

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-197705

(P2018-197705A)

(43) 公開日 平成30年12月13日(2018.12.13)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 N 21/27 (2006.01)	GO 1 N 21/27 Z	2 G O 4 3
GO 1 N 21/65 (2006.01)	GO 1 N 21/65	2 G O 5 9

審査請求 未請求 請求項の数 17 O L (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2017-102606 (P2017-102606)
 (22) 出願日 平成29年5月24日 (2017.5.24)

(71) 出願人 000125370
 学校法人東京理科大学
 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地
 (74) 代理人 100079049
 弁理士 中島 淳
 (74) 代理人 100084995
 弁理士 加藤 和詳
 (74) 代理人 100099025
 弁理士 福田 浩志
 (72) 発明者 瀬戸 啓介
 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地 学校法人東京理科大学内
 (72) 発明者 徳永 英司
 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地 学校法人東京理科大学内

最終頁に続く

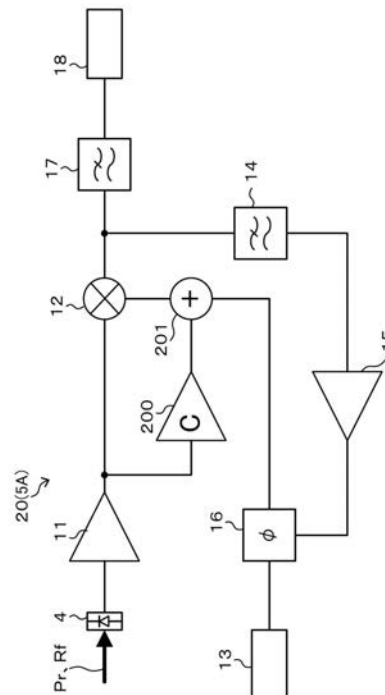
(54) 【発明の名称】 光学測定装置および光学測定方法

(57) 【要約】

【課題】 試料に印加される刺激に対する応答の結果生じるプローブ光の強度変化を検出信号の位相変化として検出する場合と比べて、高い信号雑音比で測定することが可能な光学測定装置および光学測定方法を提供する。

【解決手段】 加算器(201)は、重み付加器(200)で得られる光検出信号の強度に応じた重みを、位相制御器(16)で調整された同期信号に加算して補償同期信号を導出し、乗算器(12)が補償同期信号と光検出信号とを乗算することで、光検出信号の位相ノイズが強度ノイズにより引き起こされた場合であっても、その位相ノイズと相関させて同期信号の位相が変調されるので、位相ノイズをキャンセルすることができる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力する遅延部と、
前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、
受光した光の強度に応じた光検出信号を出力する受光部と、
前記光検出信号と前記光源に同期する同期信号とに基づいて定めた補償同期信号と、前記光検出信号とを乗算して光検出信号に含まれる雑音成分を除去する除去部と、
を備えた光学測定装置。

【請求項 2】

前記遅延部は、前記出力光を前記所定時間として $\pi/2$ 遅延させて参照光として出力する
請求項 1 に記載の光学測定装置。

10

【請求項 3】

前記補償同期信号は、前記同期信号に所定の重みを付加した前記光検出信号を加算した信号である
請求項 1 又は請求項 2 に記載の光学測定装置。

【請求項 4】

前記補償同期信号は、前記光検出信号の瞬時振幅に基づき前記同期信号の位相が調整された信号を用いる
請求項 1 又は請求項 2 に記載の光学測定装置。

20

【請求項 5】

前記補償同期信号は、前記光検出信号の瞬時振幅のべき乗に基づき前記同期信号の位相が調整された信号を用いる
請求項 1 又は請求項 2 に記載の光学測定装置。

【請求項 6】

前記所定の重みは、前記光検出信号の瞬時振幅に基づいて定める
請求項 3 に記載の光学測定装置。

【請求項 7】

前記所定の重みは、前記光検出信号の瞬時振幅のべき乗に基づいて定める
請求項 3 に記載の光学測定装置。

30

【請求項 8】

前記補償同期信号は、前記光検出信号と瞬時位相とが直交するように定める
請求項 1 から請求項 7 の何れか 1 項に記載の光学測定装置。

【請求項 9】

前記除去部は、
前記同期信号の位相を調節して前記補償同期信号とする位相調整部と、
前記補償同期信号と前記光検出信号とを乗算する乗算部と、
前記乗算部の出力を前記除去部に帰還する帰還部と、
を含む請求項 1 から請求項 8 の何れか 1 項に記載の光学測定装置。

【請求項 10】

前記帰還部は、前記乗算部の出力から予め定めた周波数以下の低周波成分を取り出すフィルタをさらに有し、前記低周波成分が、前記同期信号に前記光検出信号を付加するときの重み調整又は位相調整部に帰還される
請求項 9 に記載の光学測定装置。

40

【請求項 11】

前記光源は白色光源であり、
前記受光部の前段に配置される分光器、
をさらに有し、
前記受光部及び前記除去部は、前記分光器により分光された波長ごとに配置される
請求項 1 から請求項 10 の何れか 1 項に記載の光学測定装置。

50

【請求項 1 2】

光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力する遅延部と、
 前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、
 受光した光の強度に応じた光検出信号を出力する受光部と、
 前記光検出信号と前記光源に同期する同期信号とを乗算して光検出信号に含まれる強度雑音成分を抑制する抑制部と、
 前記抑制部で前記強度雑音成分が抑制された信号から、前記光検出信号に基づいて定めた位相雑音に係る光強度信号を減算する減算部と、
 を備えた光学測定装置。

【請求項 1 3】

前記遅延部は、前記出力光を前記所定時間として $\tau/2$ 遅延させて参照光として出力する
 請求項 1 2 に記載の光学測定装置。

【請求項 1 4】

前記減算部は、前記光検出信号の瞬時振幅に基づいて位相雑音に係る光強度信号を定める
 請求項 1 2 又は請求項 1 3 に記載の光学測定装置。

【請求項 1 5】

前記減算部は、前記光検出信号の瞬時振幅のべき乗に基づいて位相雑音に係る光強度信号を定める
 請求項 1 2 又は請求項 1 3 に記載の光学測定装置。

【請求項 1 6】

光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力し、
 前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、
 受光した光の強度に応じた光検出信号を出力し、
 前記光検出信号と前記光源に同期する同期信号とに基づいて定めた補償同期信号と、前記光検出信号とを乗算して光検出信号に含まれる雑音成分を除去する、
 光学測定方法。

【請求項 1 7】

光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力し、
 前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、
 受光した光の強度に応じた光検出信号を出力し、
 前記光検出信号と前記光源に同期する同期信号とを乗算して光検出信号に含まれる強度雑音成分を抑制し、
 前記抑制された信号から、前記光検出信号に基づいて定めた位相雑音に係る光強度信号を減算する
 を備えた光学測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光学測定装置および光学測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来より、試料に刺激を与え、その刺激に対する応答を光で測定する光学測定方法として、ポンプ・プローブ法が知られている。このポンプ・プローブ法を用いて、試料の分子振動を測定する一例として、誘導ラマン散乱法による光学測定方法も知られている。誘導ラマン散乱法ではポンプ光及びプローブ光とされる各々のパルス光を用い、これらポンプ光とプローブ光は時間・空間的に重ねられる。ポンプ光とプローブ光の光子のエネルギー差が分子振動エネルギーと一致した時に、プローブ光の強度が変化する。従って、ポンプ光またはプローブ光の光子エネルギーを掃引させることで分子振動スペクトルの取得が可

10

20

30

40

50

能になる。また、ポンプ光とプローブ光の光子エネルギー差を分子振動のエネルギーと一致させ、これら光を空間的に掃引することで分子振動によるイメージングも可能である。また、試料の複数の分子振動を測定するために、白色パルス光源をプローブ光として用いた光学測定方法も知られている。

【0003】

ところが、白色パルス光源を用いて試料の複数の分子振動を測定する場合、白色光の強度変動（強度ノイズ）が大きく、十分な信号雑音比を得るために長い積算時間が要求されることがある。光源の強度ノイズによる信号雑音比劣化を防ぐ方法として、光源の参照光を用意し、プローブ光の検出信号から参照光の検出信号を減算する、または除算することで検出される強度雑音を除去する方法がある。しかし、白色パルス光の場合、この強度ノイズは波長ごとに異なる場合がある。この場合、参照光の検出波長及び波長幅をプローブ光と厳密に同一にしなければ、強度雑音を効率的に除去することができない。従って、白色光を分光して検出する場合、プローブ光と参照光とで特性の揃った分光器を用意する必要があり、煩雑になる。このことを解消するために、光を検出する素子へ入射されるプローブ光に対して入射時期を遅延させた参照光を用意し、共通の分光器で分光されたプローブ光と参照光を共通の光検出素子で検出し、試料測定によるプローブ光の強度変化を検出信号の位相変化として検出することで、波長ごとに異なる白色光の強度ノイズによる信号雑音比劣化を抑制する光学測定装置が提案されている（特許文献1参照）。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

20

【0004】

【特許文献1】特開2015-87385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、光学測定装置に入射される光の強度が照射の度に変動した場合には検出される信号の位相偏移が引き起こされる場合がある。例えば、光検出素子はその時間応答に光強度依存性を有したり、検出部の電子回路素子が歪特性を有すると、信号強度に応じて位相が変動する場合がある。このように信号強度に応じて位相の変動を生じる場合には、その位相変動特性が原因で強度ノイズが位相ノイズに変換されて、信号雑音比が低下する。従って、信号雑音比を向上させるには改善の余地がある。

30

【0006】

本発明は、上記の事実を考慮してなされたもので、試料に印加される刺激に対する応答の結果生じるプローブ光の強度変化を検出信号の位相変化として検出する場合と比べて、高い信号雑音比で測定可能な光学測定装置および光学測定方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

第1態様の光学測定装置は、
光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力する遅延部と、
前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、受光した光の強度に応じた光検出信号を出力する受光部と、
前記光検出信号と前記光源に同期する同期信号とに基づいて定めた補償同期信号と、前記光検出信号とを乗算して光検出信号に含まれる雑音成分を除去する除去部と、
を備えている。

40

【0008】

前記遅延部は、前記出力光を前記所定時間として $\tau/2$ 遅延させて参照光として出力することができる。

【0009】

前記補償同期信号は、前記同期信号に所定の重みを付加した前記光検出信号を加算した

50

信号を用いることができる。

【0010】

前記補償同期信号は、前記光検出信号の瞬時振幅に基づき前記同期信号の位相が調整された信号を用いることができる。

【0011】

前記補償同期信号は、前記光検出信号の瞬時振幅のべき乗に基づき前記同期信号の位相が調整された信号を用いることができる。

【0012】

前記所定の重みは、前記光検出信号の瞬時振幅に基づいて定めることができる。

【0013】

前記所定の重みは、前記光検出信号の瞬時振幅のべき乗に基づいて定めることができる。

【0014】

前記補償同期信号は、前記光検出信号と瞬時位相とが直交するように定めることができる。

【0015】

前記除去部は、

前記同期信号の位相を調節して前記補償同期信号とする位相調整部と、

前記補償同期信号と前記光検出信号とを乗算する乗算部と、

前記乗算部の出力を前記除去部に帰還する帰還部と、

を含むことができる。

【0016】

前記帰還部は、前記乗算部の出力から予め定めた周波数以下の低周波成分を取り出すフィルタをさらに有し、前記低周波成分が、前記同期信号に前記光検出信号を付加するときの重み調整又は記位相調整部に帰還されるように構成することができる。

【0017】

前記光源は白色光源であり、

前記受光部の前段に配置される分光器、

をさらに有し、

前記受光部及び前記除去部は、前記分光器により分光された波長ごとに配置されるように構成することができる。

【0018】

第2態様の光学測定装置は、

同期信号に応じて光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力する遅延部と、

前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、受光した光の強度に応じた光検出信号を出力する受光部と、

