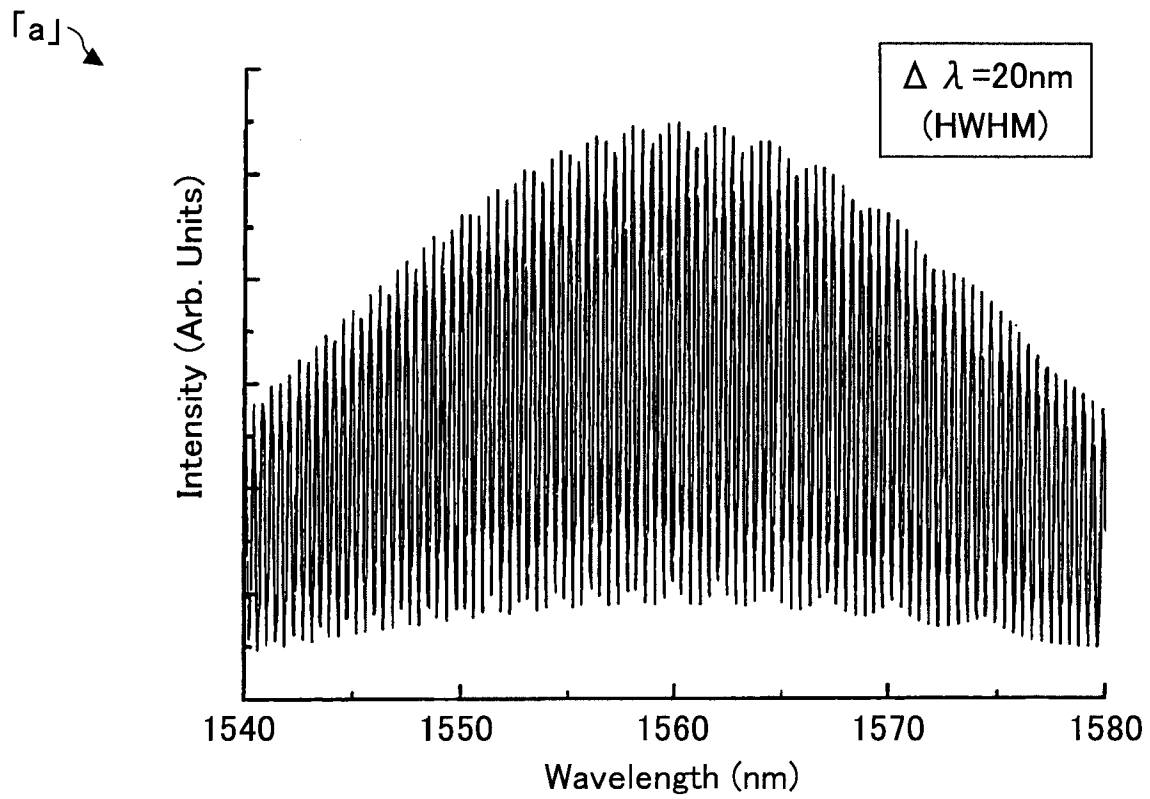
[図10]



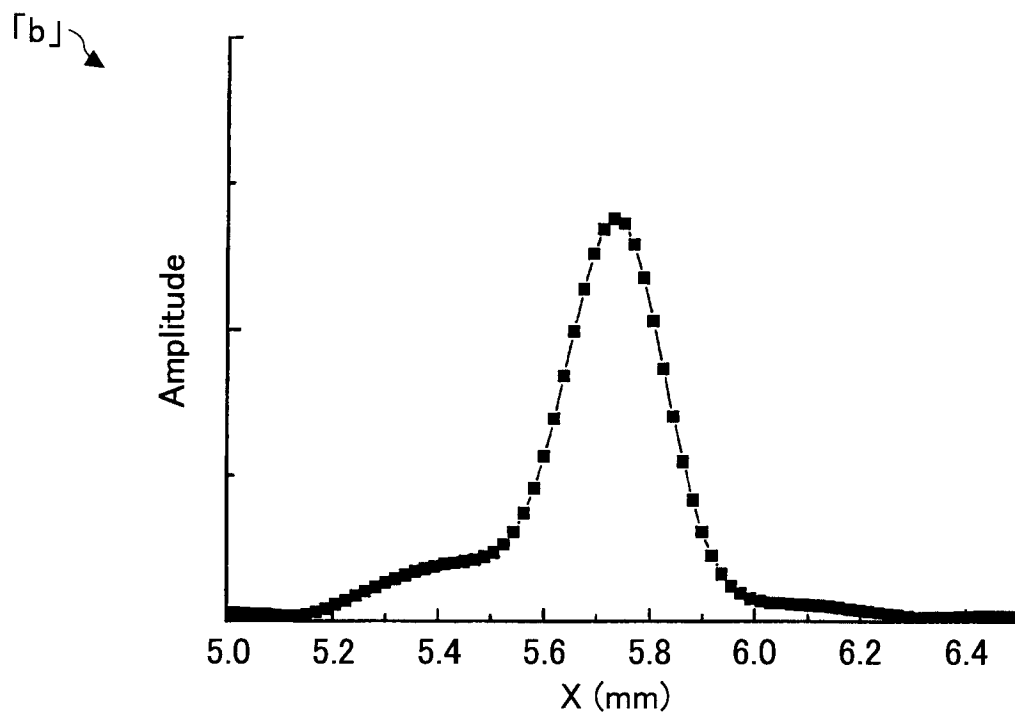
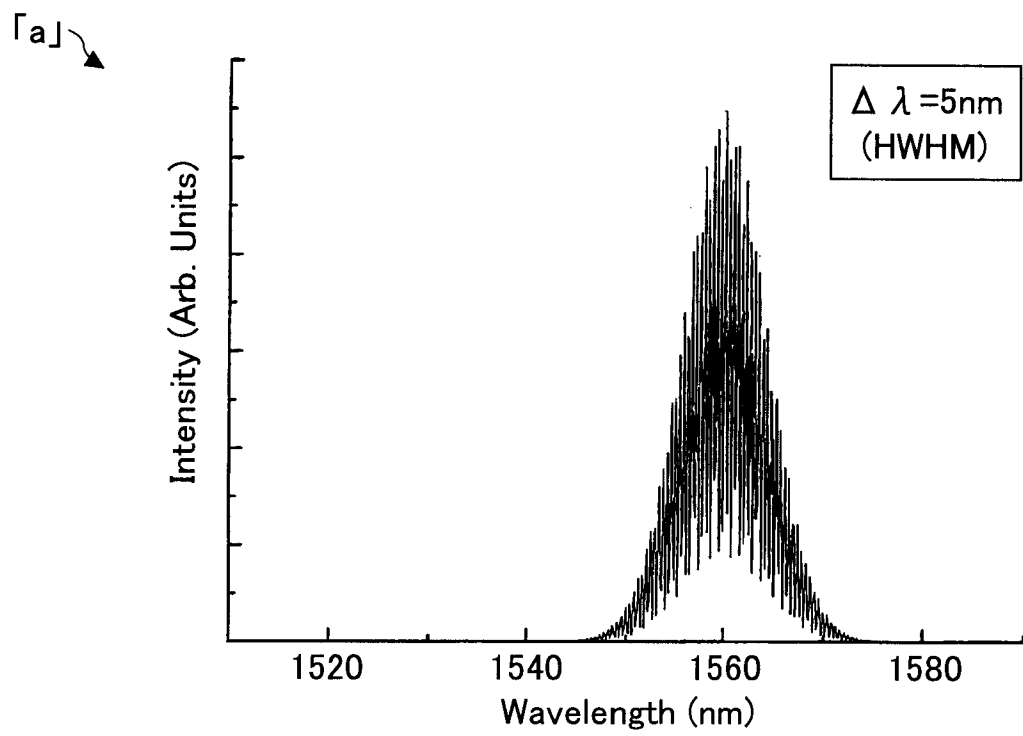
[図11]



[図12]

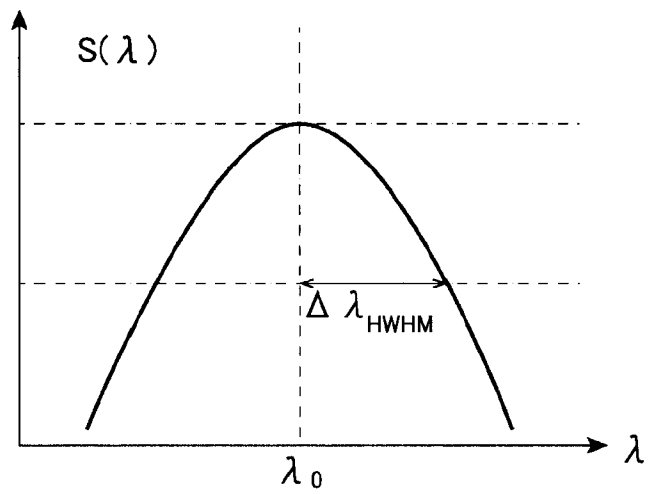


[図13]

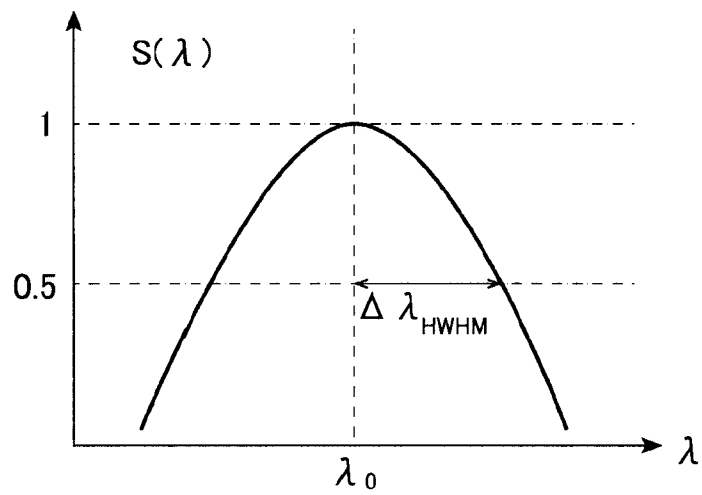


[図14]

