

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4819065号
(P4819065)

(45) 発行日 平成23年11月16日(2011.11.16)

(24) 登録日 平成23年9月9日(2011.9.9)

(51) Int.Cl.	F I
GO 1 B 11/06 (2006.01)	GO 1 B 11/06 Z
GO 1 N 21/27 (2006.01)	GO 1 N 21/27 H

請求項の数 34 (全 48 頁)

(21) 出願番号	特願2007-557085 (P2007-557085)	(73) 特許権者	505350178
(86) (22) 出願日	平成18年2月21日(2006.2.21)		ヴェリティー インストルメンツ、インコ
(65) 公表番号	特表2008-533447 (P2008-533447A)		ーポレイテッド
(43) 公表日	平成20年8月21日(2008.8.21)		アメリカ合衆国 テキサス州 75007
(86) 国際出願番号	PCT/US2006/005937		, キャロルトン, アイゼンハワー ストリ
(87) 国際公開番号	W02006/093709		ート 2901
(87) 国際公開日	平成18年9月8日(2006.9.8)	(74) 代理人	100074332
審査請求日	平成21年2月20日(2009.2.20)		弁理士 藤本 昇
(31) 優先権主張番号	11/066, 933	(74) 代理人	100114421
(32) 優先日	平成17年2月25日(2005.2.25)		弁理士 薬丸 誠一
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100114432
(31) 優先権主張番号	11/178, 856		弁理士 中谷 寛昭
(32) 優先日	平成17年7月10日(2005.7.10)	(74) 代理人	100117204
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 岩田 徳哉

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 膜厚モニタ用のヘテロダイン反射率計及びその実施方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板上に配置されるターゲット層の厚さを測定するためのヘテロダイン反射率計であって、

分割周波数の二重偏光ビームを発生する光学的な光源と、

分割周波数の二重偏光ビームを所定の入射角で基板上に配置される露出したターゲット層へ向かって伝播するためのビームパス迂回光学部品と、

分割周波数の二重偏光ビームを受け取り、参照電氣的ヘテロダインうなり信号を生成するための第1ヘテロダイン検出器と、

反射された分割周波数の二重偏光ビームをターゲット層から受け取り、測定電氣的ヘテロダインうなり信号を生成するための第2ヘテロダイン検出器と、

参照電氣的ヘテロダインうなり信号及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号を受け取り、前記参照及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号の間の位相シフトを検出するための位相検出器と、

位相シフトからターゲット層に関連する厚さを計算するためのデータプロセッサと、
を備えるヘテロダイン反射率計。

【請求項 2】

分割周波数の二重偏光ビームが、

第1の周波数で振動する第1の楕円偏光されたビーム成分と、

第2の周波数で振動する第2の楕円偏光されたビーム成分と、を備え、

10

20

第 1 の周波数が第 2 の周波数から固有である
請求項 1 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 3】

分割周波数の二重偏光ビームが、
第 1 の周波数で発振する第 1 の直線偏光されたビーム成分と、
第 2 の周波数で発振する第 2 の直線偏光されたビーム成分と、を備え、
第 1 の周波数が第 2 の周波数から固有である
請求項 1 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 4】

分割周波数の二重偏光ビームが、
第 1 の周波数で振動する s 偏光されたビーム成分と、
第 2 の周波数で振動する p 偏光されたビーム成分であって、s 偏光されたビーム成分に
直交する p 偏光されたビーム成分と、
を備える、請求項 1 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 5】

ターゲット層が膜である、請求項 1 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 6】

第 1 ヘテロダイン検出器は、
分割周波数の二重偏光ビームの第 1 の周波数の第 1 の偏光と第 2 の周波数の第 2 の偏光
とを光学的に混ぜ、かつ、参照光学うなり信号を生成する、第 1 の光学偏光ミキサーと、
第 1 の光学偏光ミキサーに接続され、参照光学的うなり信号を受け、参照電氣的ヘテロ
ダインうなり信号を生成する第 1 光学検出器と、をさらに含み、
第 2 ヘテロダイン検出器は、
分割周波数の二重偏光ビームの第 1 の周波数の反射された第 1 の偏光と第 2 周波数の反
射された第 2 の偏光とを光学的に混ぜ、かつ測定光学的うなり信号を生成する第 2 の光学
偏光ミキサーと、
第 2 の光学偏光ミキサーに接続され、測定光学的うなり信号を受け、測定電氣的ヘテロ
ダインうなり信号を生成する第 2 光学検出器と、をさらに含む、
請求項 1 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 7】

既知の厚さに対する実際の位相シフトと既知の厚さに対する予想される位相シフトとの
相違の比較に基づいて位相シフトを調整することによって補正された位相シフトを引き起
こすための、位相シフトのエラーを補正するための位相シフト補正器であって、データプ
ロセッサが補正された位相シフトを受け取り、補正された位相シフトから厚さを計算する
位相シフト補正器をさらに備える
請求項 1 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 8】

所定の入射角がターゲット層に関する屈折率と関連付けられる、請求項 1 に記載のヘテ
ロダイン反射率計。

【請求項 9】

所定の入射角が所定のデフォルト角度である、請求項 1 に記載のヘテロダイン反射率計。
。

【請求項 10】

所定の入射角がターゲット層のブルースター角に近い、請求項 1 に記載のヘテロダイ
ン反射率計。

【請求項 11】

所定の入射角の最下方は、ターゲット層と、分割周波数の二重偏光ビームに対して等方
的であるターゲット層の下界面とのいずれか一方に基づいて 0 ° である、請求項 1 に記
載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 12】

分割周波数の二重偏光ビームをターゲット層から受け取り、分割周波数の二重偏光ビームを膜へ伝播するための第2のパス迂回光学部品をさらに備える

請求項1に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項13】

位相検出器が、参照電氣的ヘテロダインうなり信号及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号を所定の形式に適合させるためのマッピング機能、及び信号を所定の形式に適合させるのに先立って参照電氣的ヘテロダインうなり信号及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号を標準化するための信号調整器をさらに備える

請求項1に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項14】

位相検出器が、

参照及び測定電氣的信号における2つの対応する参照時点間の時間を測定するための時間間隔カウンタと、

参照及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号の間の位相差に比例する出力電圧を作り出すための周波数ミキサーと、

参照及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号を初期の位相に設定するための位相シフト器と、

位相シフト器に出力電圧を供給するためのフィードバックループと

をさらに備える請求項1に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項15】

位相検出器が、

周波数信号を生み出すための発振器と、

参照電氣的ヘテロダインうなり信号及び周波数信号から第1のうなり信号を作り出すための第1の周波数ミキサーと、

測定電氣的ヘテロダインうなり信号及び周波数信号から第2のうなり信号を作り出すための第2の周波数ミキサーと、

第1及び第2のうなり信号における2つの対応する参照時点間の時間を測定するための時間間隔カウンタをさらに備える

請求項1に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項16】

位相検出器が、参照及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号の間の位相シフトを決定するための離散フーリエ変換(DFT)、及び

測定及び参照電氣的ヘテロダインうなり信号のヘテロダインうなり周波数に基づく所定の比率で、測定及び参照信号のそれぞれをサンプリングするための少なくとも1つのデジタルサイザをさらに備える

請求項1に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項17】

位相検出器が、参照及びヘテロダイン電氣的ヘテロダインうなり信号の間で位相シフトを決定するための相互相関関数と、

測定及び参照電氣的ヘテロダインうなり信号のヘテロダインうなり周波数に基づく所定の比率で、測定及び参照電氣的ヘテロダインうなり信号のそれぞれをサンプリングするため、及び、測定及び参照電氣的ヘテロダインうなり信号のうなりサイクルにおける多くのサンプルポイントに対する遅延を決定するための、少なくとも1つのデジタルサイザをさらに備える

請求項1に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項18】

分割周波数の二重偏光ビームであって、第1の周波数で振動する第1の偏光されたビーム成分と、第2の周波数で振動する第2の偏光されたビーム成分とを有し、第1の周波数が第2の周波数から固有である、前記分割周波数の二重偏光ビームを発生する光学的な光源と、

10

20

30

40

50

分割周波数の二重偏光ビームを所定の入射角で表面及び本体部を有しかつ基板上に配置されるターゲット層へ向かって伝播するためのビームパス迂回光学部品と、

分割周波数の二重偏光ビームを受け取り、参照電氣的ヘテロダインうなり信号を生成するための第 1 の検出器と、

ターゲット層から反射された分割周波数の二重偏光ビームであって、主に、ターゲット層の表面から反射された第 1 の偏光されたビーム成分及び第 2 の偏光されたビーム成分のいずれか一方と、主に、ターゲット層の表面の下からの反射された第 1 の偏光されたビーム成分及び第 2 の偏光されたビーム成分のいずれか他方とを含む前記反射された分割周波数の二重偏光ビームを受け取り、測定電氣的ヘテロダインうなり信号を生成するための第 2 検出器と、

10

参照電氣的ヘテロダインうなり信号及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号を受け取り、前記参照及び測定電氣的ヘテロダインうなり信号間の位相シフトであってターゲット層の本体の厚さによって誘発された前記位相シフトを検出する位相検出器と、

を備える基板上に配置されるターゲット層についての厚さパラメータを測定するためのヘテロダイン反射率計。

【請求項 19】

位相シフトから前記ターゲット層の本体の厚さの厚さ計算をするためのデータプロセッサをさらに備える

請求項 18 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 20】

20

第 1 の偏光成分が、第 1 の楕円偏光ビーム成分、第 1 の直線偏光ビーム成分、及び s 偏光ビーム成分のうちの 1 つであり、第 2 の偏光成分が、第 2 の楕円偏光ビーム成分、第 2 の直線偏光ビーム成分、及び p 偏光ビーム成分のうちの 1 つであり、p 偏光ビーム成分が s 偏光ビーム成分に直交する、請求項 18 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 21】

ターゲット層が膜である、請求項 18 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 22】

所定の入射角が 58 度から 62 度の間の所定のデフォルト角度である、請求項 18 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 23】

30

所定の入射角がターゲット層のブルースター角に近い、請求項 18 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 24】

所定の入射角の最下方は、ターゲット層材と、分割周波数の二重偏光ビームに対して等方的であるターゲット層の下の界面とのいずれか一方に基づいて 0°である、請求項 18 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 25】

分割周波数の二重偏光ビームの第 1 の周波数の第 1 の偏光と第 2 の周波数の第 2 の偏光とを混ぜるために、第 1 検出器に光学的に接続される第 1 の光学偏光ミキサーと、

反射された分割周波数の二重偏光ビームの第 1 の周波数の反射された第 1 の偏光と第 2 の周波数の反射された第 2 の偏光と、を光学的に混ぜるために、第 2 検出器に光学的に接続される第 2 の光学偏光ミキサーと、

40

位相シフトのエラーを補正するための位相シフト補正器であって、データプロセッサが補正された位相シフトを受け取り、補正された位相シフトから厚さを計算する位相シフト補正器と、をさらに含み、位相シフト補正器は、既知の厚さに対する実際の位相シフトと既知の厚さに対する予想される位相シフトとの差の比較に基づいて位相シフトを調整することによって、補正された位相シフトを引き起こす、請求項 18 に記載のヘテロダイン反射率計。

【請求項 26】

分割周波数の二重偏光ビームであって、第 1 の周波数で振動する第 1 の偏光されたビー

50

ム成分と、第2の周波数で振動する第2の偏光されたビーム成分とを有し、第1の周波数が第2の周波数から固有である、前記分割周波数の二重偏光ビームを発生させるために、表面及び本体部を備えかつ基板上に配置される露出したターゲット層の方に光源を所定の入射角で向けることと、

参照光学的うなり信号を生成するために、第1の周波数で振動する第1の偏光されたビーム成分と、第2の周波数で振動する第2の偏光されたビーム成分とをヘテロダインすることによって参照電氣的ヘテロダインうなり信号を生成すること及び参照光学的ヘテロダインうなり信号を参照電氣的ヘテロダインうなり信号に変換することと、

ターゲット層からの反射された分割周波数の二重偏光ビームを受け取ることと、

第1の周波数で振動する第1の反射された偏光されたビーム成分と、測定光学的うなり信号を生成するための、及び測定光学的ヘテロダインうなり信号を測定電氣的ヘテロダインうなり信号に変換する第2の周波数で振動する第2の反射された偏光ビーム成分とをヘテロダインすることによって測定信号を生成することと、

前記参照電氣的ヘテロダインうなり信号及び前記測定電氣的ヘテロダインうなり信号の間の位相シフトであって、前記ターゲット層の本体の厚さによって引き起こされる前記位相シフトを検出することと、

を含む基板上に配置される露出したターゲット層についての厚さパラメータを測定するための反射率の測定方法。

【請求項27】

位相シフトから前記ターゲット層の本体の厚さの厚さ計算することをさらに含む、
請求項26に記載の反射率の測定方法。

【請求項28】

第1の偏光成分が、第1の楕円偏光ビーム成分、第1の直線偏光ビーム成分、及びs偏光ビーム成分のうちの1つであり、第2の偏光成分が、第2の楕円偏光ビーム成分、第2の直線偏光ビーム成分、及びp偏光ビーム成分のうちの1つであり、p偏光ビーム成分がs偏光ビーム成分に直交する、請求項26に記載の反射率の測定方法。

【請求項29】

ターゲット層が膜である、請求項26に記載の反射率の測定方法。

【請求項30】

所定の入射角が、ターゲット層の屈折率に関連し、かつ、ターゲット層のブルースター角に基づくものである、請求項26に記載の反射率の測定方法。

【請求項31】

所定の入射角が、58度から62度の間の所定のデフォルト角度である、請求項26に記載の反射率の測定方法。

【請求項32】

所定の入射角の最下方は、ターゲット層の本体と、分割周波数の二重偏光ビームに対して等方的であるターゲット層の下の界面とのいずれか一方に基づいて0°である、請求項26に記載の反射率の測定方法。

【請求項33】

参照光学的うなり信号を生成するために、分割周波数の二重偏光ビームの第1の周波数の第1の偏光と第2の周波数の第2の偏光とを混ぜることと、

測定光学的うなり信号を生成するために、反射された分割周波数の二重偏光ビームの第1の周波数の反射された第1の偏光と第2の周波数の反射された第2の偏光とを混ぜることと、

位相シフトのエラーを補正すること、

補正された位相シフトからエラー補正厚さを計算することと、をさらに含み、

位相シフトのエラーを補正することは、既知の厚さに対する実際の位相シフトと既知の厚さに対する予想される位相シフトとの相違の比較に基づいて位相シフトを調整することによって、補正された位相シフトを引き起こすこと、

をさらに含む請求項26に記載の反射率の測定方法。

10

20

30

40

50

【請求項 3 4】

ターゲット層から分割周波数の二重偏光ビームをリダイレクトすること、及び分割周波数の二重偏光ビームを、所定の入射角で、基板上に配置された露出したターゲット層に向かって第 2 の経路内に伝播すること、

をさらに含む請求項 2 6 に記載の反射率の測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、反射率測定及び格子干渉測定に関する。

【背景技術】

10

【0002】

チップ、マイクロチップ、又は集積回路（IC）などの半導体は、無数の小さなトランジスタ、アルミニウム又は銅の導線、及び電氣的なスイッチから構成され、それらは電流を処理するものである。半導体ウェハは、ウェハ基板の上に様々なプロセスを実行すること、及び/又は、その後に基板の上に層を形成されることによって IC に変えられる。これらには、イメージング、堆積（デポジッション）、及びエッチングが含まれる。半導体産業において一般的に考えられる公理では、集積回路の中のトランジスタの密度は、18 ヶ月ごとに 2 倍になると見られている。従って、ずっと小さな半導体構造を製作するための新しい技術の実現は、この目標を満たすために必要である。チップ製作における極端に正確な公差に対する需要がますます高まることから、それに続く層の物理的特性は、大抵の応用例に対して申し分ない結果を達成することができるように、処理の間非常に慎重にコントロールされなければならない。層の深さ、及び/又は、厚さ又は層の積み重なりをモニタするための 1 つの方法は、干渉測定である。広く定義すると、干渉測定は、波（この場合には光波）の相互作用の測定に関する。

20

【0003】

干渉計は、同じ位相と一致する 2 つのコヒーレントな波は互いに強め合う一方、逆の位相を有する 2 つの波は互いに打ち消し合うという原理に基づいて動作する。

【0004】

ある従来のモニタシステムは、表面形状の変化を測定するために干渉測定を利用し、その特徴から高さ情報が推定され得る。ホンジ チャオ（Hong zhi Zhao）らは、「自動焦点を有する実用的なヘテロダイン表面干渉計」SPIE 議事録、第 4231 巻、2000 年、第 301 ページにおいて、参照ヘテロダイン信号と測定信号との間の位相差を検出する干渉計を開示する。これは、その全体を参照することによってここに含まれる。表面におけるシャープな照射ポイントに関する高さ情報は、測定結果から推定することができる。参照及び測定信号は、異なる経路上を伝播されるビームによって生成されるが、これは共通の経路の干渉計である。このアプローチは、入射及び反射ビームがターゲット位置へ共通の経路をとり、それは、検査される表面に垂直であるため、時には、共通の軸のアプローチ又は垂直な軸のアプローチと呼ばれることもある。

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0005】

従来技術において知られている共通の経路のヘテロダイン干渉計の 1 つの欠点は、高さ情報が参照信号の広い照射領域の平均高さから計算されることである。従って、結果の精度は、表面粗さに悪影響を受ける。従来技術の共通の軸の方法における他の限界は、それが膜層の実際の厚さパラメータを測定又は計算しないことである。

【0006】

他の試みとしては、光源を周波数調節することによって、膜厚のモニタにおけるヘテロダインを達成するものがある。“透明な素材の厚さを測定する方法”というタイトルが付されたチャン（Zhang）の米国特許第 5,657,124 号、及び、“周波数調整された光源を用いた透明な素材の厚さの測定方法及び機器”というタイトルが付されたチャ

50

ンらの米国特許第6,215,556号は、そのような機器を開示するものであり、それらの全体は参照することによってここに組み込まれる。これらの機器に関しては、調整された周波数を有する偏光した光ビームはターゲット表面に向けられ、ヘテロダイン干渉信号は2つの光線から検出され、一つ目はターゲットの表面からの反射であり、二つ目はターゲットの底面からの反射である。厚さは、ヘテロダインされた干渉信号を光源の直線的に調整された強度と比較することによって、変調期間当たりのうなりの数から決定される。この種の機器の原理の欠点は、ヘテロダインが光源の周波数調整によって達成されるので、測定できる最も薄い膜がその帯域幅によって制限されることである。

【0007】

他のヘテロダイン干渉計は、第1の周波数及び偏光における第1のビーム及び第2の周波数及び偏光の第2のビームという、2つの別個のビームからヘテロダインされた信号を取得するものである。“非触式の方法で同時に光学特性を干渉法で測定する方法及び装置”というタイトルが付されたハルナ等の米国特許第6,172,752号、及び、“ヘテロダイン厚さモニタシステム”というタイトルが付されたアイヤー(Aiyer)の米国特許第6,261,152号は、この種の干渉計を開示するものであり、それらの全体は参照することによってここに組み込まれる。

【0008】

図1は、ヘテロダイン厚さモニタ装置の図であり、化学機械研磨(CMP)装置に使用される従来技術において一般に知られているように、1対の分割周波数の直交に偏光されたビームは、混ぜられてヘテロダインされる前に別個の光学経路で伝達される。従って、ヘテロダイン厚さモニタシステム100は、大まかに、CMP装置、ウェハ110、及び測定光学アセンブリを備えている。ウェハ110は、基板112と膜114とを含む。

【0009】

測定光学アセンブリは、大まかに、反射されたビームの光周波数におけるドップラーシフトを検出し測定するための様々なコンポーネントを備え、これには、レーザー光源140、ビームスプリッタ(BS)144、偏光ビームスプリッタ(PBS)146、ビームの4分の1波長プレート148、ビーム反射体152、ビームの4分の1波長プレート150、ミックス偏光子143、光電検出器147、ミックス偏光子145、光電検出器149、及び、光電検出器147及び149の出力と電氣的に接続された信号処理アセンブリ154が含まれる。