前記光検出信号と前記同期信号とを乗算して光検出信号に含まれる強度雑音成分を抑制する抑制部と、

前記抑制部で前記強度雑音成分が抑制された信号から、前記抑制された信号と前記光検出信号とに基づいて定めた位相雑音に関する光強度信号を減算する減算部と、

を備えている。

【0019】

前記遅延部は、前記出力光を前記所定時間として $\pi/2$ 遅延させて参照光として出力することができる。

【0020】

前記減算部は、前記光検出信号の瞬時振幅に基づいて位相雑音に関する光強度信号を定めることができる。

【0021】

前記減算部は、前記光検出信号の瞬時振幅のべき乗に基づいて位相雑音に関する光強

10

20

30

40

50

度信号を定めることができる。

【0022】

第3態様の光学測定方法は、

同期信号に応じて光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力し、

前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、受光した光の強度に応じた光検出信号を出力し、

前記光検出信号と前記同期信号とに基づいて定めた補償同期信号と、前記光検出信号とを乗算して光検出信号に含まれる雑音成分を除去する。

【0023】

第4態様の光学測定方法は、

同期信号に応じて光源から出力された出力光を所定時間遅延させて参照光として出力し、

前記出力光と前記参照光と刺激光とを試料へ照射し、かつ前記試料からの測定光を受光し、受光した光の強度に応じた光検出信号を出力し、

前記光検出信号と前記同期信号とを乗算して光検出信号に含まれる強度雑音成分を抑制し、

前記抑制された信号から、前記抑制された信号と前記光検出信号とに基づいて定めた位相雑音に関する光強度信号を減算する。

【発明の効果】

【0024】

本発明によれば、試料に印加される刺激に対する応答の結果生じるプローブ光の強度変化を検出信号の位相変化として検出する場合と比べて、高い信号雑音比で測定することができる、という効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0025】

【図1】第1実施形態に係る典型的な光学測定装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図2】第1実施形態に係る白色パルス光を用いて構成した光学測定装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図3】第1実施形態に係るバランス検出法を用いて構成した光学測定装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図4】第1実施形態に係るプローブ光に対して参照光を光学的に遅延させる光学測定装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図5】第1実施形態に係る強度変調された光を出力する光源を含む光学測定装置の構成の変形例を示すブロック図である。

【図6】第1実施形態に係る強度変調された光を出力する光源を含む光学測定装置の構成のその他の変形例を示すブロック図である。

【図7】第1実施形態に係る光学測定装置において試料への光の照射に関する構成の変形例を示すブロック図である。

【図8】第1実施形態に係る光学測定装置に適用可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【図9】第1実施形態に係る複素平面におけるプローブ光と参照光の関係の一例を示すイメージ図である。

【図10】第1実施形態に係る光検出素子及び電気回路素子の位相遅れに関する特性を示すイメージ図である。

【図11】第1実施形態に係る信号雑音比を向上可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【図12】第1実施形態に係る複素平面における光検出信号と、プローブ光及び参照光の同期信号の関係の一例を示すイメージ図である。

10

20

30

40

50

【図 1 3】第 2 実施形態に係る光学測定装置に適用可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【図 1 4】第 3 実施形態に係る光学測定装置に適用可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【図 1 5】第 4 実施形態に係る光学測定装置に適用可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【図 1 6】第 5 実施形態の第 1 例に係る光学測定装置に適用可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【図 1 7】第 5 実施形態の第 2 例に係る光学測定装置に適用可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【図 1 8】第 5 実施形態の第 3 例に係る光学測定装置に適用可能な検出部の構成の一例を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0026】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態について詳細に説明する。

なお、以下の説明では、作用および機能が同じ働きを担う構成要素及び処理には、全図面を通して同じ符合を付与し、重複する説明を適宜省略する場合がある。

【0027】

[第 1 実施形態]

まず、第 1 実施形態の説明に先立ち、光学測定装置の前提技術を説明する。

図 1 に、試料測定 of 応答による測定すべきプローブ光の強度変化（強度変調）が 10^{-3} から 10^{-5} 程度と微小である典型的な測定条件による光学測定装置 1 の構成の一例を示す。この光学測定装置 1 は、ロックイン検出法を用いてプローブ光の強度を測定するように構成されている。

【0028】

詳細には、光学測定装置 1 は、プローブ光 P_r を射出する第 1 光源 2 と、試料 S_P に印加する刺激源であるポンプ光 P_p を射出する第 2 光源 3 と、受光部としての光検出器 4 と、検出部 5 と、参照信号源 8 A と、強度変調器 8 B とを備えている。プローブ光 P_r は、試料 S_P を介して光検出器 4 に入射される。ポンプ光 P_p は、ミラー 6 で反射されてビームスプリッタ 7 でプローブ光 P_r の光軸上を通り、試料 S_P に照射され、試料 S_P を刺激する。光検出器 4 は検出部 5 に接続されており、検出部 5 はロックインアンプで構成される。検出部 5 には、参照信号源 8 A から参照信号が入力されるようになっている。また、強度変調器 8 B は、ポンプ光 P_p の強度を変調するために、第 2 光源 3 の射出側に設けられている。強度変調器 8 B には、参照信号源 8 A から参照信号が入力され、ポンプ光 P_p に参照信号の強度変調を与えるようになっている。

【0029】

なお、第 1 実施形態では、誘導ラマン散乱法を用いて、プローブ光の強度が変化することを検出して分子振動スペクトルの取得などを可能とする光学測定装置について説明するが、対象とする試料 S_P からの光は、透過光でもよく反射光でもよい。この場合、試料 S_P からの光量に対応して透過光又は反射光を用いればよい。以下の説明では、試料 S_P からの透過光を用いて測定する場合を一例として説明する。

【0030】

また、プローブ光 P_r の強度変化には次のものがある。第 1 は、検出すべき対象である試料の応答に対応する強度変化、つまり、試料測定 of 応答によるプローブ光の強度変化である。第 2 は、第 1 光源 2 が位相を定義するために強度変調されている場合におけるプローブ光の強度変化である。例えばパルス光ではパルス繰り返し周期の位相のキャリアである。第 3 は、制御不能な第 1 光源 2 の強度ノイズによるプローブ光の強度変化である。第 1 実施形態は、第 3 で述べた制御不能な第 1 光源 2 の強度ノイズによるプローブ光の強度変化を削減する。そこで、以下の説明では、強度変化とは、第 3 で述べた制御不能な第 1 光源 2 の強度ノイズによるプローブ光の強度変化を指すものとする。また、これらの相違

10

20

30

40

50

を区別して説明する場合は各々の強度変化を区別して表記する。

【 0 0 3 1 】

図 1 に示すロックイン検出法を用いて構成された光学測定装置 1 は、高速のイメージングを可能とする。例えば、プローブ光の強度変調が 10^{-3} から 10^{-5} 程度と微小な測定条件で、プローブ光 P r の強度変調を直接観測しようとする、光源の強度ノイズに埋もれ、長い積算時間を要し、高速測定が求められるイメージングには適用することが困難である。そこで、図 1 に示すようにロックイン検出法を用いた光学測定装置 1 を構成することで、ポンプ光 P p の強度を変調し、プローブ光 P r の強度をその変調周波数周囲のみ計測することが可能になる。つまり、測定すべき信号の周波数はポンプ光 P p の強度変調周波数であり、光の強度ノイズはそれ以外の無関係な成分を含むので、ポンプ光 P p の強度変調周波数付近のみを観測することで、信号雑音比が向上可能になる。

10

【 0 0 3 2 】

図 1 に示す光学測定装置 1 では、ポンプ光 P p またはプローブ光 P r の波長が一定であるので、一分子振動しか観測することができず、分子振動スペクトルの取得が困難である。そこで、プローブ光 P r に白色パルス光を用い、試料 S P からの光を分光して、分光された各々の分光成分を検出することで分子振動スペクトルの取得が可能になる。

図 2 に、プローブ光 P r に白色パルス光を用いた光学測定装置 1 A を一例として示す。図 2 に示すように、光学測定装置 1 A は、分子振動スペクトルを n 個の波長成分に分光する分光器 4 S を備え、分子振動スペクトルを各々検出する光検出器 4 - 1、~ 4 - n (n は自然数) を設ける。また、光検出器 4 - 1、~ 4 - n 各々に対応して、検出部 5 - 1、~ 5 - n を設ける。

20

【 0 0 3 3 】

ところが、白色パルス光は一般的に強度雑音あらゆる周波数で大きく、ロックイン検出法を用いても長い積算時間を要する。このような光の強度雑音の影響を抑制する方法の一例として、バランス検出法が知られている。

図 3 に、バランス検出法を用いて構成した光学測定装置 1 B を一例として示す。図 3 に示すように、光学測定装置 1 B は、プローブ光 P r を、試料 S P に照射する光と、参照光 R f として用いる光に分割するビームスプリッタ 9 A を備えている。また、光学測定装置 1 B は、試料 S P を通過した光を検出する光検出器 4 A と、参照光 R f を検出する光検出器 4 B とを備えている。ビームスプリッタ 9 A で分割された参照光 R f は、ミラー 9 B によって、光検出器 4 B へ案内される。また、光学測定装置 1 B は、光検出器 4 A と光検出器 4 B との出力信号の差を演算する減算器 4 C を備えている。

30

【 0 0 3 4 】

光学測定装置 1 B では、プローブ光 P r を分割して一方の光を試料 S P の測定に用い、他方の光を参照光 R f として用いる。試料 S P 測定後のプローブ光 P r の検出信号は、試料 S P による強度変調成分と、強度雑音成分とが合成された信号である。一方、参照光 R f の検出信号は試料 S P の影響を受けないので、強度雑音成分のみである。従って、プローブ光 P r の検出信号から参照光 R f の検出信号を減算することで、試料 S P による強度変調成分は減じられることなく、強度雑音成分のみをキャンセルすることができる。

【 0 0 3 5 】

図 3 に示す光学測定装置 1 B は、最適に機能するためには次の 2 つの条件の適合が要求される。第 1 条件は、プローブ光 P r と参照光 R f の強度揺らぎが等しい (時間的に相関する)、という条件である。第 2 条件は、プローブ光 P r と参照光 R f の強度比が 1 である、という条件である。このような条件に適合させつつ、白色パルス光の強度雑音をキャンセル可能なように、光学測定装置 1 B を構築するには、次の 3 つの理由から困難であった。

40

【 0 0 3 6 】

第 1 理由は、白色光の強度揺らぎは波長毎に異なるためである。第 1 理由によって、分光してプローブ光 P r と参照光 R f を観測する際に第 1 条件を満たすためには、プローブ光 P r と参照光 R f の検出中心波長と検出波長幅を同一にすることが要求される。また、

50

第1条件を満たすためには、プローブ光 P_r と参照光 R_f で用意する2つの分光器の特性を同一にすることが要求され、構成が煩雑でかつ技術的に困難であった。このため、強度雑音を最大限キャンセルするためには改善の余地がある。

第2理由は、プローブ光 P_r と参照光 R_f が通過する光学素子の特性が波長依存性を有する場合に、波長毎にプローブ P_r と参照光 R_f の強度比が異なるためである。第2理由によって、例えば、ビームスプリッタ9Aによるプローブ光 P_r と参照光 R_f との分割比が波長毎に異なる場合には、第2条件を全ての波長で満たすことが困難である。その結果、特定波長で強度雑音を最大限キャンセル可能であっても、他の波長では強度雑音のキャンセルが不十分の場合がある。これは分光計測への適用を制限する要因となる。

第3理由は、プローブ光 P_r と参照光 R_f の強度比が試料 S_P の影響を受けるためである。第3理由によって、ある瞬間に第2条件が解決されても、試料 S_P の測定時の状態が変化すると、参照光 R_f に対する試料 S_P を通過したプローブ光 P_r の透過率が変化し、強度比が変動することになる。従って、試料 S_P の経時変化を分析する際、及び試料 S_P の測定位置が時々刻々変化するイメージングでは、特定の時刻や測定位置においてのみ強度雑音が最大限除去されるものの、他の時刻や他の測定位置では強度雑音の除去が不十分になる。