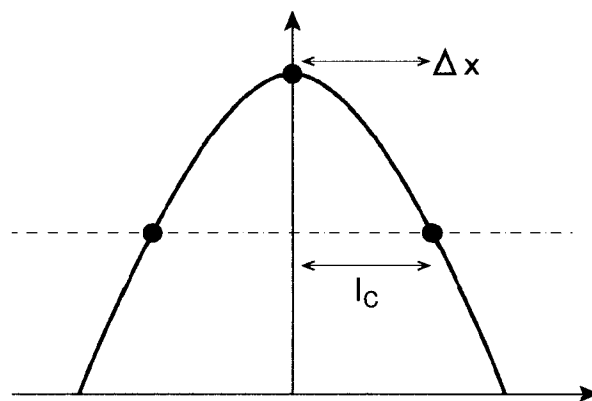
「a」



「b」

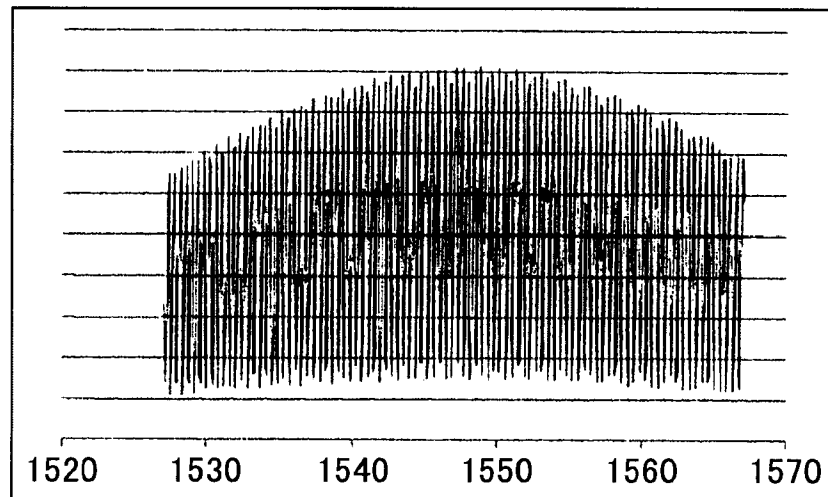


「c」

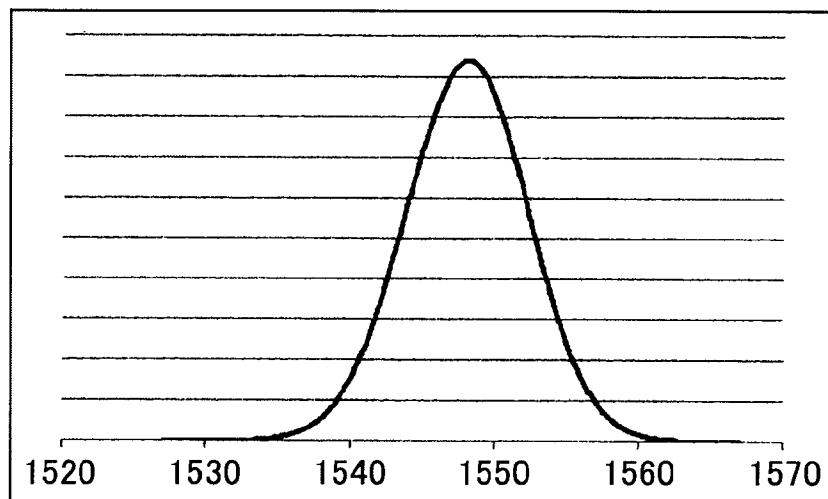


[図15]

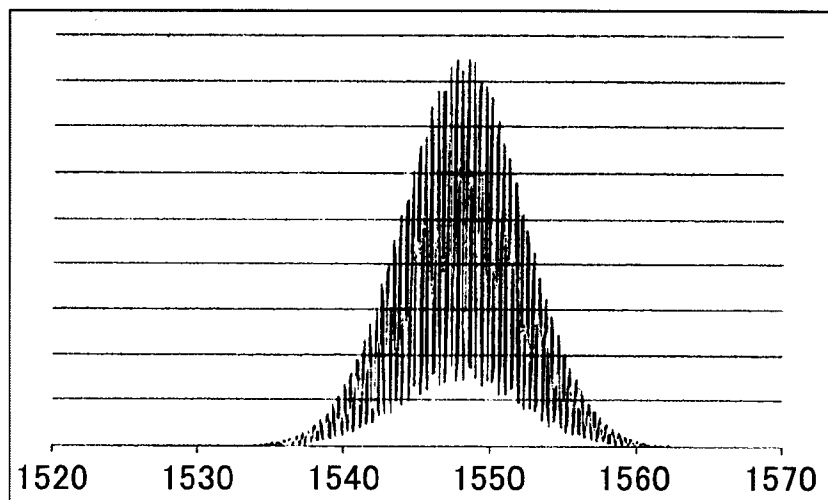
「a」



「b」

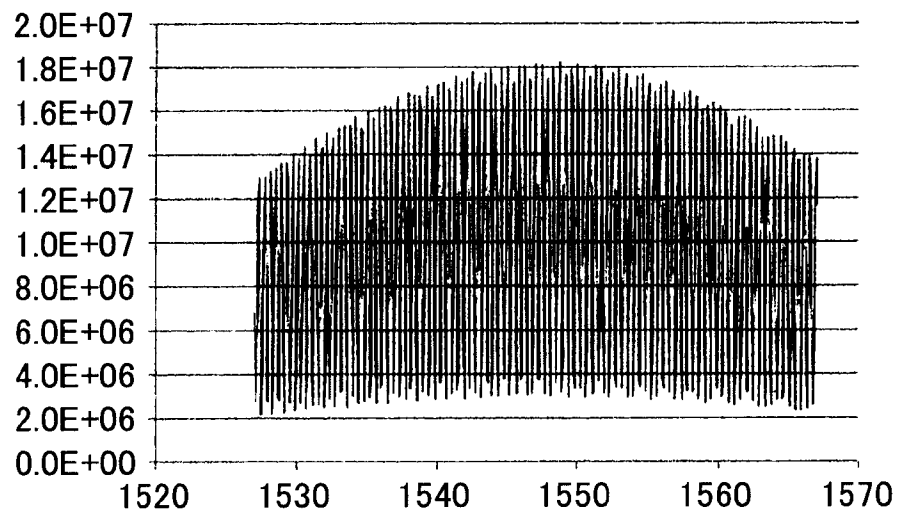


「c」

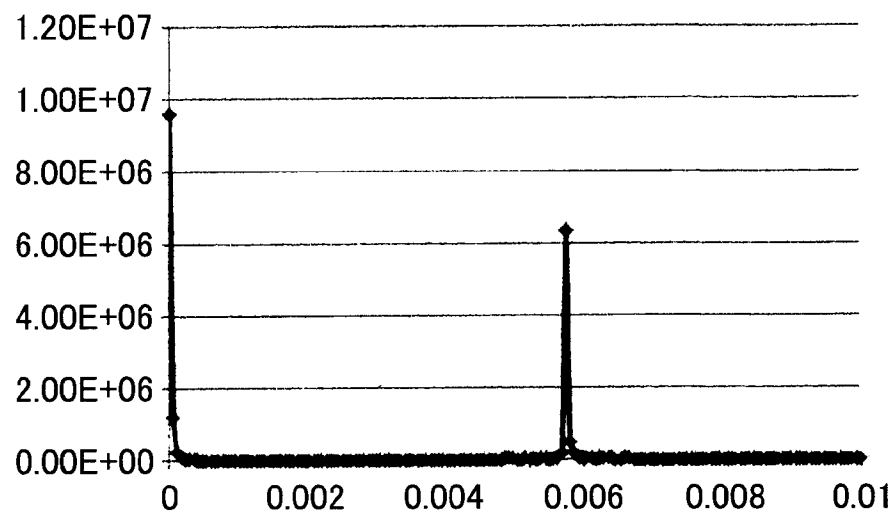


[図16]

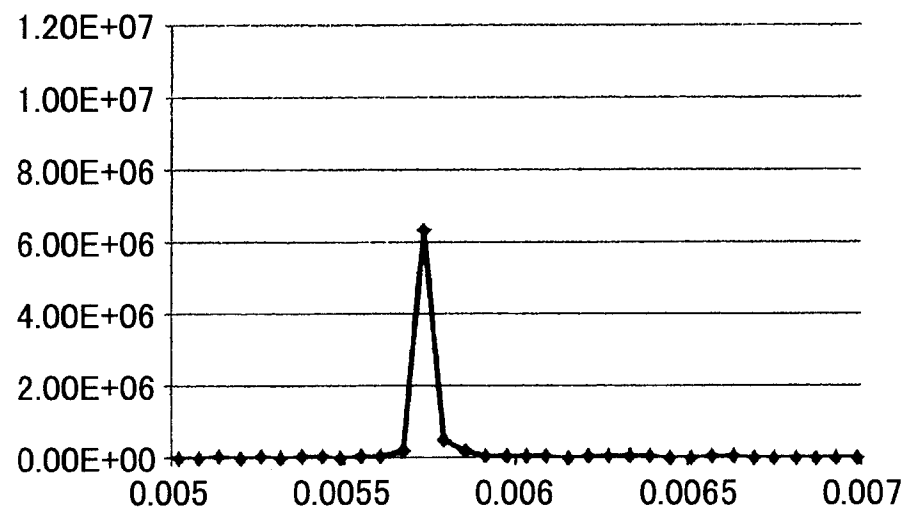
「a」



「b」

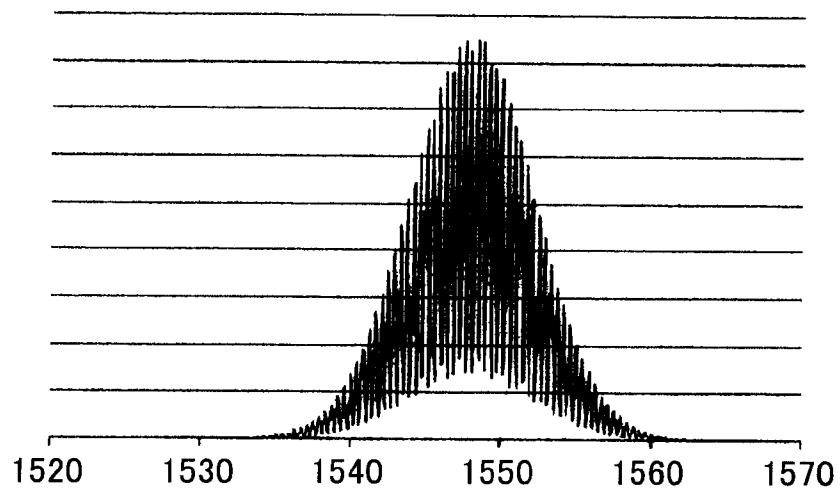


「c」

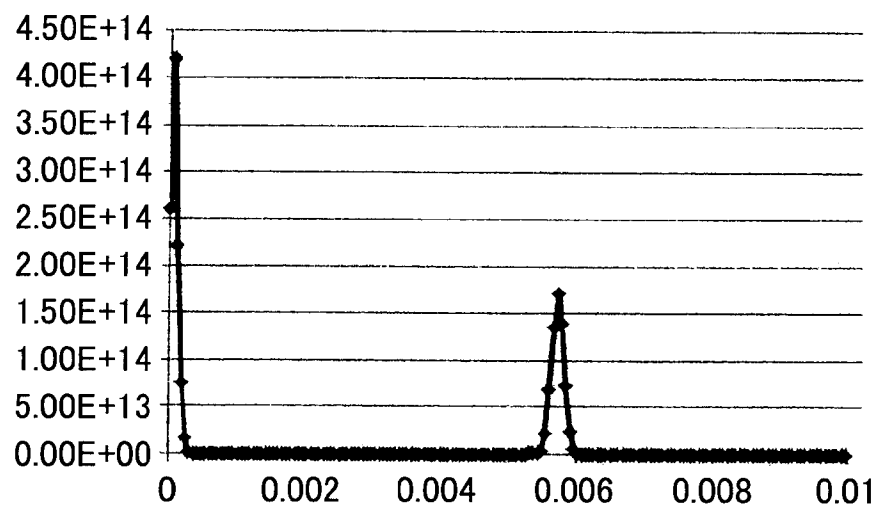


[図17]

