

明 細 書

発明の名称：電気信号計測装置及び電気信号計測方法

技術分野

[0001] 本開示は、電気信号の時間波形の計測を行う電気信号計測装置、及び電気信号計測方法に関するものである。

背景技術

[0002] 電気信号の時間波形を計測する装置として、オシロスコープが用いられている。現在、オシロスコープの計測帯域は上昇しており、最速で100GHzを超える帯域を有するものも市販されている。また、微弱な電気信号の時間波形について計測を行うために、単位時間当たりの積算回数を多くできる高速積算機能（ホスファーマード）を用いる場合を考えると、入力帯域は20GHz程度、積算速度は最速で20kHz程度である。

先行技術文献

特許文献

- [0003] 特許文献1：国際公開第2022/064798号
特許文献2：国際公開第2007/136681号
特許文献3：欧州特許出願公開第0197196号
特許文献4：欧州特許出願公開第0344986号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0004] 半導体デバイスの検査において、電気信号の時間波形の計測に上記したオシロスコープが用いられている。半導体デバイスの動作状態等についての検査方法として、例えばEOP（Electro Optical Probing）、EOFM（Electro Optical Frequency Mapping）、またはLVP（Laser Voltage Probing）、LVI（Laser Voltage Imaging）などの方法が知られている（例えば、特許文献1、2を参照）。
- [0005] EOPでは、所定周期の電圧パターンの印加によって状態が時間変化して

いる半導体デバイスに対して裏面から所定波長のプローブ光を照射し、その反射光の強度の時間変化を計測することにより、半導体デバイスの動作状態などについての検査を行う。また、E O F Mでは、半導体デバイスからの反射光についてスペクトラムアナライザを用いて周波数解析を行い、所定周波数で動作している部位についての画像化を行う。

[0006] 上記したE O P、E O F Mなどの半導体検査方法では、反射光を検出した光検出器から出力される電気信号の時間波形の計測にオシロスコープが用いられる。一方で、L S Iの性能は上昇し続けており、そのような半導体デバイスの検査では、例えば10 p s単位のジッタを計測することが必要となる場合がある。しかしながら、従来のオシロスコープでは、このような高速での反射光の強度の時間変化に対応する電気信号の時間波形の計測を十分な精度で行うことは難しい。

[0007] また、上記の検査方法では、半導体デバイスからの反射光における電圧パターンの印加による強度の時間変化は微弱な場合がある。そのような場合、微弱な反射光の強度変化を十分なS / N比で計測するためには、光検出器から出力される電気信号の時間波形について多数回の積算、またはアベレーシングを行うことが考えられる。しかしながら、従来のオシロスコープでは、電気信号の高速での積算を行うことも困難である。このような高速での電気信号の時間波形の計測の問題は、半導体検査以外での電気信号の計測においても同様に生じる。

[0008] 実施形態は、電気信号の時間波形を高速で計測することが可能な電気信号計測装置、及び電気信号計測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

[0009] 電気信号の時間波形の高速での計測について、電気信号を光信号に変換し、ストリークカメラを用いて光信号の計測を行うストリーク・オシロスコープの構成が考えられる（例えば、特許文献3、4を参照）。しかしながら、このようにストリークカメラを用いる構成について、本願発明者が詳細な検討を行ったところ、ストリーク管の光電面における入力光量密度の上限、ま

た、光信号の時間波形の積算計測を行う場合の光電面の劣化などの問題があることを見出し、本発明に到達した。

[0010] 実施形態は、電気信号計測装置である。電気信号計測装置は、（１）所定波長の計測光を供給する計測光源、及び時間波形の計測対象として入力された電気信号に基づいて計測光を強度変調する光変調器を有し、光変調器による変調後の計測光を、電気信号の時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する信号変換部と、（２）信号変換部から出力された光信号の時間波形についての計測を行う波形計測部と、（３）波形計測部による光信号の時間波形の計測結果に基づいて電気信号の時間波形を求める波形解析部とを備え、（４）波形計測部は、光信号の入力に応じて電子を生成する光電面、電気信号の時間波形に応じて設定された掃引周期で光電面からの電子を所定の掃引方向に掃引する掃引電極、及び掃引電極によって掃引された電子を入力して光信号の時間波形を示す蛍光像を生成する蛍光面を含むストリーク管と、ストリーク管の蛍光面において生成された蛍光像を撮像して波形画像を出力する撮像素子と、光信号を光電面へと入力する入力光学系とを有し、（５）波形解析部は、撮像素子から出力された波形画像に基づいて電気信号の時間波形を求めるとともに、（６）波形計測部の入力光学系は、光信号を、掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として光電面へと入力する。

[0011] 実施形態は、電気信号計測方法である。電気信号計測方法は、（１）時間波形の計測対象として入力された電気信号に基づいて、所定波長の計測光を強度変調する光変調器を用い、光変調器による変調後の計測光を、電気信号の時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する信号変換ステップと、（２）信号変換ステップで出力された光信号の時間波形についての計測を行う波形計測ステップと、（３）波形計測ステップによる光信号の時間波形の計測結果に基づいて電気信号の時間波形を求める波形解析ステップとを備え、（４）波形計測ステップは、光信号の入力に応じて電子を生成する光電面、電気信号の時間波形に応じて設定された掃引周期で光電面からの

電子を所定の掃引方向に掃引する掃引電極、及び掃引電極によって掃引された電子を入力して光信号の時間波形を示す蛍光像を生成する蛍光面を含むストリーク管を用い、ストリーク管の蛍光面において生成された蛍光像を撮像して波形画像を出力し、（５）波形解析ステップは、波形計測ステップで出力された波形画像に基づいて電気信号の時間波形を求めるとともに、（６）波形計測ステップにおいて、光信号を、掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として光電面へと入力する。

[0012] 上記した電気信号計測装置、及び電気信号計測方法では、時間波形の計測対象として入力された電気信号を、光変調器によって所定波長の光信号へと変換する。そして、光信号の時間波形をストリーク管を含む波形計測部によって計測し、得られた波形画像に基づいて電気信号の時間波形を求める。

[0013] このような構成によれば、電気信号を光信号に変換した後にストリーク管を含むストリークカメラを用いて波形計測を行うことにより、電気信号の時間波形を高速で計測することができる。また、上記構成では、光信号の生成に用いられる計測光の波長を適切に設定することにより、ストリーク管による光信号の波形計測を好適に行って、電気信号の時間波形を精度良く計測することができる。

[0014] さらに、上記構成では、波形計測部でストリーク管の前段に設けられている入力光学系について、光信号を、ストリーク管での掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として光電面へと入力するように構成している。これにより、例えば光信号を点状の光像として光電面へと入力する場合と比較して、入力光量密度を低減して光電面の劣化を抑制し、ストリーク管を用いた電気信号の計測を好適に実行することが可能となる。

発明の効果

[0015] 実施形態の電気信号計測装置、及び電気信号計測方法によれば、電気信号の時間波形を高速で計測することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]図１は、電気信号計測装置の応用の一例である半導体検査装置の一実施

形態の構成を概略的に示すブロック図である。

[図2]図2は、電圧印加部、検査光学系、及び光計測部の具体的な構成の一例を示すブロック図である。

[図3]図3は、信号変換部及び波形計測部を含む電気信号計測装置の第1実施形態の構成を概略的に示すブロック図である。

[図4]図4は、信号変換部における光変調器の構成の一例を示す図である。

[図5]図5は、波形計測部におけるストリーク管の構成の一例を示す図である。

[図6]図6は、波形計測部の構成の一例を示す側面図である。

[図7]図7は、波形計測部における入力光学系の構成の一例を示す（a）上面図、及び（b）側面図である。

[図8]図8は、（a）ストリーク管の光電面に入射する光信号の光像を示す図、及び（b）蛍光面における電子像の掃引について示す図である。

[図9]図9は、ストリーク管の光電面に入力された光信号の光像に対応して、蛍光面において生成された蛍光像の一例を示す図である。

[図10]図10は、（a）信号変換部における光信号の生成がONの状態で取得された波形画像、及び（b）光信号の生成がOFFの状態で取得されたベース画像の一例を示す図である。

[図11]図11は、電気信号のオシロスコープでの計測結果、及び図3に示した電気信号計測装置での計測結果について示すグラフである。

[図12]図12は、（a）反射光の強度、（b）電気信号の強度、及び（c）光信号の強度の関係について示す図である。

[図13]図13は、波形計測部の入力光学系の構成の第1変形例を示す（a）上面図、及び（b）側面図である。

[図14]図14は、波形計測部の入力光学系の構成の第2変形例を示す（a）上面図、及び（b）側面図である。

[図15]図15は、波形計測部の入力光学系の構成の第3変形例を示す（a）上面図、及び（b）側面図である。

[図16]図16は、電気信号計測装置の第2実施形態の構成を示す図である。

[図17]図17は、ストリーク管における主掃引、及び戻り掃引について模式的に示す図である。

[図18]図18は、ストリーク管における計測期間、及び掃引周期の位相の設定の一例について示す図である。

[図19]図19は、電気信号計測装置の第3実施形態の構成を示す図である。

[図20]図20は、図19に示した構成における2種類の光信号の光電面への入力について示す図である。

[図21]図21は、電気信号計測装置の第4実施形態の構成を示す図である。

発明を実施するための形態

[0017] 以下、添付図面とともに、電気信号計測装置、及び電気信号計測方法の実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては、同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