【0037】

これら3つの理由による課題を解消しつつ、光の強度雑音の影響を抑制するために、プローブ光 P_r と参照光 R_f との何れかを光学的に遅延させる光学測定装置を説明する。

図4に、プローブ光 P_r に対して参照光 R_f を光学的に遅延させる光学測定装置1Cを一例として示す。

【0038】

図4に示すように、光学測定装置1Cは、プローブ光 P_r を、試料 S_P の測定に用いる光と、参照光 R_f として用いる光に分割するビームスプリッタ9Aを備えている。また、光学測定装置1Cには、ビームスプリッタ9Aで分割された参照光 R_f を、プローブ光 P_r に重畳させるために、ビームスプリッタ9Aにおける参照光 R_f への分割側に、ミラー9B, 9Cが順に設けられている。また、ミラー9Cの反射側で、かつプローブ光 P_r の光軸上には、ビームスプリッタ9Dが設けられている。ミラー9B, 9Cを、プローブ光 P_r の光軸に対して接近又は離間することで、プローブ光 P_r に対する参照光 R_f の光路長の変更による光学的遅延によって、プローブ光 P_r に対して参照光 R_f が光検出器4に入射する時刻を遅延させることができる。

【0039】

第1実施形態では、プローブ光 P_r に対して参照光 R_f を $\pi/2$ 遅延させる場合を一例として説明する。なお、プローブ光 P_r に対する参照光 R_f の遅延は、 $\pi/2$ に限定されるものではない。例えば、同期信号の周期の整数倍 ($\pi/2 + m$) でもよく、周期の一部 (π/m) でもよい。つまり、プローブ光 P_r に対して参照光 R_f は位相が相違していればよく、好ましくはプローブ光 P_r と参照光 R_f とを判別可能に遅延させればよい。よって、さらに好ましくはプローブ光 P_r に対して参照光 R_f を $\pi/2$ 遅延させることである。

【0040】

光学測定装置1Cは、検出部として、検出部5Aと、ロックインアンプ5Bとを含んでいる。光検出器4は検出部5Aに接続されており、検出部5Aはロックインアンプ5Bに接続される。ここで、プローブ光 P_r は強度変調されるようになっており、プローブ光源 P_r の周期的な強度変調に同期する同期信号を取得可能になっている。図4に示すように、第1実施形態に係る光学測定装置1Cでは、同期信号源5Cからの同期信号に応じて第1光源2から出力される光、つまりプローブ光 P_r が強度変調される場合を説明する。プローブ光 P_r は、同期信号源5Cからの同期信号により第1光源2で強度変調され、その同期信号が検出部5Aに入力される。従って、検出部5Aには、同期信号源5Cから同期信号が入力されるようになってきている。また、ロックインアンプ5Bには、ポンプ光 P_p の強度を変調するための参照信号源8Aからの参照信号が入力されるようになってきている。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 1 】

第 1 実施形態では、同期信号が与えられて第 1 光源 2 から出力される強度変調されたプローブ光 P_r を用いる場合を説明するが、プローブ光 P_r は第 1 光源 2 に同期信号を与えて強度変調することに限定するものではない。例えば、受動モードロックパルスレーザ等の強度変調された光を出力する光源を用いてもよい。この場合、例えば、図 5 に示すように、受動モードロックパルスレーザ等の第 1 光源 2 から出力される強度変調されたプローブ光 P_r の同期信号を検出する同期信号検出器 5 D を備えて、同期信号検出器 5 D で検出された同期信号を検出部 5 A に入力するように構成すればよい。また、同期信号の検出は、図 6 に示すように、同期信号検出器 5 E を検出部 5 A に設けて、光検出器 4 からの信号から検出するようにしてもよい。

10

【 0 0 4 2 】

また、第 1 実施形態では、プローブ光 P_r 及び参照光 R_f を試料 S_P に照射する光学測定装置について説明するが、プローブ光 P_r 及び参照光 R_f を試料 S_P に照射することに限定されるものではない。例えば、図 7 に示すように、試料 S_P にはプローブ光 P_r のみを照射し、参照光 R_f は試料 S_P の下流側で重ね合わせてもよい。試料 S_P に照射する光として選択する、プローブ光 P_r 、又はプローブ光 P_r 及び参照光 R_f は、試料 S_P から得られるプローブ光 P_r 及び参照光 R_f である測定光の強度比、つまり透過率変化の度合いの大きさにより設定することができる。具体的には測定光の強度比（透過率変化の度合い）の大きさが予め実験等で定めた閾値を超えた場合にプローブ光 P_r 及び参照光 R_f を試料 S_P に照射するようにすればよく、予め定めた閾値以下の場合にプローブ光 P_r のみを試料 S_P に照射するようにすればよい。

20

【 0 0 4 3 】

図 8 に、図 4 に示す検出部 5 A の構成の一例を示す。

図 8 に示すように、検出部 5 A は、アンプ 1 1、乗算器 1 2、同期信号部 1 3、ローパスフィルタ 1 4、積分器 1 5、位相制御器 1 6、ローパスフィルタ 1 7、及び出力部 1 8 を備えている。光学測定装置 1 C の検出部 5 A では、光検出器 4 の検出信号が、アンプ 1 1 で増幅されて、乗算器 1 2 の一方の入力側へ出力される。乗算器 1 2 の他方の入力側には、同期信号部 1 3 から出力される同期信号が位相制御器 1 6 を介して入力される。同期信号部 1 3 は、同期信号源 5 C からの同期信号を抽出して出力する。位相制御器 1 6 の制御側は、乗算器 1 2 の出力側に、乗算器 1 2 の出力側から順に、ローパスフィルタ 1 4 及び積分器 1 5 を介して接続されている。また、出力部 1 8 は、ローパスフィルタ 1 7 からの信号をロックインアンプ 5 B へ出力する。

30

【 0 0 4 4 】

図 4 及び図 8 に示す光学測定装置 1 C は、次の機能を有している。

第 1 機能は、光学的遅延（光路長の変更）を用いてプローブ光 P_r に対して参照光 R_f が光検出器 4 に入射する時刻を遅延させる機能である。

第 2 機能は、プローブ光 P_r と参照光 R_f とを同一の光検出器 4 で検出する機能である。プローブ光 P_r と参照光 R_f との光検出器 4 へ入射する時刻が異なるので、出力は検出する位相により、プローブ光に由来するものと参照光 R_f に由来するものが弁別される。この同一の光検出器 4 を用いることにより、プローブ光 P_r と参照光 R_f とに対して同一の分光器を用いることができ、検出中心波長と検出波長幅を共通に維持することができる。これにより、上記第 1 理由による課題を解消することができる。

40

第 3 機能は、検出する位相を調整することによりプローブ光 P_r と参照光 R_f に由来する検出信号の重みを調整しつつ差を取る機能である。これにより、光学的にはプローブ光 P_r と参照光 R_f の強度が異なっても検出時に補償することができる。これにより、上記第 2 理由による課題を解消することができる。

第 4 機能は、光強度の変動、つまり差が 0 になるよう、重みを適切な応答速度でフィードバック制御する機能である。これにより、試料 S_P の状態が測定中に変化し、プローブ光 P_r と参照光 R_f の強度比が変化しても自動的に重みが最適化され、上記第 3 理由による課題を解消することができる。

50

【 0 0 4 5 】

詳細には、図 8 において、第 1 光源 2 から所定周期（例えば 76.3 MHz の繰り返し周波数）で射出されたパルス光が分割され、一方の光がプローブ光 P_r、他方の光が参照光 R_f とされ、各々試料 S_P を介して光検出器 4 へ至る。参照光 R_f は光路長を長くすることで光学的な遅延を与えられ、例えば、パルス繰り返し周期の 1/4 だけ時間的に遅延されて、再びプローブ光 P_r と空間的に重ねられる。一方、ポンプ光 P_p はプローブ光 P_r および参照光 R_f と空間的に重ねられる。しかし、時間的にはプローブ光 P_r のみに重ねられる。これらの 3 つの光が試料 S_P へ入射すると、ポンプ光 P_p による刺激がプローブ光 P_r のみで検出され、強度変調 $m(t)$ が与えられる。強度変調 m は、与えられたポンプ光 P_p の強度変調と、試料 S_P の経時変化による時間の関数である。従って、プローブ光 P_r の基本波成分は $a \times A(t) \times (1 + m(t)) \times \cos(\omega t)$ と表すことができる。また、参照光 R_f は $b \times A(t) \times \sin(\omega t)$ と表すことができる。但し、 a と b はビームスプリッタなどの光学素子で光学的に定められる、強度比に比例する定数である。 $A(t)$ は時々刻々揺らぐ、強度雑音を含む瞬時振幅である。 ω はパルス繰り返し角周波数である。従って、プローブ光 P_r 及び参照光 R_f が同一の光検出器 4 で検出された検出信号は、次の (1) 式で表すことができる。

10

【 0 0 4 6 】

【 数 1 】

$$aA(t)(1 + m(t)) \cos(\omega t) + bA(t) \sin(\omega t) \quad \dots (1)$$

20

【 0 0 4 7 】

光検出器 4 による検出信号は乗算器 12 へ入力される。一方、パルス光源との同期信号を用意する。この位相は位相制御器 16 により調整される。ここで、同期信号を次の (2) 式で表すものとする。

【 数 2 】

$$D \cos(\omega t + \phi) \quad \dots (2)$$

【 0 0 4 8 】

乗算器 12 で同期信号と検出信号を乗算し、ローパスフィルタ 17 で高周波成分を除去した結果は、次の (3) 式で表す関係に比例する。その比例した信号が出力部 18 から出力される。

30

【 数 3 】

$$A(t) \{ a(1 + m(t)) \cos(\phi) - b \sin(\phi) \} \\ = A(t) \{ a \cos(\phi) - b \sin(\phi) \} + aA(t)m(t) \cos(\phi)$$

$$\dots (3)$$

【 0 0 4 9 】

ここで、次に示す (4) 式を満たすように位相 ϕ を調整する。

40

【 数 4 】

$$a \cos(\phi) - b \sin(\phi) = 0$$

$$\text{つまり、} \phi = \tan^{-1}(a/b) \quad \dots (4)$$

【 0 0 5 0 】

このように調整すると、出力である (3) 式における第一項の加算的な雑音成分 $A(t) \times \{ a \times \cos(\phi) - b \times \sin(\phi) \}$ が打ち消され、検出すべき信号 $a \times A(t) \times m(t) \times \cos(\phi)$ のみが出力される。このようにして信号雑音比が向上される。ここで、 a と b が光学的な要因で等しくなくても、(4) 式を満たすように位相 ϕ を調

50

整することで補償することができる。また、(4)式が満たされない場合、 $A(t) \times \{a \times \cos(\) - b \times \sin(\)\}$ に含まれる直流成分が出力に現れるので、これを誤差信号として0になるよう、 θ をフィードバック制御することも可能である。これにより、動的に係数aとbが変動しても自動的に(4)式の条件が満たされる。このとき、ローパスフィルタ14の遮断周波数を十分に小さくすることでフィードバック制御の応答周波数をポンプ光Ppの強度変調周波数よりも小さくすると、 $A(t) \times m(t) \times \cos(\)$ は打ち消されることがなく検出することができる。

【0051】

図9に、複素平面におけるプローブ光Prと参照光Rfの関係の一例を示す。図9では、プローブ光Prの検出信号の成分を、矢印X方向を軸とする成分で示し、参照光Rfの検出信号の成分を、矢印Y方向を軸とする成分で示している。図9(A)は試料SPによる信号が無い場合の一例を示し、図9(B)は試料SPによる信号が有の場合の一例を示している。