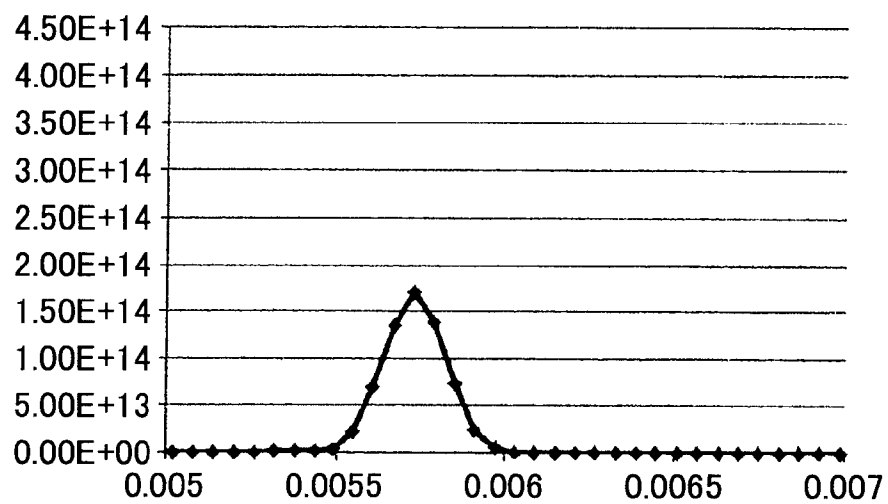
「a」



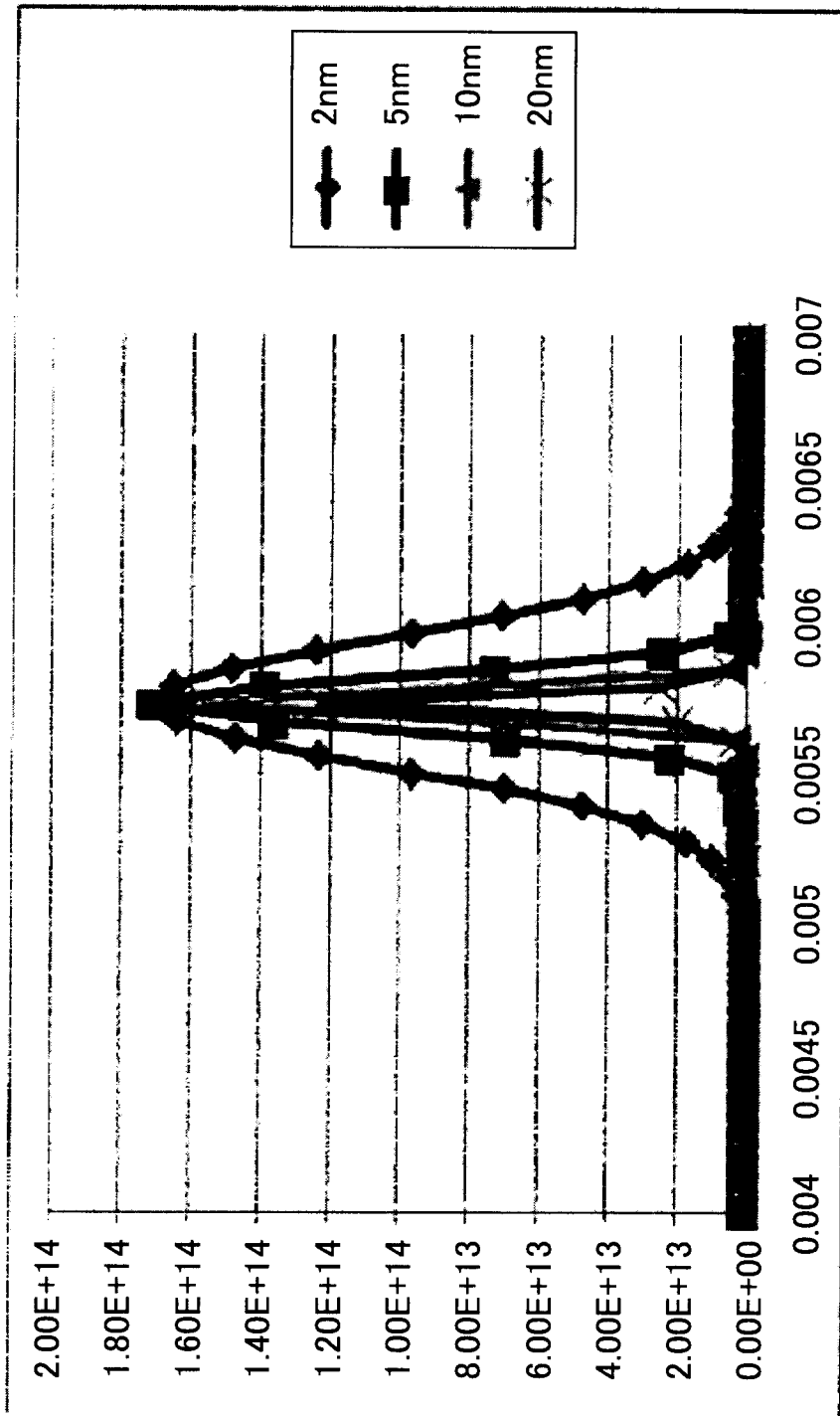
「b」



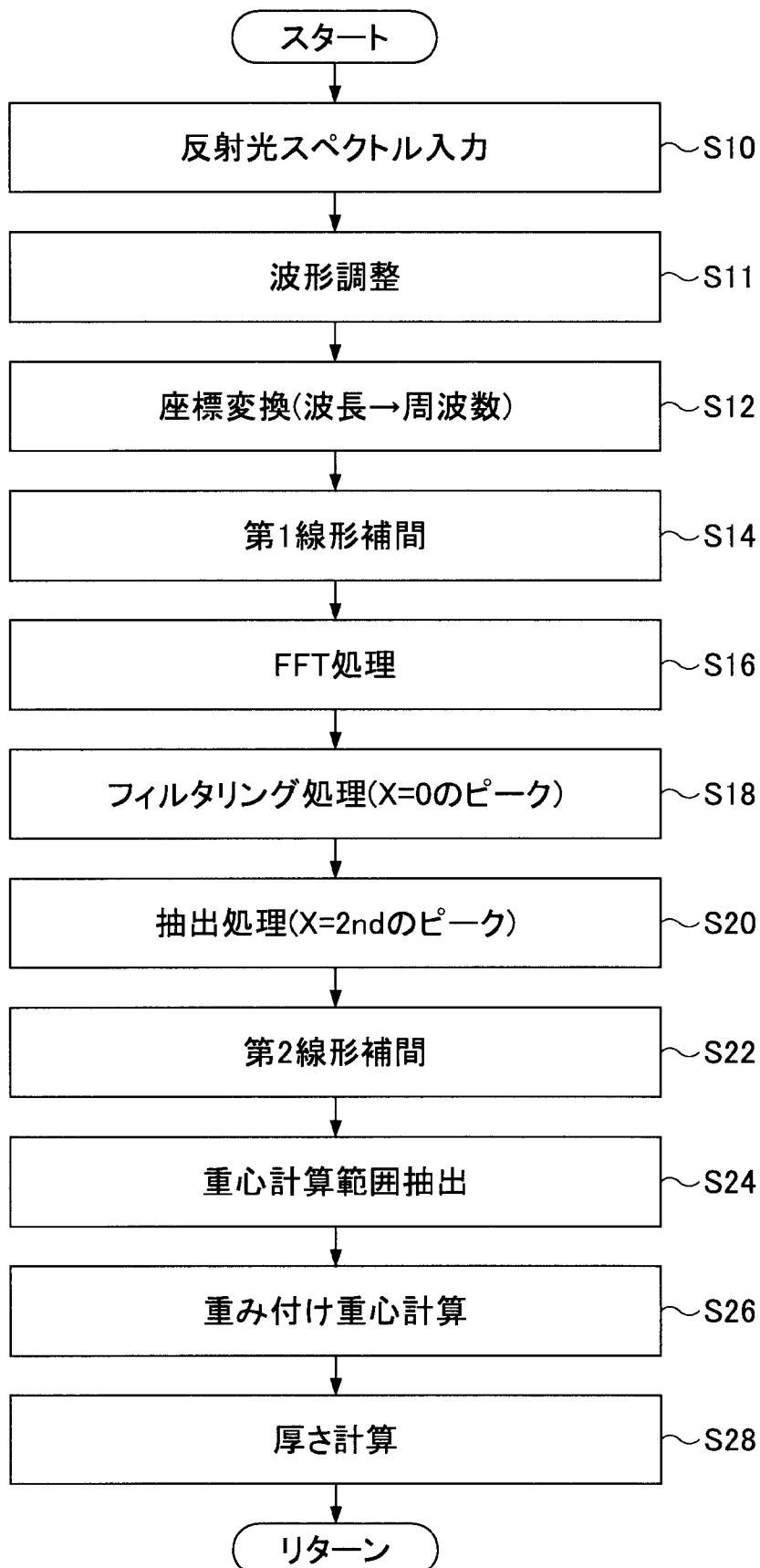
「c」



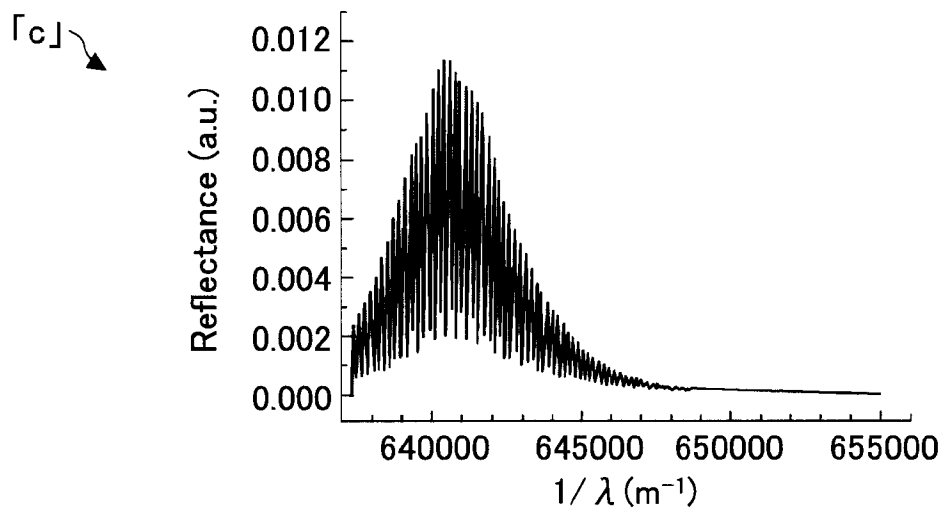
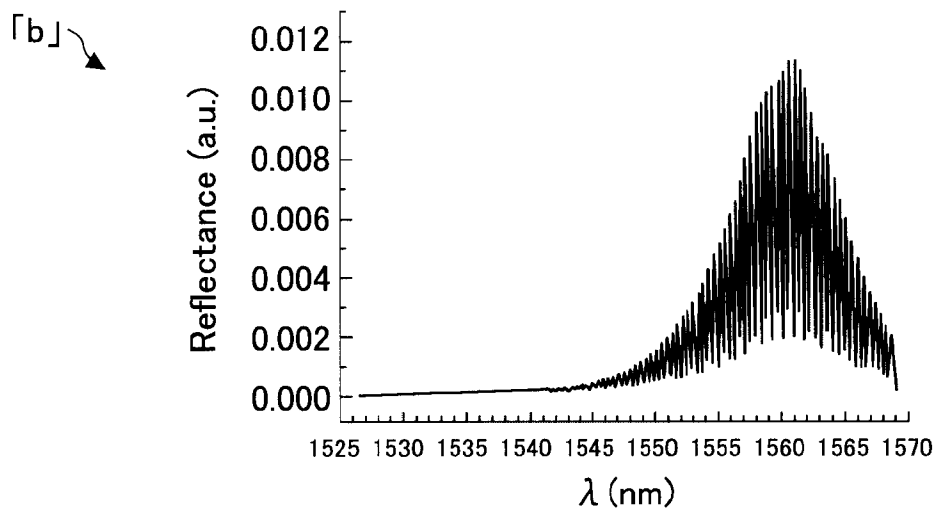
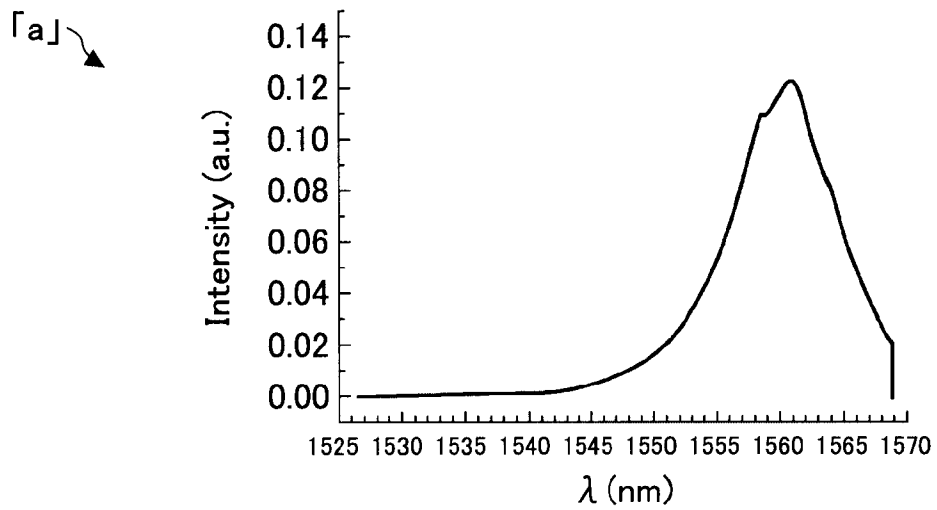
[図18]



[図19]

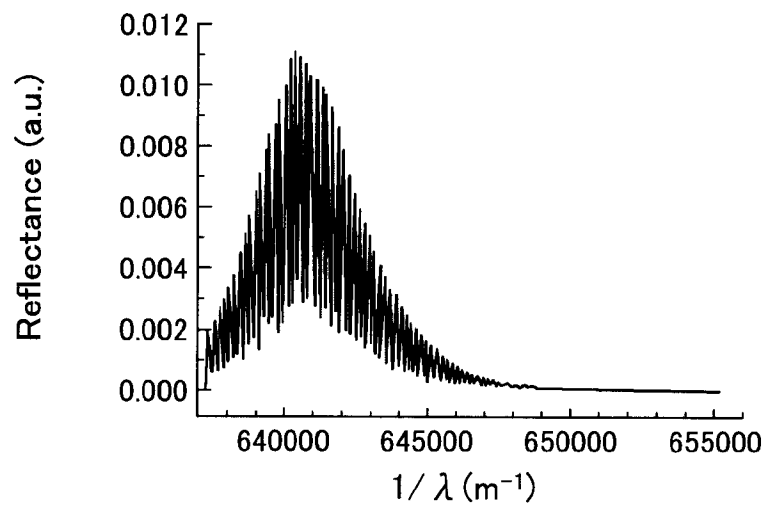


[図20]

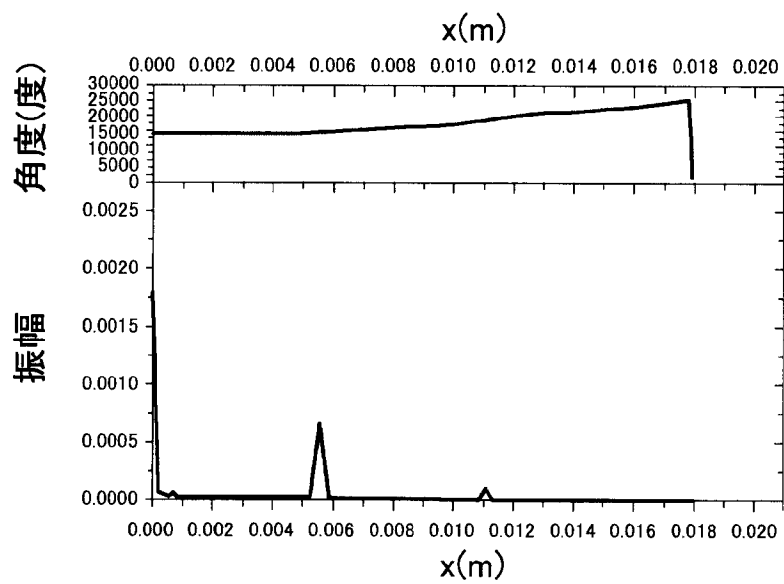


[図21]