【0010】

運転中、レーザーダイオード140は、第1の波長の第1の直線偏光成分102と、第1の偏光コンポーネントに直交に偏光する第2の波長の第2の直線偏光成分103とを有するビームを放射する。第1及び第2の偏光成分102及び103は、両方の成分の一部がビーム114及び115としてミックス偏光子145に向かって反射されるBS144に共線的に伝播し、次にビーム116及び117として信号I2が生成される検出器149に反射される。

【0011】

偏光成分102及び103の透過した一部は、ビーム104及び105としてPBS146に伝播される。PBS146において、成分104は、ビーム106として第1の透過経路を辿り、参照4分の1波長プレート148を通過して反射板152まで至り、4分の1波長板148を通過してビーム122(ビーム106に対して直交に偏光)として後方反射され、PBS146において、ミックス偏光子143に向かい且つビーム124として検出器147の方へ反射する。

【0012】

成分105からの第2の偏光成分は、ビーム106として第1のパスから分離した透過経路を辿り、第1の偏光成分104に対して直交に方向付けされ、従って、PBS146から反射し、ビーム109として4分の1波長プレート150を通過し、光学的に透明な回転可能なキャリア115に伝播する。ビーム109は、回転可能なキャリア115の後ろの表面、基板112との間の接触面及び膜114の上面において部分的な反射をし、従

10

20

30

40

50

って、それぞれ部分的に反射されたビーム 1 1 1 , 1 1 1 T , 1 1 1 B を生成する。反射されたビーム 1 0 9 S , 1 0 9 T , 1 0 9 B のそれぞれは、4 分の 1 波長プレート 1 5 0 を通って後方に伝播し、ビーム 1 1 3 S , 1 1 3 T , 1 1 3 B として P B S 1 4 6 を透過し、ビーム 1 2 4 , 1 1 5 S , 1 1 5 T , 1 1 5 B としてビーム 1 2 2 とともにミックス偏光子 1 4 5 へ共線的に伝播し、次に、信号 I 2 として光電検出器 1 4 7 において検出される。重要なことには、I 2 は、別の光の周波数で振動し、膜と相互作用するビーム 1 0 7 と、他の光の周波数で振動し、膜と相互作用しない第 2 の光学経路を伝播するビーム 1 0 6 の両方から生成される。信号 I 1 及び I 2 は、厚さ寸法を測定するために比較される。

【 0 0 1 3 】

測定ビームが光路長変化を受けると、うなり信号は、図 2 に描かれたシミュレーション結果に示されるように、対応する位相シフトを経験するであろう。そこでは、表面が研磨によって侵食される場合には、うなり信号 I 2 (プロット 1 0 3) の位相は、膜 1 1 4 の上面から部分的に反射されたビーム 1 1 1 T の光路長の変化が原因となって、うなり信号 I 1 (プロット 1 0 5) から シフトされて描かれる。

【 0 0 1 4 】

図に示すように、測定経路において、ビーム 1 1 1 B は、ウェハを透過し、ウェハの前の表面から反射される。ウェハを通して光のビーム経路が短縮されるため、ビーム 1 1 1 B の反射された光の周波数は、ドップラーシフトを受ける。従って、1 つの光の周波数 (ビーム 1 1 1 , 1 1 1 B 及び 1 1 1 T) は、ターゲットと相互作用する一方、第 2 の光の周波数 (ビーム 1 2 2) は相互作用しない。しかし、そのような方法で参照ビームと測定ビームとを分離することは、ヘテロダイン干渉計の S / N 比を低下させ、測定感度を下げてしまうという不利な点を有する。

【 0 0 1 5 】

一般に、従来技術において知られているヘテロダイン干渉計の分解能は、約 6 に制限され、従って、従来技術に係るヘテロダイン干渉計は、薄膜を正確に測定するのに必要な、又は、処理の間における厚さの小さな変更をモニタするのに必要な分解能を欠く。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 6 】

本発明は、非常に正確な位相シフト情報をヘテロダインされた光学的信号から得るためのヘテロダイン反射率計システム及び方法を対象とし、それから正確な厚さを計算することができる。ヘテロダイン反射率計は、大まかに、分割光学的周波数を有する光学的光源と、光学的うなり信号を生成する一対の光学式のみキサート、光学的うなり信号を検出して電氣的ヘテロダインうなり信号に変換するための一対の光検知器と、2 つの電氣的信号間の位相シフトを検出するための位相シフト検出器とを備える。

【 0 0 1 7 】

光源は、それぞれの分離した光周波数、即ち、それぞれ 及び + の分割周波数の p 偏光及び s 偏光されたビーム成分を有し、互いに直交する直線偏光した 2 つの成分を含む直線偏光光線を発生させる。2 つの周波数を有する直線偏光ビームは、膜の方に向けられて、それと相互作用し、その結果、その成分の膜の中の光路の増加によって、一方の光学的な偏光成分が他方に遅れることとなる。ミックス偏光子は、反射された偏光成分を混ぜる。1 つの検出器が膜層から反射されたビームを受け取り、測定信号を発生する。第 2 検出器は、膜層の上の入射に先立ってビームを受け取り、参照信号を生成する。反射されたビーム成分は、膜との相互作用のため、参照信号に対して位相シフトを有する。

【 0 0 1 8 】

反射されたビームは、システムの入射角を膜のブルースター角の近傍に設定することによって、膜厚測定のために最適化され、それは、光源波長においてその屈折率によってコントロールされる。参照信号及び測定信号の間の最も大きな位相シフトは、ビームの入射がブルースター角に設定される場合に存在する。測定信号及び参照信号は、位相シフトのために、位相検出器によって分析される。両者間の位相シフトの量は、膜の厚さと関連し

10

20

30

40

50

ている。検出された位相シフトは、膜厚の結果のために、厚さ計算機に供給される。一般に、厚さ結果は、より低い厚さほどより正確であり、より高い厚さほどより正確でない。

【 0 0 1 9 】

厚さ結果の精度は、測定信号の中でエラーをキャンセルすることによって大幅に増大され、即ち、測定されたヘテロダイン位相シフトは、予想される位相シフトとは異なり、従って、エラーを含んでいる。エラー補正アルゴリズムは、既知の共通の屈折率及び既知の膜厚を有するテスト膜に対して、ヘテロダイン位相シフトを測定することによって構築される。キャリブレーション膜に対する測定された位相シフトは、同等の厚さのために導かれる予想された位相シフトと比較され、それから測定され予想された位相シフトから定式化される。測定されたヘテロダイン位相シフトは、エラー補正を用いて補正することができる。

10

【 0 0 2 0 】

この本発明は、また、組み合わせのヘテロダイン反射率計及び格子干渉計システムと、補正されたヘテロダイン位相シフト情報及び補正された格子位相シフト情報を同時に得るための方法とをも対象とし、それから、非常に正確な厚さが計算され、膜の屈折率が厚さ計算において動的にアップデートされる。これは、上述されたヘテロダイン反射率計システムに格子干渉計を含めることによって実現され得る。

【 0 0 2 1 】

ピッチ “ p ” を有する格子は、 0 次及び 1 次のバンドに反射されたビームを回折させ、それは、別々の検出器によって検出される。検出器は、 0 次ビームを受け取り、他の測定信号を生成する。もう一方の検出器は、 1 次のビームを受け取り、格子信号を生成する。上記のように、格子からの測定信号及び参照信号は、位相シフトのために位相検出器によって分析され、それは、膜の正確な屈折率とともに、膜の厚さと関連付けられる。逆に、どちらの測定信号も、格子誘発位相シフトを検出するために、格子信号とともに、位相検出器によって分析され得る。膜の屈折率は、膜の上のビームの波長、格子ピッチ、及び入射角のために、格子位相シフト及びヘテロダイン位相シフトから直接計算される。屈折率及びヘテロダイン位相シフトとともに、膜の厚さは、波長、ピッチ、及び入射角のために決定される。逆に、膜の厚さは、屈折率とは無関係に、且つ屈折率を知ることなく、波長、ピッチ、入射角のため、格子位相シフトとヘテロダイン位相シフトから直接計算することができる。しかし、格子信号も補正されるべきエラーを含んでいる。格子エラー補正アルゴリズムは、厚さ又は屈折率のための予想される格子位相シフトに対して、測定された格子位相シフトを補正するために構築される。既知の厚さを有するテスト膜の格子位相シフトを測定し、厚さに関するそれらの測定結果を予想される格子位相シフトと比較することにより、格子位相シフトエラー補正は、測定及び予想位相シフト間で定式化することができる。測定された格子位相シフトは、補正することができる。

20

30

【 0 0 2 2 】

アップデートされた屈折率は、補正されたヘテロダイン位相シフトと補正された格子位相シフトとから導くことができ、それは、ほぼリアルタイムで厚さ補正を動的にアップデートするために用いられる。従って、膜の屈折率が処理の間にドリフトする状況においてさえ、超薄膜の正確な膜厚の結果を入手することができる。

40

【 0 0 2 3 】

さらに、本発明は、入射角の膜の表面に戻るように第 1 のパスから反射されたビームをリダイレクトすることによって、複光路方式モードにおいて動作することができる。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 4 】

本発明に特有であると思われる斬新な特徴は、添付された特許請求の範囲に記述される。ただし、本発明自体だけでなく、好ましい使用態様、さらにその目的及び利点は、図示の具体例の以下の詳細な説明を図面と併せて読むと理解することができる。

【 0 0 2 5 】

本発明の他の特徴は、添付図面から、そして以下の詳細な説明から明白になるであろう

50

。

【 0 0 2 6 】

この本発明は、半導体製造の一部である超薄膜の堆積をモニタするのに有用である。それゆえ、デポジション手段や拡散炉と一体化され得る。さらに、本発明は、サブ 10 から 2000 の膜厚の範囲で薄膜を測定する、可視光線反射率測定の使用を拡張するための、単純且つ効果的な方法を提供する。本発明を用いることにより、大きな平均故障間隔 (MTBF) 及び非常に簡単な検出スキームを備えた単色の光源を用いて、優れた結果を得ることが可能である。一般に、この厚さ領域への従来技術に係るスペクトル反射率計の拡張は、複雑な遠紫外線 (DUV) 光源及び反射性又は反射屈折光学を必要とする。また、従来技術に係る反射率計と対比すると、本発明は、数オングストロームの厚さの上層膜の厚さを決定するのに、下の層に関する事前の知識を必要としない。さらに、この発明に基づくセンサーの所有コストは、典型的な従来技術の DUV スペクトル反射率計のそれよりもはるかに低く、また、本発明の方法は、必要となる測定前処理がより少ないものである。本発明の応用及び以下で開示される技術により、表面形状又は広い領域の測定によって誤差が引き起こされることなく、超薄膜上の領域又は点のターゲットの厚さをプロセッサが正確にモニタすることが可能となる。

10

【 0 0 2 7 】

マイケルソンのヘテロダイン干渉計において、干渉参照ビームと測定ビームとは僅かな光の周波数差 (一般に ~ MHz から KHz) を有する。両者間の干渉は、次の方程式によって表される：

20

$$I = A + B \cos(\Delta\omega t + \phi) \quad (1)$$

A は、直流成分

B は、縞の可視性を表す信号成分

は、参照ビームと測定ビームとの間の位相差

は、2つの信号の角周波数差

両者間の干渉は、角周波数の差 と等しい角周波数を有するうなり信号として観察することができる。

【 0 0 2 8 】

測定ビームが光路長変化 (d) を受ける場合、うなり信号は、図 2 に示されたシミュレーションされた結果に例示されるように、対応する位相シフト $\phi = (4 \times d) / \lambda$ をするであろう。そこで、測定うなり信号 103 の位相は、測定ビームの光路長の変化が原因となって参照うなり信号 105 から シフトされて描かれる。

30

【 0 0 2 9 】

以下に提示された発明は、従来技術の欠点に対応して、薄膜測定に対する単純なヘテロダイン反射率測定のアプローチを提供する。このアプローチによって提供される検出感度は、オングストロームのタイプの膜厚の寸法を正確に測定することができるほどである。さらに、単純な正弦波が使用されるので、位相シフトの測定をリアルタイムで実現することができる。本発明のこれら及び他の特徴は、図 3 A に示される超薄膜の厚さを測定するためのヘテロダイン反射率計の説明によってより完全に理解されるであろう。

40

【 0 0 3 0 】

図 3 A は、本発明の典型的な具体例に従う、薄膜の厚さを測定するためのヘテロダイン反射率計の図である。本発明のある側面を説明するのに必要であるので、領域 301 は、図 3 B におけるビームと膜 (フィルム) との相互作用の拡大図として議論されるであろう。ヘテロダイン反射率計 300 は、一般に、膜 314 及び基板 312 に入射角 θ で入射する方向を持った入射ビーム 303 のための光学を備える。

【 0 0 3 1 】

ビーム 303 は、それぞれの分離した光周波数、即ち、それぞれ ω_1 及び ω_2 の分割周波数の p 偏光及び s 偏光されたビーム成分を有し、互いに直交する直線偏光した 2 つの成分を含む。ここに用いられるように、 ω_1 は約 20 MHz であるが、単なる典型的なも

50

のに過ぎず、本発明の範囲を逸脱することなく他の周波数分離が用いられ得る。このビームを発生させるための光源 320 は、例えばゼーマン分割ヘリウム ネオンレーザーであり得る。或いは、単一モードレーザー光源からのビームは、例えば音響光学変調器を用い、一方又は両方の別個のビームが所定周波数に周波数シフトした 2 つの別個のビームに分割することができる。分割周波数のビームは、その後、膜 314 への入射の前に再結合することができる。光ビームは、当該光ビームの経路の向きを変えるために、任意の適当な光学部品を用い、入射面の中に、そして膜 314 の方へ方向付けされる。図面に描かれるように、1 対の三角形のプリズム（入射プリズム 332 及び反射プリズム 334）は、膜 314 に入射する入射ビーム 303 を方向付けし、膜 314 から反射されたビーム 305 を受け入れるが、任意的に、ビームの偏光を保持する間、光路を方向付けするための任意の適当な光学部品でもあり得る。例えば、光源 320 は、鏡又は他の反射光学部品を用い、入射面（垂線から入射角）内に方向付けされるか、或いは、所定の入射角でビームを発射するために配置される偏波面保存ファイバに繋がられ得る。

【0032】

ただし、従来技術と著しく対照的に、両方の光周波数の経路が単一の経路に沿って膜と相互作用する、即ち、測定ビームの s 偏光成分及び p 偏光成分が実質的に同一直線上にあるビームであり、大よそ同軸であることに注目しなければならない。さらに、s 偏光及び p 偏光の成分から膜 314 上の照射領域は、ターゲット位置で大よそ同一の広がりを持つ。

【0033】

本発明のヘテロダイン反射率計の主要な特徴は、測定された位相シフト ϕ_m から実際の位相シフト ϕ_{ref} を決定することである。測定された位相シフト ϕ_m は、参照信号 I_{ref} の位相と測定信号 I_{het} の位相との位相差、即ち、反射されなかった経路（参照信号）から得られた信号と反射された経路から得られたうなり信号とのうなりである。真の（又は実際の）位相シフト ϕ_f は、膜層の誤差がない正確な厚さ d_f を決定するのに必要である。従って、測定された位相シフト ϕ_m を求めることは、2 つの信号検出器を使用するのを必要としており、一つ目は参照信号 I_{ref} の検出 / 生成用であり、二つ目は測定信号 I_{het} の検出 / 生成用である。

【0034】

信号検出器 340 は、ミックス偏光子 354 からの分離したビーム（参照ビーム）304 を感知するものであり、ミックス偏光子 354 は、ビーム 304 の s 及び p 偏光成分を膜 314 から反射する前に混ぜ、ビーム 304 の位相 ϕ_m を示す参照信号 I_{ref} 342 を生成する。検出器 340 は、例えば PIN（正 真性 負）検出器、又は、うなり周波数に反応する任意の光検出器であり得る。それは、 $|\phi_m - \phi_{ref}|$ のうなり周波数を持つ参照信号 I_{ref} を発生する。参照信号 I_{ref} 342 は、 ϕ_m が測定された位相シフト検出器 362 に送信され、そこで、膜 314 によって引き起こされた測定された位相シフト ϕ_m を決定するために参照位相として用いられる。

【0035】

一方、信号検出器 350 は、膜 314 と相互作用した後にプリズム 334 から伝播した、ビーム 305 の s 及び p 偏光成分を混ぜるミックス偏光子 355 からの反射ビーム 356 を感知する。信号検出器 350 は、測定信号 I_{het} 352 を生成し、それは、ビーム 356 の位相 ϕ_{het} を示し、参照信号 I_{ref} の位相から ϕ_m 位相シフトしている。検出器 350 は、例として、PIN 検出器であり得る。それは、反射光ビーム 356 をモニタし、ヘテロダイン測定信号 I_{het} を発生し、 ϕ_m のヘテロダイン角周波数をも伴う。測定信号 I_{het} 及び参照信号 I_{ref} は、ヘテロダイン位相シフト $\phi_m (= \phi_{het} - \phi_{ref})$ とともに、図 18 においてそれぞれ信号プロット 1802, 1804 としてグラフを用いて描かれる。

【0036】

信号 352 は、測定されたヘテロダイン測定信号 I_{het} 352 を参照信号 I_{ref} 342 と比較して測定された位相シフト ϕ_m を決定する ϕ_m 測定位相シフト検出器 362 におい

10

20

30

40

50

て受信される。位相シフト ϕ_m は、膜 314 によって引き起こされ、位相シフトの量は、種々の要因に依る。それには、膜 314 の厚さ、モニタされる特定の膜に対する、及びより高い位相シフトにおける屈折率 n_f 、補正係数が含まれる。ファクター間の相互関係は、以下で、より大きな特異性において議論されるであろう。どのような場合であっても、正確な膜厚 d_f は、プロセッサ 360 によって補正された位相シフト から決定することができ、それは測定された位相シフト ϕ_m から得られる。しかし、測定された位相シフト ϕ_m は少なくともより高い位相シフトにおいて、固有誤差を有するので、測定された位相シフトが補正されることによってのみ、正確な厚さ寸法が可能である。

【0037】

ここで、データ処理システム 360 が個々の用途によって様々な形式を取り得ることは理解されるべきである。インラインウェハ処理からのデータは、反射率計検出器 340 及び 350 又は ϕ_m 測定位相シフト検出器 362 に電氣的に繋がられるコンピュータ又は PC においてリアルタイムで処理されることが多い。ただし、他の典型的な具体例に従って、反射率計システムは、リアルタイムでモニタされたデータを格納及び処理するために内部のデータプロセッサ及び / 又は個別のファームウェアコンポーネントによって事前設定され得る。まだ他の典型的な具体例に従って、反射率計からの生の測定データは、ウェハプロセス機器内のデータ処理システムによって処理される。その場合、ウェハ処理ファームウェアは、厚さ計算を含め、反射率計の全てのデータ処理を実行する。従って、ヘテロダイン反射率計システム 300 は、一般的なデータ処理システム 360 によって描かれ、それは、個別のファームウェア及びハードウェアコンポーネントを含み得る。これらのコンポーネントは、一般に、測定位相シフト補正器 366 及び厚さ計算機 368 を含む。任意的に、システム 360 は、エラー訂正データメモリー 364 を含み得るものであり、その操作は、以下で議論されるであろう。

【0038】

より具体的には、 ϕ_m 位相シフト検出器 362 は、各検出器から参照信号 I_{ref} 342 及びヘテロダイン測定信号 I_{het} 352 を受信し、両者間の位相シフト ϕ_m を測定する。位相シフト検出器 362 は、位相検出のために参照信号 I_{ref} 及び測定信号 I_{het} の対応点を検出すべく、任意の適当な機構を用いることができる。ただし、これらの改良は、図 25 及び 26A ~ 26D に関して別々に議論される。

【0039】

図には示されないが、位相シフト検出器 362 は、波長を入力するための入出力インタフェース、及び / 又は信号検出を容易にするための発振器周波数情報をも装備することができる。

【0040】

測定位相シフト ϕ_m が検出されると、エラー訂正のために ϕ_m 位相シフト補正器 366 に渡される。測定位相シフト ϕ_m のエラーは、より高い位相シフトにおいてかなりであり得るが、エラーは、適切な補正係数の組を多項式関数を ϕ_m に適用することによって訂正することができる。図 7 図 10 に対応する以下の議論から明白になるように、補正係数は、個別の膜の屈折率に対して得られる。さらに、エラー訂正計算を実行するために、 ϕ_m 訂正器 366 は、ある種のパラメータデータを必要とする。これらのデータには、光源の波長、トップ (一番上) の膜層の屈折率 n_f 、及び入射角が含まれる。は、通常はデフォルトの $\theta = 60$ に設定され、光源波長及び膜の屈折率 n_f に対するブルースター角ちょうどではない。その理由は、以下で議論されるであろう。