10

【0052】

従って、(3)式で表される検出信号は、プローブ光Prの信号と参照光Rfの信号とが合成された方向(図9の例ではX方向とY方向とを合成した方向)になる。一方、同期信号は紙面、検出信号と直交する方向(図9の例ではX方向と、Y方向の逆方向とを合成した方向、 $\theta + \pi/2$)になる。検出信号と同期信号を乗算して低周波成分を抜き出すのは、検出信号と同期信号の内積を取ることであり、検出信号を同期信号に射影することに相当する。この低周波成分の周波数は、予め定めた周波数以下の周波数に対応する。

20

【0053】

ここで、試料SPによる信号が無い場合を考える(図9(A)参照)。このとき、光源の強度雑音により、プローブ光Prと参照光Rfとの検出信号の大きさは変化するが、これらの信号の強度比は一定であるので、重ねられた検出信号の偏角 θ は一定である。従って、同期信号に射影された成分は0のみである。これは、強度雑音は検出されないことを意味する。

【0054】

一方、試料SPによる信号が現れた場合(図9(B)参照)、プローブ光Prの強度のみが $m(t)$ で強度変調される一方、参照光Rfの強度は変調されない。従って、重ねられた検出信号の偏角 θ が θ だけ変化する。この変化の分だけ同期信号へ射影された成分が現れる。つまり、光源の強度雑音は射影成分として出力されない一方、試料SPによる強度変調は出力されるので、信号雑音比が向上される。

30

【0055】

ここで、同期信号の位相のフィードバック周波数をポンプ光Ppの強度変調周波数よりも十分大きくすると、重ねられた光検出信号と同期信号は常に直交する状態になる。この場合、ローパスフィルタ17後に現れていた $A(t) \times m(t) \times \cos(\)$ をも打ち消され、出力されなくなる。しかし、重ねられた光検出信号の位相は試料SPによる強度変調により変調されていて、これと直交するように位相 θ をフィードバック制御しているので、この制御信号に位相変調の情報が含まれる。一方、強度雑音は位相を変調しない。つまり、フィードバック制御信号を観測することで、信号雑音比が向上されて試料SPによる強度変調を検出することが可能である。しかもこの場合、 $A(t) \times m(t) \times \cos(\)$ に含まれる、乗算的に寄与する $A(t)$ をもキャンセルすることが可能である。

40

【0056】

しかしながら、図4及び図8に示す光学測定装置1Cでは、入射するパルス光と検出される信号との時刻の関係が一定であることを前提としている。つまり、光強度がパルス毎に変動しても検出される信号の位相偏移が引き起こされないことを前提としている。ところが、実際のフォトダイオードなどの光検出素子の時間応答には、光強度依存性がある。また、アンプ及び電気回路素子間をつなぐ信号線へのカップリングコンデンサ、その他電気回路素子は、歪特性を有しており、その歪特性により、信号強度によって位相が変動する可能性がある。

50

【 0 0 5 7 】

図 10 に、光検出素子及び電気回路素子の位相遅れに関する特性を示す。図 10 (A) は、光強度と位相の関係の一例を示している。また、図 10 (B) は、電子回路の信号と位相の関係の一例を示している。

図 10 (A) に示す例では、強度が安定した繰り返し周波数が 76.3 MHz のパルス光をフォトダイオードで検出した場合の光強度と位相の関係を示している。検出された光強度が大きくなるに従って位相が遅れている。つまり、強度が揺らぐと位相が揺らぎ、強度雑音に位相雑音に変換されることになる。

【 0 0 5 8 】

以上のことについて、説明を簡単にするために、試料 S P による信号が検出されていない場合、つまり $m = 0$ の場合を説明する。また、位相遅れは瞬時振幅に比例するものと近似する。そこで、比例定数を k とし、強度雑音に由来する位相雑音を $-k \times A(t)$ とすると上記 (1) 式は、次の (5) 式で表すことができる。

10

$$aA(t) \cos(\omega t - kA(t)) + bA(t) \sin(\omega t - kA(t)) \quad \dots (5)$$

【 0 0 5 9 】

この (5) 式による信号と (2) 式による同期信号を乗算した低周波部分の信号を示す (3) 式は、次の (6) 式で表すことができる。

20

$$A(t) \{ a \cos(\phi + kA(t)) - b \sin(\phi + kA(t)) \} \quad \dots (6)$$

$$= -A(t)(a^2 + b^2)^{1/2} \sin(\phi + kA(t) + \alpha)$$

但し、

$$\alpha = -\tan^{-1}(a/b)$$

とする。

【 0 0 6 0 】

ここで、同期信号の位相 を (4) 式で示すように選択すると、出力は次の (7) 式で表すことができる。

30

$$-A(t)(a^2 + b^2)^{1/2} \sin(kA(t)) \doteq -kA^2(t)(a^2 + b^2)^{1/2} \quad \dots (7)$$

【 0 0 6 1 】

なお、(7) 式の右辺は $k \ll 1$ の場合である。つまり、強度雑音に比例定数 k で位相雑音に変換されるとき、(7) 式で表される雑音は出力に加算される。これを複素平面 (図 9 参照) で説明すると、プローブ光 P r と参照光 R f の検出信号が強度に比例して反時計まわりに $k \times A(t)$ だけ回転するので、プローブ光 P r と参照光 R f が重ねられた検出信号も $A(t)$ に比例して長くなりつつ、反時計周りに $k \times A(t)$ だけ回転する。この回転により、振幅ノイズ成分 $A(t)$ が同期信号ベクトルに射影されて出力される。しかし、出力は回転と瞬時振幅の両方に比例するので、(7) 式で示すように、出力される雑音は $A(t)$ の二乗に比例する。 $A(t)$ は光源の強度雑音で、確率的に変動するので、過去の出力に基づくフィードバックにより位相を制御しても打ち消すことは困難である。

40

【 0 0 6 2 】

以上は位相偏移が強度に対して線形に比例する場合を説明した。しかし、非線形に比例する場合も考えられる。例えば、図 10 (B) は乗算器 1 2 に、位相が一定で、かつ振幅が異なる電気信号の入力を与えたときの位相偏移を示している。図 10 (B) は、横軸を入力信号の振幅、縦軸を位相偏移として表している。図 10 (B) に示すように、振幅が

50

0.2 Vまではほぼ線形に位相偏移しているものの、0.2 V以上からは非線形性が顕著であることが理解できる。

【0063】

・補償同期信号の生成

以上の事実を考慮して、本発明者は、光検出信号の位相が光検出信号強度に応じて変調される点に着目し、同期信号に光検出信号を加算して補償同期信号を得ることで、強度雑音を、より抑制可能にする光学測定装置に到達した。

【0064】

図11に、光学測定装置に適用可能な検出部の一例として、補償同期信号によって強度雑音をより抑制して、信号雑音比をさらに向上できる検出部20の構成を示す。図11に示す検出部20は、図4に示す光学測定装置1Cにおける検出部5A（図8も参照）において、同期信号に重みcを付加して光検出信号に加算する一例である。

10

【0065】

詳細には、位相制御器16の出力側と、乗算器12の他方の入力側との間に、加算器201を設け、加算器201の一方の入力側に、同期信号部13から出力された後に位相制御器16で調整された同期信号が入力されるように構成される。また、アンプ11の出力側と、乗算器12の一方の入力側との間に、入力信号に重みcを付加した出力信号を出力する重み付加器200の入力側が接続される。重み付加器200の出力側は、加算器201の他方の入力側に接続される。加算器201の出力側は、乗算器12の他方の入力側に接続される。

20

【0066】

このように構成することで、位相制御器16で調整された同期信号に代えて、重みcが付加された光検出信号を加算して生成された補償同期信号を用いることによって、光検出信号の位相ノイズが強度ノイズにより引き起こされた場合であっても、その位相ノイズと関連させて同期信号の位相が変調されるので、位相ノイズをキャンセルすることができる。

【0067】

図12に、図11に示す検出部20において、複素平面における光検出信号と、プローブ光Pr及び参照光Rfの同期信号の関係の一例を示す。

図12では、光検出信号はプローブ光由来と参照光由来の信号が重ねられたもののみ示す。この信号は瞬時振幅A(t)に応じてk×A(t)だけ遅れる方向に位相偏移するとする。これとほぼ直交しているのが同期信号ベクトルである。前述のとおり、出力される信号は光検出信号を同期信号ベクトルに射影したものになる。以下の説明では、同期信号ベクトルに適切な重みcで光検出信号を加算して、これを補償同期信号ベクトルと称する。重みcを適切に選択することで、補償同期信号を位相変調された光検出信号と常に直交させることができる。従って、光検出信号の位相ノイズが強度ノイズにより引き起こされても、その位相ノイズと関連させて同期信号の位相を変調することで、位相ノイズをもキャンセルできる。

30

【0068】

つまり、重ねられた光検出信号は初期位相を適切に選択することで次の(8)式で表すことができる。

40

【数8】

$$A(t) \sin(\omega t - kA(t) + m'(t)) \quad \dots (8)$$

但し、m'(t)は試料により引き起こされた位相変調で、観測すべき信号である。

【0069】

この位相変調は、試料測定による強度変調を含んだプローブ光の瞬時振幅と参照光の瞬時振幅の比で定まる。同期信号は前述の(2)式で表すことができるが、重ねられた光検出信号の初期位相を零としたので、Dcos(t)となる。従って、補償同期信号は同

50

期信号に重み c で (8) 式の光検出信号を加算することにより次の (9) 式で表すことができる。

【数 9】

$$D \cos(\omega t) + c A(t) \sin(\omega t - kA(t) + m'(t)) \quad \dots (9)$$

【 0 0 7 0 】

この場合、出力される信号は、次の (1 0) 式で表すことができる。(1 0) 式は、(8) 式と (9) 式との積をとり、低周波成分を抜き出したものである(つまり、内積に相当)。

【数 1 0】

$$\begin{aligned} (D/2)[A(t) \sin(m'(t) - kA(t))] + (1/2)cA^2(t) & \dots (10) \\ \doteq (1/2)DA(t)m'(t) + (1/2)A^2(t)(c - kD) & \end{aligned}$$

但し、 $|m'(t)|, |kA(t)| \ll 1$ とする。第一項は検出すべき信号で、第二項が強度雑音(振幅雑音)により引き起こされた位相雑音による雑音である。

【 0 0 7 1 】

ここで $c = k \times D$ と選択することで、この位相雑音がキャンセルできることが分かる。一方で、光検出信号を加算することでは、試料 S P の測定に由来する信号(第一項)のゲインを減らすことはない。このようにして信号雑音比がさらに向上できる。

【 0 0 7 2 】

[第 2 実施形態]

次に、第 2 実施形態を説明する。第 1 実施形態は、位相偏移は強度に対して線形である場合を説明したが、開示の技術は、位相偏移が強度に対して線形である場合に限定されるものではない。第 2 実施形態は、位相偏移が強度に対して非線形性がある場合に、開示の技術を適用したものである。なお、第 2 実施形態は第 1 実施形態と同様の構成であるため、同一部分には同一符号を付して詳細な説明を省略する。

【 0 0 7 3 】

図 1 3 に、第 2 実施形態に係る光学測定装置に適用可能な検出部 2 1 の構成の一例を示す。図 1 3 に示す検出部 2 1 は、図 1 1 に示す検出部 2 0 において、重み付加器 2 0 0 に対して強度変調する制御を行って補償同期信号を生成する一例である。

【 0 0 7 4 】

詳細には、アンプ 1 1 の出力側と、乗算器 1 2 の一方の入力側との間は、検波器 2 1 0 及び強度変調器 2 1 1 を介して、ローパスフィルタ 1 7 の出力側と、出力部 1 8 の入力側との間に接続される。なお、検波器 2 1 0 は、図 1 3 では D E T と表記している。検波器 2 1 0 は、アンプ 1 1 の出力信号を入力としてアンプ 1 1 の瞬時振幅信号、つまり光検出器 4 の光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を出力する。検波器 2 1 0 の一例には包絡線検波器及び同期検波器などを用いることができる。強度変調器 2 1 1 は、少なくともアンプ 1 1 から出力された光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、非線形な位相偏移に相関関係を有する強度変調信号を、重み付加器 2 0 0 の制御側に出力するように構成される。つまり、第 2 実施形態では、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて重み付加器 2 0 における重み c を定める。