[0018] 以下においては、まず、電気信号計測装置の具体的な応用の一例である半導体検査装置の構成について説明し、次に、半導体検査装置において用いられている電気信号計測装置の構成、動作等について説明する。なお、後述する電気信号計測装置の応用は、具体的には半導体検査に限られるものではなく、様々な構成における電気信号の時間波形の計測に広く適用することが可能である。

[0019] 図1は、半導体検査装置の一実施形態の構成を概略的に示すブロック図である。本実施形態による半導体検査装置1Aは、半導体デバイスDに対してプローブ光を照射して検査を行う装置であって、半導体検査部10、光計測部20、プローブ光源21、電気信号計測装置2A、制御装置50、入力部53、表示部54、及び走査制御部55を備えて構成されている。また、半導体検査装置1Aは、さらに、第2光計測部61、第2波形計測部62、及び周波数解析部63を備えている。

[0020] なお、以下の各図において、装置各部の間に示す二重線は、プローブ光、

反射光、計測光、光信号などの光の伝送路を示している。このような光の伝送路としては、好ましくはシングルモード光ファイバなどの光ファイバが用いられる。また、光の伝送路として、伝送条件に応じて、レンズやミラー等を用いた空間的な伝送路を用いてもよい。また、装置各部の間に示す一重線、及び矢印線は、電気信号、同期信号、トリガ信号、制御信号などの伝送路、または半導体デバイスDに対するプローブ光、反射光の光路を示している。

- [0021] 図1に示す半導体検査装置1Aによる検査対象の被検査デバイス(DUT: Device Under Test)となる半導体デバイスDは、任意の半導体デバイスとすることができるが、具体的には例えば、トランジスタ等のPN接合を有する集積回路(IC: Integrated Circuit)、あるいは大規模集積回路(LSI: Large Scale Integration)であるロジックデバイス、メモリデバイス、アナログデバイスを挙げることができる。
- [0022] また、半導体デバイスDとして、さらに、上記を組み合わせたミックスドシグナルデバイス、または、大電流用/高圧用MOSトランジスタ、バイポーラトランジスタ、IGBT等の電力用半導体デバイス(パワーデバイス)等を用いてもよい。また、半導体検査装置1Aによって行われる半導体デバイスDの検査は、例えばEOP、EOFM等の手法を利用したものであり、デバイス各部の動作状態の検証、故障箇所の特特定等を含む。また、検査対象となる半導体デバイスDの各部としては、例えば、電圧がかかっているトランジスタ、ダイオード、コンデンサ、配線等が挙げられる。
- [0023] 半導体検査部10は、検査光学系11、及び電圧印加部12を含んで構成されている。検査光学系11は、検査対象の半導体デバイスDに対して、プローブ光源21から光計測部20を介して供給される第1波長のプローブ光を照射する。また、検査光学系11は、半導体デバイスDでプローブ光が反射された反射光を光計測部20へと出力する。
- [0024] 半導体デバイスDへのプローブ光照射は、通常、デバイスの裏面側、例えばSi基板側から行われる。したがって、プローブ光としては、シリコンを

透過することが可能な波長の光が用いられる。この場合、プローブ光の第1波長は、1050nm以上5000nm以下の波長範囲内で設定することが好ましい。このようなプローブ光としては、具体的には例えば、波長1.3μmの光を用いることができる。

[0025] プローブ光源21から供給されるプローブ光は、コヒーレント光であってもよく、インコヒーレント光であってもよい。プローブ光源21としては、具体的には例えば、レーザ光源、SLD (Super Luminescent Diode)、ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源、LED (Light Emitting Diode) 等を用いることができる。

[0026] 電圧印加部12は、半導体デバイスDに対して、所定のテスト周期で電圧が繰り返して時間変化するテストパターンを印加する。このとき、テストパターンが印加された半導体デバイスDでは、電圧変化のテスト周期でデバイス各部の状態が時間変化する。光計測部20は、プローブ光源21から出力されたプローブ光を検査光学系11へと供給するとともに、検査光学系11から出力された半導体デバイスDからの反射光を入力する。半導体デバイスDからの反射光は、半導体デバイスDの状態の時間変化に応じて、その強度がテスト周期で時間変化する。

[0027] 図2は、電圧印加部12、検査光学系11、及び光計測部20の具体的な構成の一例を示すブロック図である。本構成例における電圧印加部12は、半導体テスト (LSIテスト) のテストヘッド12a、及びテストボード12bを有して構成されている。テストヘッド12aは、テストボード12bを介して半導体デバイスDを搭載し、半導体デバイスDに対して、所定の動作パルス信号を含み半導体デバイスDを駆動させるテストパターンを、上記したテスト周期で繰り返し印加する。

[0028] テスタヘッド12aは、例えば、半導体デバイスDに含まれるトランジスタ等を駆動するための動作パルス信号を発生させるパルスジェネレータと、動作パルス信号を半導体デバイスDに入力するテスト部と、電源とを有している。また、テストボード12bは、半導体デバイスDを搭載する半導体基

板である。テストボード 12b は、半導体デバイス D の動作に必要な周辺チップ、回路、及び端子等を有している。

[0029] 検査光学系 11 は、ステージ 14、走査光学系 15、結像光学系 16、及び対物レンズ 17 を有して構成されている。また、走査光学系 15、結像光学系 16、及び対物レンズ 17 は、ステージ 14 上に載置された状態で、暗箱 13 内に配置されている。対物レンズ 17 は、結像光学系 16 と、半導体デバイス D との間に配置されている。本構成例では、対物レンズ 17 として、複数の対物レンズが設けられており、それらはターレット 18 によって切り替え可能となっている。複数の対物レンズ 17 としては、例えば、低倍率（例えば 5 倍）の対物レンズと、高倍率（例えば 50 倍）の対物レンズとが設けられる。

[0030] 走査光学系 15 は、プローブ光源 21 から光計測部 20、及び光ファイバを介して入力されたプローブ光を結像光学系 16 へと導光する。光ファイバにおけるプローブ光の出力端は、光の反射を低減するために、APC 型であることが好ましい。走査光学系 15 は、例えばガルバノミラー、MEMS ミラー等の光走査素子を含む光スキャナを有して構成されており、走査制御部 55 による制御に基づき、半導体デバイス D に対するプローブ光の照射位置を走査、設定する。

[0031] 結像光学系 16 は、走査光学系 15 から入力されたプローブ光を、所定の光路で対物レンズ 17 へと導光する。対物レンズ 17 は、半導体デバイス D において設定された照射位置に対し、プローブ光を集光照射する。また、半導体デバイス D にプローブ光を照射することによって発生した反射光（戻り光）は、対物レンズ 17、結像光学系 16、走査光学系 15、及び光ファイバを介して、光計測部 20 へと入力される。この反射光の波長は、プローブ光と同じく第 1 波長である。また、対物レンズ 17 と半導体デバイス D との間には、必要に応じて固浸レンズを設置してもよい。

[0032] 半導体デバイス D からの反射光では、プローブ光の照射位置にある計測対象点において発生している電界や熱と、これに起因するキャリア密度の変化

等によって、プローブ光に対する反射率、吸収率が微妙に変化し（数10 ppm/V程度）、これによって、反射光の強度に微弱な時間変化が生じる。この反射光の強度の時間変化を計測することにより、半導体デバイスDについての検査を行うことができる。

- [0033] 光計測部20は、光カプラ22、光増幅器23、光分岐器24、光検出器25、及びACアンプ26を有して構成されている。光カプラ22は、光ファイバを介してプローブ光源21、光増幅器23、及び走査光学系15と光学的に結合されており、プローブ光源21から入力されたプローブ光を走査光学系15へと出力するとともに、走査光学系15から入力された半導体デバイスDからの反射光を光増幅器23へと出力する。また、光カプラ22と走査光学系15との接続には、例えばAPC用FCアダプタが用いられる。
- [0034] 光カプラ22としては、具体的には例えば、PBS型の光カプラ、サーキュレータ型の光カプラ等を用いることができる。光カプラ22がPBS型の光カプラである場合、走査光学系15において $\lambda/4$ 波長板を設けてもよい。また、光カプラ22がサーキュレータ型の光カプラである場合、走査光学系15において $\lambda/2$ 波長板を設けてもよい。走査光学系15では、上記した波長板の代わりにファラデーローテータを設けてもよい。また、光カプラ22として、光スプリッタを用いてもよい。
- [0035] 光増幅器23は、光カプラ22から入力された半導体デバイスDからの反射光の強度を利得飽和しない範囲、及び後段の光検出器25が飽和しない範囲で増幅し、増幅後の反射光を光分岐器24へと出力する。光増幅器23としては、具体的には例えば、半導体光増幅器、光ファイバ増幅器、固体光増幅器（SOA: Solid Optical Amplifier）、テーパ型光増幅器、ブースタ光増幅器等を用いることができる。また、光増幅器23として、結晶、ガス、液体等を増幅媒質とした光増幅器を用いてもよい。
- [0036] 光分岐器24は、光ファイバを介して光検出器25、第2光計測部61、及び光増幅器23と光学的に結合されており、光増幅器23から入力された反射光を、所定の分岐比で光検出器25及び第2光計測部61へと出力する