【0041】

最終的に、 d_f 厚さ計算機 368 は、 ϕ_m 補正器 366 から補正された位相シフトを受け取り、調査されている膜、即ち膜 314 に対する補正された膜厚 d_f を計算する。

【0042】

或いは、 d_f 厚さ計算機 368 は、直接 ϕ_m 位相シフト検出器 362 から測定された位相シフト ϕ_m を受け取り、メモリー 364 から取り出す膜厚補正データによって代数的に測定された厚さを補正し得る。厚さエラー補正データ又は検索テーブル (LUT) は、

膜 3 1 4 に対する屈折率 n_f に基づいたメモリー 3 6 4 に予めロードされる。

【 0 0 4 3 】

さらに別の選択肢は、個々の測定位相シフト値に対してインデックスが付けられた補正された厚さ値 d_f のテーブルをメモリー 3 6 4 に記憶することである。その場合、位相シフト検出器 3 6 2 から θ_m を受け取ると、 d_f 厚さ計算機 3 6 8 は、メモリー 3 6 4 から補正された厚さ値を取り出し、値を出力する。

【 0 0 4 4 】

今回の方法は、膜の上面からの放射の異方性反射によるものである。従って、ヘテロダイン反射率計の設定は、好ましくは、ブルースター角の近傍の入射角で設定される。直下に示されるように、膜に対する位相シフトの最大の感度は、検査中の個々の膜の屈折率に対するブルースター角において達成される。ブルースター角において、膜の上面からの反射した p 偏光した光の量は、ゼロ又は最小である。従って、検出器 3 5 0 からの信号 $I_{het\ 3\ 5\ 2}$ は、膜厚の情報に富むものである。

【 0 0 4 5 】

ただし、実用的な問題として、モニタシステム中の光学部品は、個々の処理装置と協力するために半恒久的に設定され得る（例えば、予め設定された入射角 60° ）。そのようなシステムにおいて、精密な角度に入射を調整することは困難又は不可能であり得る。とはいえ、以下の議論において示されるように、ここで説明される発明の 1 つの利点は、厚さ測定が個々の膜の屈折率に対するブルースター角の周辺の広い角度範囲に亘って非常に正確なことである。

【 0 0 4 6 】

さらに、膜表面からの異方性の反射に加えて、反射の異方性は、膜自体及び底の膜表面又は基板にも存在し得る。膜素材及び下の界面は s 及び p 偏光のために等方性であるものとされている。ただし、この仮定は、常に全ての膜のタイプに合うものではなく、J. Vac. Sci. Technol. A 12 (4) 1994 年 7 月 / 8 月の第 1152 ページに掲載されたディー・ヤスダらの "特異な微斜面の Si-SiO₂ 界面及び水素終端 Si 表面の光学的異方性" や、J. Vac. Sci. Technol. B 3 (5) 1985 年 9 月 / 10 月の第 1498 ページに掲載されたディー・イー・アスプネスの "三次元半導体の上方バンドギャップ光学的異方性：表面の可視近紫外線プローブ" を参照されたい。従って、トップの膜及び / 又は基板が顕著な反射率異方性を示す状況においては、最適化された入射角は、直角入射とブルースター入射角との間にあり得る。

【 0 0 4 7 】

より具体的には、膜の次のような領域： a) トップ表面、b) 膜の中間、及び / 又は、c) 底表面の全てにおいて、反射 / 吸収の異方性が存在し得る。膜の上面において、本質的に、他の偏光の上のブルースター角における一方の偏光の優先的な反射による、上で議論した理由及び論理的根拠によって、フレネル反射が原因となって測定信号の中に位相シフトが引き起こされ得る。一般に、それは殆どの膜にそのまま当てはまり、ノイズに対して大きな信号を与える。しかし、膜表面の上のスクラッチは、反射の異方性に寄与し得、従って、この位相シフトを高める。膜の中間は、特に強磁性の薄膜に関しては、例えばディスクメモリ機器と強誘電性の薄膜、例えば CMOS 中のキャパシタについて位相シフトをも引き起こし得る。膜の底の表面（即ち、膜と基板との間の界面）において、結晶方位、又は、強磁性の薄膜に加えて着色結晶格子構造によって位相シフトが引き起こされ得る。

【 0 0 4 8 】

例として、SiO₂ / Si 膜の下の界面は、直角入射における s 及び p 偏光の反射のために異方性であると分かっている。SiO₂ の上面と及び量のバルクメディアが直角入射において等方性であると仮定すると、膜厚に基づいて、測定信号の中に位相シフトが引き起こされ得る。ただし、この場合、シフトは、膜面ではなく、下の界面からの異方性の反射によって引き起こされる。しかし、ここで、ビームは、 60° のデフォルト角度ではなく、表面に対して垂直に方向付けされ得る。今回説明された方法は、反射と同様に吸収に

も当てはまり、さらに、半導体ウェハの表面などの表面を横切る膜厚のマップを作成するためにウェハを走査するのにも適用可能である。

【 0 0 4 9 】

膜面からの異方性の反射についてより一般的なケースに戻り、設定システム 3 0 0 のヘテロダイン反射率計の設定入射角 θ_i は、検査中の膜の屈折率 n_f 及び照射光源の波長 λ と関係し、また、それらとともに変化し得るということが、以下の議論から理解されるであろう。異なる膜は異なる屈折率を有するので、角度 θ_i は、インデックスの変化と対応して、調整され得る。必要であれば、ヘテロダイン反射率計システム 3 0 0 の入射角度を調整するために、調査される様々な膜の屈折率に基づく様々な手段が提供される。これは、テーブルシステム 3 1 0 及び / 又はプリズム 3 3 2 , 3 3 4 が動くことを可能とすることによって実現され得る。例えば、ミラー 3 3 2 , 3 3 4 は、2 度の動きを有して設定され、一つは、ビーム 3 0 3 , 3 0 5 によって形成される入射の面に垂直、且つ、膜 3 1 4 の垂線である軸周りの回転方向にあり、表面法線に平行な並進動作の方向である。或いは、ミラー 3 3 2 , 3 3 4 は、入射面と直角な方向周りに 1 度の回転運動を有し得るものであり、テーブルアセンブリ 3 1 0 は、垂直な方向に 1 度の並進動作を有するであろう。後者の典型的な具体例は、動作を表す仮想線によって示されたミラー 3 3 2 , 3 3 4 と、テーブルアセンブリ 3 1 0 (ここでは、テーブル 3 1 5、膜 3 1 4、及び基板 3 1 2 として描かれる) とでここに描き出される。仮想の要素は、屈折率 n_f の値の変化に応じて、異なる入射角 θ_i に角度を変えられた入射ビーム 3 0 3 及び受信用の反射ビーム 3 0 5 を示す。ただし、以上や以下で強調されるように、デフォルト入射角 $\theta_i = 60^\circ$ を用いることは、膜及び光源に対するブルースター角で入射角を正確に設定する上で好都合である。

【 0 0 5 0 】

次に図 3 B を見ると、膜 3 1 4 に起因する位相シフト ϕ の源が描き出される。s 偏光成分は、明確さのために p 偏光成分と分離されるものとして描き出される。入射ビーム 3 0 3 は、s 偏光成分 3 0 3 s (光の角周波数 ω を有する) と p 偏光成分 3 0 3 p (光の角周波数 $\omega + \Delta\omega$ を有する) とを含み、それらは互いに直交する。成分 3 0 3 s 及び成分 3 0 3 p の両方は、膜 3 1 4 の垂線に対して角度 θ_i で入射する。膜 3 1 4 の表面において、ビーム成分 3 0 3 s の一部は、反射光線 3 0 5 - 1 s (以下で

$$r_{1s}(\omega)$$

として参照される) として反射される一方、ビーム成分 3 0 3 s の他部は、屈折角 θ_t で膜 3 1 4 の中へ屈折し、その後、基板 3 1 2 から反射し、膜 3 1 4 の外へ屈折光線 3 0 5 - 2 s (以下で

$$\tilde{r}_{2s}(\omega)$$

として参照される) として屈折する。

同様に、ビーム成分 3 0 3 p は、反射光線 3 0 5 - 1 p (以下で

$$r_{1p}(\omega + \Delta\omega)$$

として参照される) と屈折光線 3 0 5 - 2 p (以下で

$$\tilde{r}_{2p}(\omega + \Delta\omega)$$

として参照される) とに分割される。

【 0 0 5 1 】

膜厚の正確な計算の基本は、膜との光の相互作用を膜厚に対してより敏感になるように最適化することであり、それは、ヘテロダイン位相シフト ϕ_m を高める。その目的は、参照信号からヘテロダイン信号の位相シフトをできるだけ増大させること、即ち、 ϕ_m を増大させることである。本発明では、これは、等方性の膜及び基板に対する入射角を最適化することによってなされる。反射されたビームが反射され屈折する s 及び p 成分光線

から構成されるので、一方の偏光成分が他方に比べて膜面からの反射光線の大きな部分を有するのが好都合である。分割周波数を有する s 及び p 偏光された光が測定に用いられるので、この結果を達成するために入射角度 α を調整することが可能である。技術的によく理解されているように、直線偏光は、光源波長の入射角をブルースター角に設定することによってこの結果を表すであろう。ブルースター角では、事実上、入射ビーム 303 p の p 偏光成分全体は、305 - 2 p として膜の中にごく僅かしか屈折されず、もしあったとしても光線として 305 - 1 p として反射される。逆に、ブルースター角において操作すると、入射ビーム 303 s の s 偏光成分は、屈折光線 305 - 2 s として膜を貫く残りの部分とともに、光線 305 - 1 s として顕著な反射が見込まれる。従って、角度 α は、1 つの偏光成分のより多くが反射されるのではなく膜の中で殆ど全て屈折するように調整され得る。従って、光線が混ぜられた後に、結果として生じるビームは、膜の表面から反射された s 偏光成分の不釣り合いな寄与によって、位相シフトのために高感度化される。従って、屈折した成分が次式で示される増大した経路距離を移動するのに必要な時間に位相シフトが由来することを理解することができる。

$$\Delta d = 2d_f \sqrt{n_f^2 - \sin^2 \alpha}$$

【0052】

等方性の膜及び基板に対して、好ましくは、ビーム 303 の偏光成分は、直線的且つ互いに直交し、明細書全体に亘ってそのように見なされる。ただし、多少減少するが、楕円偏光した成分も、同様な厚さ誘因位相シフトを生じさせるであろう。従って、本発明の他の典型的な具体例に従って、ビーム 303 の分割周波数は、楕円偏光する。

【0053】

本発明の側面によると、偏光された信号をヘテロダインすることの軸外照明アプローチを用いて、非常に敏感な厚さの測定が実現される。反射角がブルースター角の近傍である場合、本発明のこの側面は、膜の上面からの電磁放射の異方性反射に依存する。従来技術の共通又は垂直軸のアプローチにこの方法を利用することの理由は、直下で取り込まれるであろうが、基板が直角入射で顕著な反射率異方性を表す場合には、入射角が直角入射であり得ることが確認されるはずである。

【0054】

単一の積層膜に対する s 偏光反射率は、次式で書くことができる：

$$r_s = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}} \quad (2)$$

$$r_p = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} \quad (3)$$

【0055】

同様に、p 偏光反射率は、次式で与えられる：

$$r_p = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} \quad (3)$$

ここで、

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \times d$$

は、膜厚に起因する位相シフト

は、投射角

10

20

30

40

50

n は、膜の屈折率

d は、膜厚

【 0 0 5 6 】

2つの偏光が混じる場合には、検出器によって感知された合成振幅反射率は、次式で書くことができる：

$$r_{eff} = (r_s e^{i\alpha} + r_p e^{i(\omega + \Delta\omega)t}) \times \cos 45^\circ \quad (4)$$

【 0 0 5 7 】

パワー反射率は、次式の通りである。：

$$R_{eff} = r_{eff} \times r_{eff}^* \times (\cos 45^\circ)^2 \quad (5)$$

r_{eff} は、検出器からの合成振幅反射率

r_{eff}^* は、 r_{eff} の複素共役

【 0 0 5 8 】

方程式 (5) に方程式 (2) , (3) , (4) を代入すると、次式で表すことができる。：

$$\begin{aligned} R_{eff} = & \frac{r_{1s}^2 + r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta}{1 + r_{1s}^2 r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta} + \frac{r_{1p}^2 + r_{2p}^2 + 2r_{1p}r_{2p} \cos 2\delta}{1 + r_{1p}^2 r_{2p}^2 + 2r_{1p}r_{2p} \cos 2\delta} + \\ & \frac{2[(1+ab)g + bc + ad + (1+ab)f] \cos(\Delta\omega t)}{1 + a^2 + b^2 + 2ab + a^2 b^2 + 2(a+b+a^2 b + ab^2) \cos 2\delta + 2ab \cos 4\delta} + \\ & \frac{2[ag + (1+ab)c + af] \cos(\Delta\omega t + 2\delta)}{1 + a^2 + b^2 + 2ab + a^2 b^2 + 2(a+b+a^2 b + ab^2) \cos 2\delta + 2ab \cos 4\delta} + \\ & \frac{2[bg + (1+ab)d + bf] \cos(\Delta\omega t - 2\delta)}{1 + a^2 + b^2 + 2ab + a^2 b^2 + 2(a+b+a^2 b + ab^2) \cos 2\delta + 2ab \cos 4\delta} + \\ & \frac{2ac \cos(\Delta\omega t + 4\delta)}{1 + a^2 + b^2 + 2ab + a^2 b^2 + 2(a+b+a^2 b + ab^2) \cos 2\delta + 2ab \cos 4\delta} + \\ & \frac{2bd \cos(\Delta\omega t - 4\delta)}{1 + a^2 + b^2 + 2ab + a^2 b^2 + 2(a+b+a^2 b + ab^2) \cos 2\delta + 2ab \cos 4\delta} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $a = r_{1s} r_{2s}$, $b = r_{1p} r_{2p}$, $c = r_{1s} r_{2p}$, $d = r_{1p} r_{2s}$, $f = r_{2s} r_{2p}$, $g = r_{1s} r_{1p}$

【 0 0 5 9 】

方程式 (6) の最初の2項は、 s 及び p で偏光された光による標準のホモダイン受信法反射率を表している。所与の波長及び膜厚のために、これらの項は、パワー反射率に時不変の(直流の)値を与えている。次の5つの項は、偏光ミキサーでの s 及び p 偏光光の可干渉性の(コヒーレントな)追加に起因するヘテロダイン反射率を表している。

【 0 0 6 0 】

位相が t のみによって決定される第3項は、厚さ変化に影響されない。一方では、 $\cos(t \pm 2)$ 及び $\cos(t \pm 4)$ を含む項は、膜厚が変化する際にうなり信号の位相をシフトさせ得る。伝統的なヘテロダイン干渉計測において、測定された位相シフトは、経路の長さ又は厚さの変化と直接比例するであろう。しかし、方程式 (6) の非線形な性質のため、測定された位相シフトは、厚さ変化の表れに過ぎず、その直接的な尺度とはならない。

【 0 0 6 1 】

興味深いことに、 $+$ 及び $-$ の両方が位相シフトに寄与する。その結果、どのような厚さ変化に対しても直角入射において0位相偏位が起こる。これは、シミュレーション結果によって確認された。これは、直角入射(即ち、従来技術の共通軸の入射)において、 $\cos(t + 2)$ の係数が $\cos(t - 2)$ ののと同じであり、 $\cos(t + 4)$ の係数が $\cos(t - 4)$ ののと同じであることを実現すること

10

20

30

40

50

によって理解することができる。従って、一方によって引き起こされた位相シフトは、他方によってバランスがとられる。

【 0 0 6 2 】

図 4 は、直角入射 ($\theta = 0 . 0 ^{\circ}$) において取られたシミュレーション結果の強度対時間のプロットを示す図である。図から、100 nm の膜に関する測定信号 402 のプロットは、参照信号である参照信号プロット 404 と一致していることが明白であり、即ち、100 nm の膜の測定信号及び参照信号が直角入射において同じ位相となっている。また、この結果は測定される膜の厚さによって変わらない。100 nm の膜と同じように、50 nm の膜に関する測定信号 406 のプロットも、ローカルな参照プロット 404 のプロットと同じ位相となっており、即ち、50 nm の膜に関する測定信号と参照信号とが直角入射において同じ位相となっていることに気づく。

10

【 0 0 6 3 】

垂直軸モードと対比すると、軸外モードにおいて、係数 ($\cos (\theta \pm 2)$) 及び $\cos (\theta \pm 4)$ の対が異なる。従って、ヘテロダイン反射率計を用いて等方材料における厚さ起因の位相偏位を検出及び測定することが可能である。

【 0 0 6 4 】

図 5 は、角度 $20 . 0 ^{\circ}$ の入射 ($\theta = 20 . 0 ^{\circ}$) において取られたシミュレーション結果の強度対時間のプロットを示す図である。この図から明白なように、100 nm の膜に関する測定信号のプロット 504 は、($\theta = \theta_m$) によって参照信号である参照プロット 502 からシフトした位相である。

20

【 0 0 6 5 】

しかし、入射角 $\theta = 20 . 0 ^{\circ}$ では、100 nm の厚さ変化の位相シフト $\Delta \phi$ はかなり小さい。従って、ヘテロダイン反射率計の設定は、リアルタイムの薄膜の厚さ / 変化をモニタするのにより有用となるために、厚さにより敏感となるよう最適化されるべきである。

【 0 0 6 6 】

入射角がトップの膜に関するブルースター角であるならば、 r_{1p} は 0 に近くなるであろう。換言すると、 θ がブルースター角となるように入射角を選択することによって、s 偏光成分のみが反射されるであろう。p 成分の殆どは、膜の中に屈折するであろうし、膜基板界面で反射されるであろう。プラズマエッチング又は堆積のプロセスに関しては、ブルースター角は、 $\arctan (n_f / n_p)$ で与えられる。ここで、 n_p は、プロセス室の中のガスの屈折率であり、 n_f は、トップの膜層の屈折率である。その場合、方程式 (5) は、次式のように書き換えることができる。：

30

$$R_{eff} \approx \frac{r_{1s}^2 + r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s}\cos 2\delta}{1 + r_{1s}^2 + r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s}\cos 2\delta} + \frac{r_{2p}^2}{1} + \frac{2f\cos(\Delta\omega t)}{1 + a^2 + 2a\cos 2\delta} + \frac{2[c + af]\cos(\Delta\omega t + 2\delta)}{1 + a^2 + 2a\cos 2\delta} + \frac{2ac\cos(\Delta\omega t + 4\delta)}{1 + a^2 + 2a\cos 2\delta} \quad (7)$$

ここで、 $a = r_{1s}r_{2s}$, $b = r_{1p}r_{2p}$, $c = r_{1s}r_{2p}$, $d = r_{1p}r_{2s}$, $f = r_{2s}r_{2p}$, $g = r_{1s}r_{1p}$

40

【 0 0 6 7 】

上記の方程式において、位相情報を有するヘテロダイン項は、 r_{1s} (θ) 及び r_{2p} ($\theta + \theta_m$) を含む項のコヒーレントの付加によるものである。これは、古典的なヘテロダイン干渉計に多少類似しており、そして測定ビームから参照ビームを分離することに関係するノイズがない。

【 0 0 6 8 】

図 6 は、2 つの異なる膜厚に関して角度 $60 . 0 ^{\circ}$ の入射 ($\theta = 60 . 0 ^{\circ}$) において取られたシミュレーション結果の強度対時間のプロットを示す図である。(ここで、多くのブルースター角が $57 . 7 ^{\circ}$ により近いものであり得るが、当然のことながら、入射角 θ は $60 . 0 ^{\circ}$ に設定される)。100 nm の膜に関する測定信号 602 のプロット及び 50 nm

50

の膜に関する測定信号 606 のプロットの両方は、参照信号であるローカルな参照信号プロット 604 及び互いからかなり位相シフトしているであるということが図から分かる。図 5 と比較すると、60°の入射角の観察されたシフトは、20°の入射角よりもかなり大きいことが明らかにされる。(t -) を含む項の除去は、技術を厚さ変化により敏感にするように思われる。