【 0 0 7 5 】

なお、強度変調器 2 1 1 は、ローパスフィルタ 1 7 の出力信号を入力に追加して(図 1 3 に点線で示す接続関係)、ローパスフィルタ 1 7 の出力信号も用いて重み c を定めることも可能であるが、第 2 実施形態では、ローパスフィルタ 1 7 の出力信号を用いることなく(つまり図 1 3 に点線で示す接続関係なしで)、重み c を定める場合を説明する。ローパスフィルタ 1 7 の出力信号も用いて重み c を定めることに関する詳細は後述する。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 6 】

このように構成することで、非線形に位相偏移が引き起こされる場合であっても、その非線形な位相偏移に相関関係を有する強度変調信号によって、重み c の大きさが制御されて、振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルすることができる。

【 0 0 7 7 】

詳細には第 1 実施形態では、 k が定数で、位相偏移は強度に対して線形である場合を説明した。一方、例えば、図 10 (B) に示すように、乗算器 12 の定数 k が光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ に依存する非線形性がある場合、例えば、次の (11) 式で位相偏移を関数 f で、表現する。

【 数 1 1 】

$$kA(t) = f(A(t)) \quad \dots (11)$$

10

【 0 0 7 8 】

このように非線形に位相偏移が引き起こされる場合、重み付加器 200 により生成される重み c を関数 $f(A(t)) / A(t)$ による結果に基づいて強度変調させて加算器 201 で加算すれば、非線形に位相偏移が引き起こされる場合の補償同期信号を生成することができる。つまり、非線形に位相偏移が引き起こされるとき、光検出信号を示す (8) 式は次の (12) 式で表すことができる。

【 数 1 2 】

$$A(t) \sin(\omega t - f(A(t)) + m'(t)) \quad \dots (12)$$

20

【 0 0 7 9 】

また、このとき、補償同期信号は、次の (13) 式で表すことができる。

【 数 1 3 】

$$D \cos(\omega t) + c(A(t))A(t) \sin[\omega t - f(A(t)) + m'(t)] \quad \dots (13)$$

ここで $c(A(t))$ は以下のように定める。(12) 式と (13) 式との積をとり、低周波成分を抜き出すと、次の (14) 式で表すことができる。

30

【 数 1 4 】

$$\begin{aligned} (1/2)[DA(t) \sin\{m'(t) - f(A(t))\} + c(A(t))A^2(t)] \\ \cong (1/2)DA(t)m'(t) + (1/2)A(t)\{A(t)c(A(t)) - Df(A(t))\} \\ \dots (14) \end{aligned}$$

【 0 0 8 0 】

従って、次の (15) 式で示すように、重み c を選択することで振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルできる。

40

【 数 1 5 】

$$c(A(t)) = Df(A(t))/A(t) \quad \dots (15)$$

【 0 0 8 1 】

通常、この関数 f はべき乗関数で記述することができ、次の (16) 式で表すことができる。

【 数 1 6 】

$$f(x) = \sum_{i=1}^n k_i x^i \quad \dots (16)$$

50

【 0 0 8 2 】

この場合、重み c は次の (1 7) 式により求めることができる。

【 数 1 7 】

$$c = D \sum_{i=1}^n k_i A(t)^{i-1} \quad \dots (17)$$

【 0 0 8 3 】

(1 7) 式に示すように、重み c は、固定的な定数 $D k_i$ と、瞬時振幅 $A(t)$ とから求めることができる。つまり、検波器 2 1 0 は、瞬時振幅 $A(t)$ を求め、強度変調器 2 1 1 は、瞬時振幅 $A(t)$ と定数 $D k_i$ とから重み c を求める。従って、瞬時振幅 $A(t)$ のべき乗に定数 $D k_i$ を乗算することで定まる重み c によって光検出信号を制御した信号を用いることで、振幅雑音による位相偏移 (位相雑音) をキャンセルできる。

10

【 0 0 8 4 】

このように、第 2 実施形態では、非線形に位相偏移が引き起こされる場合であっても、その非線形な位相偏移に相関関係を有する強度変調信号によって、重み c の大きさを制御するので、振幅雑音による位相偏移 (位相雑音) をキャンセルすることができる。

【 0 0 8 5 】

[第 3 実施形態]

次に、第 3 実施形態を説明する。第 1 実施形態及び第 2 実施形態は、同期信号に適切な重みで光検出信号を加算して補償同期信号を得る場合を説明した。第 3 実施形態は、同期信号の位相を直接変調して、補償同期信号を得る場合に、開示の技術を適用したものである。つまり、第 3 実施形態は、同期信号の位相を瞬時振幅に相関させて補償同期信号を得るものである。なお、第 3 実施形態は第 1 実施形態及び第 2 実施形態と同様の構成であるため、同一部分には同一符号を付して詳細な説明を省略する。

20

【 0 0 8 6 】

図 1 4 に、第 3 実施形態に係る光学測定装置に適用可能な検出部 2 2 の構成の一例を示す。図 1 4 に示す検出部 2 2 は、図 8 に示す検出部 5 A において、位相制御器 1 6 で同期信号の位相を制御する場合に、アンプ 1 1 の出力信号、つまり光検出器 4 の光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、補償同期信号を生成する一例である。

【 0 0 8 7 】

詳細には、積分器 1 5 の出力側と、位相制御器 1 6 の制御側との間に、加算結果を示す信号が位相制御器 1 6 の制御側に入力されるように加算器 2 2 1 が設けられる。また、アンプ 1 1 の出力側と、乗算器 1 2 の一方の入力側との間は、検波器 2 1 0 及び直接位相変調制御器 2 2 0 を介して、加算器 2 2 1 に接続される。つまり、直接位相変調制御器 2 2 0 は、アンプ 1 1 から出力された光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、直接位相を変調するための信号を、位相制御器 1 6 の制御側に出力するように構成される。詳細には、加算器 2 2 1 の一方の入力側には、積分器 1 5 の出力信号が入力されるように構成され、加算器 2 2 1 の他方の入力側には、直接位相変調制御器 2 2 0 の出力信号が入力されるように構成される。つまり、第 3 実施形態では、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて同期信号の位相を瞬時振幅に相関させる。

30

40

【 0 0 8 8 】

なお、直接位相変調制御器 2 2 0 は、ローパスフィルタ 1 7 の出力信号を入力に追加して (図 1 4 に点線で示す接続関係)、ローパスフィルタ 1 7 の出力信号も用いて同期信号の位相を瞬時振幅に相関させることも可能であるが、第 3 実施形態では、ローパスフィルタ 1 7 の出力信号を用いることなく (つまり図 1 4 に点線で示す接続関係なしで)、相関させる場合を説明する。ローパスフィルタ 1 7 の出力信号も用いて同期信号の位相を瞬時振幅に相関させることに関する詳細は後述する。

【 0 0 8 9 】

ここで、同期信号の位相を直接変調して、補償同期信号を得る場合、位相変調 ($A(t)$) による補償同期信号は次の (1 8) で表すことができる。

50

【数 18】

$$D \cos[\omega t - \Psi(A(t))] \quad \dots (18)$$

【0090】

式(12)と(18)を乗算した結果は、次の(19)式で表すことができる。

【数 19】

$$(1/2)DA(t) \left[\sin\{2\omega t - f(A(t)) - \Psi(A(t)) + m'(t)\} \right. \\ \left. + \sin\{\Psi(A(t)) - f(A(t)) + m'(t)\} \right]$$

... (19)

10

【0091】

この(19)式における低周波成分は、第2項であり、次の(20)式である。

【数 20】

$$(1/2)DA(t) \sin\{\Psi(A(t)) - f(A(t)) + m'(t)\}$$

... (20)

【0092】

ここで、(20)式の関数 \sin の第2項である $-f(A(t))$ は、振幅雑音を引き起こした位相雑音を示す。従って、位相制御器16を、次の(21)式で示すように変調すれば位相雑音をキャンセルすることができる。

20

【数 21】

$$\Psi(x) = f(x) \quad \dots (21)$$

【0093】

つまり、第2実施形態と同様に、位相変調 $(A(t))$ は、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて固定的に求めることができる。従って、直接位相変調用制御器220は、検波器210で求まる瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、同期信号の位相を直接変調するための信号を求め、同期信号の位相を瞬時振幅に相関させることで、振幅雑音による位相偏移(位相雑音)をキャンセルできる。

30

【0094】

このように、第3実施形態では、同期信号の位相を直接変調することによって、補償同期信号を得ることができ、位相雑音をキャンセルすることができる。

【0095】

[第4実施形態]

次に、第4実施形態を説明する。第1実施形態から第3実施形態は、同期信号に適切な重みで光検出信号を加算して補償同期信号を得る場合、及び同期信号の位相を直接変調して補償同期信号を得る場合を説明した。第4実施形態は、雑音を出力から直接減算する場合に、開示の技術を適用したものである。なお、第4実施形態は第1実施形態から第3実施形態と同様の構成であるため、同一部分には同一符号を付して詳細な説明を省略する。

40

【0096】

図15に、第4実施形態に係る光学測定装置に適用可能な検出部23の構成の一例を示す。図15に示す検出部23は、図8に示す検出部5Aにおいて、アンプ11の出力信号、つまり光検出器4の光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、位相雑音に由来する雑音を出力信号から直接減算することで、雑音をキャンセルする一例である。

【0097】

詳細には、ローパスフィルタ17の出力側と、出力部18の入力側との間に、減算器231が設けられる。減算器231は、入力側がローパスフィルタ17の出力側に接続され、減算用の入力側が減算用制御器230の出力側に接続され、出力側が出力部18の入力側に接続される。また、アンプ11の出力側と、乗算器12の一方の入力側との間は、検

50

波器 210 及び減算用制御器 230 を介して減算器 231 に接続される。具体的には、減算用制御器 230 は、アンプ 11 から出力された光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、位相雑音を示す信号を、減算器 231 の減算用の入力側に出力するように構成される。つまり、第 4 実施形態では、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて求まる位相雑音を示す信号を出力信号から直接減算する。

【0098】

ここで、減算用制御器 230 は、ローパスフィルタ 17 の出力信号を入力に追加して（図 15 に点線で示す接続関係）、ローパスフィルタ 17 の出力信号も用いて位相雑音を示す信号を求めることも可能であるが、第 4 実施形態では、ローパスフィルタ 17 の出力信号を用いることなく（つまり図 15 に点線で示す接続関係なしで）、位相雑音を示す信号を求める場合を説明する。ローパスフィルタ 17 の出力信号も用いて位相雑音を示す信号を求めることに関する詳細は後述する。

10

【0099】

なお、第 4 実施形態では、同期信号に対して位相変調を実施しない構成の一例として、次の (22) 式により同期信号が与えられる場合を説明する。

【数 22】

$$D \cos[\omega t] \quad \dots (22)$$

【0100】

(22) 式により同期信号が与えられた場合、ローパスフィルタ 17 の出力は、(12) 式と (22) 式を乗算することにより導出でき、次の (23) 式で表すことができる。

20

【数 23】

$$(1/2)DA(t) [\sin\{2\omega t - f(A(t)) + m'(t)\} + \sin\{m'(t) - f(A(t))\}]$$

... (23)

【0101】

この (23) 式における第 2 項は、低周波成分を示す信号に対応し、次の (24) 式で近似的に表すことができる。

【数 24】

$$(1/2)DA(t) \sin\{m'(t) - f(A(t))\}$$

$$\approx (1/2)DA(t)m'(t) - (1/2)DA(t)f(A(t))$$

... (24)

【0102】

この (24) 式では、右辺第 2 項が、振幅雑音が引き起こした位相雑音を示す信号に対応する。従って、次の (25) 式で示される (24) 式の右辺第 2 項で表される信号を、ローパスフィルタ 17 の出力から減算することによって、位相雑音に由来する雑音をキャンセルすることができる。つまり、減算用制御器 230 は、アンプ 11 から出力された光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、位相雑音を示す信号を導出し、減算器 231 の減算用の入力側に出力する。