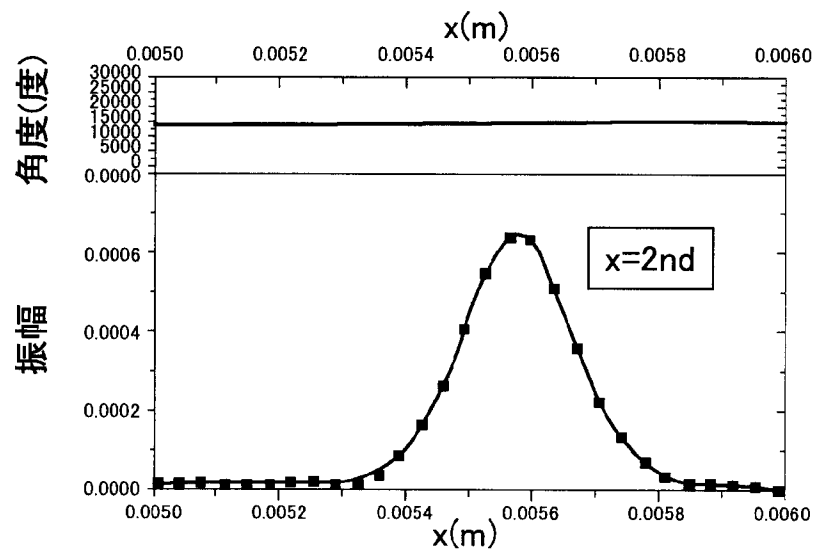
「a」



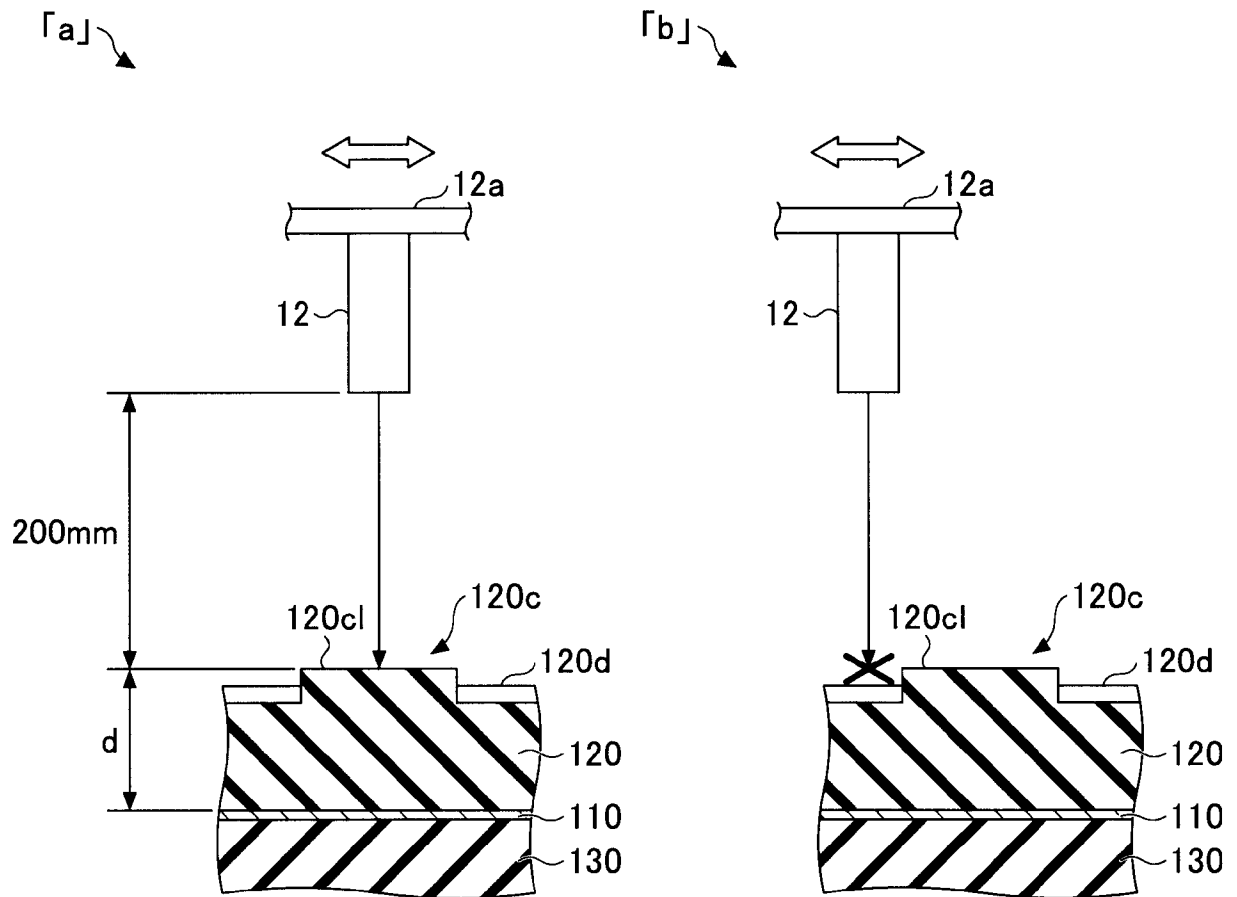
「b」



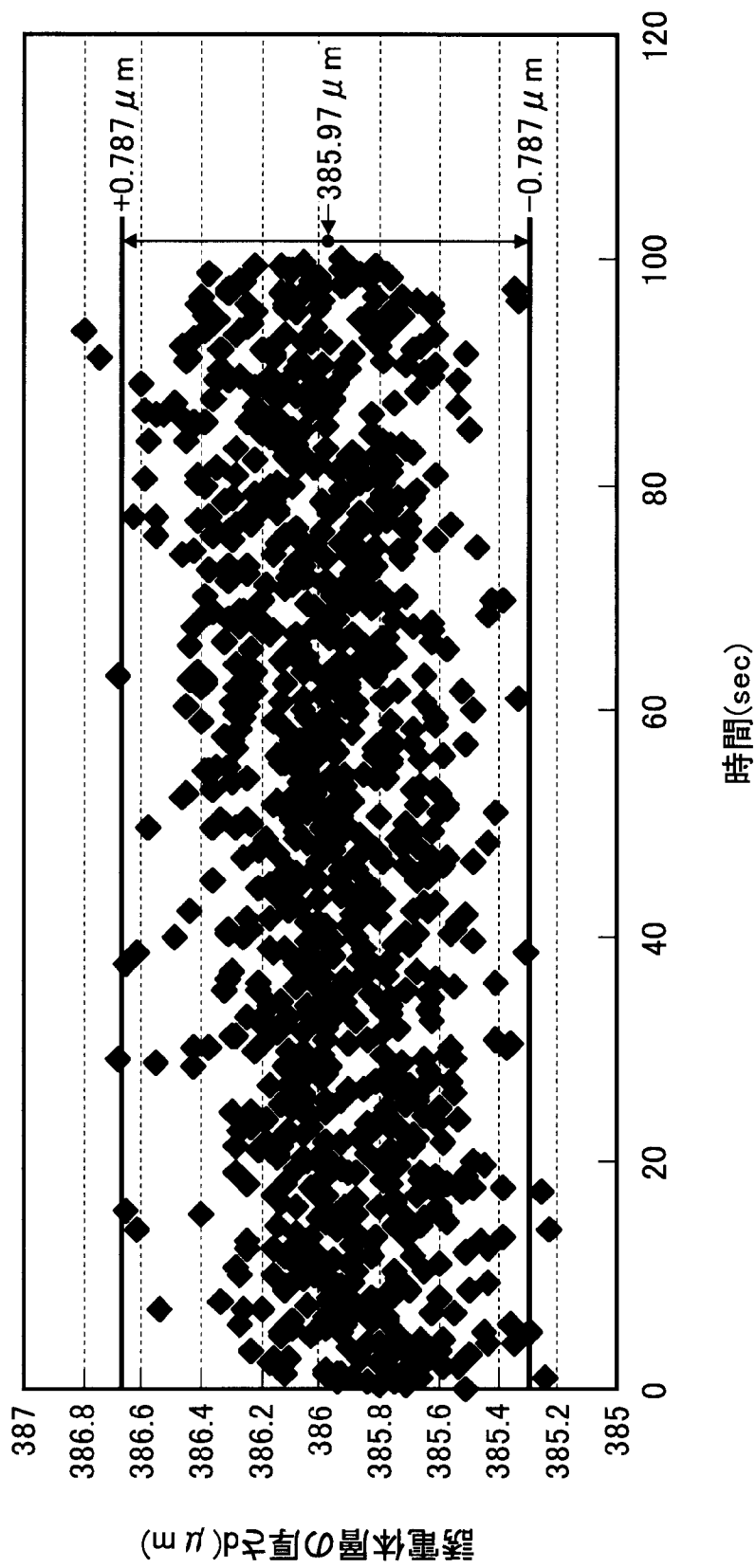
「c」



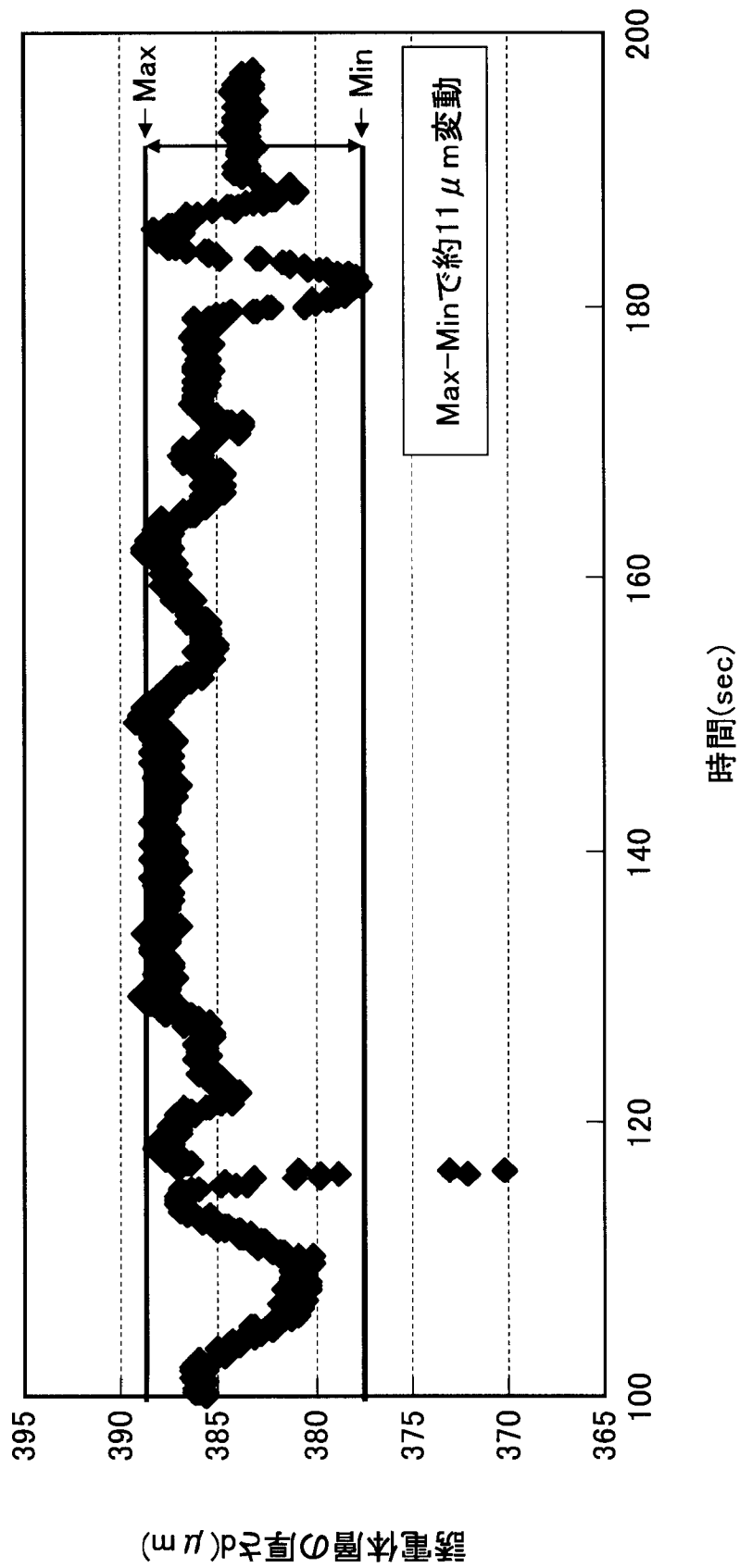
[図22]



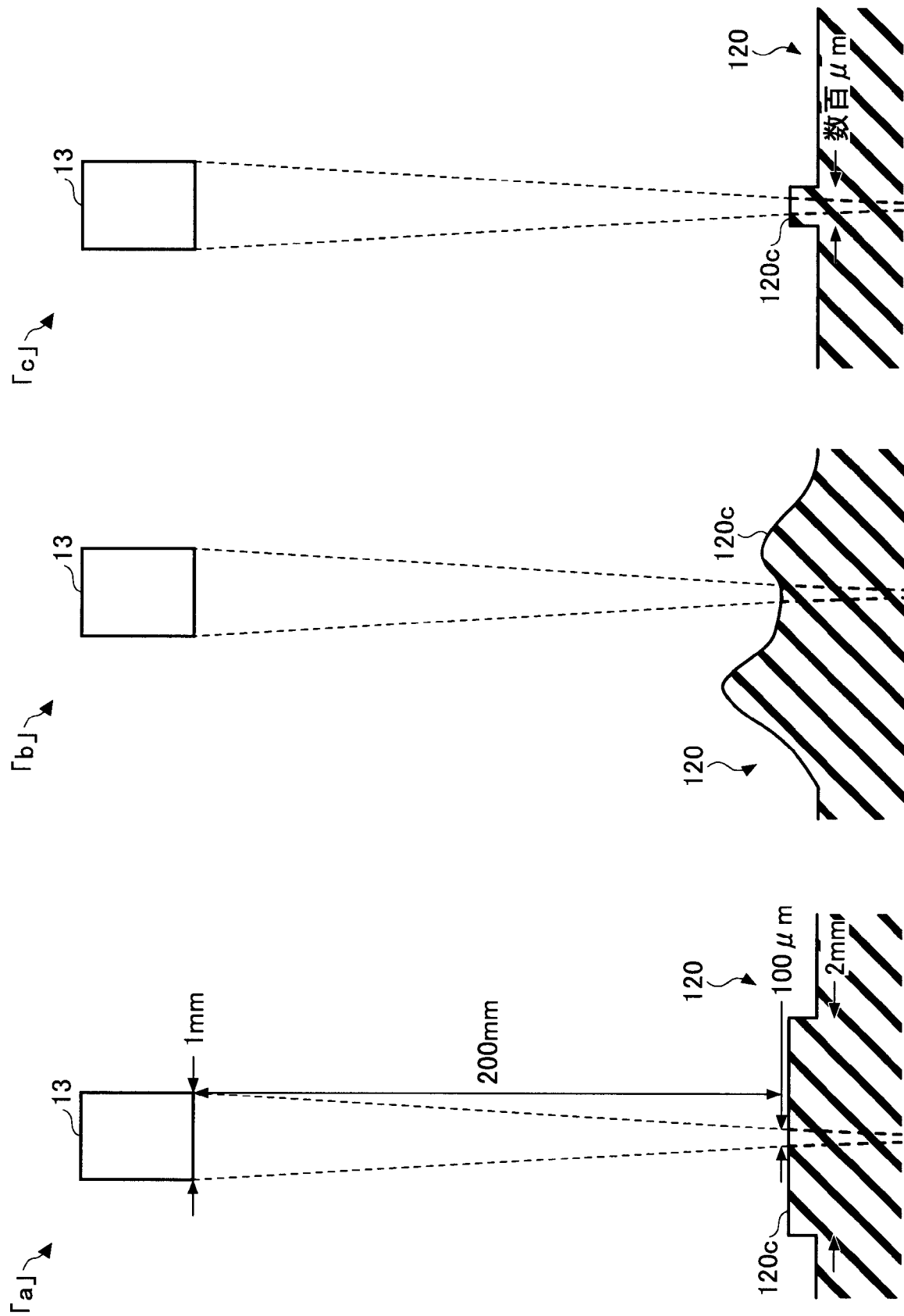
[図23]