【0069】

ヘテロダイン反射率計の設定が厚さにより敏感であるように最適化されると、位相シフト から厚さを決定するための計算を確立することができる。古典的なヘテロダイン干渉計では、位相シフトが測定され、ビームの経路差 d における対応する変化は、以下の式を用いて計算することができる：

$$\Delta\phi = 4\pi \times \Delta d / \lambda \quad (8)$$

は、参照信号 I_{ref} に対して測定された信号 I_{het} の位相シフト

d は、対応するビームの経路差

は、ヘテロダイン照射光源の波長

【0070】

従って、：

$$\Delta d = \Delta\phi\lambda / 4\pi \quad (9)$$

【0071】

ヘテロダイン反射率測定において、 = 2 、及び、

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \times d$$

であるので、膜の厚さは、以下の方程式によって求めることができる：

$$d = \left(\frac{\Delta\phi \times \lambda}{4\pi \times \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \quad (10)$$

【0072】

方程式 (6) を用いるシミュレーションでは、0 から 100 nm (1000) までの膜厚に対応するヘテロダイン反射率信号が生成される。そして、各信号の位相シフトは、参照信号を参照して概算される。推定された位相値から、膜厚の対応する値が方程式 (10) を用いて予測 / 計算された。

【0073】

測定された厚さは、次に、入力された厚さと比較される。測定された厚さと入力された (既知の) 厚さとの差は、測定された位相シフト ϕ_m におけるエラーの関数である。

$$\Delta\phi_m = \frac{4\pi d \times \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\lambda} \quad (11)$$

ϕ_m は、参照信号 I_{ref} に対して測定された信号 I_{het} の位相シフト

d は、測定された位相シフト ϕ_m から推定される膜厚

n は、膜の屈折率

は、入射角

は、ヘテロダイン照射光源の波長

【0074】

図 7 は、60°入射角の、推定の膜厚と実際の膜厚との比較の図である。比較プロット 702 から、約 300 までの膜厚は、予測された厚さが入力された厚さとうまく合致しており、プロット 702 が比較的直線的であることが分かる。300 の厚さを超えると、予測された値におけるエラーは、直線的でない比率で厚さとともに増大する。図 8 に

10

20

30

40

50

いて、薄膜の実際の及び測定された厚さの間のエラー量を描くエラープロット 802 によって、エラー対入力された厚さが描かれる。

【0075】

図 6 及び図 7 から、300 までのエラーの量が 0 又は無視できるが、それを超えるとエラーが急速に増大することが分かる。そうではあるが、このエラーは定量化することができ、エラー計算は、その除去のために公式化することができる。エラーを相殺する 1 つのメカニズムは、より高次の多項式関数を誤差曲線 802 に適合させることである。測定された位相シフト θ_m 及び実際の位相シフト θ_a から計算される、実際の膜厚及び推定の厚さから引き出された多項式関数の係数を用いることにより、厚さ計算におけるエラーを決定することができる。そして、厚さ計算（即ち、測定された位相シフト θ_m を補正すること）において多項式のエラー関数を単に含めることにより、膜厚（即ち実際の膜厚）の予測値を得ることができる。或いは、位相シフト寸法から得られる推定の厚さ値は、厚さエラー補正値を直接推定の厚さに代数的に追加することによって補正することができる。

10

【0076】

図 9 及び図 10 は、60°の入射角に対する膜厚を計算するためのエラー計算の妥当性を証明する。曲線 902 は、632 nm のレーザーに関し、エラー補正後の推定の厚さの結果が 700 まで極めて正確であり、900 の範囲まで大変良いことを示す。推定の厚さ値は、900 の厚さを超えて初めてエラー補正が破綻する。図 10 の曲線 1002 から、404 nm のレーザーに対するエラー補正結果は、632 nm のレーザーを用いた測定の 900 の厚さの障壁を超えてなお正確なままであることが分かる。

20

【0077】

上の議論から、トップの膜層の屈折率 n_f が既知である場合には、膜厚に対する最も正確な結果が得られることは明白である。以上で示されたシミュレーション結果から、適切に設定されたヘテロダイン反射率計は、サブ 200 nm の領域での膜厚を決定するのに極めて有益であることが証明されている。正確な厚さ結果は、位相シフトから計算された厚さに対するエラー補正を決定することによって、300 より大きい膜厚において達成することができる。本発明の 1 つの典型的な具体例に従って、厚さ / 位相シフトのエラー補正は、予め決定される。所定の補正とともに、膜厚のその後の元の位置でのモニタにより、ウェハ処理の間、リアルタイムで且つ正確な厚さが実現され得る。

30

【0078】

図 11 は、本発明の典型的な具体例に従う、ヘテロダイン位相シフトの大きさを測定するのに用られる位相シフト補正多項式関数の係数を決定する方法を描くフローチャートである。この方法は、1 つの既知の屈折率 n_f 及び複数の既知の厚さ d_{fk1-j} （ステップ 1102）を有する多くのキャリブレーションウェハを選択することから始まる。屈折率は共通のファクターであるので、厚さエラー補正多項式関数の係数は、指数に固有になるであろう。各キャリブレーションウェハの屈折率は、正確な厚さ計算結果を保証するため、生産工程中の上層膜のインデックスと同一であるべきである。一般に、単一の層の NIST 追跡可能な酸化物ウェハは、この目的のために様々な屈折率及び膜厚において利用可能であるが、既知の膜厚及び共通の既知の屈折率を有する任意のウェハで十分であろう。典型的なウェハエッチ又は堆積処理のために、選択されたキャリブレーションウェハの膜厚は、5 刻みで 10 から 100 に及ぶ。

40

【0079】

次に、入射角 θ は、キャリブレーション膜の既知の屈折率 n_f 及び照射光源の波長に基づいて、ヘテロダイン反射率計システムのために調整される（ステップ 1104）。好ましくは、入射角は、膜の屈折率のために、可能な限りブルースター角の近傍とされる。しかし、一部のモニタシステムは、設定可能ではない場合もあるが、 $\theta = 60^\circ$ 等のデフォルト入射角に予め設定され、従って、ブルースター角に入射を調整することは不可能である。そうは言っても、商業的に入手可能な膜の多くがそのデフォルト入射角 $\theta = 60^\circ$ （一般に、 60° に僅かに満たない）の数度以内にブルースター角を有することが分かって

50

いる。システムの多くがデフォルト角度に予め設定されるので、信号ノイズによるいかなる付加的なエラーも無視することができる。その結果、膜に関する精密なブルースター角ではなく、所定のデフォルト、例えば $= 60^\circ$ において多項式の関数に対する係数を導くことが好都合であり得る。その際、係数は、 $= 60^\circ$ のデフォルト入射角を有する予め設定されたシステムに適切であるそれらの設定可能なシステムは、膜のブルースター角より僅かに高いのではあるが、 60° のデフォルト値に調整された入射角のみを有することができる。入射が膜のブルースター角から数度ずれていることに起因する厚さ測定エラーよりも、入射角度を間違えて調整しているか、又は、入射角に対する不適当な多項式関数を用いていることに起因する厚さ測定エラーの方が実質的により大きなエラーであることを理解されているべきである。

10

【0080】

運転中、分割周波数偏光ビームは、ヘテロダイン反射率計システム中の膜から反射され、その結果、各 j ウェハに対するヘテロダイン測定信号 I_{het} 及び参照信号 I_{ref} が生成される（ステップ 1106）。測定信号は、参照信号から膜厚に関連する量シフトした位相になるであろう。測定された位相シフト ϕ_{m1-j} は、参照信号 I_{ref} の位相と各 j キャリブレーションウェハに対する測定信号 I_{het} の位相とから検出される（ステップ 1108）。測定された位相シフト情報によって、6 次多項式関数の係数を決定することができ、それは、既知の厚さ d_{kf1-j} に対しての、そして既知の屈折率 n_f に対しての、測定された位相シフト ϕ_{m1-j} から得られた推定の厚さにおけるエラーに関係する（ステップ 1110）。これは、位相差アルゴリズム、例えば方程式 (11) を用い、ウェハの既知の厚さ d_{kf1-j} 及び既知の屈折率 n_f から実際の d_m を求めることによって実現され得る。続いて、6 次多項式関数は、 d_m に内在するエラーを補正し、従って、補正された膜厚を求めるために、測定された位相シフトに適用され得る。

20

【0081】

本質的に、エラー補正多項式関数は、正確な膜厚を求めるために、少なくとも 3 つの方法のうちの 1 つにおいて用いることができる。第一に、多項式関数は、直接データ処理システムにロードされ、測定された位相シフト ϕ_m から予測される厚さをエラー補正するために厚さ計算とともに、直ちに実行することができる。或いは、多項式関数は、予め厚さエラー補正のセットを生成するために、厚さ計算とともに用いることができ、それらは、テーブルの中に蓄積され、個々の測定された位相シフト ϕ_m の値と関連付けられる。任意的に、エラーの訂正された厚さのデータセットは、厚さエラー訂正の代わりに多項式関数と厚さ計算によって作成され、個々の測定された位相シフト ϕ_m 値に対して表の中でインデックスをも付され得る。厚さエラー訂正のテーブルが編集されるならば、動作の間、データプロセッサは、測定された位相シフト ϕ_m から測定された厚さ d_m を計算し、それから、テーブルから適切な厚さエラー訂正によって d_m のエラーを訂正する。或いは、エラーが訂正された厚さデータが用いられるならば、信号のために得られた各測定位相シフト ϕ_m の表からのエラーが訂正された厚さ測定結果に単にアクセスするに過ぎず、従って、厚さ計算を実行するためのデータプロセッサの必要性がなくなる。

30

【0082】

ここで、1 つの物理的な機械で引き出した補正係数が別の装置に上手く翻訳し得ず、即ち、その二つが同一に設定されているとしても、エラー補正精度がある程度劣り得ることもまた理解されるべきである。換言すると、位相シフトエラー補正多項式のために引き出された係数は、少なくとも部分的に装置特有のものであり得る。従って、理想的に、 d_m は、膜厚を測定するのに用いられる同じ装置から取得されるべきである。それにもかかわらず、特定の生産器具に対する一連の係数の妥当性は、一連の検査ウェハの膜厚を測定することによって確認され得るものであり、各立証ウェハは、共通の屈折率、及び、モニタされる膜の範囲内の既知の膜厚を有する膜を備える。検査ウェハの屈折率は、モニタされる膜のそれに類似している。

40

【0083】

プロセスは、生産運転を開始するのに先立って 6 次多項式関数をデータプロセッサの R

50

RAMメモリに読み込むことで終わり、それは、各測定 m に対するリアルタイムの補正された d_f を求めるための膜厚計算において実行され、そこからエラー補正された厚さが生成される（ステップ 1112）。或いは、6次多項式関数は、将来使用するために記憶され得る。エラー補正された厚さの結果のために導かれた一連の係数の精度が屈折率 n_f 、及び、キャリブレーションウェハを測定するのに用いられるセットアップパラータ（即ち、光源波長 λ 及び入射角 θ ）に依存しているため、インデックス情報は、各補正係数とともに保持されるべきである。

【0084】

任意的に、厚さエラー補正又はエラー補正された厚さのどちらかを有するLUTは、直ちに使用するために、メモリに直接保存されるか又はロードされる（ステップ 1112）。エラー補正多項式と同様に、参照屈折率及び設定パラメータは、LUTとともに保存されるべきである。

【0085】

直前で言及されたように、多くの場合、ヘテロダインモニタ装置は設定可能ではないであろうことが予想される。その場合、屈折率及び個々の装置に予め設定される設定パラメータに基づいて、適切な多項式関数が識別される必要がある。多くのモニタシステムが通例の値、即ち、 $\theta = 60^\circ$ 及び $\lambda = 404\text{ nm}$ 又は 632 nm に予め設定されることが予想されるが、他のものもまたあり得る。これを受けて、通例でない設定パラメータ値にふさわしい利用可能な複数の補正係数はそれらのシステムのヘテロダイン反射率測定膜厚測定プロセスの適用性を実質的に増大させるであろうということが理解されるであろう。従って、代替りの典型的な具体例に関しては、多項式関数に対する複数の組の補正係数が、設定可能なモニタシステムを用いて、個々の屈折率に対して、及び、例えば波長及び入射角などの様々な設定パラメータ値に対して予め導かれ得る。これは、図11のフローチャートに描かれたキャリブレーションプロセスを通して繰返すこと、及び、膜に関するブルースター角以外の角度に θ をリセットすることによって実現され得る（ステップ 1104 参照）。多項式関数のための個々の設定された補正係数は、各屈折率について、設定パラメータ値の各組み合わせのために求められ得る。個々の生産器具のための一連の係数の妥当性は、生産運転を開始するのに先立って、一連の検査ウェハの既知の厚さを測定/確認することによって、個々の物理的な装置の使用のために確認されなければならない。同様な方法の中で、一連の補正係数は、異なる波長を有する光源を用いるキャリブレーションプロセスを通して繰返すことによって、様々な光源波長のために導かれ得る。従って、現在説明された発明は、厚さ測定において精度を犠牲にせずに様々なシステム構成に適応し得る。

【0086】

本発明は、エラー補正厚さ方程式を用いることにより、直ちに非常に正確な膜厚の計算をすることを容易にする。上で簡潔に議論されるように、本発明に関する1つの極めて有益な応用は、ウェハエッチング又は堆積の工程などの間にリアルタイムの膜厚の結果を得るためのものである。

【0087】

図12A及び図12Bは、本発明の典型的な具体例に従う、ヘテロダイン反射率計の信号から非常に正確な膜厚測定を得るためのプロセスのフローチャートである。プロセスは、例えば生産ウェハのようなウェハのトップの膜層に対する初期の屈折率 n_f を決定することから始まる（ステップ 1202）。次に、膜の屈折率 n_f にふさわしい6次多項式関数に対する一連の係数が識別され、該関数はシステムRAMにロードされる（ステップ 1204）。システムが所定の入射角に予め設定されるならば、システム入射角度を調整することができないので、一連の補正係数も、参照された入射角に基づいて選択されなければならない。

【0088】

多項式関数は、測定された位相シフト ϕ_m におけるエラーを補正するために用いられ、一度補正されると、正確な膜厚 d_f を計算するために用いることができる。しかし、得

られるエラー補正された膜厚 d_f は、一般に上で議論された 2 つの基本的な手続：多項式関数を用いて補正された膜厚を直ちに決定すること；又は、検索テーブルに対する厚さエラー補正又は補正された厚さ値を予め計算すること、のうちの 1 つによって決定されることができる。厚さエラー補正は、測定された位相シフト ϕ_m から得られた測定された厚さ値、 d_m を補正するのに用いられる。或いは、補正された厚さ値は、測定された位相シフトに基づいてテーブルの中で単に探され得る。後者のケースのどちらかにおいて、膜の屈折率 n_f にふさわしい補正データを有する LUT がシステムメモリーにロードされる（ステップ 1204）。ヘテロダイン反射率計モニタシステムが設定可能であると仮定すれば、それは、関数によって参照された設定パラメータ（即ち、光源波長 及び入射角）に基づいて、再設定される（ステップ 1206）。

10

【0089】

典型的な生産工程が、適合する膜の屈折率をそれぞれ有する、多くのプロセスウェハから構成されるであろうし、従って、前述のステップを典型的な生産工程におけるその後のウェハに対して繰り返す必要がないことが予想される。次に、厚さ寸法を進めることができる。

【0090】

ウェハは、反射率計のテーブルに搭載され、図 3A の説明について上で説明されたビームが照射される（ステップ 1208）。膜層からの反射された参照及び測定のビームがそれぞれ検出され、参照信号 I_{ref} 及び測定されたヘテロダイン信号 I_{het} に変換される。信号 I_{het} 及び I_{ref} は、（測定された位相シフト） ϕ_m 検出器において受け取られ（ステップ 1212）、 ϕ_m 検出器は、信号の位相から測定された位相シフト ϕ_m を決定する（ステップ 1210）。次に、 ϕ_m は、補正係数とともに多項式関数を用い、エラーに関して補正される（ステップ 1214）。補正された位相シフト ϕ_m とともに、補正された膜厚 d_f は、方程式（10）などの標準の厚さ計算を用いて決定され（ステップ 1218）、例えば末端のアルゴリズムにおいて使用するために出力することができる。

20

【0091】

ステップ 1204 に関して言及されるように、ステップ 1212 に戻り、測定された位相シフト ϕ_m は、代わりに厚さ計算に用いられ得るが、エラーは、結果である測定された厚さ d_{fm} まで遂行されるであろう。この厚さエラーは、厚さエラー補正を d_{fm} に適用することによって取り除くことができる（ステップ 1216）。その場合、厚さエラー補正データセットは、メモリーの中にロードされるであろうし、必要に応じて取り出された個々の厚さ補正值は、測定された位相シフト ϕ_m に基づいているであろうし、補正された膜厚 d_f が出力される（ステップ 1218）。さらに交互に、一連のエラー補正された厚さデータは、メモリーにロードされ得る。それは、個々の測定された位相シフトに基づく厚さ値のためにアクセスされる。従って、厚さデータが測定された位相シフト値に前処理され、インデックスを付されるであろうため、厚さ計算が実行される必要はない。

30

【0092】

プロセスが停止しないと仮定すれば、全ての厚さ寸法がウェハに対して完了するまで（ステップ 1220）、フローはステップ 1210 から繰返す。完了すると、別のウェハに対するチェックがなされ得る（ステップ 1222）。他のウェハが処理されないには、プロセスが終了し、そうでなければ、新しいウェハ上の膜の屈折率が前のウェハの屈折率と照合される（ステップ 1224）。2 つが一致するならば、新しいウェハが反射率計テーブルの上に搭載されることによりプロセスが開始され（ステップ 1208）、そこから継続される。インデックスが変わらないので、補正多項式又はシステム設定のどちらをも意図されない。しかし、新しいウェハからの屈折率及び前のウェハが一致しないならば、補正係数の現在の組は適切でなく、異なる補正多項式関数が選択される。反射率計システムが設定可能ならば、反射率計システムは、新しい屈折率のために再設定されるべきである。従って、プロセスがステップ 1202 から再度開始する。どちらの場合にも、最終的な厚さ測定結果が運転中の最後のウェハから取られるまで、上で説明されるように、測定のプロセスが続く。そして、プロセスが終了する。

40

50

【0093】

以上の議論は、単一の層、主に薄膜の応用に重点を置いたものである。しかし、以下で示されるであろうように、エラーの変化は、複数のスタックに拡張され得る。しかし、最初に、より複雑なスタックには2つのレーザー波長が必要となり得ることが前提とされ、その結果、興味のある厚さの隔たりに対する厚さを正確に評価するために、2つの別個の厚さ補正が必要である。サブ2000の膜厚のモニタに対するテスト結果が以下に示される。

【0094】

図13は、出願人によってテスト体制において精査されたものに類似する、溝掘りされた複数層のスタックの図である。構造1300は、概略的に、フォトレジスト(PR)層1314、底の非反射コーティング(BARC)層1316、酸化被膜1318、及びシリコン基板1312を備える。シミュレーションの目的で、構造1300は、2つの領域A及びBに分割される。領域Bは、チャンネル1320がPR層1314及びBARC層1316を横切っており、従って、酸化被膜1318の表面を露呈する構造1300の一部を表している。領域Aは、PR層1314の表面が露出する構造1300の一部である。両方の領域の振幅反射率は、特有のマトリクス法を用いて計算され得る。現在のヘテロダイン反射率計が空間でコヒーレントなビームを用いるので、これらの反射率は、構造1300の反射率を計算するためにコヒーレントに加算される。PR層1314の厚さはほぼ0から2000まで変化される一方、他の2つの層の厚さは一定に維持される。領域AのPR層1314の厚さが変更されると、領域Bの溝1320の深さが対応して変更される。

【0095】

上述のように、一般に、選択された各波長のブルースター角に対応する入射角を用いると、興味の厚さ間隔を評価するのに2つのレーザー波長()ヘテロダイン反射率計が必要であろうということが予測される。採用されるレーザー光線の光源は、632nm及び404nmの波長を有する。興味の厚さ間隔に対する最適な波長を慎重に選択することによって、うなり信号の位相シフトから上層膜の厚さを正確に予測することができる。図14A 14Dは、0 2000の厚さ間隔に亘って、入力された厚さの関数として予測される厚さのプロットを描く図である。図から収集されるように、入射角をトップの膜層のブルースター角に設定し、厚さ間隔0 900及び1600 2000は、 $= 632\text{ nm}$ を有する光源を用いて正確に予測することができるが、910 1590の範囲の厚さは正確に予測できなかった。その厚さ間隔に対して、満足な厚さ測定精度を実現するために、 $= 404\text{ nm}$ を有する光源が採用された(図14C参照)。