40

【数 25】

$$-(1/2)DA(t)f(A(t)) \quad \dots (25)$$

【0103】

つまり、第 2 実施形態と同様に、(25) 式による信号は、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて固定的に求めることができる。従って、減算用制御器 230 は、検波器 210 で求まる瞬時振幅 $A(t)$ を用いて、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて求まる位相雑音を示す信号を求め、

50

位相雑音を示す信号を出力信号から直接減算することで、振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルできる。

【0104】

このように、第4実施形態では、振幅雑音が引き起こす位相雑音を示す信号を出力信号から直接減算することによって、雑音をキャンセルすることができる。

【0105】

[第5実施形態]

次に、第5実施形態を説明する。

第1実施形態から第4実施形態は、素子の個体差及び環境変動による特性変動が一定であることを想定している。しかし、例えば、実際の光検出器4等の素子及び乗算器12等の電子回路素子は、雑音を招く特性として、個体差を有する場合、温湿度等の環境変動に依存する場合、及び検出波長に依存する場合がある。第5実施形態は、素子の個体差及び環境変動による特性変動が生じる場合に、開示の技術を適用したものである。

なお、第5実施形態は第1実施形態から第4実施形態と同様の構成であるため、同一部分には同一符号を付して詳細な説明を省略する。

また、第5実施形態では、説明を簡単にするために、位相偏移が振幅に対して線形に比例する場合におけるフィードバック制御の一例を説明する。

【0106】

まず、第5実施形態の第1例を説明する。

第5実施形態の第1例は、振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルするために、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて重み付加器20における重み c を定める場合に（図13参照）、ローパスフィルタ17の出力信号も用いてフィードバック制御する一例である。

【0107】

光学測定装置の検出部において、素子の個体差及び環境変動によって出力信号に含まれる雑音変動する場合、その雑音を安定してキャンセルするためには、重み c をフィードバック制御等で自動的に最適化することが考えられる。しかし、フィードバック制御するためには最適でないときに現れる誤差信号が要求される。前述の出力信号を示す(10)式の第2項に着目すると、重み c が最適でないとき ($c \neq kD$) のとき、瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ の大きさに比例した直流成分が現れる。しかし、出力信号の直流成分は(3)式の右辺第1項における同期信号の位相のフィードバック制御の誤差信号として用いるので、重み c のフィードバック制御に用いることが困難である。

【0108】

そこで、瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ で表される信号の高周波成分に着目する。瞬時振幅 $A(t)$ は無作為な雑音で、その二乗 $A^2(t)$ の交流成分も無作為な雑音である。ところが、周波数成分は、瞬時振幅 $A(t)$ に比べて瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ の方が高い周波数成分を含む。つまり、瞬時振幅 $A(t)$ に含まれている上限の周波数 f_{1up} に比べて、その二乗 $A^2(t)$ に含まれる上限の周波数 f_{2up} は2倍になる ($f_{2up} = 2f_{1up}$)。従って、光検出信号から瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ を示す信号を生成し、周波数 f_{1up} から周波数 f_{2up} までの成分を抽出して、抽出した成分の信号と出力信号とを乗算すると、 $A^2(t)(c - kD)$ から（直流の）誤差信号を生成することができる。一方、検出すべき信号成分 $DA(t)m'(t)$ 、及び(3)式の第1項の同期信号の位相に関する誤差信号である、 $A(t)\{a \cos(\) - b \sin(\)\}$ は、周波数 f_{1up} 以下の成分のみを含み、無相関であるので、これらの信号から影響を受けることはない。従って、重み c の誤差信号のみを得ることができる。このように得られた誤差信号に基づいて、重み c をフィードバック制御することが可能になる。

【0109】

図16に、第5実施形態の第1例に係る光学測定装置に適用可能な検出部24の構成の一例を示す。図16に示す検出部24は、重み c のフィードバック制御を行う一例である。

図16に示すように、検出部24は、図13に示す強度変調器211の一例として、乗

10

20

30

40

50

算器 2 4 0、ハイパスフィルタ 2 4 1、乗算器 2 4 2、及び積分器 2 4 3 を備えている。

【 0 1 1 0 】

詳細には、アンプ 1 1 の出力側と、乗算器 1 2 の一方の入力側との間は、検波器 2 1 0 の入力側に接続される。検波器 2 1 0 の出力側は、乗算器 2 4 0 の 2 つの入力側に共通に接続される。乗算器 2 4 0 の出力側は、ハイパスフィルタ 2 4 1 を介して乗算器 2 4 2 の一方の入力側に接続される。乗算器 2 4 2 の他方の入力側は、ローパスフィルタ 1 7 の出力側と、出力部 1 8 の入力側との間に接続される。また、乗算器 2 4 2 の出力側は、積分器 2 4 3 を介して、重み付加器 2 0 0 の制御側に接続される。

【 0 1 1 1 】

次に、第 5 実施形態の第 1 例に係る検出部 2 4 の動作を説明する。

図 1 6 に示すように、まず、検波器 2 1 0 は、光検出信号を用いて瞬時振幅 $A(t)$ を示す信号を出力する。瞬時振幅 $A(t)$ を示す信号は、乗算器 2 4 0 の両方の入力側に入力されて、乗算器 2 4 0 は瞬時振幅 $A(t)$ を二乗した信号を出力する。次に、ハイパスフィルタ 2 4 1 は、遮断周波数 f_{1up} であり、瞬時振幅 $A(t)$ の二乗 $A^2(t)$ を示す信号の交流成分のうち、遮断周波数 f_{1up} 以上の周波数成分を乗算器 2 4 2 の一方の入力側へ出力する。乗算器 2 4 2 の他方の入力側には、ローパスフィルタ 1 7 の出力信号が入力され、乗算器 2 4 2 は、これらの入力信号を乗算して、乗算結果である重み c の誤差信号を積分器 2 4 3 へ出力する。積分器 2 4 3 は、入力された重み c の誤差信号を積分して（積分制御）、積分結果を重み付加器 2 0 0 の制御側に出力するように構成する。このように構成することによって、重み c をフィードバック制御することができる。なお、このフィードバックの遮断周波数はポンプ光 P_p の変調周波数よりも十分に小さく、かつ、瞬時振幅 $A(t)$ と瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ の高周波成分との相関が無視できる程度に小さくする。

【 0 1 1 2 】

このように、第 5 実施形態の第 1 例に係る光学測定装置では、瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ で表される信号の高周波成分を用いて、重み c の誤差信号のみを得て、得られた誤差信号に基づいて、重み c をフィードバック制御することができる。これによって、素子の個体差及び環境変動によって出力信号に含まれる雑音が変動する場合であっても、重み c を自動的に最適化することができる。

【 0 1 1 3 】

なお、第 5 実施形態の第 1 例におけるフィードバック制御は、位相偏移が振幅に対して線形に比例する場合について説明したが、位相偏移が振幅に対して非線形に対応する場合に適用可能であることは勿論である。詳細には、 m 次に比例する成分の誤差信号は、出力と瞬時振幅 $A(t)$ の $(m+1)$ 次の周波数 f_{1up} の $(m+1)$ 倍の高周波成分との積を導出することで得ることができる。例えば、係数 k_2 をキャンセルする重み c_2 に対する誤差信号は、瞬時振幅の三乗 $A^3(t)$ を示す信号の周波数 f_{1up} の 2 倍より大きい周波数の高周波を生成して出力と積を導出することで得られる。

【 0 1 1 4 】

つまり、(16) 式において、係数 k_1 と係数 k_2 を同時に考慮して係数 k_1 と係数 k_2 の各々に対する誤差信号を生成する場合、係数 k_1 の重み c_1 に対する誤差信号は、 $A^2(t)$ の f_{1up} から $2f_{1up}$ の信号と出力との積から導出できる。また、重み c_2 に対する誤差信号は、 $A^3(t)$ の $2f_{1up}$ から $3f_{1up}$ の信号と出力との積から導出できる。これらを一般化すると、 m 次に比例する成分の (c_m) 誤差信号は、 $A^m(t)$ の $(m-1)f_{1up}$ から $m \times f_{1up}$ の信号と出力との積から導出できる。なお、この場合、瞬時振幅 $A(t)$ は（雑音を含むので）一つの周波数ではなく広帯域で、直流成分（DC）から周波数 f_{1up} を含むものである。

【 0 1 1 5 】

次に、第 5 実施形態の第 2 例を説明する。

第 5 実施形態の第 2 例は、振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルするために、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて同期信号の位相を直接変調する場合に（図 1 4 参照）、口

10

20

30

40

50

ーパスフィルタ 17 の出力信号も用いてフィードバック制御する一例である。

【 0 1 1 6 】

振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルする方法は同期信号の位相を直接変調する場合にも適用できる。つまり、同期信号の位相を直接変調する場合には、上記の（21）式における関数 $f(x)$ をべき乗の和として近似し、フィードバックにより係数 k_i を推定すればよい。

【 0 1 1 7 】

具体的には、上記（21）式の左辺を、次に示す（26）式として、上記第5実施形態の第1例と同様に、係数 k_i を推定すればよい。

【 数 2 6 】

$$\Psi(x) = \sum_{i=1}^n k_i x^i \quad \dots (26)$$

10

【 0 1 1 8 】

図 17 に、第5実施形態の第2例に係る光学測定装置に適用可能な検出部 25 の構成の一例を示す。図 17 に示す検出部 25 は、同期信号の位相を直接変調する場合にフィードバック制御を行う一例である。

図 17 に示すように、検出部 25 は、図 14 に示す直接位相変調用制御器 220 の一例として、乗算器 240、ハイパスフィルタ 241、乗算器 242、積分器 243、及びアンプ 244 を備えている。図 17 に示す直接位相変調用制御器 220 は、図 16 に示す強度変調器 211 の構成に、アンプ 244 を追加したものである。アンプ 244 は、同期信号の位相を直接変調するための信号を出力する制御器として作動する。

20

【 0 1 1 9 】

詳細には、乗算器 242 の出力側は、積分器 243 を介して、アンプ 244 の制御側に接続される。アンプ 244 の入力側は検波器 210 の出力側に接続され、アンプ 244 の出力側は加算器 221 に接続される。つまり、アンプ 244 は、光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ を示す信号を、瞬時振幅 $A(t)$ の二乗 $A^2(t)$ を示す信号を用いて制御して、直接位相を変調するための信号を、加算器 221 の他方の加算側に出力するように構成される。つまり、第5実施形態の第2例では、瞬時振幅 $A(t)$ 及び瞬時振幅 $A(t)$ の二乗 $A^2(t)$ を示す信号を用いて同期信号の位相を直接変調する。

30

【 0 1 2 0 】

次に、第5実施形態の第2例に係る検出部 25 の動作を説明する。

乗算器 242 は、入力されたハイパスフィルタ 241 による瞬時振幅 $A(t)$ の二乗 $A^2(t)$ を示す信号の交流成分のうち、遮断周波数 f_{up} 以上の周波数成分の信号と、ローパスフィルタ 17 の出力信号とを乗算し、乗算結果を誤差信号として積分器 243 へ出力する。積分器 243 は、入力された誤差信号を積分して（積分制御）、積分結果をアンプ 244 の制御側に出力する。

【 0 1 2 1 】

このように、第5実施形態の第2例に係る光学測定装置では、瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ で表される信号の高周波成分を用いて、誤差信号を得て、得られた誤差信号に基づいて、同期信号の位相を直接変調する信号にフィードバック制御することができる。

40

【 0 1 2 2 】

なお、第5実施形態の第2例におけるフィードバック制御は、位相偏移が振幅に対して線形に比例する場合について説明したが、第5実施形態の第1例におけるフィードバック制御と同様に位相偏移が振幅に対して非線形に対応する場合にも適用可能である。