。光分岐器 24 としては、具体的には例えば、90 : 10 光スプリッタを用いることができる。この場合、光増幅器 23 からの光は、光分岐器 24 において、光検出器 25 及び第 2 光計測部 61 に対して、90 : 10 の分岐比で分岐される。また、光分岐器 24 と第 2 光計測部 61 との接続には、例えば FC コネクタが用いられる。

[0037] 光検出器 25 は、光分岐器 24 から入力された増幅後の反射光を検出し、その検出結果を示す電気信号（検出信号）を出力する。光検出器 25 から出力される電気信号は、半導体デバイス D からの反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する。光検出器 25 としては、例えば、高速での検出動作が可能な PIN フォトダイオード（PIN-PD）を用いることが好ましい。

[0038] 光検出器 25 として PIN-PD などの高速の光センサを用いる場合、基本的に、シングルモード光ファイバでの入力となる。このため、入力用光ファイバ、光カプラ等については、全てシングルモード光ファイバの組合せによって構成されることが好ましい。ただし、このような導光系は、ハーフミラー、偏光ビームスプリッタ、コリメータ等を組み合わせた光学系によって構成してもよい。また、光検出器 25 としては、PIN-PD 以外にも、例えば、アバランシェフォトダイオード（APD）などの他のフォトダイオード、光電子増倍管等を用いてもよい。

[0039] AC アンプ 26 は、光検出器 25 から電気信号として入力された検出信号の交流成分を増幅して、増幅後の電気信号を電気信号計測装置 2A へと出力する。この AC アンプ 26 における信号増幅により、検出信号における強度の時間変化成分が抽出され、また、電気信号計測装置 2A へと入力される前の電気信号のオフセットレベルが、適切に調整、設定される。このオフセットリセットの動作については、さらに後述する。

[0040] 再び図 1 を参照する。電気信号計測装置 2A は、信号変換部 30、及び波形計測部 40 を含んで構成されている。信号変換部 30 は、光計測部 20 の AC アンプ 26 から計測対象として入力された電気信号を信号波形計測用の

光信号へと変換し、変換後の光信号を波形計測部40へと出力する。波形計測部40は、信号変換部30から入力された光信号の時間波形についての計測を行い、その計測結果を制御装置50へと出力する。なお、電気信号計測装置2Aの構成については、具体的には後述する。

[0041] 制御装置50は、検査制御部51、及び波形解析部52を含んで構成されている。検査制御部51は、半導体検査部10、光計測部20、プローブ光源21、走査制御部55、及び電気信号計測装置2A等の装置各部の動作を制御することで、半導体検査装置1Aにおける半導体デバイスDの検査、及び電気信号計測装置2Aにおける電気信号の時間波形の計測を制御、実行する。波形解析部52は、電気信号計測装置2Aの波形計測部40から入力された光信号の時間波形の計測結果に基づいて、電気信号の時間波形を求める。上記の半導体検査装置1Aの場合、時間波形を求める電気信号は、反射光の強度の時間変化に応じて光計測部20で生成された電気信号である。

[0042] また、図1に示す構成では、制御装置50に対して、入力部（入力装置）53、及び表示部（表示装置）54が設けられている。入力部53は、例えばキーボード、マウスなどからなり、半導体検査装置1Aにおける半導体検査、電気信号計測装置2Aにおける電気信号計測、波形解析に必要な情報等の入力に用いられる。表示部54は、例えば液晶ディスプレイなどからなり、半導体デバイスDの検査結果、電気信号の波形解析の結果等の表示に用いられる。

[0043] 制御装置50は、具体的には例えば、処理部としてのCPU、及び記憶部としてのROM、RAM、及び外部記憶装置等を有するコンピュータによって構成することができる。この場合、コンピュータは、検査制御装置（計測制御装置）及び波形解析装置として機能する。また、検査制御部（計測制御部）51及び波形解析部52は、別々のコンピュータによって構成されてもよいし、単一のコンピュータによって構成されてもよい。

[0044] 図1に示す半導体検査装置1Aにおいて、第2光計測部61、第2波形計測部62、及び周波数解析部63は、従来の検査装置と同様の手法でEOP

、E O F Mを行う装置部分である。第2光計測部61は、例えばアバランシェフォトダイオード等の光検出器と、アンプとを含んで構成されている。第2波形計測部62は、例えばデジタイジングボード、またはデジタルオシロスコープ等を用いて構成されている。周波数解析部63は、例えばE O F M像取得用のスペクトラムアナライザ、またはロックインアンプ等を用いて構成されている。

[0045] このような構成において、電気信号計測装置2Aは、高速デジタイジングユニットとして機能し、第2波形計測部62は、低速デジタイジングユニットとして機能している。また、半導体検査部10の電圧印加部12からは、正弦波状の同期信号、矩形波状のトリガ信号等が出力され、これらの同期信号、トリガ信号は、必要に応じて、電気信号計測装置2A、第2波形計測部62、周波数解析部63等の装置各部に供給される。なお、同期信号については、上記した正弦波状の信号に限られるものではなく、例えば矩形波状の信号等であってもよい。

[0046] 次に、図1に示した半導体検査装置1Aにおいて用いられている電気信号計測装置2Aの構成、及び動作について説明する。

[0047] 図3は、信号変換部30及び波形計測部40を含む電気信号計測装置の第1実施形態の構成を概略的に示すブロック図である。本実施形態による電気信号計測装置2Aは、ストリークカメラを用いたストリーク・オシロスコープとして構成されている（例えば、特許文献3、4を参照）。また、図3に示すように、電気信号計測装置2Aには、必要に応じて、制御装置50の波形解析部（波形解析装置）52が含まれる。

[0048] なお、図3においては、電気信号計測装置2Aに対し、光計測部20、テストヘッド12a、及びテストヘッド12aに接続された遅延発生器（D G : Delay Generator）19を図示するとともに、それらを便宜的に電気信号供給部80としている。電気信号供給部80において、光計測部20は、電気信号出力部81として機能し、テストヘッド12aは、同期信号出力部82として機能し、遅延発生器19は、トリガ信号出力部83として機能してい

る。遅延発生器 19 は、テストヘッド 12a から供給された信号の遅延時間及びパルス幅等を調整し、トリガ信号として出力する。

[0049] また、上述したように、本実施形態による電気信号計測装置 2A の応用は、半導体検査装置 1A に限られるものではなく、様々な構成における電気信号の時間波形の計測に適用することが可能である。そのような場合、電気信号供給部 80 における電気信号出力部 81、同期信号出力部 82、及びトリガ信号出力部 83 については、具体的な計測対象に応じて適宜に構成される。また、同期信号出力部 82、及びトリガ信号出力部 83 については、不要であれば設けない構成としてもよい。

[0050] 信号変換部 30 は、計測光源 31、光減衰器 32、及び光変調器 33 を有して構成されている。計測光源 31 は、所定波長の計測光を供給する。また、上記のように半導体検査装置 1A に適用される場合、計測光源 31 は、半導体検査のプローブ光の第 1 波長とは異なる第 2 波長の計測光を供給する。この計測光は、波形計測部 40 に入力される光信号の元となる連続光である。計測光としては、光変調器 33 による変調動作が可能であって、後述する波形計測部 40 におけるストリーク管 42 によって波形計測が可能な波長の光が用いられる。

[0051] この場合、計測光の所定波長は、ストリーク管 42 で用いられる光電面の感度分布等を考慮して、115nm 以上 1600nm 以下の波長範囲内で設定することが好ましく、さらに、充分な感度を得るために、200nm 以上 1050nm 未満の波長範囲内で設定することが好ましい。このような計測光としては、具体的には例えば、波長 850nm 或いは波長 780nm の光を用いることができる。また、光ファイバ内の分散による時間分解能の悪化を抑制するために、計測光として狭帯域の光を用いることが好ましい。

[0052] 計測光源 31 としては、具体的には例えば、レーザ光源、SLD (Super Luminescent Diode)、LED (Light Emitting Diode) 等を用いることができる。実際に用いる計測光源 31 については、光変調器 33 として用いられる変調器の種類に応じて選択することが好ましい。計測光源 31 から出力さ

れた計測光は、光減衰器 32 において強度（光量）が減衰、調整された後、連続光として光変調器 33 へと入力される。

[0053] 光変調器 33 には、変調制御信号として、光計測部 20 からの電気信号が入力されている。光変調器 33 は、光計測部 20 から入力された電気信号に基づいて、計測光源 31 から供給された計測光を強度変調し、変調後の計測光を、電気信号の時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する。光変調器 33 としては、アナログ的な光強度変調が可能に構成されたものが用いられる。

[0054] 光変調器 33 としては、具体的には例えば、EO (Electro-Optic) 変調器、AO (Acousto-Optic) 変調器、MO (Magneto-Optic) 変調器、ポッケルスセル等を用いることができる。ただし、これらのうち、ポッケルスセルについては、数 100 V 程度の電圧が必要であるため、微弱な電気信号での変調において問題がある。また、AO 変調器は、帯域が数 100 MHz 程度に制限される。また、MO 変調器は、比較的大きな磁場（電流）を必要とする。