【0096】

従って、入射角としてブルースター角を用いる状態で、溝を有する多重積層構造の厚さを正確に予測するのに2つの波長が必要であり得ることを理解することができる。2つの別個のエラー補正解決策には2つの固有な波長が必要であり、正確に厚さを予測するためには、4組の多項式の係数が必要である。しかし、さらなるコンピュータ実験により、単一のレーザー波長、即ち632nmのみを用いて、0 2000の全体の厚さの範囲が予測できた角度に入射がセットされたことが証明された。テストされた膜試料に対し、その入射角は、632nmの波長を有する光の源を用いて、60°と実験的に決定された(ここで、トップの膜層のブルースター角は、光源波長に対する57.38°である)。従って、たった2組の多項式の係数のみを有し、たった1組のアルゴリズムのみが必要である。予測された厚さと0 2000に亘る厚さの隔たりの間の入力された厚さとの比較の結果が図15A及び図15Bに示される。従って、本発明の典型的な具体例に従って、入射角は、60°と予め定められ、よって、2つの波長のテロダイン反射率計を設定することの必要性がなくなる。

【0097】

今回説明された発明は、ヘテロダインされた反射率計を用いて超薄膜の厚さをリアルタイムで正確に決定するための、単純なメカニズム及び方法を提供する。しかし、関連した

10

20

30

40

50

技術において理解されるように、古典的な厚さ計算は、ターゲット材の屈折率に関する正確な値を有することに高く依存している。工程が進むと、上層膜の屈折率がしばしばドリフトするか又は変化し、従って、さらなるエラーが厚さ計算に入ってくるので、このことは、半導体ウェハ処理の間に正確な厚さを実現するのに問題となる。

【 0 0 9 8 】

本発明の別の典型的な具体例に従って、ヘテロダイン反射率計は、薄膜の厚さ及び屈折率を同時に決定するための格子干渉計と連携する。さらに、厚さ計算は、格子干渉計からの情報を用いて得られた屈折率を用い、リアルタイムで動的にアップデートされる。本発明のこれらの及び他の側面は、以下で議論されるシステム及び方法の説明から理解されるであろう。

【 0 0 9 9 】

図 1 6 は、本発明の典型的な具体例に従って、膜の屈折率のために動的にアップデートされた値を用い、エラー補正された膜厚を得るための、組み合わせのヘテロダイン反射率計及び格子干渉計の図である。ヘテロダイン反射率計 / 格子干渉計システム 1 6 0 0 (H R / G I 1 6 0 0) は、多くの側面において、図 3 A について上で議論されたヘテロダイン反射率計システム 3 0 0 と類似しているので、2つの具体例の差異のみが詳細に議論されるであろう。図面から明白な1つの特徴は、H R / G I 1 6 0 0 が、検出器 1 6 1 1 を有するヘテロダイン反射率計サブセクション (小区分) 1 6 7 0 と、0 次ビーム検出器 1 6 1 2 及び 1 次ビーム検出器 1 6 2 3 を有する格子干渉計サブセクション 1 6 8 0 とにさらに細かく分かれていることである。ヘテロダイン反射率計サブセクション 1 6 7 0 は、上述したのと同じに機能し、検出器 1 6 1 1 が測定信号 I_{het} を発生し検出器 1 6 1 0 が参照信号 I_{ref} を発生する (信号 1 6 2 0 及び 3 4 2 と信号 1 6 2 1 及び 3 5 2 と同様に、検出器 1 6 1 0 及び 1 6 1 1 は検出器 3 4 0 及び 3 5 0 と相互に関連がある)。測定信号 I_{het} 及び参照信号 I_{ref} は、ヘテロダイン位相シフト ϕ_{het} とともに、図 1 8 において、信号プロット 1 8 0 2 及び 1 8 0 4 としてそれぞれ描かれる。上述したように、測定されたヘテロダイン位相シフト ϕ_m は、 ϕ_m 検出器 3 6 2 によって検出されるが、明瞭さのために、測定された格子位相シフト ϕ_{grtm} として “ ϕ_{hetm} ” と称され、同様に議論されるであろう。

【 0 1 0 0 】

一方、格子干渉計サブセクション 1 6 8 0 は、格子 1 6 3 0 を利用し、格子 1 6 3 0 は、複数の回折バンドの中にビーム 1 6 4 0 が回折するためのピッチ “ p ” を有し、1 次光線 1 6 4 3 のみがいられるいくつかのより高次 (1 次、2 次、3 次等の回折バンド) が明るい中心のバンド (ゼロ次光線 1 6 4 2) の両側に並ぶ。格子のピッチは、本質的に、3つの要件：選択された波長に対するブラッグ回折条件、厚さ測定のためのダイナミックレンジ、及び、格子干渉計分解能を満たすことに基づく。簡単に図 1 7 A 及び図 1 7 B を見ると、格子 1 6 3 0 に関する作用の原理が分かり、そこから、回折した光ビームの少なくとも一部が参照信号から追加量、即ち、2つの別個の位相シフト分シフトした位相になるであろうということが理解できる。s 偏光成分は、明瞭さのために、これらの図において、p 偏光成分と区別して描かれる。上述したように、最初の位相シフトは、膜 3 1 4 との相互作用に起因する。入射ビーム 3 0 3 は、反射光線 3 0 5 - 1 s と、屈折光線 3 0 5 - 2 s 及び 3 0 5 - 2 p とに分離し、屈折光線及び反射光線のそれぞれが互いに垂直距離 x 分離した状態で基板によって反射される。ここで、：

$$x = 2d_f \tan \rho \cdot \cos \alpha = \frac{2d_f \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\sqrt{n_f^2 - \sin^2 \alpha}} \quad (12)$$

x は、隣接した光線の間の垂直の距離

d_f は、膜厚

n_f は、膜の屈折率

α は、入射角

n_f は、膜の屈折率

【0101】

第2の位相シフトは、格子回折1630からの回折光バンド、光線1643のみで起こり、その結果、1次の回折バンド（回折波1643-1s、1643-2s、及び1643-2p）のみで観察される。そこで、回折格子1630によって発生する1次の光線、光線1643-1s、1643-2s、及び1643-2pは、コヒーレント加算で、格子誘発位相シフト g_{rt} を表し、次のように定義される経路差PDと対応している：

$$PD = \frac{mx\lambda}{\rho} \quad (13)$$

10

PDは、隣接する1次回折光線間の垂直距離

mは、回折バンドの整数定数であり、1次バンドに対しては $m = 1$

は、ヘテロダイン照射光源の波長

は、膜の屈折率

【0102】

ゼロ番目バンドビーム1642は、回折しないが、格子回折1630を通して直接変化しないパスであるため、格子1630との相互作用からの格子誘発位相シフト g_{rt} は、1次光線1643-1s、1643-2s、及び1643-2pのみで見られる（入射角度 θ がブルースター角の近傍で選択されるので（デフォルトの入射角 $\theta = 60^\circ$ ）、 r_{1p} （+）0であるので、反射光線305-1p、即ち、BS1632の後の1640-1pはないことを思い出されたい）。上述のように、膜に起因する位相シフトは、光線305-2s及び305-2pの2 g_{het} である。従って、1次の屈折光線1643-2s及び1643-2pの格子における全体の位相シフト G_l は、2 G_l であり、ここで、 $G_l = g_{het} + g_{rt}$ である。

20

【0103】

図16に戻って、格子干渉計サブセクション1680は、0次回折ビーム及び1次回折ビームに対する2つの別個の信号をそれぞれ作り出すために、検出器1612及び1613を利用する。格子1630からの0次光線1642が回折しないので、それらの位相は、格子1630によって変化しない。従って、検出器1612は、ヘテロダイン測定信号 I_{het} 1622を発生させ、測定信号 I_{het} に対する位相シフトは、検出器1610からの参照信号 I_{ref} に対して、本質的に g_{het} のままである。従って、実際問題として、パス356及び検出器1611は、BS1632と同様に、割愛することができる。

30

【0104】

逆に、格子1630からの1次光線1643は回折し、フーリエシフト定理に従って、格子 g_{rt} からの追加の位相シフトが生じることとなる。検出器1613は、1次ビーム1643から格子信号 I_{G_l} 1623を発生させる。測定された格子位相シフト G_{lm} は、信号 I_{het} 及び I_{ref} から g_{hetm} を検出するのと同ーの方法によって、信号 I_{het} 及び I_{G_l} から検出することができる。信号 I_{het} 及び I_{ref} 間の測定された位相シフト g_{hetm} は、上述されたように、膜の光学的厚さについての情報を提供する。信号 I_{G_l} 及び I_{het} 間の格子位相シフト g_{rtm} は、一方では、膜の屈折率 n_f を決定するのに有益な追加の情報を提供する。従って、信号 I_{ref} 、 I_{het} 、及び I_{G_l} から膜の屈折率 n_f を得ることが可能である。

40

【0105】

g_{hetm} 検出器362は、参照信号 I_{ref} 1620、及び、測定信号 I_{het} 1621又は1622のいずれかを各検出器から受け取り、両者の間の位相シフト g_{hetm} を検出/測定する。上の他の場所で議論されるように、測定された位相シフト g_{hetm} は、例えば多項式関数を用いて厚さ計算をするのに先立ってエラー補正されるべきである。従って、 g_{het} 補正器366は、 g_{hetm} 検出器362から測定された位相シフト値 g_{hetm} を受け取り、エラー補正アルゴリズムを適用する。補正された位相シフト g_{het} は、次に、

50

d_f 計算機 368 に渡されるが、直下で議論される理由のために、 n_f 計算機 1696 にも渡される。

【0106】

$grtm$ 検出器 1690 は、格子信号 I_{Gl} 1623、及び、各検出器からの測定信号 I_{het} 1621 又は 1622 のいずれかを受け取り、格子のみによって格子信号 I_{Gl} 1623 で誘発された位相シフトを検出/測定し、即ち、 $grtm$ は、格子信号 I_{Gl} 1623、及び、測定信号 I_{het} 1621 又は 1622 のいずれかとの間で検出される。測定信号 I_{het} 及び格子信号 I_{Gl} は、図 19 において、ヘテロダイン位相シフト grt とともに、それぞれ信号プロット 1802 及び 1902 として描かれる。

【0107】

本発明の 1 つの特徴は、リアルタイムでアップデートされ補正された膜の屈折率の値によって、動的に厚さ計算をアップデートする能力である。従って、製造工程の中で、極めて正確な膜厚を達成可能であり、それは、膜のリフラクタンスの変化と無関係である。屈折率の変化は、プロセス自体からの屈折率 n_f の変化、例えば、ゲートプロセスにおいてハイ ケー（高誘電率） $SiON$ を形成する SiO_2 の窒化物形成が原因となり得る。

【0108】

検査されている膜の屈折率は、位相シフト het 及び位相シフト grt から決定することができる。しかし、測定されたヘテロダイン位相シフト $hetm$ と同様に、 $grtm$ 検出器 1690 によって検出された測定された格子位相シフト $grtm$ は、指数計算に先立って補正しなければならない潜在エラーを有する。補正された格子位相シフト grt は、次に、 n_f 計算機 1696 に送られる。 n_f 計算機 1696 は、 n_f を決定するために（以下の方程式（24）などの）別個の関数を利用し、次に、 d_f 計算機 368 に送られる。膜厚計算、例えば d_f 計算機 368 によって使用された上の方程式（10）は、膜厚 d_f の計算のために n_f を利用する。

【0109】

或いは、膜厚 d_f は、実際の補正された格子位相シフト grt 及び補正されたヘテロダイン位相シフト het から直接求められ得る。そこで、位相シフト grt は、 grt 補正器 1692 から受け取られ、 het は、 d_f 計算機 370 として het 補正器 366 から受け取られる。膜厚計算、例えば d_f 計算機 370 によって上で使用された方程式（23）は、 n_f とは無関係な膜厚 d_f を計算する。

【0110】

セットアップは、ブルースター角の近傍の入射角（ $= 60^\circ$ ）を有するように設定される。この角度では、膜の上面からの p 偏光した光線の反射は、ごく僅かであるか、又は全くない。それによって、検出器 1611 からの測定信号 I_{het} 1621 を膜厚情報が豊かなものとして行うことができる。 Si 基板の上の薄膜のために、検出器 1611 からの測定信号 I_{het} は、次式で表現することができる。：

$$R_{het} \propto \frac{r_{1s}^2 + r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta_{het}}{1 + r_{1s}^2 r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta_{het}} + \frac{r_{2p}^2}{1} + \frac{2f \cos(\Delta\omega t)}{1 + a^2 + 2a \cos 2\delta_{het}} + \frac{2[c + af] \cos(\Delta\omega t + 2\delta_{het})}{1 + a^2 + 2a \cos 2\delta_{het}} + \frac{2ac \cos(\Delta\omega t + 4\delta_{het})}{1 + a^2 + 2a \cos 2\delta_{het}} \quad (14)$$

ここで、 $a = r_{1s} r_{2s}$ 、 $b = r_{1p} r_{2p}$ 、 $c = r_{1s} r_{2p}$ 、 $d = r_{1p} r_{2s}$ 、 $f = r_{2s}$

ここで、 $a = r_{1s} r_{2s}$ 、 $b = r_{1p} r_{2p}$ 、 $c = r_{1s} r_{2p}$ 、 $d = r_{1p} r_{2s}$ 、 $f = r_{2s} r_{2p}$ 、 $g = r_{1s} r_{1p}$ であり、

$$\delta_{het} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \times d$$

は、膜厚を計算するために測定する必要のある位相である。1 nm の $SiON$ 膜に関しては、 $\sim 25 \text{ mrad}$ である。

【0111】

10

20

30

40

50

方程式(14)において、位相情報のヘテロダイン項は、 r_{1s} () 及び r_{2p} (+) に関する項のコヒーレント加算による。方程式(18)からの膜厚情報の抽出は、他の場所において説明される。

【0112】

格子干渉計の目的は、膜の位相 / 厚さの測定の代替アプローチを提供することである。この測定結果をヘテロダイン反射率計からのものと組み合わせることによって、膜の屈折率を決定することができる。ヘテロダイン反射率計の分析に続いて、格子干渉計からの1次のビームのために次の方程式が理解され得る。1つの膜スタックのために、s 偏光反射率は、次の方程式によって表すことができる。

$$r_s = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta_{GI}}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta_{GI}}} \quad (15)$$

10

【0113】

方程式としての p 偏光反射率 :

$$r_p = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta_{GI}}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta_{GI}}} \quad (16)$$

ここで、

20

$$\delta_{GI} = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \times d + \frac{2\pi (\pm m) \times \sin \alpha \times \cos \alpha}{p \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \times d \right]$$

即ち、 $\delta_{GI} = \delta_{het} + \delta_{grt}$ であり、1次のビームに関しては $m = 1$ である。

【0114】

2つの偏光が混じる場合、検出器によって感知された結果の振幅反射率は、次のように書くことができる :

$$r_{GI} = (r_s e^{i\omega t} + r_p e^{i(\omega + \Delta\omega)t}) \times \cos 45^\circ \quad (17)$$

30

【0115】

従って、パワー反射率は、次のように表現できることになる。

$$R_{GI} = r_{eff} \times r_{eff}^* \times (\cos 45^\circ)^2 \quad (18)$$

【0116】

方程式(18)において、方程式(15)、(16)、及び(17)を代入した後、検出器1613におけるブルースター角の R_{GI} からの信号 I_{GI1623} は、次のように表現することができる :

$$R_{GI} \propto \left[\frac{r_{1s}^2 + r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta_{GI}}{1 + r_{1s}^2 r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta_{GI}} + \frac{r_{2p}^2}{1} + \frac{2f \cos(\Delta\omega t)}{1 + a^2 + 2a \cos 2\delta_{GI}} + \frac{2[c + af] \cos(\Delta\omega t + 2\delta_{GI})}{1 + a^2 + 2a \cos 2\delta_{GI}} + \frac{2ac \cos(\Delta\omega t + 4\delta_{GI})}{1 + a^2 + 2a \cos 2\delta_{GI}} \right] \times DE \quad (19)$$

40

ここで、DE は、1次ビームの回折効率である :

$$\delta_{GI} = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \times d + \frac{2\pi (\pm m) \times \sin \alpha \times \cos \alpha}{p \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \times d \right] \quad (20)$$

50

【 0 1 1 7 】

方程式 (1 4) は、検出器 1 6 1 1 又は 1 6 1 2 からの測定信号 I_{het} を表している。格子干渉計 1 6 8 0 では、測定信号 1 6 2 2 I_{het} 及び格子信号 1 6 2 3 I_{G1} の 0 交差をモニタすることによって、格子誘発位相シフト ϕ_{grt} を決定することができる。格子誘発位相シフト ϕ_{grt} は、他の周知の位相測定技術によっても検出することができる。

【 0 1 1 8 】

参照信号 1 6 2 0 I_{ref} と測定信号 1 6 2 1 又は 1 6 2 2 I_{het} の 0 交差を比較することによって、超薄膜によって引き起こされた位相シフト ϕ_{het} を決定することができる。ヘテロダイン位相シフト ϕ_{het} は、他の周知の位相測定技術によっても検出することができる。このヘテロダイン位相シフトは、次のように表すことができる。

10

$$\Delta\phi_{het} = \frac{2\pi \times \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \times 2d}{\lambda} = 2 \times \delta_{het} \quad (21)$$

【 0 1 1 9 】

測定信号 1 6 2 1 又は 1 6 2 2 I_{het} 及び格子信号 1 6 2 3 I_{G1} から、格子誘発位相シフト ϕ_{grt} は、 ϕ_{het} とは無関係に決定され得る。格子位相シフトは、次のように表すことができる。

$$\Delta\phi_{grt} = \frac{2\pi \times \sin \alpha \times \cos \alpha \times 2d}{p \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = 2 \times \delta_{grt} \quad (22)$$

20

【 0 1 2 0 】

方程式 (2 2) を方程式 (2 1) と掛け合わせ、その後に簡単な代数によって、物理的な厚さは、次のように表すことができる。

$$d = \sqrt{\left(\frac{\Delta\phi_{het} \times \Delta\phi_{grt} \times \lambda \times p}{16\pi^2 \sin \alpha \times \cos \alpha} \right)} \quad (23)$$

【 0 1 2 1 】

方程式 (2 1) を方程式 (2 2) 割り、その後に簡単な代数によって、屈折率 n は、次のように表すことができる。

$$n = \sqrt{\sin^2 \alpha + \left(\frac{\Delta\phi_{het}}{\Delta\phi_{grt}} \right) \frac{\lambda}{p} \sin \alpha \times \cos \alpha} \quad (24)$$

30

【 0 1 2 2 】

従って、図 1 6 に計算機 3 7 0 で示されるように、格子干渉測定 (G I) と連携する今回のヘテロダイン反射率測定 (H R) は、薄膜の物理的な厚さ d_f 、及び屈折率 n_f の両方を独立して決定するために用いることができ、計算機 3 7 0 は、計算機 3 6 8 によって導かれる d_f アウトプット 3 6 9 とは無関係に d_f アウトプット 3 7 1 を導く。この特徴は、膜が厚さの変化と同時に指数変化を受ける場合に、ゲート誘電体計測学の中で特に重要である。例えば、ハイケーのゲート酸化物プロセスの間に、誘電体膜は、光学的な厚さ変化を受ける。この変化の一部は、膜の膨らみや、いくぶんその指数変化に原因がある。この二つを分離できることは、工程管理にとって重要である。従来技術の手法では、それらが測定するパラメータから互いに独立な 2 つの変化に完全に解析することができない。膜厚 d_f 及び膜の屈折率 n_f の両方が、ヘテロダイン位相シフト ϕ_{het} とは無関係に判断することができる格子誘発位相シフト ϕ_{grt} を用い、無関係に判断することができるので、今回のプロセスは、この欠点を克服する。