【 0 1 2 3 】

次に、第5実施形態の第3例を説明する。

第5実施形態の第3例は、振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルするため

50

に、瞬時振幅 $A(t)$ を用いて出力から位相雑音に由来する雑音を減算する場合に（図 15 参照）、ローパスフィルタ 17 の出力信号も用いてフィードバック制御する一例である。

【0124】

振幅雑音による位相偏移（位相雑音）をキャンセルする方法は出力から位相雑音に由来する雑音を減算する場合にも適用できる。つまり、出力から位相雑音に由来する雑音を減算する場合には、上記の（25）式中の関数 $f(x)$ をべき乗の和として近似し、フィードバックにより k_i を推定すればよい。

【0125】

具体的には、上記（25）式を、次に示す（27）式として、上記第 5 実施形態の第 1 例と同様に、係数 k_i を推定すればよい。

【数 27】

$$-(1/2)Dx \sum_{i=1}^n k_i x^i \quad \dots (27)$$

【0126】

図 18 に、第 5 実施形態の第 3 例に係る光学測定装置に適用可能な検出部 26 の構成の一例を示す。図 18 に示す検出部 26 は、出力から位相雑音に由来する雑音を減算する場合にフィードバック制御を行う一例である。

図 18 に示すように、検出部 26 は、図 17 に示す直接位相変調用制御器 220 と同様の構成の減算用制御器 230 を備えている。図 18 に示す減算用制御器 230 では、アンプ 244 は、出力から位相雑音に由来する雑音を減算するための信号を出力する制御器として作動する。

【0127】

詳細には、アンプ 244 の入力側は乗算器 240 の出力側に接続され、アンプ 244 の出力側は減算器 231 に接続される。つまり、アンプ 244 は、光検出信号の瞬時振幅 $A(t)$ の二乗 $A^2(t)$ を示す信号を用いて制御して、出力から位相雑音に由来する雑音を減算するための信号を、減算器 231 の減算用の入力側に出力するように構成される。つまり、第 5 実施形態の第 3 例では、瞬時振幅 $A(t)$ 及び瞬時振幅 $A(t)$ の二乗 $A^2(t)$ を示す信号を用いて出力から位相雑音に由来する雑音を減算する。

【0128】

次に、第 5 実施形態の第 3 例に係る検出部 25 の動作を説明する。

乗算器 242 は、入力されたハイパスフィルタ 241 による瞬時振幅 $A(t)$ の二乗 $A^2(t)$ を示す信号の交流成分のうち、遮断周波数 f_{up} 以上の周波数成分の信号と、ローパスフィルタ 17 の出力信号とを乗算し、乗算結果を誤差信号として積分器 243 へ出力する。積分器 243 は、入力された誤差信号を積分して（積分制御）、積分結果をアンプ 244 の制御側に出力する。

【0129】

このように、第 5 実施形態の第 3 例に係る光学測定装置では、瞬時振幅の二乗 $A^2(t)$ で表される信号の高周波成分を用いて、誤差信号を得て、得られた誤差信号に基づいて、位相雑音に由来する雑音を減算する信号にフィードバック制御することができる。

【0130】

なお、第 5 実施形態の第 3 例におけるフィードバック制御は、位相偏移が振幅に対して線形に比例する場合について説明したが、第 5 実施形態の第 1 例におけるフィードバック制御と同様に、位相偏移が振幅に対して非線形に対応する場合にも適用可能である。

【0131】

なお、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。発明の要旨を逸脱しない範囲で上記実施の形態に多様な

10

20

30

40

50

変更または改良を加えることができ、当該変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれる。

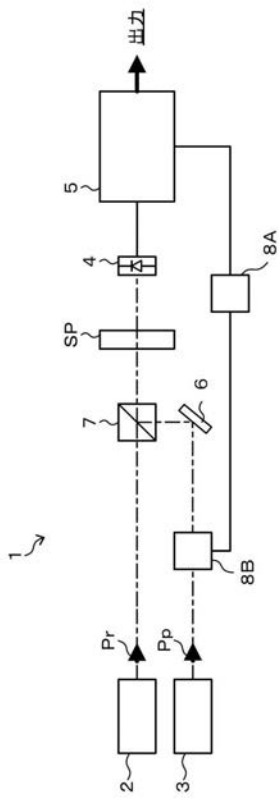
【符号の説明】

【0132】

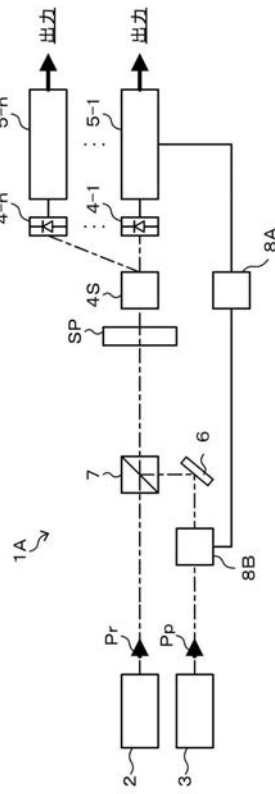
1	光学測定装置	
1 A、1 B、1 C	光学測定装置	
2、3	光源（光源）	
4	光検出器（受光部）	
4 A、4 B	光検出器	
4 C	減算器	10
4 S	分光器	
5	検出部	
5 A	検出部	
5 B	ロックインアンプ	
5 C	同期信号源	
5 D	同期信号検出器	
5 E	同期信号検出器	
6	ミラー	
7	ビームスプリッタ	
8 A	参照信号源	20
8 B	強度変調器	
9 A	ビームスプリッタ	
9 B、9 C	ミラー	
9 D	ビームスプリッタ	
11	アンプ	
12	乗算器	
13	同期信号部	
14	ローパスフィルタ	
15	積分器	
16	位相制御器	30
17	ローパスフィルタ	
18	出力部	
20	検出部	
21、22、23、24	検出部	
200	重み付加器	
201	加算器	
210	検波器	
211	強度変調器	
220	直接位相変調用制御器	
221	加算器	40
230	減算用制御器	
231	減算器（減算部）	
240	乗算器	
241	ハイパスフィルタ	
242	乗算器	
243	積分器	
244	アンプ	
Pp	ポンプ光（刺激光）	
Pr	プローブ光（出力光）	
Rf	参照光（参照光）	50