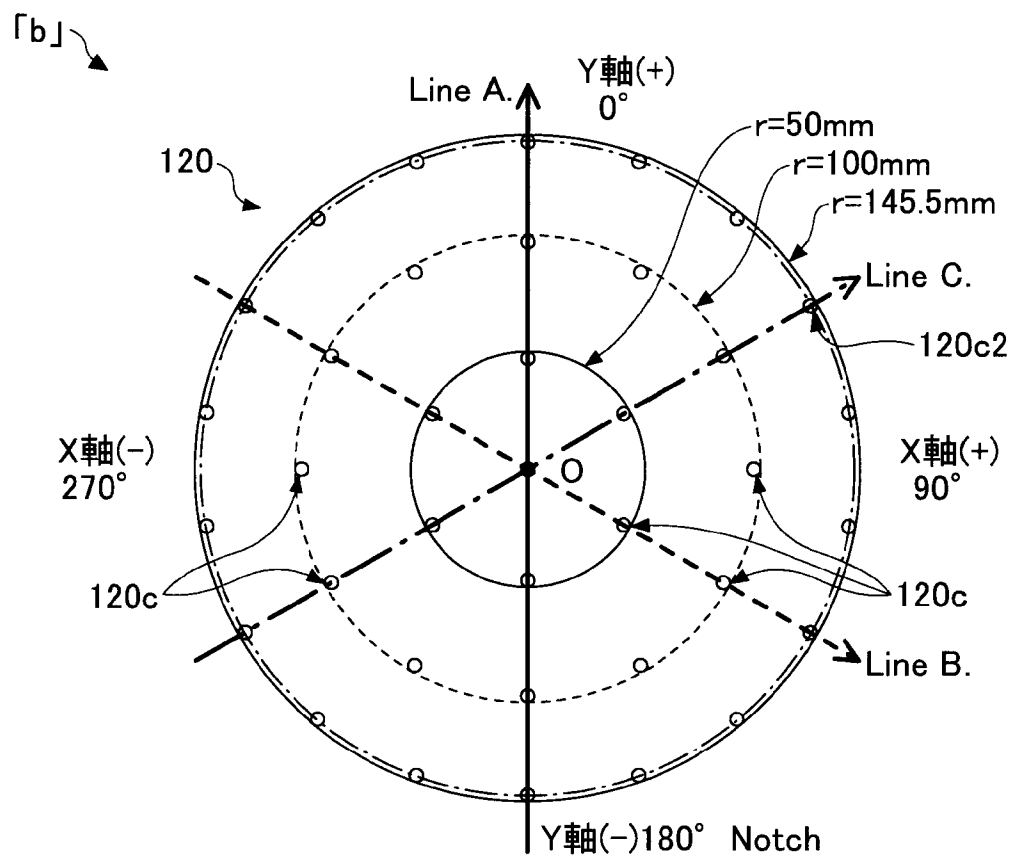
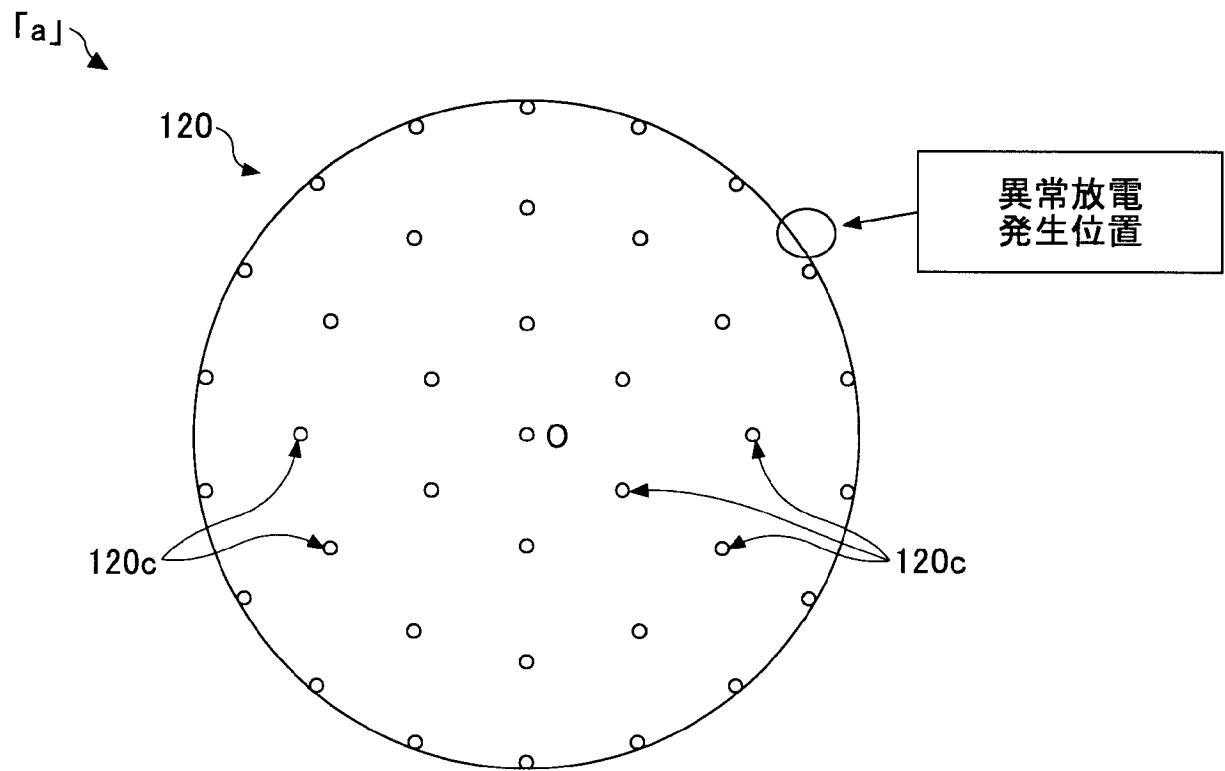
[図24]



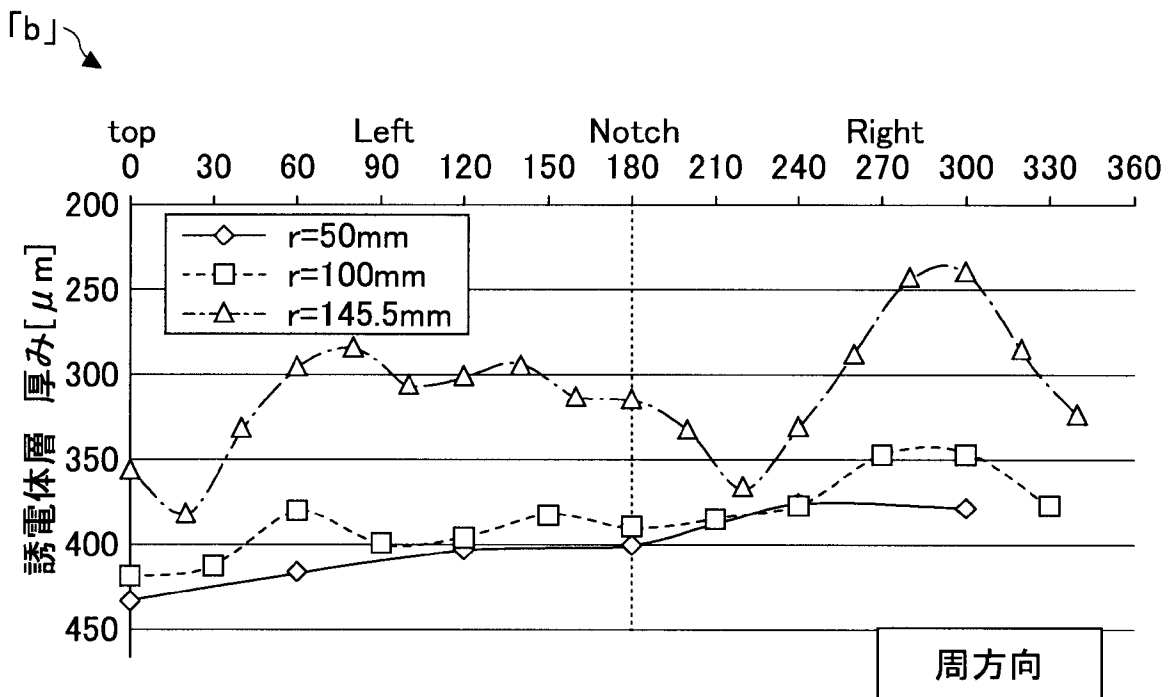
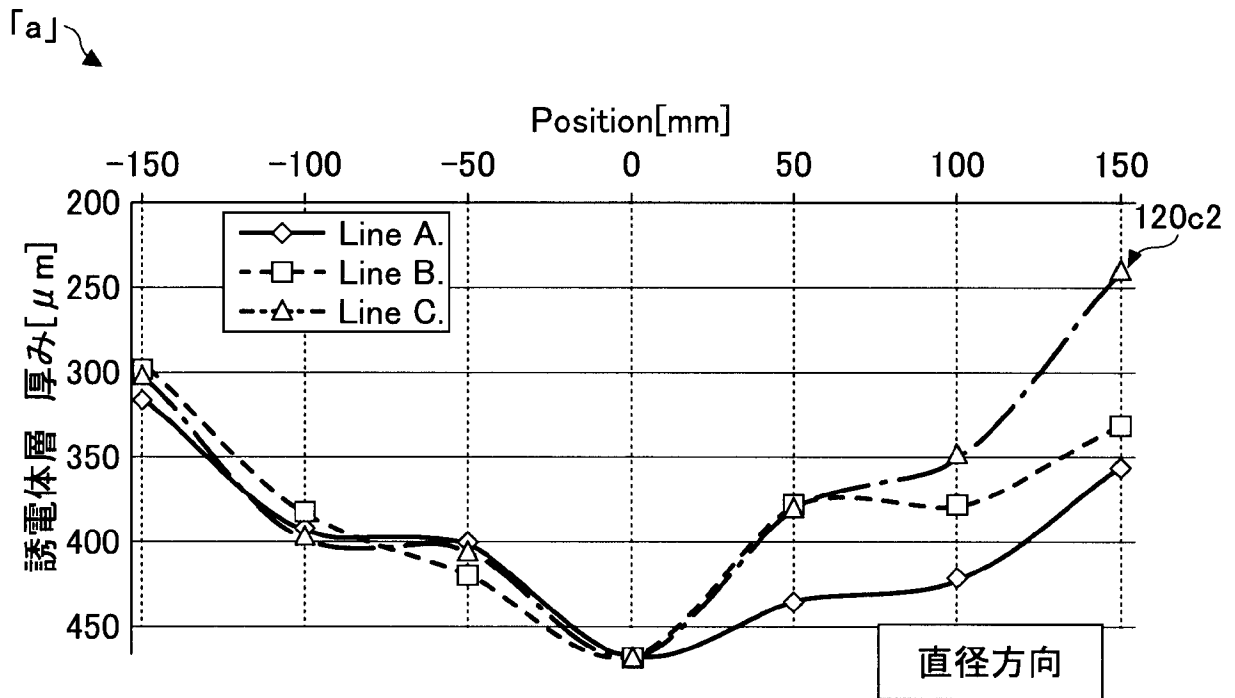
[図25]



[図26]