40

【 0 1 2 3 】

50

屈折率計算は、正確な格子位相シフト情報 g_{rt} と同様に正確なヘテロダイン位相シフト情報 h_{et} を必要としており、従って、補正アルゴリズムは、それぞれの測定値を補正するために導かれる。ヘテロダイン位相シフト補正アルゴリズムを既知の膜厚と既知の回折インデックスを用いてキャリブレーションウェハから求めるプロセスは、図 1 1 に示されたフローチャートに関して上述されている。格子位相シフト補正アルゴリズムを既知の膜厚とピッチ p を有する格子の既知の回折指数を用いてキャリブレーションウェハから導くプロセスは、位相シフト補正アルゴリズムを求めるための同時進行プロセスとして図 2 0 に描かれる。

【 0 1 2 4 】

従って、プロセスは、1つの既知の屈折率 n_f と複数の既知の厚さ d_{fk1-j} とを有する多くのキャリブレーションウェハを選択することから始まる（ステップ 2 0 0 2）。ヘテロダイン反射率計システムは、可能ならば、キャリブレーション膜及びヘテロダイン光源波長の既知の屈折率 n_{fk} に基づいて、入射角 θ を調整される（ステップ 2 0 0 4）。或いは、入射角 θ は、所定のデフォルト値 $\theta = 60^\circ$ にセットされている場合もある。この時点で、格子のピッチ p にも注目される。

【 0 1 2 5 】

操作中、分割周波数の偏光ビームは、ヘテロダイン反射率計システムの膜から反射され、その結果、各 j ウェハに対してヘテロダイン測定信号 I_{het} 及び格子信号 I_{Gl} が生じる（ステップ 2 0 0 6）。これらの信号は、測定されたヘテロダイン位相シフト h_{etm} の多項式関数用の補正係数のセット、及び、測定された格子位相シフト g_{rtm} の多項式関数用の補正係数の別のセットを決定するために、キャリブレーションウェハの既知の膜厚パラメータとともに用いられる。測定されたヘテロダイン位相シフト h_{etm} は、各 j キャリブレーションウェハの参照信号 I_{ref} 及び測定信号 I_{het} から検出され（ステップ 2 0 0 8）、次に、測定された位相シフト h_{etm1-j} のエラーに関係する 6 次多項式関数用の係数の決定に用いられる（ステップ 2 0 1 0）。同様な方法で、測定された格子位相シフト g_{rtm} は、各 j キャリブレーションウェハの測定信号 I_{het} 及び格子信号 I_{Gl} から検出される（ステップ 2 0 1 2）。そして、実際の格子位相シフト g_{rtk1-j} は、（上の方程式（2 2）に例示するように）既知の膜厚 d_{fk1-j} と複数の既知の屈折率 n_f とから計算することができ、それは、測定された位相シフト g_{rtm1-j} のエラーと関係する 6 次多項式関数用の係数のセットを導くために用いられる（ステップ 2 0 1 4）。重要なことには、補正された格子位相シフト g_{rt} 及び補正されたヘテロダイン位相シフト h_{et} は、（例えば、上の方程式（2 4）を用いて）膜の屈折率 n_f を求めるのに用いられるであろう。膜厚計算は、補正された位相シフトから屈折率 n_f とともに動的にアップデートすることができる。従って、測定されたヘテロダイン位相シフト h_{etm} を有する補正係数のセット、及び、測定された格子位相シフト g_{rtm} を補正するための多項式関数を有する補正係数の第 2 のセットは、キャリブレーションウェハ及び設定パラメータの参照屈折率とともに保存される。

【 0 1 2 6 】

本発明は、エラー補正厚さ方程式を用いて、膜厚を直ちに非常に正確に計算するのを容易にし、それは、膜層の屈折率の変化に対して動的にアップデートされる。従って、ウェハ処理の間の屈折率の変化は、膜厚の結果の精度に影響しないであろう。厚さ計算の間にインデックスを動的にアップデートするための 1 つの典型的な方法が以下に存在する。

【 0 1 2 7 】

図 2 1 A 及び図 2 1 B は、ヘテロダイン反射率計信号から補正された膜厚を得るためのプロセスのフローチャートであり、厚さ計算の屈折率成分が本発明の典型的な具体例に従って動的にアップデートされる。プロセスは、ウェハ、例えば生産ウェハのトップの膜層の入射の屈折率 n_f を決定することから始まる（ステップ 2 1 0 2）。インデックスを用い、2つの適切な多項式関数が、測定された信号の中でエラーを補正するためにインデントされ、システム RAM にロードされる（ステップ 2 1 0 4）。最初の多項式関数は、補正係数の適切なセットによって、測定されたヘテロダイン位相シフト h_{etm} においてエ

10

20

30

40

50

ラーを補正するために識別される。第2の多項式関数は、補正係数の適切なセットによって、測定された格子位相シフト θ_{grtm} においてエラーを補正するために識別される。測定されたヘテロダイン位相シフト θ_{hetm} の多項式関数のためのヘテロダイン補正係数は、測定されたヘテロダイン位相シフト θ_{hetm} から補正されたヘテロダイン位相シフト θ_{het} を決定するために用いられ、そしてそれは、正確な膜厚を生成するために用いることができる。逆に、測定された格子位相シフトエラーの多項式関数のための格子補正係数は、測定された格子位相シフト θ_{grtm} から補正された格子位相シフト θ_{grt} を決定するために用いられ、そしてそれは、膜の正確な屈折率 n_f を生成するために補正されたヘテロダイン位相シフト θ_{het} と連携して用いることができる。厚さ計算の精度が屈折率の精度に依存しているため、この新しい屈折率は、膜厚計算（例えば厚さ方程式（10））の屈折率項を動的にアップデートするために用いられる（ステップ2106）。個々のプロセスウェハの膜の屈折率が通常一定のままであるので、このステップが典型的な生産工程では、それ以降のウェハに対して繰り返される必要はない。厚さ測定計算は、動的にアップデートされた屈折率によって、ここから進むことができる。

【0128】

ウェハは、反射率計テーブル（ステップ2108）に搭載され、照射される。光源からの参照ビームと膜層からの測定及び格子ビームが検出され、参照信号 I_{ref} 、測定されたヘテロダイン信号 I_{het} 、及び格子信号 I_{Gl} に変換される。ヘテロダイン測定信号 I_{het} 及び参照信号 I_{ref} が θ_{hetm} ヘテロダイン位相シフト検出器で受け取られ、同時に、ヘテロダイン測定信号 I_{het} 及び格子信号 I_{Gl} が格子誘発位相シフト検出器格子 θ_{grtm} で受け取られる（ステップ2110）。 θ_{hetm} 検出器は、 I_{ref} 及び I_{het} 信号から θ_{hetm} を決定する（ステップ2112）。

【0129】

測定されたヘテロダイン位相シフト θ_{hetm} は、 θ_{hetm} のエラー補正多項式関数を用い、実際の θ_{het} に補正される（ステップ2114）。測定されたヘテロダイン位相シフト θ_{hetm} をエラー補正することは、従来技術の方法論の厚さ測定の精度を大いに高めるが、さらには、処理の間、変化又はドリフトする膜厚計算におけるパラメータを動的にアップデートすることによってより一層の正確さを達成することが可能である；最も重要なものは、膜の屈折率である。従って、並列動作において、 θ_{grtm} 検出器は、 I_{het} 及び I_{Gl} 信号から θ_{grtm} を決定する（ステップ2116）。そして、測定された格子位相シフト θ_{grtm} は、 θ_{grtm} に対するエラー補正多項式関数を用いて、実際の θ_{grt} に補正される（ステップ2118）。

【0130】

実際の補正された格子位相シフト θ_{grt} 及び補正されたヘテロダイン位相シフト θ_{het} を有することによって、屈折率のプロセス値は、（ソース波長情報、入射角、及びピッチ p などの他の必要な情報とともに、）屈折率計算、例えば方程式（22）を用いて決定することができる（ステップ2120）。そして、アップデートされた屈折率 n_f は、リアルタイムの膜厚計算において、屈折率パラメータを動的にアップデートするのに用いることができ（ステップ2120）、そこから（当然ながらソース波長情報及び入射角を用いて）膜厚 d_f が得られる（ステップ2124）。例えば末端決定において用いられるために、 d_f が出力され得る（ステップ2126）。

【0131】

代わりに又は同時に、ステップ2118において、（ソース波長情報と入射角とともに）上の方程式23を用い、実際の補正された格子位相シフト θ_{grt} 及び補正されたヘテロダイン位相シフト θ_{het} から直接膜厚 d_f が得られ得る（ステップ2123）。そして、格子干渉計サブシステムから導かれた d_f の値は、ヘテロダイン反射率計サブシステムから導かれ、品質保証確認検査として及び/又は直接例えば末端決定において用いられ、 d_f の値と比較することができる（ステップ2126）。

【0132】

フローは、プロセスが停止する（ステップ2128）まで、現在のウェハに対してステ

10

20

30

40

50

ップ 2 1 1 0 から継続的に繰り返し、その間、別のウェハが入射屈折率（ステップ 2 1 3 0 及び 2 1 3 2）のために調査される場合もあり、最終的な厚さ測定が運転における最後のウェハから行われるまで、上述のような測定プロセスが続く。そして、プロセスが終了する。

【 0 1 3 3 】

本発明のさらに別の典型的な具体例に従って、測定信号 I_{het} は、反射されたビームを入射角で膜ターゲットに戻るようリダイレクトする（向きを変える）ことによって強められる。この複光路方式アプローチは、上述の単光路アプローチの膜面からの p 偏光された光線の優れた抑制の利点を有している。

【 0 1 3 4 】

図 2 2 は、本発明の典型的な具体例に従う、組み合わせのヘテロダイン反射率計及び格子干渉計の図であり、反射されたビームを膜ターゲットに戻るようリダイレクトすることによって複光路方式アプローチを利用する。ヘテロダイン反射率計 / 格子の干渉計システム 2 2 0 0 は、図 3 A 及び図 1 6 について上述されたヘテロダイン反射率計システム 3 0 0、及び、組み合わせのヘテロダイン反射率計と格子干渉計 1 6 0 0 に類似しているので、複光路方式アプローチと関係する側面のみが議論されるであろう。しかし、議論されたいずれの反射率計の具体例においても、複光路方式アプローチが反射率計の強化された測定感度を提供することは明らかである。

【 0 1 3 5 】

本質的に、測定ビームの複光路方式は、膜の表面から反射されたビームを第 1 のパスと等しい入射角で膜の上に返るようリダイレクトすることによって実現される。例えば、図 2 2 については、入射ビーム 3 0 3 は、BS 2 2 3 を通過し、プリズム 3 3 2 においてターゲット膜 3 1 4 の上に向かってリダイレクトされる。分離周波数の s 偏光と p 偏光成分を備える反射ビーム 3 0 5 は、1 つの面の上に HR（高い反射）コーティングを有するプリズム 3 3 4 に受け取られ、ビーム 2 2 0 6 として膜 3 1 4 上のターゲットへ後方反射される。この具体例において描かれるように、ビーム 2 2 0 6 は、本質的に入射角でターゲットに戻るようビーム 3 0 5 のパスを辿る。ビーム 2 2 0 6 は、膜 3 1 4 と相互作用し、反射ビーム 2 2 0 8 としてプリズム 3 3 2 へ、それから BS 2 2 3 3 の上に戻るよう反射され、そこで、ヘテロダイン反射率計サブセクション 1 6 7 0 及び / 又はヘテロダイン反射率計格子干渉計サブセクション 1 6 8 0 に向かってリダイレクトされる。その際、膜に起因する位相シフトは、効果的に倍増され、従って、反射率計の測定感度が 2 倍に高められる。現在説明された具体例は、ビームパス、実質的にそれ自体への後方リダイレクトのためのコートされたプリズムを利用するが、入射のパスによって定義された元の入射面又は元の入射面以外の面の膜に戻るようビームをリダイレクトするためのミラー又は光学部品のセットなど、他の光学部品が用いられ得る。さらに、ある状況では、膜の上の 2 つ以上のパスを形成することが有利であり得る。

【 0 1 3 6 】

ビームのパスの距離は、効果的に倍増されている d_{hetm} の変化によって d 増加するが、位相シフトの増加は、多項式関数に対する係数を補正することに対応するであろう。

【 0 1 3 7 】

図 2 3 の図において、現在の具体例のヘテロダイン反射率測定の分析が説明される。s 偏光成分は、明瞭さのために、p 偏光成分と分離して描かれる。描写から、両方の偏光成分が複光路方式薄膜反射率を受けることが分かる。例えば、s 偏光成分 3 0 3 は、膜 3 1 4 と相互作用し、ミラー 2 2 3 6 によって膜 3 1 4 に戻るようリダイレクトされる光線 3 0 5 - 1 s 及び 3 0 5 - 2 s を生成する。これらの光線は、再度膜と相互作用して、複光路方式 s 偏光成分 2 2 0 8 s を生成し、それは検出することができる。p 偏光成分 3 0 3 p は、実質的に同一のパスを辿るが、上述のように、s - 偏光成分とは異なる態様で膜 3 1 4 と相互作用する。

【 0 1 3 8 】

1 つの膜スタックに対して、s 偏光反射率は、次式となる。

$$r_s = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}} \times \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}} \quad (25)$$

【 0 1 3 9 】

そして、p 偏光反射率は、次式となる。

$$r_p = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} \times \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} \quad (26)$$

10

ここで、 θ は、入射角

【 0 1 4 0 】

2つの偏光が混ぜられる場合には、検出器により感知された結果の振幅反射率は、次式のように書くことができる。

$$r_{\text{eff}} = (r_s e^{i\omega t} + r_p e^{i(\omega + \Delta\omega)t}) \times \cos 45^\circ \quad (27)$$

$$R_{\text{eff}} = r_{\text{eff}} \times r_{\text{eff}}^* \times (\cos 45^\circ)^2 \quad (28)$$

【 0 1 4 1 】

$\cos 45^\circ$ は、検出器での2つの偏光の混合を表している。方程式(4)の代数操作は、手に負えず、324の分子項と81の分母項とを作り出し、従って、方程式はモデル化される。図24には、単光路アプローチ及び複光路方式アプローチの比較のプロットが示される。その図から、標準の単光路ヘテロダイン反射率測定(参照プロット2402と単光路プロット2404との違い)と、より高い感度の複光路方式ヘテロダイン反射率測定(参照プロット2402と複光路方式プロット2406との違い)の感度の違いが分かる。予想通り、所与の膜厚に対しては、複光路方式ヘテロダイン反射率測定によって感知された位相シフトは、単光路ヘテロダイン反射率測定の2倍である。これは、0.7の分解能(10%の窒化物形成を有するSiON膜の場合)は、0.2を分解することが可能な検出器によって得ることができることを意味している。これは、既製の電子機器(例えば、ベクトル電圧計)の性能の範囲内である。

20

30

【 0 1 4 2 】

複光路方式アプローチは、膜面からのp偏光された光線のよりよい抑制を提供するが、s偏光された光線の強度も、対応して多少減少する。シミュレーションにおいて示されたように、これは、縞コントラストにおける多少の減少を引き起こす。現在の分析では、膜の中部で作出された“定在波”は、節及び腹において、いかなるインデックスの違いにも寄与しないであろうことを前提としている。ここで利用される波長及びヘテロダイン反射率計のパワーレベルを考慮すると、それは、妥当な前提である。

【 0 1 4 3 】

図3A、図16、及び図22の現在の反射率計の典型的な具体例の図を再度見ると、位相シフト検出器362及び1690で検出された測定された位相シフトの精度は厚さ寸法の精度に大きく依存することを理解することが重要である。これらのコンポーネントの操作が説明されるであろう。本発明の位相シフト検出器の典型的な具体例の操作は(I_{het} と I_{ref} の間で位相差を求めるための)ヘテロダイン位相シフト検出器又は(I_{het} と I_{GI} の間で位相差を求めるための)格子位相シフト検出器のどちらにも適用可能であるので、信号は、総称的に参照されるであろう。

40

【 0 1 4 4 】

しかし、位相差が信号の間で正確に決定することができる前に、信号は、位相比較をするために、よりよい形式に変換されるべきである。これは、信号を変換するための“フィット関数”の基準として方程式(1)を用いることで実現される。

【 0 1 4 5 】

50

図 25 は、本発明の典型的な具体例に従って、2つの信号の間の位相差を決定するためのプロセスを描くフローチャートである。この方法は、それらの各信号から θ_{hetm} 及び / 又は θ_{grtm} を計算するのに有用である。最初に、信号データは、DC 成分パラメータなどのフィット関数においてパラメータを取り除くために前処理されるべきである。これは、データ信号を平均集中し、それから、振幅をそれぞれの最も高い振幅値へ標準化することによって達成される (ステップ 2502)。次に、参照データは、フィット関数 $I_r = B_r \cos(\theta_r t + \phi_r)$ に当てはめられる (ステップ 2504)。ここで、:

B_r は、参照信号振幅

θ_r は、2つのヘテロダイン信号の間の位相差

ϕ_r は、2つのヘテロダイン信号の角周波数の差

【0146】

その後、サンプルデータは、同様なフィット関数: $I_s = B_s \cos(\theta_s t + \phi_s)$ に当てはめられる (ステップ 2506)。ここで、

B_s は、サンプル信号振幅

θ_s は、2つのヘテロダイン信号の間の位相差

ϕ_s は、2つのヘテロダイン信号の角周波数の差

【0147】

参照及びサンプルデータを同様なフィット関数に当てはめると、2つの信号の間の位相角が $\theta = \theta_s - \theta_r$ として検出される (ステップ 2508)。 θ を検出するための様々な方法は、直下のように存在し、それらの成分は、必要に応じて、図 26A 26D に図示される。

【0148】

1つの典型的な具体例に従って、参照及びサンプルデータの間の位相角は、2つの信号への相互相関法を活用することによって決定することができる。このオプションを用いると、相互相関関数は、最初に、2つのデータのシリーズに当てはめられる (例えば、マトラブ (MatLab) などのアルゴリズム開発用の高級テクニカルコンピューティング言語及びデータ視覚化で表される $xcorr$ (データ1、データ2)。MatLab は、登録商標であり、マサチューセッツ州ナティックのマスワークス (MathWorks) インコーポレイテッド社から入手可能である)。次に、相互相関が最大値を有する所で、遅延を求める。最終的に、参照及びサンプル信号の間の位相シフトは、うなりサイクル (即ち、遅延 / (デジタル化レート \times うなり周波数)) におけるデータポイントの数に対する遅延の比率から決定される。

【0149】

より具体的には、相互相関手続は、2つのシリーズが相関している程度を評価する方法である。数学的には、手続は、次のように定義される。

$$r = \frac{\sum_i [(x(i) - mx) * (y(i - d) - my)]}{\sqrt{\sum_i (x(i) - mx)^2} \sqrt{\sum_i (y(i - d) - my)^2}} \quad (29)$$

【0150】

ここで、 $x(i)$ 及び $y(i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$) は、分析されている2つのシリーズを示し、 d は、相互相関が評価される遅延である。値 mx 及び my は、対応するシリーズの平均である。相互相関は、一般に $r(d)$ として表現される。

【0151】

本質的に、参照及びサンプル信号のデジタル化されたデータは、うなり周波数 f_u に対するデジタル化レートの比率とともに収集されて、位相角の分解能を決定し、従って、データは、要求された位相角分解能より大きいレートでデジタル化されなければならない。収集されたデータ (サンプルの N 番号) の長さは、ノイズ低減法を適用できる程度に十分長くなければならない。システムにおけるドリフトがない場合には、より長い収集時間が

10

20

30

40

50

好ましい。

【0152】

次に、相互相関関数は、2つのデータシリーズに適用される。

相互相関計算のための典型的なコードは、以下で示される。

```
[c, lags] = xcorr(data(:, 1), data(:, 2))
```

【0153】

次は、相互の相互関係が最大値を有する選択遅延。

相互相関関数の最大値は、以下の典型的なコードによって計算される：

```
[Y, I] = max(abs(c))
maxlags = lags(I)
```

10

【0154】

最終的に、遅延値は、うなり周波数生産高に対するデジタル化レートの比率に対して遅延値を比率で示すことによって、角度に変換可能な分数の位相を与える位相遅れ値に変換され、それは、角度に変換することができる。