S P 試料

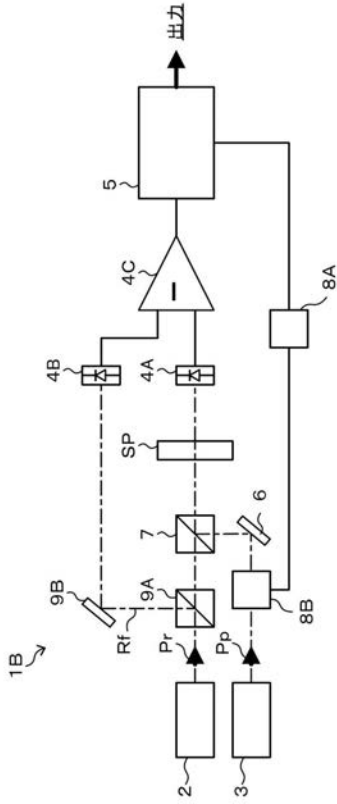
【図 1】



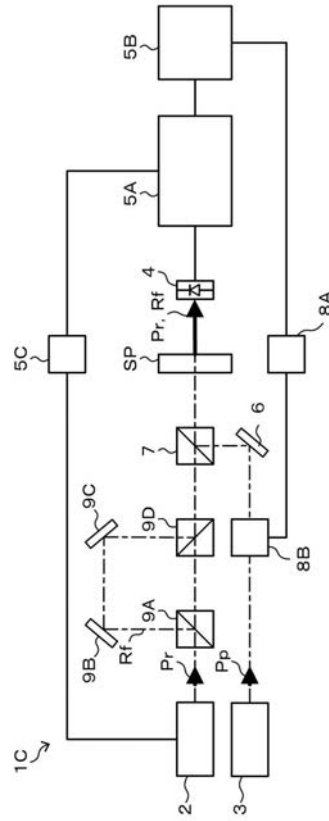
【図 2】



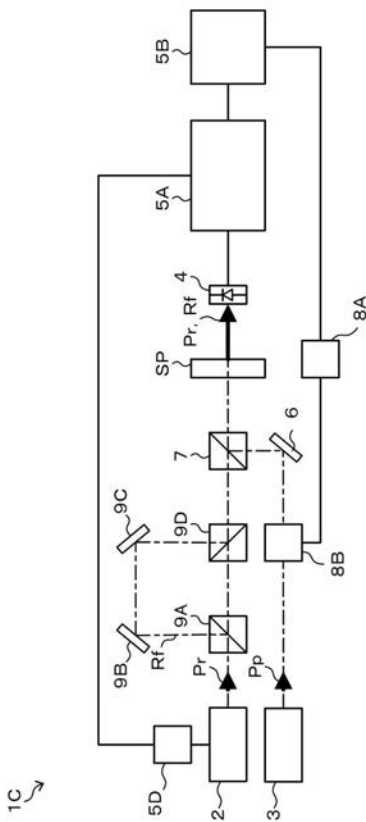
【 図 3 】



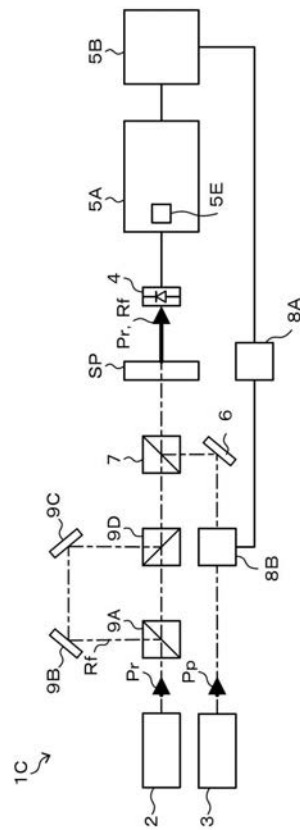
【 図 4 】



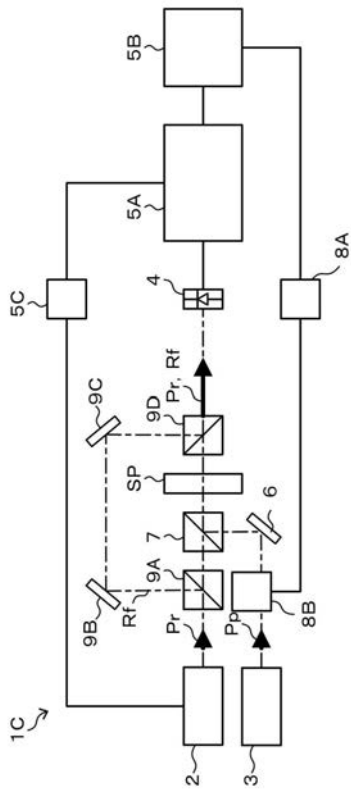
【 図 5 】



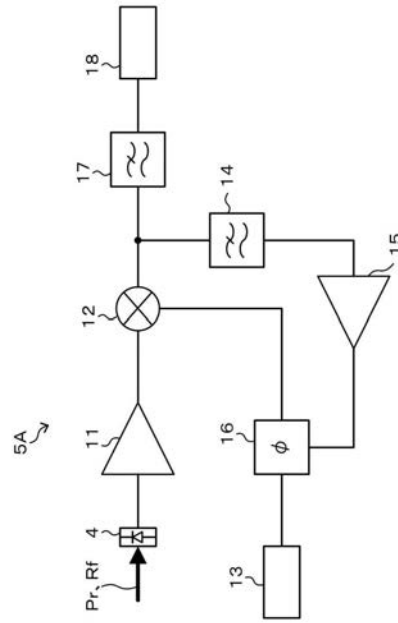
【 図 6 】



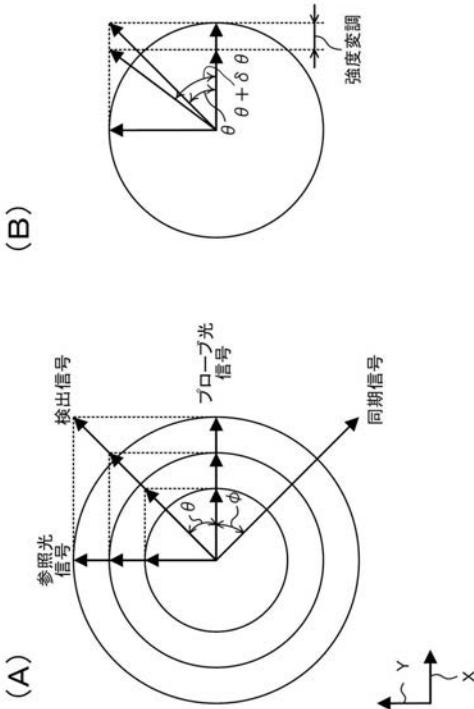
【図 7】



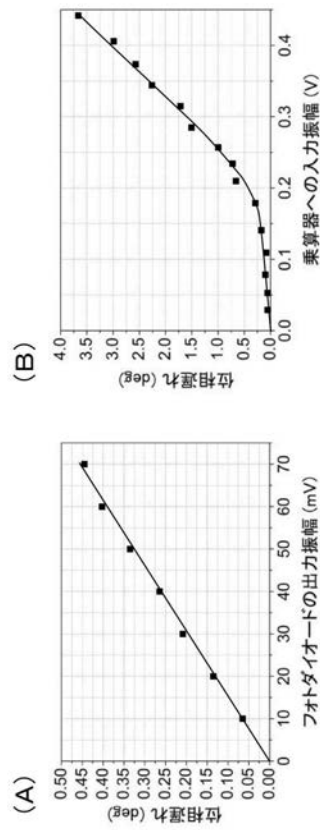
【図 8】



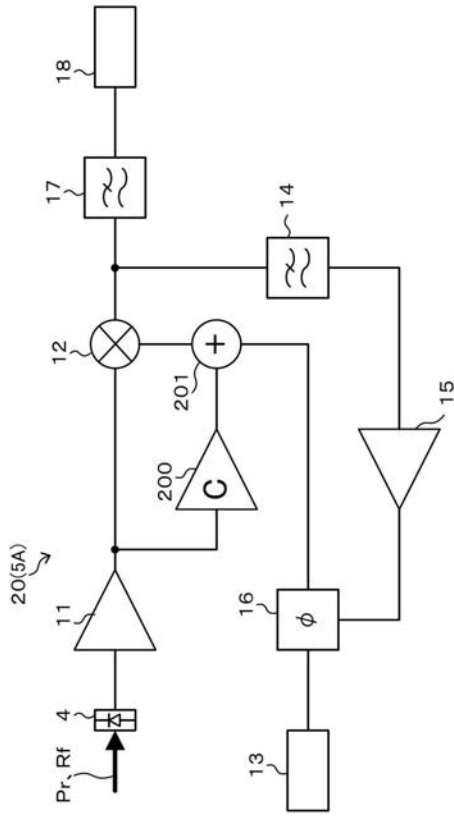
【図 9】



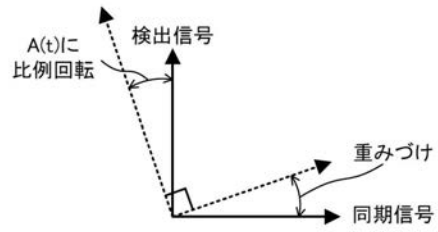
【図 10】



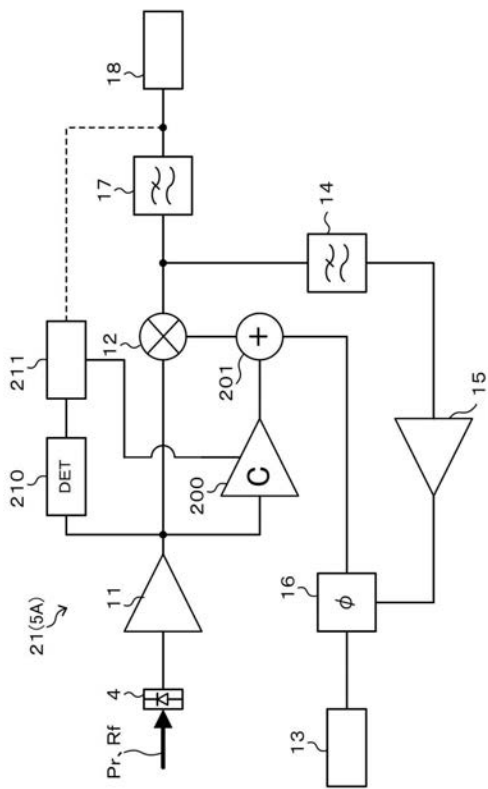
【図 1 1】



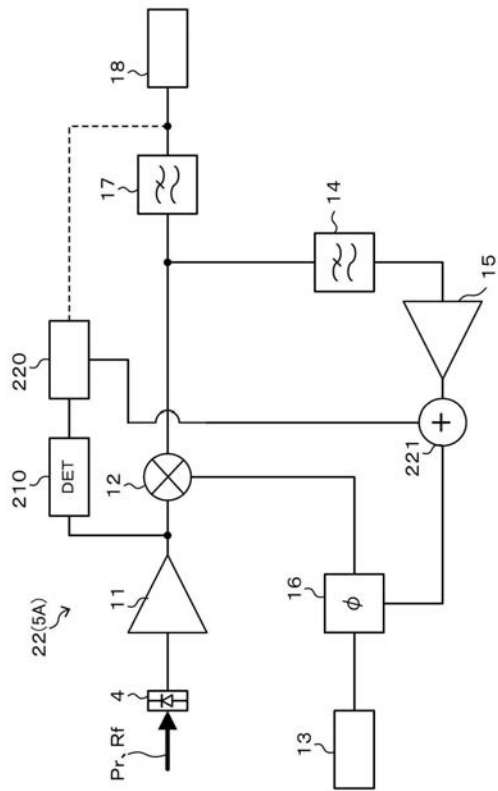
【図 1 2】



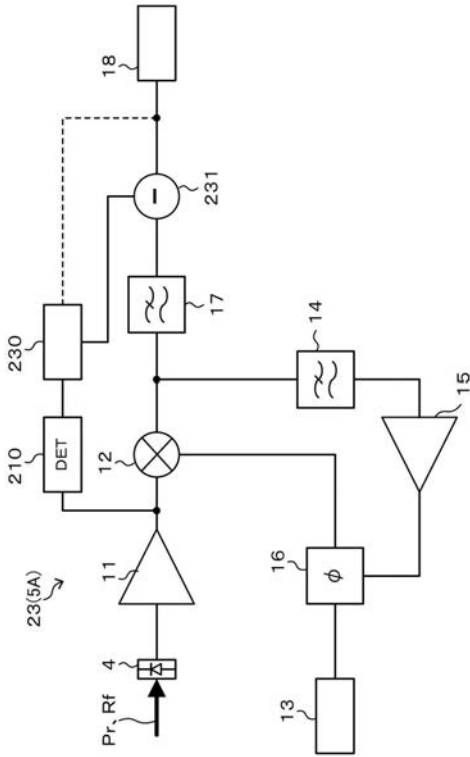
【図 1 3】



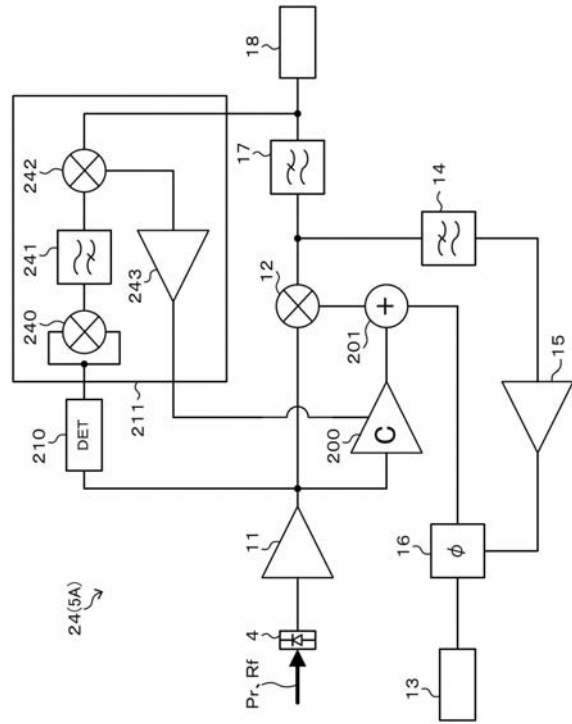
【図 1 4】



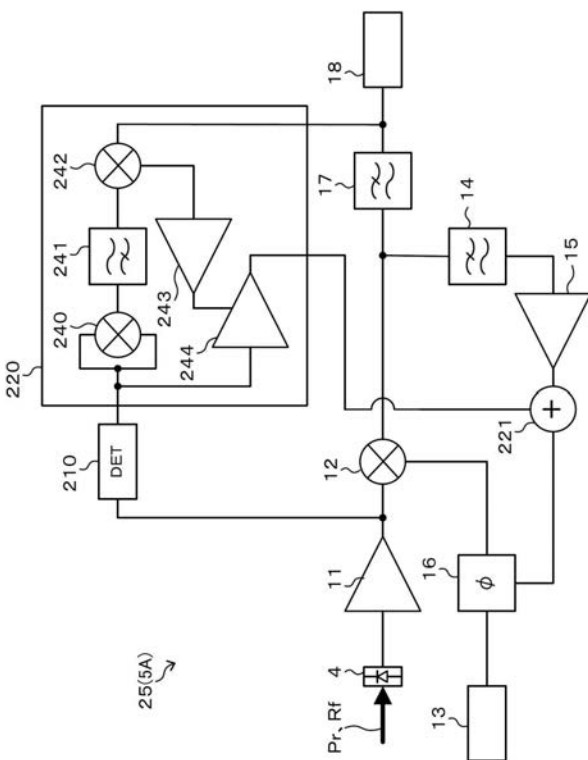
【図 15】



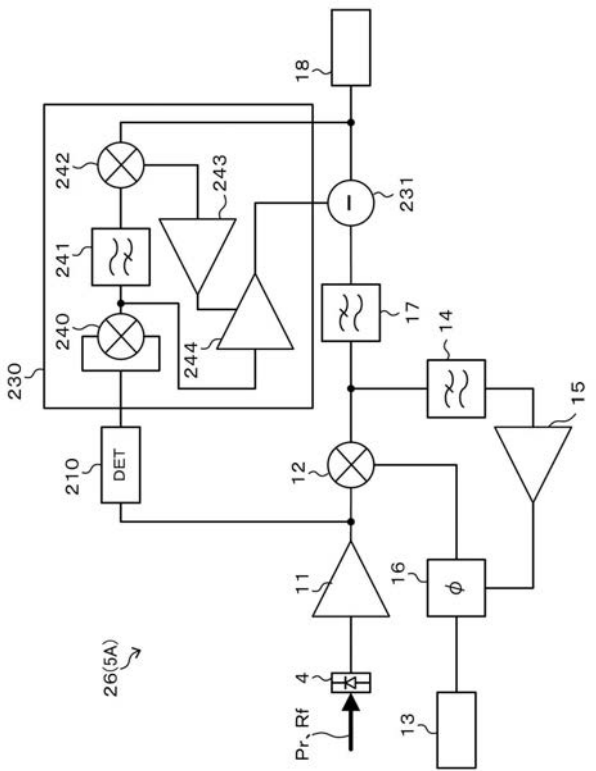
【図 16】



【図 17】



【図 18】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2G043 AA01 EA03 EA13 EA14 FA06 HA02 HA09 KA09 MA01 NA01
2G059 AA01 EE01 EE02 EE03 EE12 GG01 GG03 GG06 JJ13 JJ22
KK03 LL01 MM01 NN01