[0055] これらの点を考慮すると、光変調器 33 として、EO 変調器を用いることが好ましい。これにより、高速の電気信号による計測光の強度変調を好適に実現することができる。なお、光変調器 33 として EO 変調器、AO 変調器、MO 変調器を用いる場合には、計測光源 31 としてレーザ光源を用いることが好ましい。また、光変調器 33 としてポッケルスセルを用いる場合には、計測光源 31 として SLD、LED を用いることが好ましい。

[0056] 図 4 は、信号変換部 30 における光変調器 33 の構成の一例を示す図である。本構成例における光変調器 33 は、EO 結晶 330、結晶 330 上に形成された光導波路 331～334、RF 電極 335、バイアス電極 336、及びグランド電極 337a～337d を有し、光強度変調が可能な EO 変調器として構成されている。EO 結晶 330 としては、具体的には例えば、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) を用いることができる。

[0057] 図 4 に示す構成では、矩形形状の EO 結晶 330 上に、図中の左側に入力

光導波路 331 が設けられ、右側に出力光導波路 334 が設けられている。
入力光導波路 331 は、50 : 50 光カプラを介して、第 1 分岐光導波路 332 及び第 2 分岐光導波路 333 に分岐されている。また、これらの第 1、第 2 分岐光導波路 332、333 は、再び 50 : 50 光カプラを介して結合され、出力光導波路 334 に接続されている。

[0058] 計測光源 31 から入力光導波路 331 に入力された変調対象の計測光は、入力側光カプラによって、第 1、第 2 分岐光導波路 332、333 へと分岐される。また、第 1、第 2 分岐光導波路 332、333 をそれぞれ導光された分岐光は、出力側光カプラでの合波時に干渉し、所定強度を有する干渉光として出力光導波路 334 から出力される。この出力光導波路 334 から出力される干渉光が、波形計測部 40 へと時間波形の計測対象として入力される光信号となる。

[0059] 第 1、第 2 分岐光導波路 332、333 の間には、その入力側に RF 電極 335 が設けられ、出力側にバイアス電極 336 が設けられている。RF 電極 335 に対して、第 1 分岐光導波路 332 を挟んでグランド電極 337a が設けられ、第 2 分岐光導波路 333 を挟んでグランド電極 337b が設けられている。また、バイアス電極 336 に対して、第 1 分岐光導波路 332 を挟んでグランド電極 337c が設けられ、第 2 分岐光導波路 333 を挟んでグランド電極 337d が設けられている。

[0060] 上記の構成において、図中でハッチングを付して示した電極間の領域が、RF 電極 335 またはバイアス電極 336 に対する電圧印加によって、光導波路に電界が印加される領域である。EO 結晶 330 に電界が印加されると、電界印加領域に形成されている光導波路内の屈折率が変化する。これにより、第 1、第 2 分岐光導波路 332、333 の間での光路差が変化し、出力光導波路 334 から出力される干渉光の強度が変化する。

[0061] EO 結晶 330 上で入力側に位置する RF 電極 335 には、計測光の強度変調に用いられる、光計測部 20 からの電気信号が印加される。これにより、光変調器 33 による電気信号の光信号への変換が行われる。また、バイア

ス電極 336 への電圧印加は、光の干渉の位相調整に用いられ、例えば、後述するように、電気信号から光信号への信号変換におけるオフセット調整に用いられる。

[0062] 上記のように E O 変調器を用いた光変調器 33 では、変調される光の偏光方向が決まっており、また、光変調器 33 における干渉器よりも長い干渉距離を持つ必要があるため、変調対象となる計測光としては、レーザ光を用いることが好ましい。また、特に、結晶における Z 方向が図中の上下方向である場合、Z 軸に印加される電界の方向が逆だと屈折率の変化量が逆になるため、より低い電圧でより高速に光を変調することができる。なお、光変調器 33 として、光集積回路 (PIC : Photonic Integrated Circuit) を利用した薄膜 E O 変調器を用いることも可能である。

[0063] 再び図 3 を参照する。波形計測部 40 は、入力光学系 41、ストリーク管 42、出力光学系 (結像光学系) 43、撮像素子 44、及び同期部 45 を有し、ストリークカメラとして構成されている。また、ストリーク管 42 を含む波形計測部 40 には、遅延発生器 19 (トリガ信号出力部 83) からの矩形波状のトリガ信号が入力され、また、テストヘッド 12a (同期信号出力部 82) からの正弦波状等の同期信号が同期部 (同期回路) 45 を介して入力されている。

[0064] ストリーク管 42 を含む波形計測部 40 のストリークカメラの構成について説明する。図 5 は、ストリーク管 42 の構成の一例を示す斜視図である。また、図 6 は、ストリーク管 42 を含む波形計測部 40 の構成の一例を示す側面図である。本構成例におけるストリーク管 42 は、外囲管 420、光電面 421、加速電極 422、垂直掃引電極 423、水平掃引電極 424、マイクロチャンネルプレート (MCP : Micro Channel Plate) 425、及び蛍光面 426 を有して構成されている。また、ストリーク管 42 において、MCP 425 については、設けない構成としてもよい。

[0065] なお、以下の各図において、図 5 に x y z 直交座標系を示しているように、ストリーク管 42、及び入力光学系 41、出力光学系 43 の構成に関し、

光信号及び電子の進行方向を z 軸方向、 z 軸方向に直交するストリーク管42における電子の掃引方向を y 軸方向、 z 軸方向及び y 軸方向に直交する方向を x 軸方向とする。また、図6は、波形計測部40の構成を x 軸方向から見た側面図になっている。

[0066] 図5に示す構成において、 z 軸方向に延びる外囲管420に対し、その入力側に光電面421が、光電面421とは反対側の出力側に蛍光面426が設けられている。信号変換部30からの光信号は、入力光学系41を介して光電面421に入射し、光電面421上において光像P1を形成する。光電面421は、光信号の入力に応じて電子（光電子）を生成する。このとき、光電面421で生成される電子数は、各時点での光信号の強度に応じたものとなる。光電面421から出射された電子は、外囲管420内で加速電極422によって z 軸方向に加速される。

[0067] 光電面421と蛍光面426との間の外囲管420内には、光電面421側から順に、上記の垂直掃引電極423、水平掃引電極424、及びMCP425が設けられている。垂直掃引電極423は、所定パターンの掃引電圧が印加されることで、半導体検査部10におけるテスト周期に応じて設定された掃引周期で光電面421からの電子を所定の掃引方向（ y 軸方向）に掃引する。掃引電極423によって掃引された電子は、MCP425によって増倍されて蛍光面426へと入射する。蛍光面426のサイズは、例えばφ18mmである。

[0068] また、このとき、蛍光面426上に形成される電子像P2は、掃引電極423による電子の掃引によって、時間とともに y 軸方向に移動する。これにより、蛍光面426において、 y 軸方向を時間軸として、光電面421に入力された光信号の時間波形を示す蛍光像が生成される。なお、図5においては、図示の容易のため、MCP425の入射面上において、電子像P2の y 軸方向への移動を模式的に示している。また、水平掃引電極424は、通常の掃引方向と直交する x 軸方向に電子像P2を掃引、移動させる必要がある場合に用いられる。

[0069] ストリーク管42の蛍光面426において生成された蛍光像は、図6に示すように、出力光学系43を介して撮像素子44に入力される。撮像素子44は、蛍光面426において生成された蛍光像を撮像して、2次元画像である波形画像を出力する。撮像素子44としては、CMOS撮像素子、CCD撮像素子などの2次元撮像素子が用いられ、具体的には例えば、画素数 2048×2048 、画素サイズ $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ のCMOSカメラが用いられる。また、図6に示す構成において、出力光学系43は、レンズ430、431によって構成されている。

[0070] 撮像素子44において取得される波形画像は、蛍光面426上の蛍光像と同様に、y軸方向を時間軸として、波形計測部40に入力された光信号の時間波形を示す画像となっている。制御装置50の波形解析部52（図3参照）は、撮像素子44から出力された上記の波形画像に基づいて、光信号の時間波形に対応する電気信号の時間波形を求める。この電気信号の時間波形は、半導体検査部10における半導体デバイスDからの反射光の強度の時間変化に対応している。したがって、波形解析部52で取得された電気信号の時間波形を参照することにより、半導体デバイスDについての検査を行うことができる。

[0071] また、半導体検査部10における反射光の強度の微弱な時間変化を精度良く計測するため、波形計測部40に対して、信号変換部30からの光信号を複数周期で繰り返し入力して、ストリーク管42の蛍光面426において、テスト周期について複数周期の光信号の時間波形が積算された蛍光像を生成する構成としてもよい。この場合、撮像素子44で取得される波形画像も同様に、複数周期の光信号の時間波形が積算されたものとなる。このような光信号の時間波形の積算は、半導体検査以外の構成においても、計測対象の電気信号が微弱信号であって、時間波形が所定周期で繰り返す電気信号である場合等に、同様に好適に用いることができる。

[0072] 波形計測部40のストリークカメラは、上記のような電気信号の時間波形の計測、及び半導体デバイスDの検査を好適に実行するため、電圧印加部1

2 から供給される同期信号またはトリガ信号に基づいて、光信号の時間波形についての計測動作を制御する。具体的には、波形計測部 40 は、光信号の時間波形の計測について、単掃引モード、及びシンクロスキャンモードの 2 つの計測モードを有している。