【0155】

実際、以上に記載された手続は、2回実行される。最初は、光学部品又は電子機器のためのいかなる体系的な位相シフトをも取り除くために試料が取り付けられない無効な測定である。2回目は、サンプルが取り付けられ、位相シフトが試料膜のために直接決定されるであろう。

【0156】

20

或いは、図26Aに描かれるように、参照RF1、及び試料RF2信号は、時間間隔カウンタ2602に送られることができ、0交差などの信号（スタートT1とストップT2との間の）信号中の2つの参照時点間の時間が測定される。また、信号の周期も測定される。時間差と期間との関係は、位相シフトを与える。

【0157】

図26Bに描かれた参照及び試料信号結果の間で位相シフトを決定するためのさらに別のアプローチに従って、信号RF1及びRF2がミキサー2612に送られ、和周波数及び差周波数が作られる。信号RF1及びRF2が同じ周波数を有するので、差周波数は電圧であり、それは位相差に比例する。また、任意的に、ミキサー2612において信号が同じ初期位相を有するようにセットするために、位相シフト器2610が含まれ、その結果、位相変化後の測定をオフセットなしですることができ、ノイズを減らすためのアウトプットのローパスフィルタ2614が含まれ得る。

30

【0158】

図26Cに描かれるアプローチの変更例において、アウトプットは、ミキサー2612でロックされた位相を維持するために増幅器2616を通して位相シフト器2610にフィードバックされる。ここで、信号は、フィードバック信号であり、それは、位相差に比例する。

【0159】

位相差を決定するためのさらに他のメカニズムに関して、図26Dに描かれるように、参照RF1及び試料RF2信号は、発振器2630によって設定された共通の基準周波数で別のミキサー2612及び2622にそれぞれ送られる。ミキサー2612及び2622から得られるうなり周波数は、時間間隔カウンタ2632に送られる。カウンタ2632によって決定されたうなり信号の時差は、位相差と関係する。

40

【0160】

図27は、本発明のさらに他の典型的な具体例に従う、離散フーリエ変換（DFT）を用いて得られ得る2つの信号の間の位相差（例えば、 θ_{hetm} 及び/又は θ_{grtm} ）を測定するためのプロセスを描くフローチャートである。フローチャートは、ヘテロダインされた参照信号における位相差を計算し（ステップ2702 2708）、続いて、ヘテロダインされた測定信号における差を計算すること（ステップ2710 2716）を描くが、実際問題として、本発明の精神及び範囲から逸脱することなく、これらの2回の計算

50

は、平行して又は描かれたものとは逆に行われ得る。さらに、このプロセスは、任意の2つの信号の間の位相差を決定するのに有用であり、例えば、 hetm 検出器362及び/又は grtm 検出器1690で実行されるような参照信号 I_{ref} と測定信号 I_{het} との間、及び/又は、測定信号 I_{het} と格子信号 I_{Gl} との間である。

【0161】

いずれにせよ、ヘテロダインされた信号は、デジタイザに供給され、それは、十分に小さなサンプリング間隔 t で各信号をサンプリングし、サンプリングレートは、うなり周波数の2倍を超える(ステップ2702と2710)。各デジタイザのアウトプットは、信号ブロック ref 及びブロック het の多くの振動周期を代表する n 個のデータサンプルのそれぞれのブロックを蓄積するデジタル信号プロセッサに供給される。デジタル信号プロセッサに送られたデータは、形式 u_r である。ここで、 $r = 1, 2, 3, \dots, n$ 。効率的な処理のために、 n (ブロック中のサンプルの数)は、好ましくは、2の累乗の積分である。データブロックがより長ければ、位相を決定することができる精度が高くなるであろう。

10

【0162】

次に、デジタル信号プロセッサは、各ブロック(DFT_{het} 及び DFT_{ref})の DFT を計算する(ステップ2704及び2712)。 DFT アウトプットは、いずれの場合にも、 n 個の一連の複素数 v_s からなり、ここで、 s は $1, 2, 3, \dots, n$ である。

【0163】

シリーズの前半からの値のみを考慮する必要がある。位相シフトを決定するために、次の等式を殆ど満たす s の値のみが識別される必要がある(ステップ2710及び2714)。

20

$$\Delta\omega = \frac{2\pi(s-1)}{n\Delta t}$$

最終的に、各ブロック、ブロック ref 、及びブロック het に対して、測定された、参照又は格子信号のいずれかのために、複素数 v_s の虚数成分と複素数 v_s の実数成分との比率の逆タンジェント、即ち、次式から位相が計算される(ステップ2708と2716)。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(v_s)}{\text{Re}(v_s)} \right)$$

30

【0164】

各信号の既知の位相とともに、任意の2つの位相差が計算され得る。；即ち、 $\text{hetm} = \text{het} - \text{ref}$ ；又は $\text{grtm} = \text{Gl} - \text{het}$ である。そして、プロセスが終了する。

【0165】

以下の請求項における、対応する構造、素材、行為、及び全ての方法又はステップの同等なもの、さらに、機能要素は、具体的に請求される他の請求された要素と組み合わせて機能を実行するための任意の構造、素材、又は行為でも含むことを意図している。本発明は、堆積及びエッチングのプロセスに関して議論されたが、適用は、広範囲に及んでいる。例えば、さらに他の典型的な具体例に従って、本発明は、CMP後のウェハの薄いCu残留物などの残りの残留物に関してウェハ表面を検査するのに応用され得る。Cuを有する領域は、Cuのない隣接領域より高い位相シフト ϕ_m を示すであろう。当業者は、直ちに本発明を理解し、他の用途への応用を理解するであろう。

40

【0166】

本発明の詳細は、図示及び説明の目的のために示されているが、開示された形式の発明を完全に網羅することやそれに制限されることを意図したものではない。当業者にとって、発明の範囲及び精神を逸脱することなく、多くの変更及び変形が明らかになるであろう。具体例は、発明の原理を最もよく説明し、且つ、意図された特定の使用に適するように様々な変更を伴った様々な具体例の発明を他の当業者が理解することができるために、選

50

択され説明された。

【図面の簡単な説明】

【 0 1 6 7 】

【図 1】従来技術において一般に知られているヘテロダイン反射率計の図である。

【図 2】従来技術の一般的なヘテロダイン干渉計の測定信号及び参照信号の図であり、測定信号及び光路長変化によって引き起こされた測定信号に対する位相シフトを示す。

【図 3 A】本発明の典型的な具体例に従う、薄膜の厚さを測定するための、ヘテロダイン反射率計の図である。

【図 3 B】光の角周波数 ω を有する s 偏光成分と光の角周波数 $\omega + \Delta\omega$ を有する p 偏光成分とを含み、直線偏光された反射を膜とともに示す図である。

10

【図 4】直角入射において取られたシミュレーション結果の強度対時間のプロットを示す図である。

【図 5】 20.0° の入射角度において取られたシミュレーション結果の強度対時間のプロットを示す図である。

【図 6】 60.0° の入射角度において 2 つの異なる膜厚に関して取られたシミュレーション結果の強度対時間のプロットを示す図である。

【図 7】 60 度の入射角の、推定の膜厚と実際の膜厚との比較の図である。

【図 8】薄膜の実際の及び測定された（概算された）厚さの間のエラー量を示すエラー対入力された厚さの比較の図。

【図 9】 0 から 1000 の間の厚みに対する、 60° の入射角に対する、 632 nm の光源波長に対する、補正された膜厚及び実際の膜厚の比較の図。

20

【図 10】 0 から 1000 の間の厚みに対する、 60° の入射角に対する、 404 nm の光源波長に対する、補正された膜厚及び実際の膜厚の比較の図。

【図 11】本発明の典型的な具体例に従う、ヘテロダイン位相シフトの大きさを測定するための位相シフト補正アルゴリズムを決定する方法を描くフローチャートである。

【図 12 A】本発明の典型的な具体例に従う、ヘテロダイン反射率計の信号から非常に正確な膜厚測定を得るためのプロセスのフローチャートである。

【図 12 B】本発明の典型的な具体例に従う、ヘテロダイン反射率計の信号から非常に正確な膜厚測定を得るためのプロセスのフローチャートである。

【図 13】溝掘りされた複数層のスタックの図である。

30

【図 14 A】 0 から 2000 の厚さ間隔に亘って、入力された厚さの関数として予測される厚さのプロットを描く図である。

【図 14 B】 0 から 2000 の厚さ間隔に亘って、入力された厚さの関数として予測される厚さのプロットを描く図である。

【図 14 C】 0 から 2000 の厚さ間隔に亘って、入力された厚さの関数として予測される厚さのプロットを描く図である。

【図 14 D】 0 から 2000 の厚さ間隔に亘って、入力された厚さの関数として予測される厚さのプロットを描く図である。

【図 15 A】 0 から 2000 に亘る厚みに対する、 60° の入射角に対する、 632 nm の光源波長に対する、入力された厚さの関数としての補正された膜厚のプロットを描く図。

40

【図 15 B】 0 から 2000 に亘る厚みに対する、 60° の入射角に対する、 632 nm の光源波長に対する、入力された厚さの関数としての補正された膜厚のプロットを描く図。

【図 16】本発明の典型的な具体例に従って、膜の屈折率のために動的にアップデートされた値を用い、エラー補正された膜厚を得るための、組み合わせのヘテロダイン反射率計及び格子干渉計の図である。

【図 17 A】格子に関する作用の原理を描く図であり、検出された光ビームの少なくとも一部が参照信号及び測定信号の両方から位相シフトし得ることを示す。

【図 17 B】格子に関する作用の原理を描く図であり、検出された光ビームの少なくとも

50

一部が参照信号及び測定信号の両方から位相シフトし得ることを示す。

【図 1 8】測定信号 I_{het} 及び参照信号 I_{ref} の関係をヘテロダイン位相シフト ϕ_m とともに示す図。

【図 1 9】測定信号 I_{het} 及び参照信号 I_{ref} の関係を格子位相シフト ϕ_{grt} とともに示す図。

【図 2 0】本発明の典型的な具体例に従って、ヘテロダイン位相シフト測定結果を補正するためのヘテロダイン位相シフト補正アルゴリズムと、格子位相シフト測定結果を補正するための格子位相シフト補正アルゴリズムとを同時に判断するためのプロセスを描く図。

【図 2 1 A】ヘテロダイン反射率計信号から補正された膜厚を得るためのプロセスのフローチャートであり、厚さ計算の屈折率成分が本発明の典型的な具体例に従って動的にアップ

10

デートされる。

【図 2 1 B】ヘテロダイン反射率計信号から補正された膜厚を得るためのプロセスのフローチャートであり、厚さ計算の屈折率成分が本発明の典型的な具体例に従って動的にアップ

デートされる。

【図 2 2】本発明の典型的な具体例に従う、複光路方式アプローチを利用する薄膜の厚さを測定するためのヘテロダイン反射率計及び格子干渉計の図。

【図 2 3】位相シフトを増大させることによって感度を高めるための複光路方式アプローチの原理を描く図。

【図 2 4】参照位相と、単光路アプローチ及び複光路方式アプローチを用いて得られた位相との関係を示す図。

20

【図 2 5】本発明の典型的な具体例に従って、2つの信号の間の位相差を決定するためのプロセスを描くフローチャートである。

【図 2 6 A】本発明の典型的な具体例に従う、 ϕ_m を検出するための様々な方法を示す図。

【図 2 6 B】本発明の典型的な具体例に従う、 ϕ_{grt} を検出するための様々な方法を示す図。

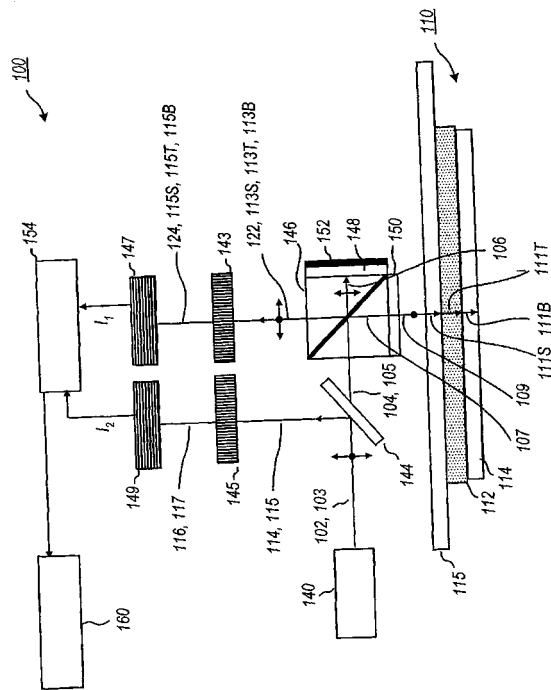
【図 2 6 C】本発明の典型的な具体例に従う、 ϕ_m を検出するための様々な方法を示す図。

【図 2 6 D】本発明の典型的な具体例に従う、 ϕ_{grt} を検出するための様々な方法を示す図。

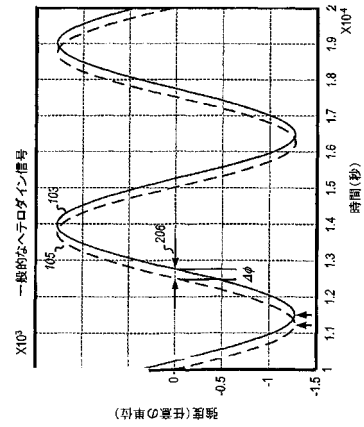
30

【図 2 7】本発明のさらに他の典型的な具体例に従う、離散フーリエ変換 (DFT) を用いた2つの信号の間の位相差 (例えば、 ϕ_{hetm} 及び / 又は ϕ_{grtm}) を測定するためのプロセスを描くフローチャート。