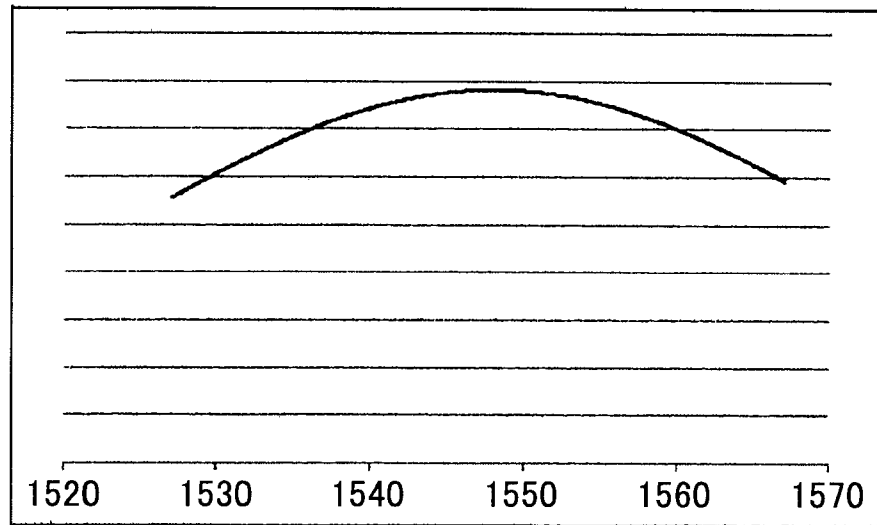


[図27]

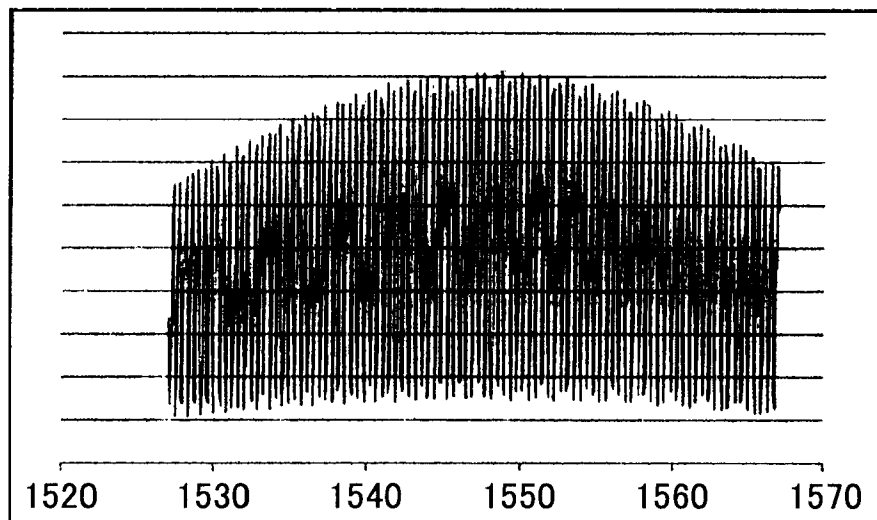


[図28]

「a」

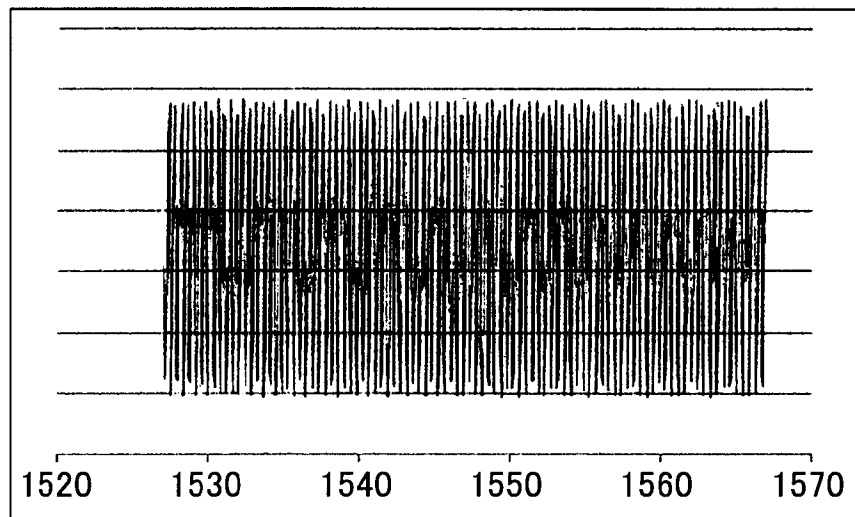


「b」

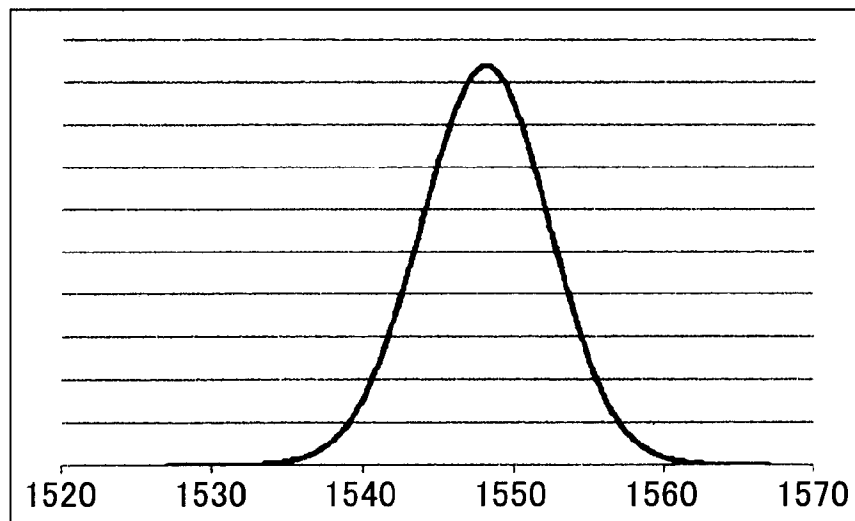


[図29]