[0073] 単掃引モードでは、波形計測部 40 は、テストヘッド 12a または遅延発生器 19 からの矩形波状のトリガ信号に同期して、シングルショットの計測を行う。この場合、掃引電極 423 に印加される掃引電圧は、例えば直線状に変化する電圧パターンとなる。また、このとき、半導体テストにおける電圧印加のテスト周期は、自由に決めることができる。なお、単掃引モードにおいては、シングルショットの計測を複数回繰り返して、時間波形の積算を行うことも可能である。

[0074] シンクロスキャンモードでは、波形計測部 40 は、テストヘッド 12a からの正弦波状の同期信号に同期して、複数周期の時間波形を積算する計測を行う。この場合、掃引電極 423 に印加される掃引電圧は、同期部 45 によって制御され、同期信号と同様に例えば正弦波状の電圧パターンとなる。このモードでは、例えば 800 fs 以下の高い時間精度を実現することができる。ただし、このとき、半導体テストにおけるテスト周期は、同期信号の周期の整数倍に制限される。

[0075] ストリーク管 42 の光電面 421 への光信号の入力条件、及びストリーク管 42 の前段に設けられた入力光学系 41 の構成について説明する。上記の構成では、ストリーク管 42 に入力される光信号の光量に基づくショットノイズが計測のノイズフロアを決定する。この場合、ショットノイズの比率を低減するためには、光量を増やすことが好ましいが、光電面 421 には、入力光量密度に関する上限が存在する。また、光信号の時間波形の多数回の積算計測を行うなどの場合、それによる光電面の劣化も問題となる。

[0076] このような点を考慮すると、光電面への入力光量密度を低減し、かつ、光電面の劣化を抑制するため、入力光学系 41 は、光信号をストリーク管 42 での掃引方向（y 軸方向）と交差する方向に延びるライン状の光像として、

光電面 4 2 1 へと入力することが好ましい。これにより、図 5 に示したように点状の光像 P 1 として光信号を入力する場合と比較して、入力光量密度を低減することができる。なお、この場合のライン状の光像の像形成方向については、掃引方向と直交する方向（ x 軸方向）に設定することが好ましい。

[0077] 図 7 は、波形計測部 4 0 における入力光学系 4 1 の構成の一例を示す図である。図 7 において、図 7 (a) は、 y 軸方向から見た上面図を示し、図 7 (b) は、 x 軸方向からみた側面図を示している。また、図 7 に示す入力光学系 4 1 におけるレンズ構成は、図 6 に概略的に示されているレンズ構成と同様の構成になっている。

[0078] 図 6 及び図 7 に示す入力光学系 4 1 は、信号変換部 3 0 からの光信号の入力側（光信号が出力される光ファイバ端側）から順に、シリンドリカルレンズ 4 1 0、レンズ 4 1 1、及びレンズ 4 1 2 によって構成されている。このように、入力光学系 4 1 においてシリンドリカルレンズ 4 1 0 を用いることにより、図 7 に光線の広がり示すように、光電面 4 2 1 上においてライン状の光像を形成することができる。

[0079] 図 8 は、ストリーク管 4 2 において形成される光像、及び電子像について模式的に示す図である。図 8 において、図 8 (a) は、ストリーク管 4 2 の光電面 4 2 1 に入射する光信号の光像 P 3 を示す図であり、図 8 (b) は、蛍光面 4 2 6 における電子像 P 4 の掃引について示す図である。また、図 8 に示す光像 P 3 及び電子像 P 4 は、図 7 に示した入力光学系 4 1 を用いた構成において形成されるものである。

[0080] 図 8 (a) に示すように、光信号は、 x 軸方向に延びるライン状の光像 P 3 として光電面 4 2 1 へと入力される。また、図 8 (b) に示すように、蛍光面 4 2 6 上では、光像 P 3 に対応する x 軸方向に延びるライン状の電子像 P 4 が形成され、この電子像 P 4 が y 軸方向に掃引されることで、光信号の時間波形を示す蛍光像が生成される。

[0081] 図 9 は、ストリーク管 4 2 の光電面 4 2 1 に入力された光信号のライン状の光像に対応して、蛍光面 4 2 6 において生成された蛍光像の一例を示す画

像である。ここでは、掃引電極 4 2 3 による電子の掃引を行わずに、ライン状の電子像に対応する蛍光像をそのまま計測している。また、図 9 に示す蛍光像に対応する光電面 4 2 1 上におけるライン状の光像は、 x 軸方向の長さが約 5 mm、 y 軸方向の幅が約 $15\ \mu\text{m}$ である。

[0082] また、図 10 は、掃引電極 4 2 3 による電子の掃引を行う通常の計測で、蛍光面 4 2 6 において生成された蛍光像を撮像素子 4 4 で撮像して得られた画像の一例を示している。図 10 において、図 10 (a) は、信号変換部 30 における光信号の生成が ON の状態で取得された波形画像を示し、図 10 (b) は、光信号の生成が OFF の状態で取得されたベース画像（背景画像）を示している。図 10 (a) の波形画像では、ライン状の電子像を掃引して得られた蛍光像が計測されている。

[0083] 図 3 に示した電気信号計測装置 2 A によって行われる電気信号計測方法は、信号変換ステップと、波形計測ステップと、波形解析ステップとを備える。信号変換ステップでは、信号変換部 30 において、時間波形の計測対象として入力された電気信号に基づいて、光変調器 33 によって計測光を強度変調し、変調後の計測光を、電気信号の時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する。

[0084] 波形計測ステップでは、波形計測部 40 において、ストリーク管 4 2 及び撮像素子 4 4 等を用い、信号変換部 30 から出力された光信号の時間波形についての計測を行い、得られた波形画像を出力する。また、このとき、入力光学系 41 は、光信号を、ストリーク管 4 2 での電子の掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として光電面 4 2 1 へと入力する。波形解析ステップでは、制御装置 50 の波形解析部 52 において、波形計測部 40 から出力された波形画像に基づいて電気信号の時間波形を求める。

[0085] 上記実施形態の電気信号計測装置 2 A、及びそれによって実行される電気信号計測方法の効果について説明する。

[0086] 図 3 ～図 8 に示した電気信号計測装置 2 A、及び電気信号計測方法では、時間波形の計測対象として入力された電気信号を、光変調器 33 によって所

定波長の光信号へと変換する。そして、光信号の時間波形を、ストリーク管 42 を含む波形計測部 40 によって計測し、撮像素子 44 で取得された波形画像に基づいて電気信号の時間波形を求める。

[0087] このような構成によれば、電気信号を光信号に変換した後にストリーク管 42 を含むストリークカメラを用いて波形計測を行うことにより、電気信号の時間波形を高速で計測することができる。また、上記構成では、光信号の生成に用いられる計測光の波長を適切に設定することにより、ストリーク管 42 による光信号の波形計測を好適に行って、電気信号の時間波形を精度良く計測することができる。

[0088] さらに、上記構成では、波形計測部 40 でストリーク管 42 の前段に設けられている入力光学系 41 について、光信号を、ストリーク管 42 での電子の掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として光電面 421 へと入力するように構成している。これにより、例えば光信号を点状の光像として光電面 421 へと入力する場合と比較して、入力光量密度を低減して光電面 421 の劣化を抑制し、ストリーク管 42 を用いた電気信号の計測を好適に実行することが可能となる。

[0089] 図 11 は、電気信号の時間波形の計測結果について示すグラフである。図 11 のグラフにおいて、横軸は時間 (ps) を示し、縦軸は信号の強度 (a.u.) を示している。また、図 11 において、グラフ G1 は、電気信号を 20 GHz のオシロスコープで計測した計測結果を示し、グラフ G2 は、図 3 に示した構成の電気信号計測装置 2A で計測した計測結果を示している。

[0090] ここでは、フェムト秒レーザからのパルスレーザ光を、40 GHz 帯域の PIN-PD によって検出し、出力された電気信号を計測している。レーザ光の波長は 1550 nm、繰り返し周波数は 100 MHz、パルス幅は 100 fs 以下である。また、グラフ G1 の計測結果において、オシロスコープとしては、Tektronix 製の 20 GHz 帯域の DPO72004C を使用している。

[0091] グラフ G2 の計測結果については、波形計測部 40 のストリークカメラで

の積算速度は50MHz、フレーム速度は60Hz、積算時間は1.6秒（露光時間10msで100枚）、後述する減算用のベース画像の積算時間は同様に1.6秒である。図11のグラフに示されているように、上記実施形態の構成では、微弱信号の計測において、オシロスコープでは実現不可能な高速での積算を行って、時間波形を好適に取得している。なお、計測された波形のFWHMは、グラフG1では31.85ps、グラフG2では19.21psとなっている。

[0092] 上記実施形態の計測装置2A及び計測方法では、電気信号は、その時間波形が所定周期（例えば、半導体検査におけるテスト周期）で繰り返す電気信号であり、また、波形計測部40において、ストリーク管42の蛍光面426が、所定周期について複数周期の光信号の時間波形が積算された蛍光像を生成する構成としてもよい。