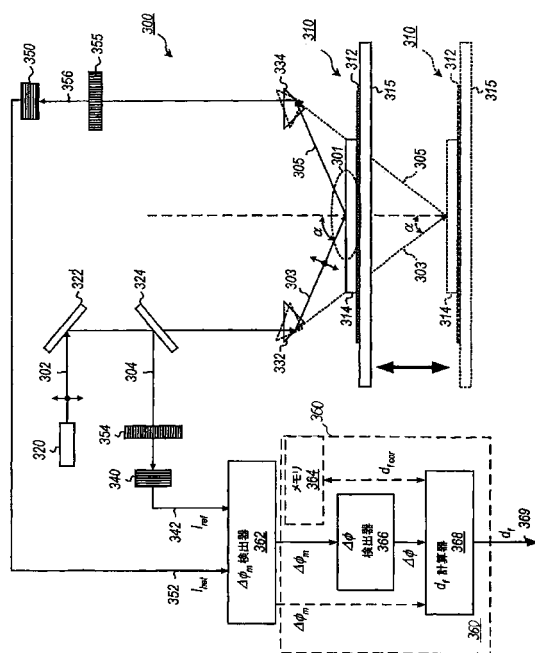
【図 1】



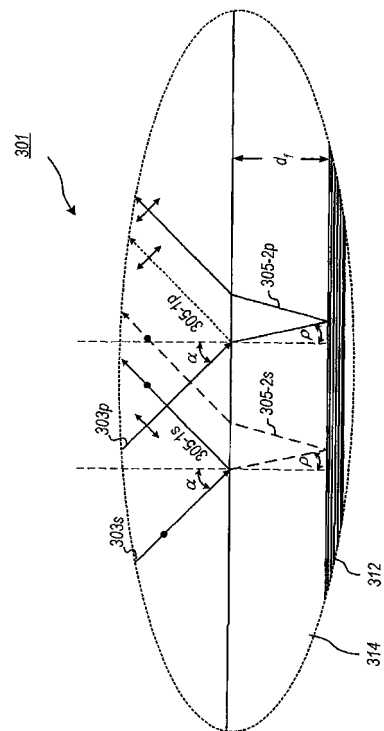
【図 2】



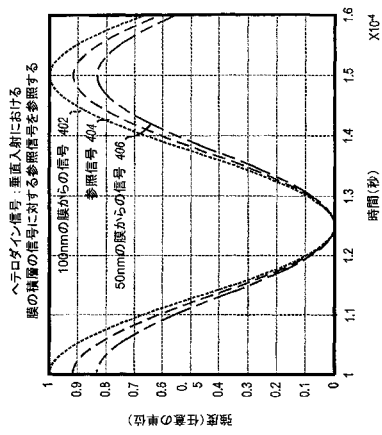
【図 3 A】



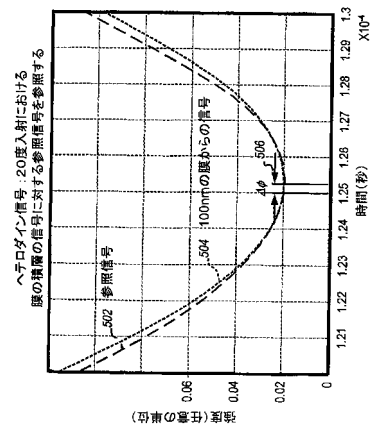
【図 3 B】



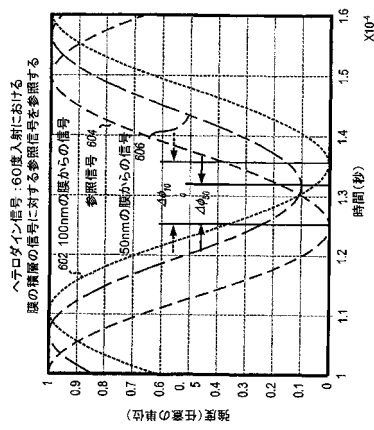
【図 4】



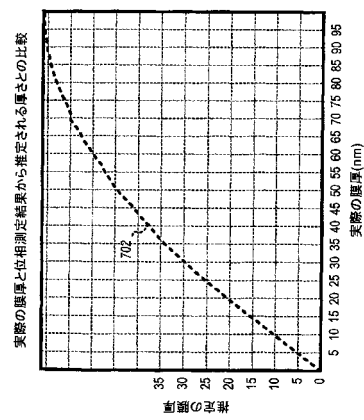
【図 5】



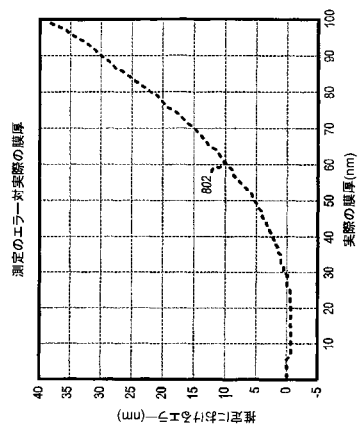
【図 6】



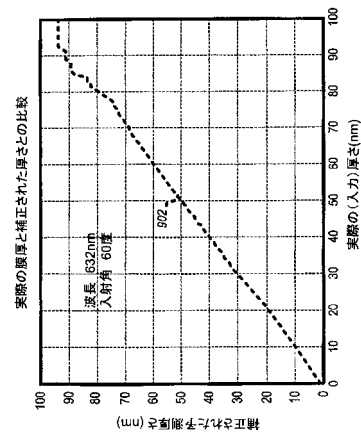
【図 7】



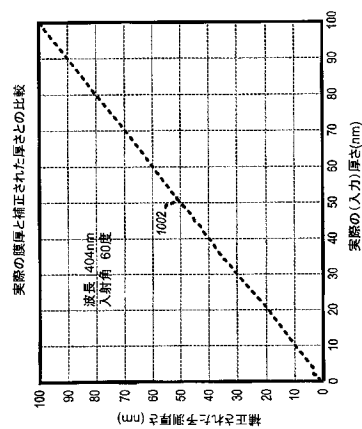
【図 8】



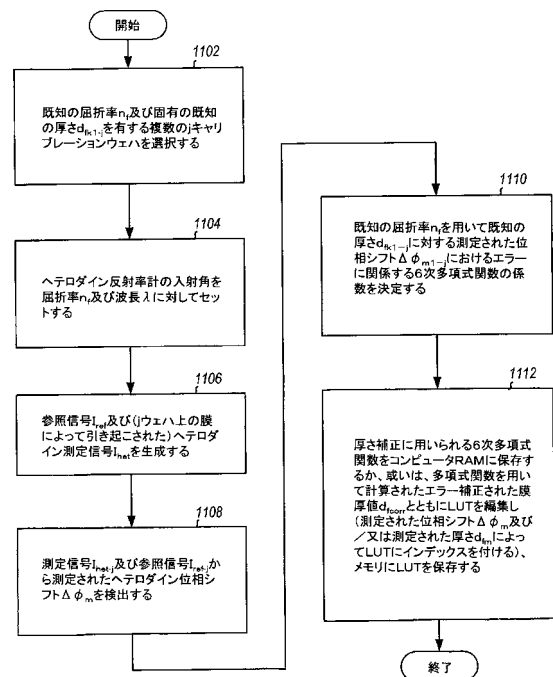
【図 9】



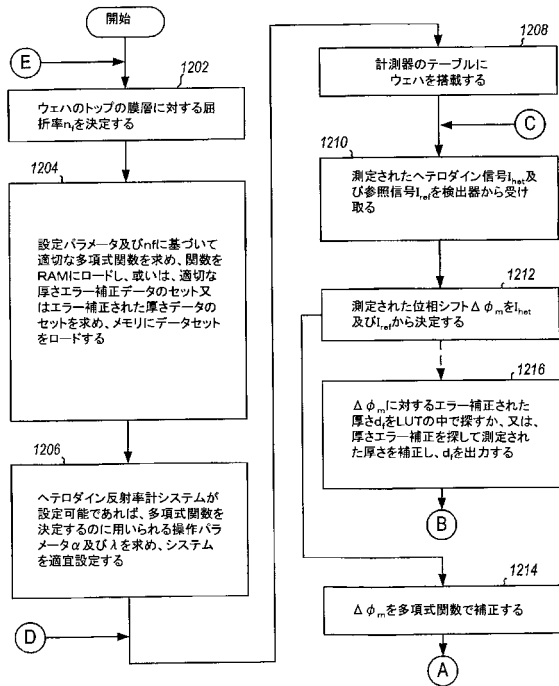
【図 10】



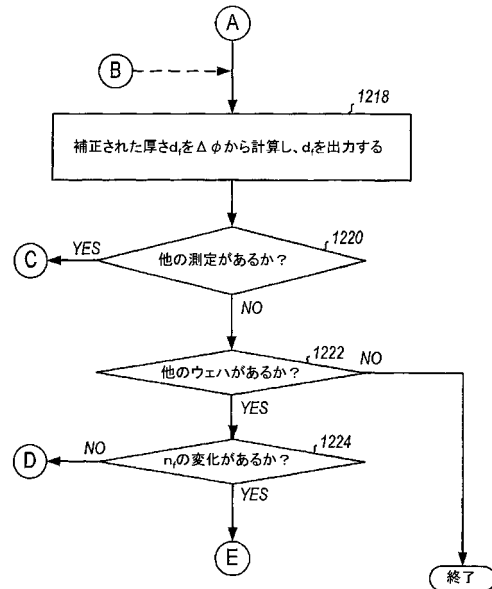
【図 11】



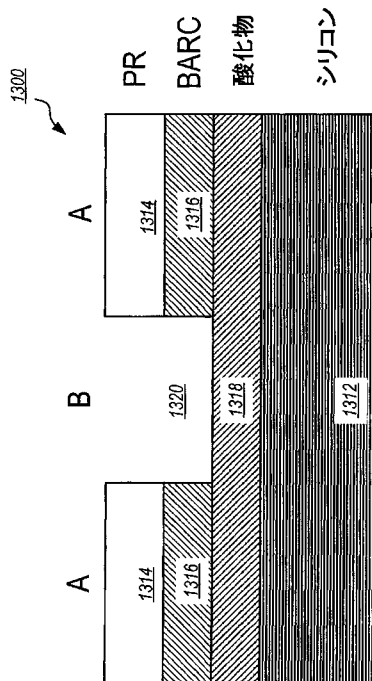
【図 12 A】



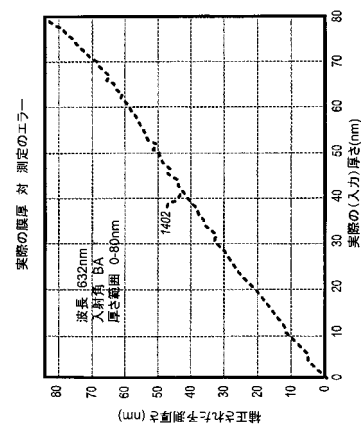
【図 12 B】



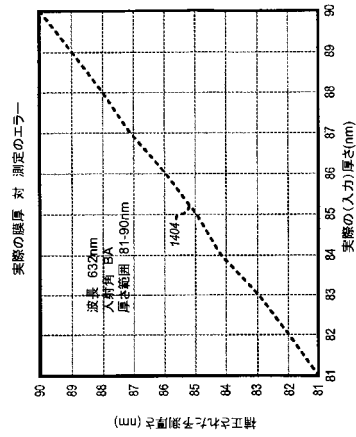
【図 13】



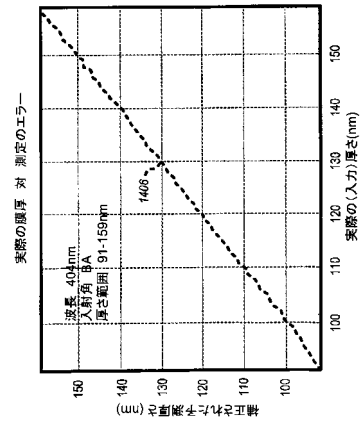
【図 14 A】



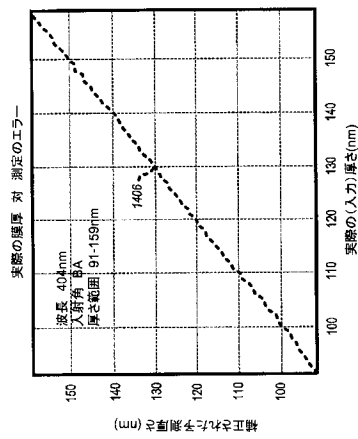
【図 1 4 B】



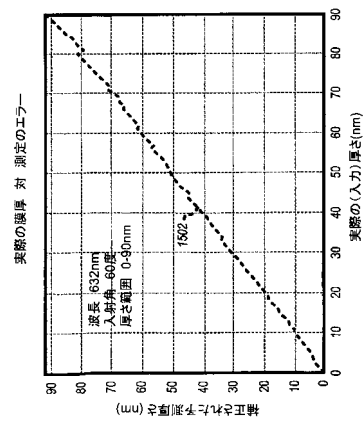
【図 1 4 C】



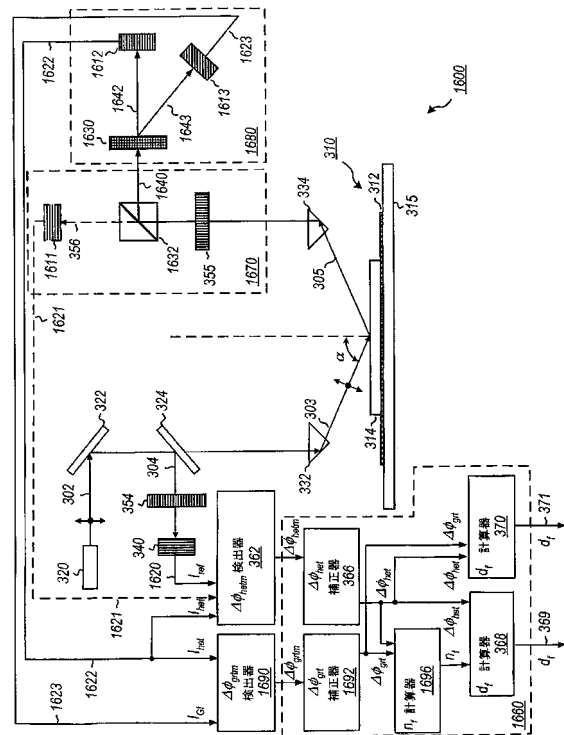
【図 1 4 D】



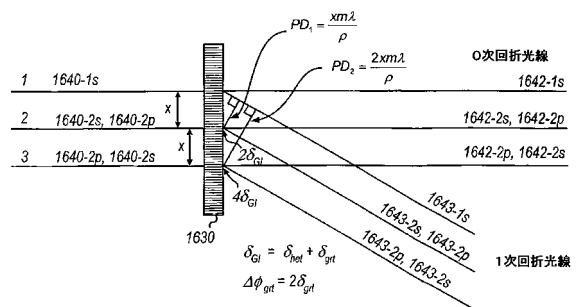
【図 1 5 A】



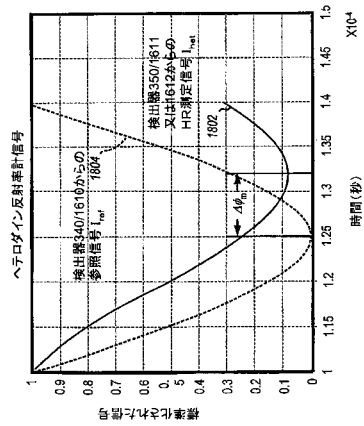
【 図 1 6 】



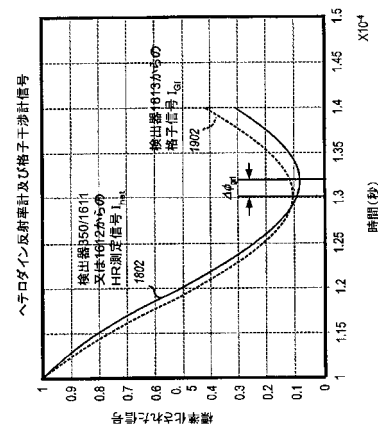
【 図 1 7 B 】



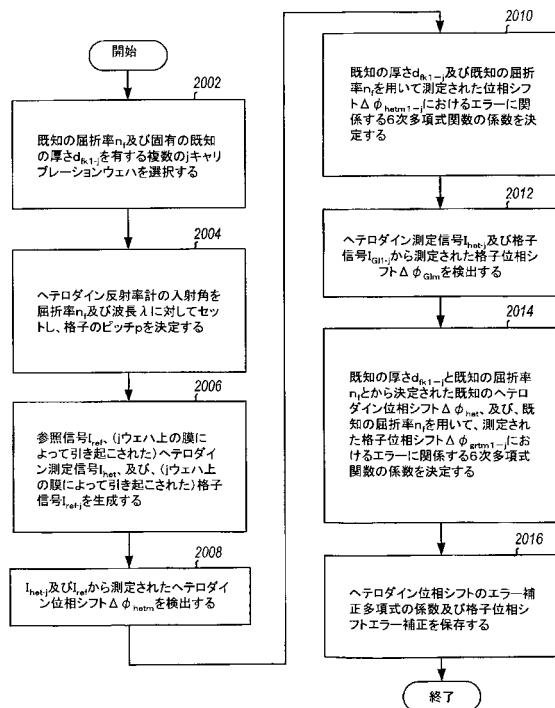
【図 18】



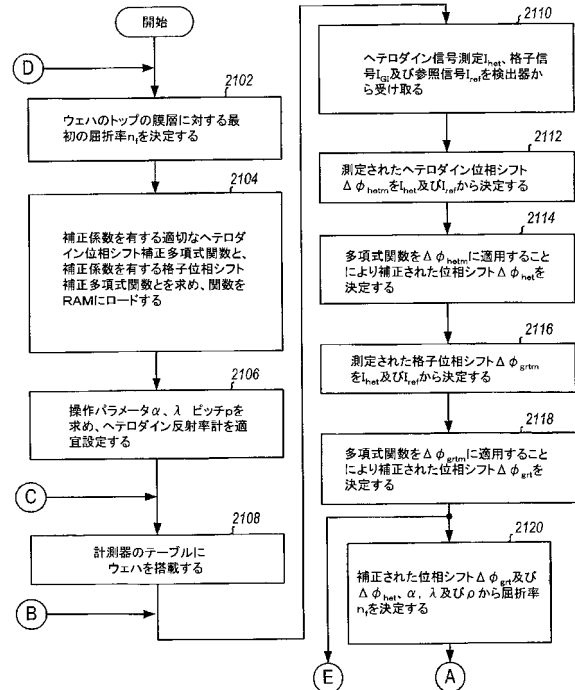
【図 19】



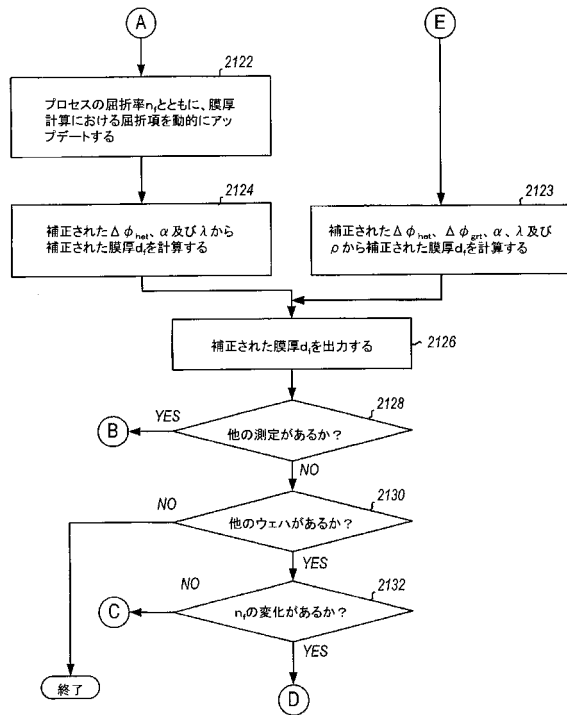
【図 20】



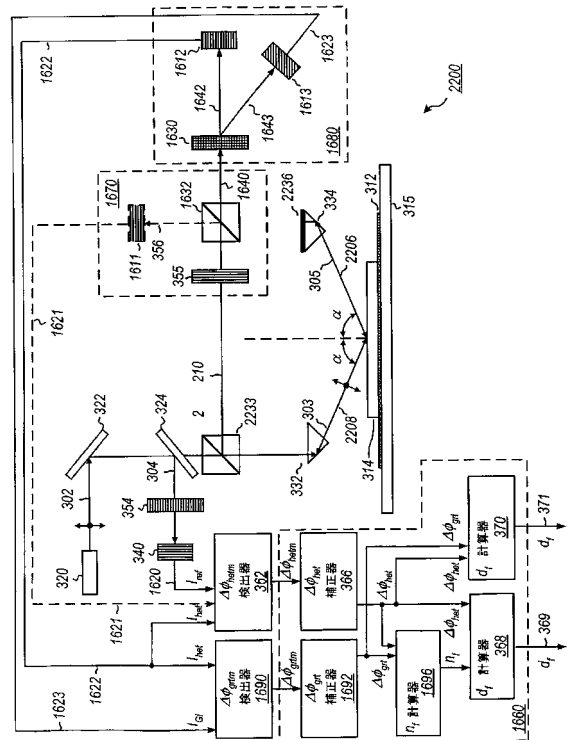
【図 21 A】



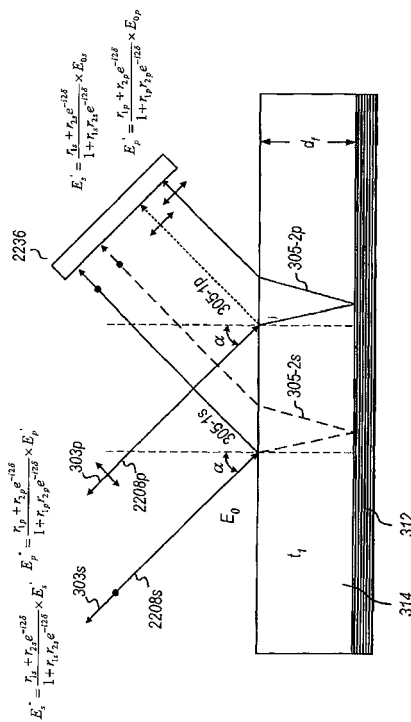
【図 2 1 B】



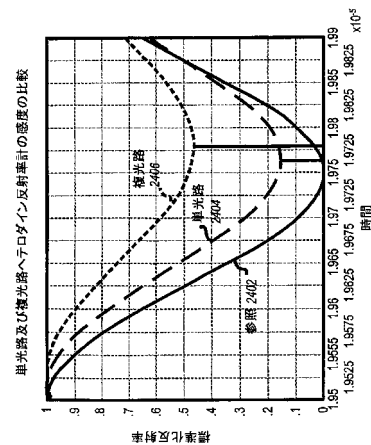
【図 2 2】



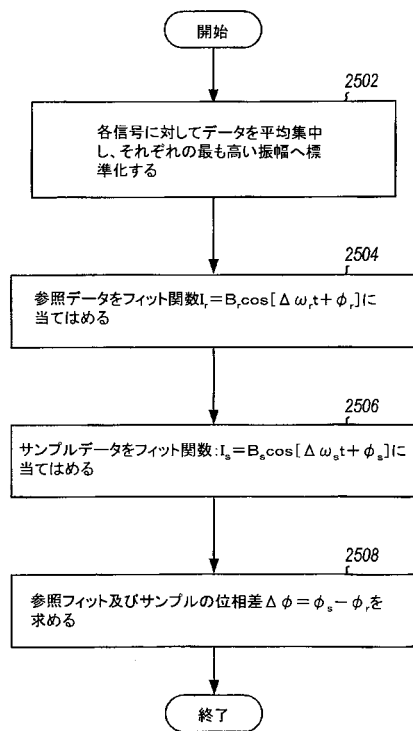
【図 2 3】



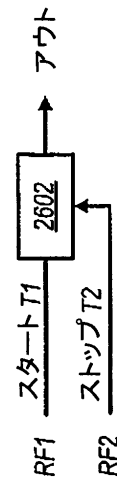
【図 2 4】



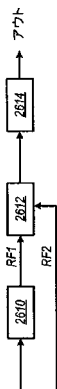
【図 25】



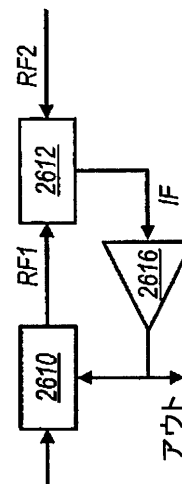
【図 26 A】



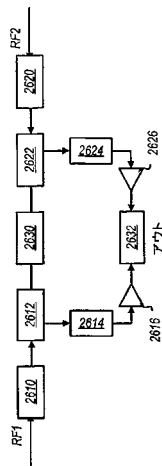
【図 26 B】



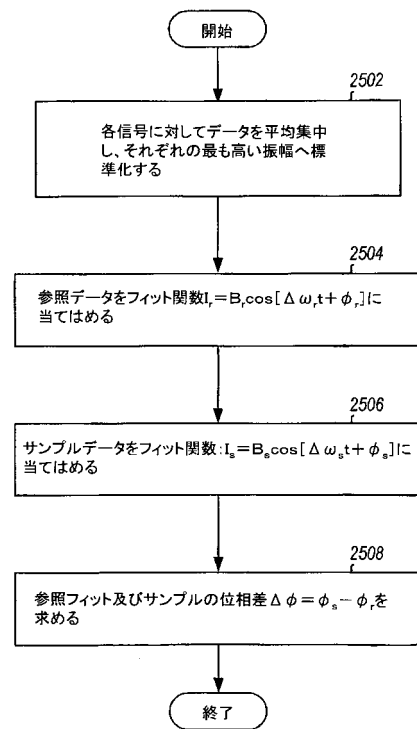
【図 26 C】



【図 26 D】



【図 27】



フロントページの続き

- (72)発明者 アイヤー, アルン アナンス アイヤー
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 5 3 9 フレモント, ドレリタ シーティー. 4 3
- (72)発明者 メロニ, マーク エー.
アメリカ合衆国 テキサス州 7 5 0 2 8 フラワー マウンド, ツリー ライン ロード 1 6
1 3
- (72)発明者 ハーベイ, ケネス シー.
アメリカ合衆国 テキサス州 7 5 0 6 ダラス # 1 9 1 5 アメスブリー ドライブ 5 6 5
7
- (72)発明者 クエニー, アンドリュー ウィークス
アメリカ合衆国 テキサス州 7 5 2 0 6 ダラス, モーニングサイド アベニュー 5 6 3 0

審査官 有家 秀郎

- (56)参考文献 特開昭 6 3 - 1 2 8 2 1 1 (J P , A)
特開平 0 8 - 2 7 1 2 3 0 (J P , A)
特開平 0 6 - 1 4 8 0 8 6 (J P , A)
特開平 0 2 - 0 2 1 2 0 3 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 0 3 5 3 1 6 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

G01B 11/00-11/30

G01N 21/27