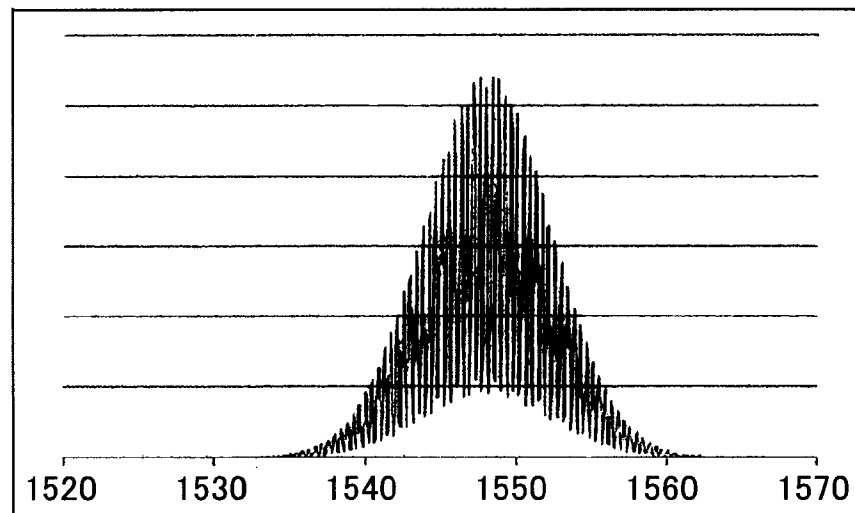
「a」



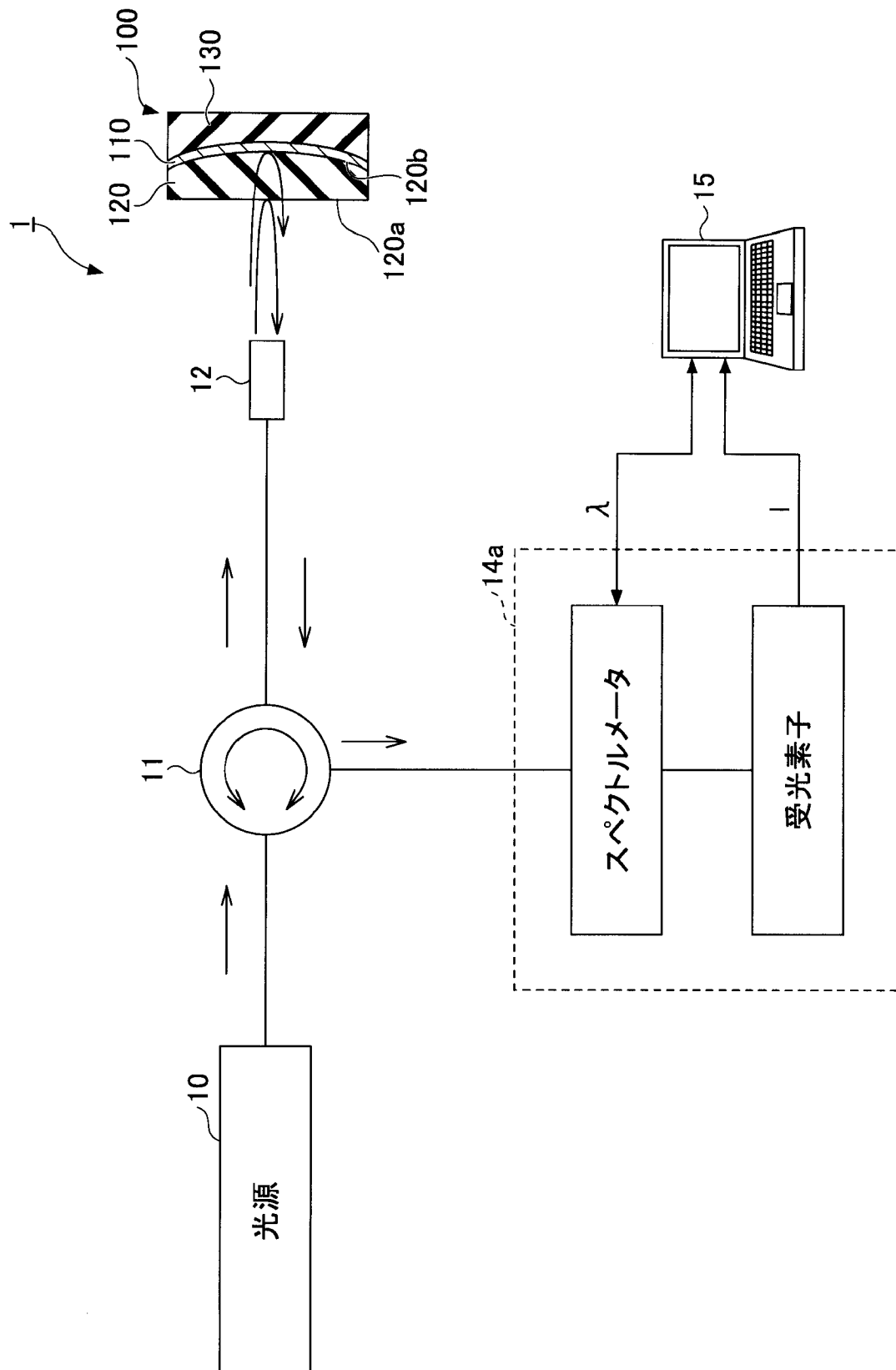
「b」



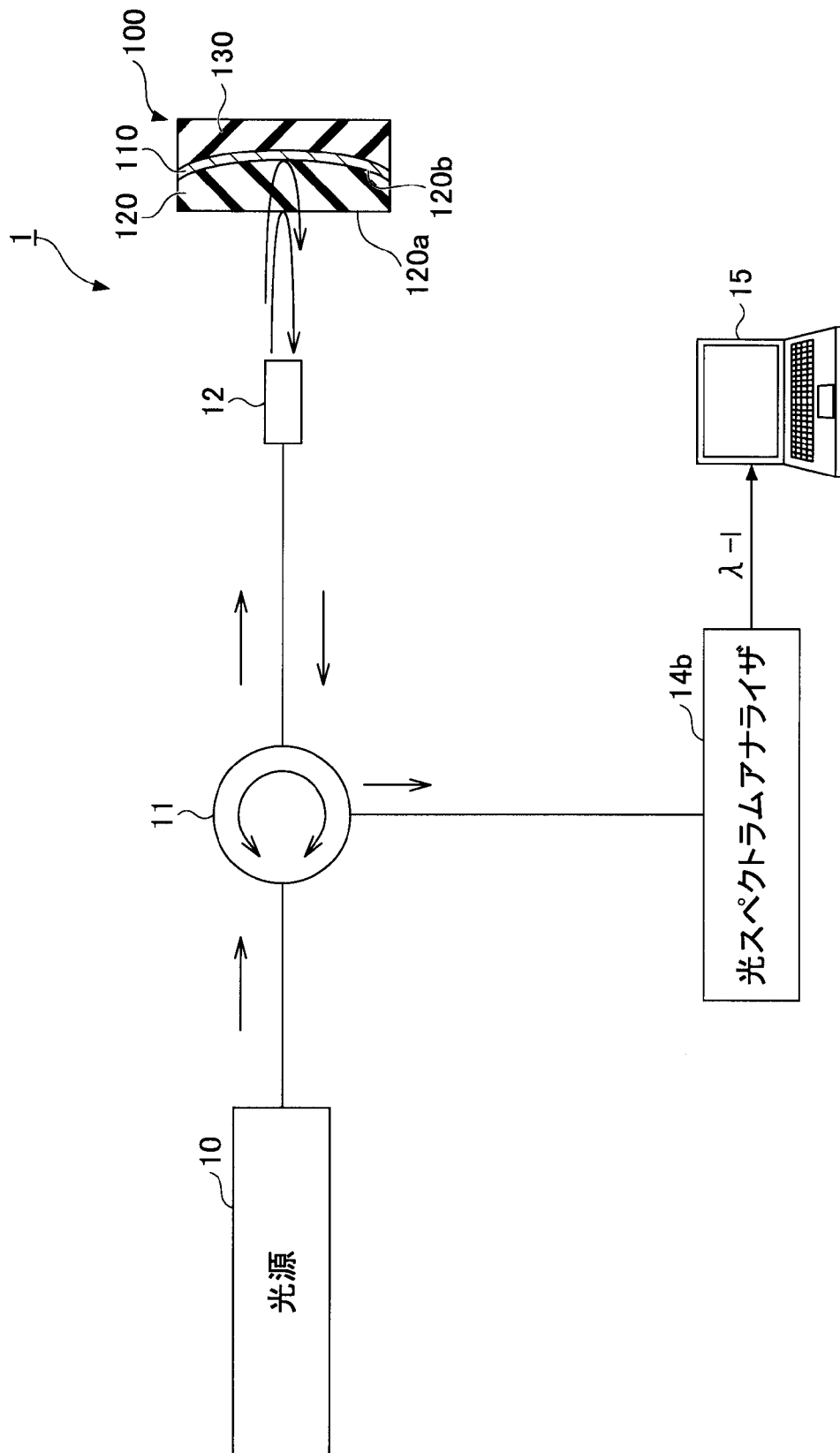
「c」



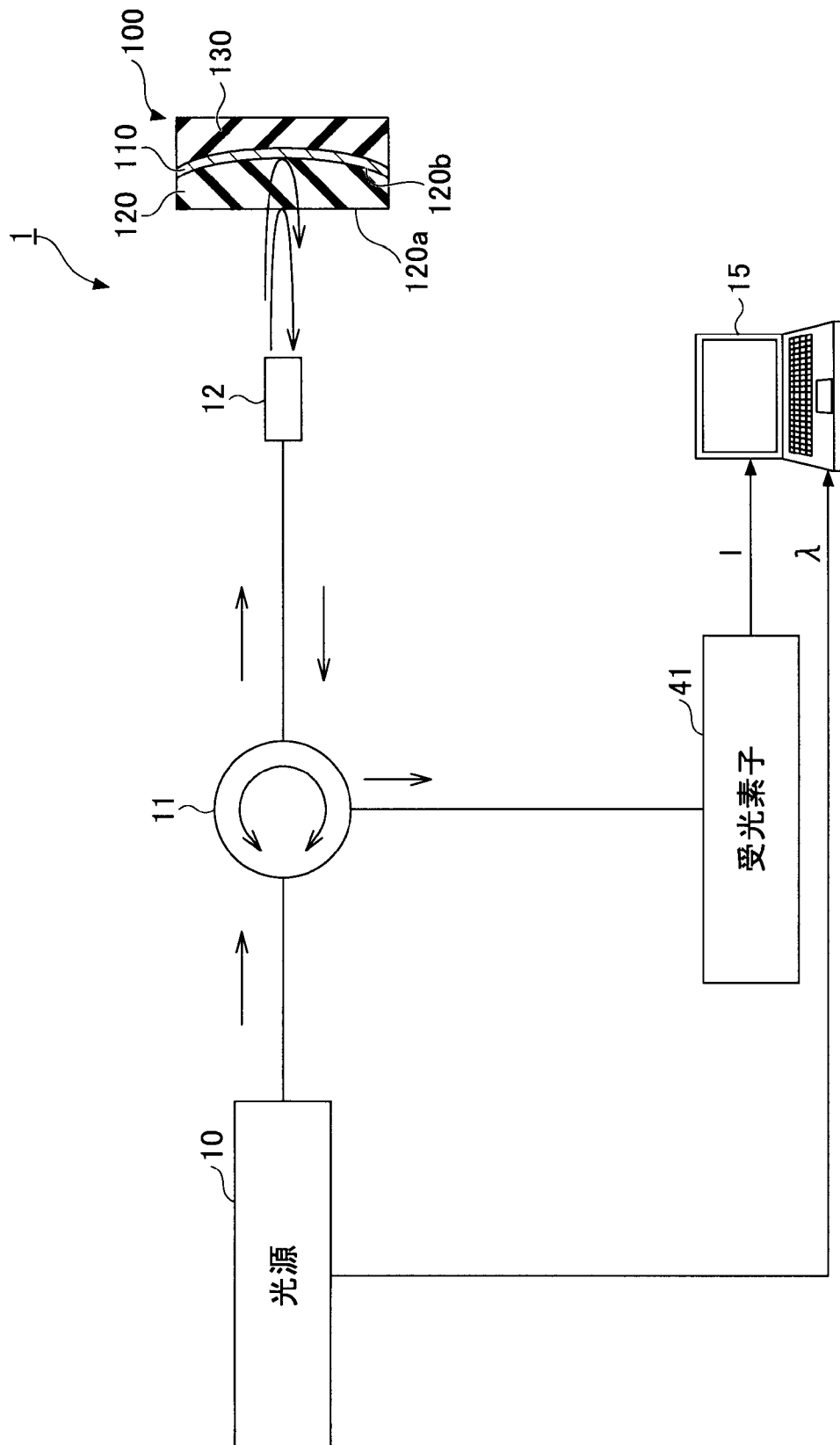
[図30]



[図31]



[図32]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/063859

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B11/06(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)

G01B9/00-11/30, G01N21/00-21/01, G01N21/17-21/61, G01N21/84-21/958

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	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

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	JP 2013-96858 A (Tokyo Electron Ltd.), 20 May 2013 (20.05.2013), claims; paragraphs [0004], [0005], [0018] to [0068], [0088]; fig. 1 to 18 & US 2013/0128275 A1	1-9
Y	JP 2007-48823 A (Nikon Corp.), 22 February 2007 (22.02.2007), paragraph [0062]; fig. 18 (Family: none)	1-9
Y	JP 2008-275552 A (Covalent Materials Corp.), 13 November 2008 (13.11.2008), paragraphs [0003], [0004], [0021]; fig. 1 (Family: none)	5-8

☒ 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
09 June, 2014 (09.06.14)

Date of mailing of the international search report
17 June, 2014 (17.06.14)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/063859

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2013-9001 A (Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd.), 10 January 2013 (10.01.2013), paragraphs [0027], [0030], [0031]; fig. 1 (Family: none)	5, 6
Y	JP 2012-216816 A (NGK Insulators, Ltd.), 08 November 2012 (08.11.2012), paragraphs [0018], [0045]; fig. 3 & US 2012/0248716 A1 & CN 102738054 A & KR 10-2012-0112150 A & TW 201243996 A	5-8
Y	JP 6-281432 A (JASCO Corp.), 07 October 1994 (07.10.1994), claims; paragraphs [0005], [0012]; fig. 1 (Family: none)	9