[0093] この場合、電気信号を光信号に変換した後にストリーク管42を用いて波形計測を行うとともに、蛍光面426による蛍光像の生成及び撮像素子44による波形画像の取得において、光信号の時間波形を積算することにより、電気信号の時間波形の多数回の積算を光学的に高速で行うことができる。また、この場合の光信号の時間波形の積算回数については、計測対象である電気信号の条件に応じて、適切に設定することが好ましい。例えば、ストリークカメラにおいて、40MHzでのシンクロスキャンを行った場合、1秒当たりの積算回数は、最大4000万回／秒の範囲でテスト周期等によって決められる。

[0094] 上記実施形態の計測装置2A及び計測方法では、計測光の波長の設定については、上述したように、計測光の所定波長は、115nm以上1600nm以下の波長範囲内で設定されることが好ましい。光信号の生成に用いられる計測光の波長を上記のように設定することにより、計測光を電気信号で強度変調した光信号のストリーク管42による波形計測を好適に行って、電気信号の時間波形を精度良く計測することができる。

[0095] 上記実施形態の計測装置2A及び計測方法では、波形解析部52は、信号

変換部30における光信号の生成がONの状態を取得された波形画像を、光信号の生成がOFFの状態を取得されたベース画像に基づいて補正する構成としてもよい。このように、波形解析部52において、波形画像をベース画像に基づいて補正し、この補正後の波形画像を用いて電気信号の時間波形を求めることにより、電気信号の時間波形をさらに精度良く計測することができる。

[0096] このようなベース画像の取得、及びそれによる波形画像のベース補正は、例えば、ストリーク管42の蛍光面426または撮像素子44などにおける位置による計測効率のばらつきの補正（ゲイン補正）等に用いることができる。また、電気信号計測装置2Aにおける時間による計測特性のドリフトの補正についても、上記のようにベース補正を行うことが有効である。

[0097] 例えば、信号変換部30の光変調器33に用いられるEO変調器は、熱による特性ドリフトがあり、ゲイン補正を行ってもオフセットがずれる場合がある。このような場合、光変調器33に対して放熱対策を行うとともに、波形計測部40で取得される波形画像について、時間による特性ドリフトの補正を行うことが好ましい。

[0098] 電気信号計測装置2Aを半導体検査装置1Aに適用した場合、上記実施形態の検査装置1A及び検査方法では、光計測部20は、検査光学系11から出力された反射光を増幅して出力する光増幅器23を有し、光検出器25は、光増幅器23によって増幅された反射光を検出する構成としてもよい。また、光計測部20の光検出器25は、PIN-PDである構成としてもよい。

[0099] これらの構成によれば、半導体デバイスDからの反射光の光計測部20による計測、及び電気信号の出力を、高速で精度良く行うことができる。すなわち、半導体デバイスDの検査では、プローブ光の光量は、半導体デバイスDが破壊されない程度に設定する必要があり、その反射光も光量は小さくなる。例えば、1以上のNAを実現する固浸レンズを用いる場合、プローブ光の光量の上限は数mW程度であり、このときの半導体デバイスDからの反射

光の光量の上限は0.1 mW程度である。

- [0100] このため、反射光を直接、光検出器25で検出する場合、光検出器25として、例えばAPDが用いられる。しかしながら、APDは、その容量が比較的大きく、高速での信号計測に充分に対応することが難しい。これに対して、光検出器25の前段にSOAなどの光増幅器23を設けることにより、光検出器25として、例えばPIN-PDなどの高速の光センサを用いることが可能になり、ストリークカメラを用いた波形計測と合わせて、高速での信号計測を好適に実現することができる。
- [0101] 上記実施形態の検査装置1A及び検査方法では、計測対象の電気信号を生成、出力する電気信号供給部80における光計測部20は、光検出器25から出力された検出信号の交流成分（AC成分）を増幅して電気信号として出力するACアンプ26などの増幅素子を有する構成としてもよい。
- [0102] このような構成によれば、光検出器25の後段のACアンプ26で検出信号のDC成分を除去して、AC成分のみを増幅するオフセットリセットを行うことにより、検出信号における強度の時間変化成分を抽出するとともに、信号変換部30において光信号への変換を行う前の電気信号のオフセットレベルを適切に調整、設定することができる。なお、検出信号のAC成分を抽出、増幅する増幅素子としては、ACアンプ26以外にも、例えばDC成分の除去、またはAC成分の抽出を行う他の素子を用いてもよい。
- [0103] ここで、上記の半導体検査装置1Aにおける反射光の強度の時間変化、電気信号の時間波形、光信号の時間波形の関係、及び信号のオフセットレベルの設定について説明する。図12は、（a）半導体デバイスDからの反射光の強度、（b）光計測部20で生成される電気信号の強度、及び（c）信号変換部30で生成される光信号の強度の関係について示す図である。
- [0104] 例えば、波長1.3 μm のプローブ光を照射した場合、半導体デバイスDからの反射光の強度は、上記したように0.1 mW程度である。このとき、図12（a）に示す反射光の強度において、反射光の強度レベル（DC成分）A0を1として、帯域100 GHzでショットノイズレベルは1 σ におい

て2.25%である。これに対して、半導体検査に用いられる反射光の強度の時間変化の信号レベル（AC成分）A1は、0.001%~0.01%と非常に小さい。

[0105] この反射光に対して、光増幅器23、光検出器25、及びACアンプ26を含む光計測部20で生成される電気信号の信号レベルは、例えば図12（b）に示すようになる。光検出器25から出力される検出信号は、反射光の強度と同様にDC成分及びAC成分を含むが、ACアンプ26において検出信号のDC成分を除去して、AC成分のみを増幅することにより、反射光の強度レベルA0に対応する信号レベルは、ほぼゼロとなる。また、ショットノイズレベルは1 σ で300mV程度である。一方、反射光の強度の時間変化の信号レベルA1に対応する信号レベルB1は、0.15mV~1.5mV程度となる。

[0106] また、この電気信号に基づく光変調器33での計測光の強度変調によって生成される光信号の信号レベルは、例えば図12（c）に示すようになる。図12（c）において、曲線C5は、光変調器33を構成するEO変調器に印加される電気信号の電圧（縦軸）と、生成される光信号の強度（横軸）との正弦波状の関係を示している。

[0107] 図12（c）に示すように、光変調器33における電気信号から光信号への信号変換では、電気信号の電圧変化に対して最も感度を高くし、かつ信号変換の線形性を良くするため、信号レベルC0によって示すようにオフセットとなるバイアス電圧を印加して、電気信号の電圧がゼロのときの計測光の透過光量が所定の光量、例えば最大透過光量の50%の光量になるように設定することが好ましい。このとき、電気信号の電圧変化範囲C1に対して、変換後の光信号の強度変化範囲C2を十分に広げることができる。

[0108] また、このような光計測部20、及び信号変換部30でのオフセット調整により、反射光の強度の時間変化の計測、及びその時間波形の積算を、精度良く好適に行うことができる。なお、光信号の強度の最大値については、光電面における入射光量密度の上限値を考慮して、上限値と一致またはそれ以

下となるように、光減衰器 32 等によって適切に設定することが好ましい。

[0109] また、図 12 は、プローブ光照射による半導体検査を前提としたものであるが、上記した計測対象の電気信号におけるオフセットリセット、電気信号から光信号への信号変換におけるオフセット調整、及び電気信号の電圧変化範囲と光信号の強度変化範囲との対応関係等については、半導体検査以外での電気信号の計測においても、同様に適用することが可能である。例えば、信号変換部 30 に計測対象として入力される電気信号について、信号変換部 30 の前段に、電気信号のオフセットリセットを行うための増幅素子などの素子を設ける構成としてもよい。

[0110] 電気信号計測装置 2A を用いた信号計測における時間波形の積算回数の設定について、電気信号計測装置 2A を半導体検査装置 1A に適用した場合を例として説明する。上記したように、反射光計測でのショットノイズレベルは、帯域 100 GHz で 2.25%、また、帯域 1 GHz では 0.225% となる。また、信号レベルは、0.001%~0.01% である。

[0111] このとき、例えば S/N が 10 以上の時間波形を得るためには、帯域 1 GHz で信号レベル 0.001% の場合において、必要な積算回数は 2250 の 2 乗回で、約 500 万回となる。また、帯域が 10 倍になれば必要な積算回数も単純に 10 倍となり、例えば帯域 10 GHz に対して必要な積算回数は 5000 万回、帯域 40 GHz に対して必要な積算回数は 2 億回となる。

[0112] ノイズに対する信号強度が高ければ必要な積算回数は小さくなり、例えば S/N 比が 10 倍になれば、必要な積算回数は 1/100 となる。なお、S/N 比を改善する方法としては、光量を上げてショットノイズと信号との比率を変えることが考えられるが、上記したように、プローブ光の光量は、半導体デバイス D が破壊されない程度に設定する必要がある。したがって、このように信号強度を高くすることは、難しい場合がある。半導体検査における実用的な条件等から考えると、反射光計測における時間波形の積算回数は、例えば 100 万回以上 10 億回以下の範囲内で設定することが好ましい。

[0113] 電気信号計測装置 2A を用いて実行される、電気信号の時間波形の計測方

法の具体的な一例について説明する。まず、計測対象となる電気信号について、通常のアシロスコープ等を用いて波形計測を行って、その時間波形を取得する。また、ストリークカメラを用いた電気信号計測装置 2 A による波形計測のための計測レンジを設定する。

[0114] 次に、アシロスコープ等で取得された電気信号の時間波形を表示部 5 4 に表示し、その波形において実際に計測を行いたい計測期間（計測の開始時間及び時間幅）を設定、選択する。そして、設定された計測期間について、電気信号計測装置 2 A を用いて計測を行って、波形解析部 5 2 において電気信号の時間波形を求め、その計測結果を表示部 5 4 に表示する。また、計測を行いたい計測期間が複数ある場合には、同様の計測を必要に応じて位相を変更しながら複数回、繰り返して行う。また、波形画像取得とベース画像取得とを交互に行い、上記したドリフト補正などのベース補正を行ってもよい。

[0115] 波形計測部 4 0 のストリークカメラにおける入力光学系 4 1 の構成について、さらに説明する。上記したように、入力光学系 4 1 は、光信号をライン状の光像として光電面 4 2 1 へと入力することが好ましい。そのための具体的構成の一例として、図 7 において、シリンドリカルレンズ 4 1 0、レンズ 4 1 1、及びレンズ 4 1 2 による入力光学系 4 1 の構成を示したが、入力光学系 4 1 の構成については、図 7 の構成以外にも、具体的には様々な構成を用いることができる。

[0116] 図 1 3 は、波形計測部 4 0 における入力光学系 4 1 の構成の第 1 変形例を示す（a）上面図、及び（b）側面図である。第 1 変形例の入力光学系 4 1 は、光信号の入力側から順に、レンズ 4 1 3、及びシリンドリカルレンズ 4 1 4 によって構成されている。このような構成によっても、図 7 の構成と同様に、光電面 4 2 1 上においてライン状の光像を形成することができる。

[0117] なお、シリンドリカルレンズ 4 1 0 が入力光学系 4 1 のレンズ構成において前段に配置されている図 7 の構成と、シリンドリカルレンズ 4 1 4 が後段に配置されている図 1 3 の構成とでは、シリンドリカルレンズの配置方向が異なっている。また、図 1 3 に示す構成では、後段のシリンドリカルレンズ

414は、結像レンズを兼ねている。

[0118] 図14は、波形計測部40における入力光学系41の構成の第2変形例を示す(a)上面図、及び(b)側面図である。第2変形例の入力光学系41は、光信号の入力側から順に、レンズ413、シリンドリカルレンズ414、レンズ415、及びレンズ416によって構成されている。この図14の構成は、図13の構成に対してレンズ415、416からなるリレー光学系を追加した構成となっている。

[0119] 図15は、波形計測部40における入力光学系41の構成の第3変形例を示す(a)上面図、及び(b)側面図である。第3変形例の入力光学系41は、光信号の入力側から順に、レンズ417、パウエルレンズ418、及びレンズ419によって構成されている。パウエルレンズは、平行光を扇状に広げるレンズであり、通常のレンズやシリンドリカルレンズなどと組み合わせて使用することで、細くかつ均一なライン状の光像を形成することができる。

[0120] なお、図15に示す構成では、後段のレンズ419を、互いに配置方向が異なり、軸が直交する2つのシリンドリカルレンズの組合せに置き換えてもよい。この場合、光の結像位置の調整が容易となる。また、ライン状の光像の形成には、上記したシリンドリカルレンズ、パウエルレンズ以外にも、例えば、アナモルフィックプリズムペアとスリットとの組合せを用いてもよい。

[0121] 一般には、波形計測部40の入力光学系41は、シリンドリカルレンズ、パウエルレンズ、及びアナモルフィックプリズムペアの少なくとも1つを含むことが好ましい。入力光学系41において、上記の光学素子を用いることにより、掃引方向と交差する方向（好適には掃引方向と直交する方向）に延びる光信号によるライン状の光像を、好適に形成することができる。

[0122] ストリークカメラを用いて構成された上記の電気信号計測装置の構成、及び動作について、さらに説明する。

[0123] 図16は、信号変換部30及び波形計測部40を含む電気信号計測装置の

第2実施形態の構成を概略的に示すブロック図である。本実施形態による電気信号計測装置2Bの構成は、波形計測部40については図3に示した構成と同様であるが、信号変換部30の構成が異なっている。なお、図16においては、電気信号計測装置2Bの一部を構成する制御装置50の波形解析部52について、図示を省略している。

[0124] 信号変換部30は、計測光源31、光減衰器32、変換制御用光変調器34、及び光変調器33を有して構成されている。これらのうち、計測光源31、光減衰器32、及び光変調器33の構成については、図3に示した構成と同様である。

[0125] 変換制御用光変調器34は、光減衰器32と、光変調器33との間に設けられ、半導体検査部10におけるテスト周期等の計測条件に応じて、信号変換部30における電気信号から光信号への信号変換動作のON/OFFを制御する。具体的には、変換制御用光変調器34は、遅延発生器19から入力されるトリガ信号、または制御装置50の検査制御部51から入力される制御信号等に基づいて、光減衰器32からの計測光の通過／非通過を切り替えることで、信号変換動作のON/OFFを制御する。

[0126] このように、信号変換部30において、信号変換に用いられる光変調器33とは別に、変換制御用光変調器34を設けることにより、半導体検査装置1Aにおける具体的な計測条件に応じて、様々な計測制御を行うことが可能となる。また、変換制御用光変調器34としては、光変調器33と同様に、EO変調器、AO変調器、MO変調器、ポッケルスセル等を用いることができ、特に、EO変調器を用いることが好ましい。

[0127] 変換制御用光変調器34を用いた信号変換動作の制御としては、例えば、波形計測部40のストリーク管42における主掃引、戻り掃引に応じた制御を行うことができる。ここで、図17は、ストリーク管42における主掃引、及び戻り掃引について模式的に示す図である。ストリーク管42においては、例えばシンクロスキャンモードでは、正弦波状の掃引電圧によって電子が掃引されるが、この場合、本来の掃引方向での主掃引と、逆方向での戻り

掃引とが交互に繰り返されることとなる。

- [0128] この場合、図 1 7 に示すように、蛍光面 4 2 6 には、主掃引による電子像 P 5 と、戻り掃引による電子像 P 6 とが交互に入力されるが、この戻り掃引による電子像パターンが、主掃引による電子像パターンに重畳して計測されると、目的とする時間波形の計測を正しく行うことができない。
- [0129] これに対して、図 1 6 に示す構成では、信号変換部 3 0 に設けられた変換制御用光変調器 3 4 において、ストリーク管 4 2 における主掃引に対応する期間に信号変換動作を ON とし、戻り掃引に対応する期間に信号変換動作を OFF とするように制御を行う。これにより、主掃引による電子像パターンのみを選択的に計測することができる。
- [0130] なお、ストリーク管 4 2 における主掃引、戻り掃引に関する計測制御は、上記のように信号変換部 3 0 の変換制御用光変調器 3 4 を用いる構成以外にも、具体的には様々な構成を用いることができる。例えば、ストリーク管 4 2 における水平掃引電極 4 2 4 (図 5 参照) に所定パターンで電圧を印加することで、戻り掃引の期間に電子像を蛍光面 4 2 6 外の位置にずらす構成を用いることができる。
- [0131] また、ストリーク管 4 2 に印加される高電圧を変調制御する、MCP 4 2 5 に印加される電圧を変調制御する、などの構成を用いてもよい。また、MCP 4 2 5 に代えて、ストリーク管 4 2 と、出力光学系 4 3 との間にイメージンシファイアを設け、このイメージンシファイアの ON/OFF を主掃引、戻り掃引に応じて制御する構成を用いてもよい。
- [0132] ただし、これらの構成では、時間波形の計測を行わない戻り掃引の期間も光信号の光像が光電面 4 2 1 に入射するため、それによって光電面 4 2 1 が劣化する。これに対して、上記のように信号変換部 3 0 の変換制御用光変調器 3 4 を用いて、信号変換動作の ON/OFF を制御する構成によれば、戻り掃引の期間は光信号の光像が光電面 4 2 1 に入射しないため、光電面 4 2 1 の劣化を抑制することができる。なお、変換制御用光変調器 3 4 の設置位置については、図 1 6 では光変調器 3 3 の前段に配置しているが、光変調器