Y	JP 6-102189 A (Toshiba Corp.), 15 April 1994 (15.04.1994), claims; paragraphs [0007], [0025], [0038] (Family: none)	9
A	JP 2000-213919 A (JEOL Ltd.), 04 August 2000 (04.08.2000), entire text; all drawings (Family: none)	1-9

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01B11/06(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. G01B9/00-11/30, G01N21/00-21/01, G01N21/17-21/61, G01N21/84-21/958

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 4 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 4 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 4 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	JP 2013-96858 A（東京エレクトロン株式会社）2013.05.20, 特許請求の範囲, 段落【0004】、【0005】、【0018】-【0068】、【0088】、 第1-18 図 & US 2013/0128275 A1	1 - 9
Y	JP 2007-48823 A（株式会社ニコン）2007.02.22, 段落【0062】、 第18 図（ファミリーなし）	1 - 9
Y	JP 2008-275552 A（コバレントマテリアル株式会社）2008.11.13, 段 落【0003】、【0004】、【0021】、第1 図（ファミリーなし）	5 - 8

☒ 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 9 . 0 6 . 2 0 1 4

国際調査報告の発送日

1 7 . 0 6 . 2 0 1 4

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100-8915
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）

梶田 真也

2 S

3 3 0 3

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 8

C (続き) . 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	JP 2013-9001 A (住友大阪セメント株式会社) 2013.01.10, 段落【0027】 , 【0030】 , 【0031】 , 第1図 (ファミリーなし)	5, 6
Y	JP 2012-216816 A (日本碍子株式会社) 2012.11.08, 段落【0018】 , 【0045】 , 第3図 & US 2012/0248716 A1 & CN 102738054 A & KR 10-2012-0112150 A & TW 201243996 A	5 - 8
Y	JP 6-281432 A (日本分光株式会社) 1994.10.07, 特許請求の範囲, 段落【0005】 , 【0012】 , 第1図 (ファミリーなし)	9
Y	JP 6-102189 A (株式会社東芝) 1994.04.15, 特許請求の範囲, 段落【0007】 , 【0025】 , 【0038】 (ファミリーなし)	9
A	JP 2000-213919 A (日本電子株式会社) 2000.08.04, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 9