３３の後段に配置する構成としてもよい。

- [0133] また、電気信号計測装置２Ｂにおける電気信号の時間波形の計測期間、計測条件の制御については、変換制御用光変調器３４による計測期間の制御以外にも、波形計測における位相について制御を行ってもよい。具体的には例えば、波形計測部４０において、ストリーク管４２は、電気信号の時間波形を計測すべき期間に応じて掃引周期の位相を調整する構成としてもよい。このような構成によっても、具体的な計測条件に応じて、様々な計測制御を行うことが可能となる。
- [0134] 図１８は、ストリーク管における計測期間、及び掃引周期の位相の設定の一例について示す図である。図１８は、上から順に、（ａ）テストヘッド１２ａから供給される同期信号、（ｂ）テストヘッド１２ａまたは遅延発生器１９から供給されるトリガ信号、（ｃ）電気信号の時間波形（反射光の強度の時間変化）のうちで波形計測が必要な期間として設定された計測期間Ｔ１、（ｄ）ストリーク管４２における掃引電圧パターン、及び（ｅ）変換制御用光変調器３４に供給される制御信号パターンを示している。
- [0135] 図１８に示す例では、半導体検査部１０における各テスト周期において、図１８（ｃ）に示すように、半導体デバイスＤを検査する上で、計測すべき計測期間（計測時間窓）Ｔ１が設定される。また、この計測期間Ｔ１に応じて、図１８（ｅ）に示すように、変換制御用光変調器３４への制御信号パターンが決定され、これによって信号変換動作のＯＮ／ＯＦＦが制御される。
- [0136] また、ストリーク管４２において、図１８（ｄ）に示すように、時間波形の計測期間Ｔ１が主掃引の期間に含まれるように、電子掃引のタイミングが同期信号から時間Ｔ２だけ遅延され、これによって掃引周期の位相が調整される。このように、信号変換部３０の変換制御用光変調器３４によって時間波形の計測期間を設定するとともに、ストリーク管４２において電子の掃引周期の位相を設定、調整することにより、所望の条件で波形計測を行うことが可能となる。また、上記の位相の調整には、例えば、ストリークカメラの位相遅延機能を用いることができる。また、これに代えて、電気信号供給部

80の testaヘッド12aと波形計測部40とをつなぐ同期ライン上に位相遅延器を設けて、上記の位相の調整を行ってもよい。

[0137] 図19は、信号変換部30及び波形計測部40を含む電気信号計測装置の第3実施形態の構成を概略的に示すブロック図である。本実施形態による電気信号計測装置2Cの構成は、波形計測部40については図3に示した構成と同様であるが、信号変換部30の構成が異なっている。なお、図19においては、制御装置50の波形解析部52、testaヘッド12aからの同期信号の供給、及び遅延発生器19からのトリガ信号の供給について、図示を省略している。

[0138] 信号変換部30は、計測光源31、光減衰器32、光変調器33、光カプラ35、第1光遅延器36a、及び第2光遅延器36bを有して構成されている。これらのうち、計測光源31、光減衰器32、及び光変調器33の構成については、図3に示した構成と同様である。

[0139] 光カプラ35は、光変調器33から入力された光信号（変調後の計測光）を分岐し、第1光遅延器36a及び第2光遅延器36bへと出力する。第1光遅延器36aは、光信号を第1遅延時間だけ遅延させた後、波形計測部40へと出力する。また、第2光遅延器36bは、光信号を第2遅延時間だけ遅延させた後、波形計測部40へと出力する。第1、第2遅延時間は異なってもよく、同じであってもよい。また、第1、第2遅延時間のうちで、一方はゼロであってもよい。

[0140] 第1、第2光遅延器36a、36bからの2種類の光信号は、それぞれの時間波形を計測するため、ストリーク管42において、光電面421上の異なる領域に入力されることが好ましい。図20は、図19に示した構成における2種類の光信号の光電面421への入力について示す図である。

[0141] 図20に示す構成では、第1光遅延器36aからの光信号は、シリンダリカルレンズ410a、レンズ411a、及び反射ミラー428を介して、光電面421における図中の左側の領域に光像P7として入射している。また、第2光遅延器36bからの光信号は、シリンダリカルレンズ410b、レ

ンズ411b、及び反射ミラー428を介して、光電面421における図中の右側の領域に光像P8として入射している。これにより、第1、第2光遅延器36a、36bからの光信号のそれぞれについて、時間波形を計測することができる。

[0142] このように、信号変換部30において、それぞれ電気信号の時間波形に対応する時間波形を有するとともに変換条件が互いに異なる2種類の光信号を生成し、波形計測部40において、それらの光信号それぞれの時間波形を計測することにより、様々な計測を行うことが可能となる。

[0143] 例えば、図19に示す構成において、図16の構成における変換制御用光変調器34をさらに設け、信号変換動作のON/OFFを行うとともに、第1、第2光遅延器36a、36bでの遅延時間を異ならせることにより、アイパターン観察を行ってもよい。また、信号変換部30において生成される光信号の個数については、上記の構成例では2種類の光信号としているが、3種類以上の光信号を生成する構成としてもよい。

[0144] 図21は、信号変換部30及び波形計測部40を含む電気信号計測装置の第4実施形態の構成を概略的に示すブロック図である。本実施形態による電気信号計測装置2Dの構成は、波形計測部40については図3に示した構成と同様であるが、信号変換部30の構成が異なっている。なお、制御装置50の波形解析部52等の図示の省略については、図19と同様である。

[0145] 信号変換部30は、計測光源31、光減衰器32、光カプラ37、及び第1、第2光変調器33a、33bを有して構成されている。これらのうち、計測光源31、及び光減衰器32の構成については、図3に示した構成と同様である。

[0146] 光カプラ37は、光減衰器32から入力された計測光を分岐し、第1光変調器33a及び第2光変調器33bへと出力する。第1、第2光変調器33a、33bには、光計測部20からの電気信号が入力されている。第1、第2光変調器33a、33bそれぞれは、光計測部20から入力された電気信号に基づいて、計測光を強度変調し、変調後の計測光を、電気信号の時間波

形に対応する時間波形を有する光信号として出力する。

[0147] 第1、第2光変調器33a、33bからの2種類の光信号は、ストリーク管42において、光電面421上の異なる領域に入力されることが好ましい。また、このような構成において、第1、第2光変調器33a、33bそれぞれに入力される電気信号を異なるものとし、または、第1、第2光変調器33a、33bそれぞれに対して、光遅延器を設けてもよい。このような構成によっても、図19に示した構成と同様に、様々な計測を行うことが可能となる。

[0148] 電気信号計測装置、及び電気信号計測方法は、上記実施形態及び構成例に限られるものではなく、様々な変形が可能である。例えば、電気信号計測装置の具体的な構成については、図3、図16、図19、図21に示した構成に限らず、様々な構成を用いてよい。例えば、図19または図21に示した構成において、図16の構成における変換制御用光変調器34をさらに設ける構成としてもよい。

[0149] また、波形計測部40のストリーク管42において、水平掃引電極424、及びMCP425については、不要であれば設けない構成としてもよい。また、図12に示した信号レベル、及びオフセット調整の設定についても、電気信号供給部80、及び電気信号計測装置の構成に応じて、具体的には様々な構成を用いてよい。また、計測対象となる電気信号について、上記では電気信号計測装置を半導体検査装置に適用した例を示したが、このような構成に限らず、様々な電気信号を計測対象とすることが可能である。

[0150] 上記実施形態による第1態様の電気信号計測装置は、(1)所定波長の計測光を供給する計測光源、及び時間波形の計測対象として入力された電気信号に基づいて計測光を強度変調する光変調器を有し、光変調器による変調後の計測光を、電気信号の時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する信号変換部と、(2)信号変換部から出力された光信号の時間波形についての計測を行う波形計測部と、(3)波形計測部による光信号の時間波形の計測結果に基づいて電気信号の時間波形を求める波形解析部とを備え

、（４）波形計測部は、光信号の入力に応じて電子を生成する光電面、電気信号の時間波形に応じて設定された掃引周期で光電面からの電子を所定の掃引方向に掃引する掃引電極、及び掃引電極によって掃引された電子を入力して光信号の時間波形を示す蛍光像を生成する蛍光面を含むストリーク管と、ストリーク管の蛍光面において生成された蛍光像を撮像して波形画像を出力する撮像素子と、光信号を光電面へと入力する入力光学系とを有し、（５）波形解析部は、撮像素子から出力された波形画像に基づいて電気信号の時間波形を求めるとともに、（６）波形計測部の入力光学系は、光信号を、掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として光電面へと入力する。

[0151] 上記実施形態による第１態様の電気信号計測方法は、（１）時間波形の計測対象として入力された電気信号に基づいて、所定波長の計測光を強度変調する光変調器を用い、光変調器による変調後の計測光を、電気信号の時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する信号変換ステップと、（２）信号変換ステップで出力された光信号の時間波形についての計測を行う波形計測ステップと、（３）波形計測ステップによる光信号の時間波形の計測結果に基づいて電気信号の時間波形を求める波形解析ステップとを備え、（４）波形計測ステップは、光信号の入力に応じて電子を生成する光電面、電気信号の時間波形に応じて設定された掃引周期で光電面からの電子を所定の掃引方向に掃引する掃引電極、及び掃引電極によって掃引された電子を入力して光信号の時間波形を示す蛍光像を生成する蛍光面を含むストリーク管を用い、ストリーク管の蛍光面において生成された蛍光像を撮像して波形画像を出力し、（５）波形解析ステップは、波形計測ステップで出力された波形画像に基づいて電気信号の時間波形を求めるとともに、（６）波形計測ステップにおいて、光信号を、掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として光電面へと入力する。

[0152] 第２態様の電気信号計測装置では、上記第１態様の構成において、電気信号は、その時間波形が所定周期で繰り返す電気信号であり、波形計測部において、ストリーク管の蛍光面は、所定周期について複数周期の光信号の時間

波形が積算された蛍光像を生成する構成としてもよい。

[0153] 第2態様の電気信号計測方法では、上記第1態様の構成において、電気信号は、その時間波形が所定周期で繰り返す電気信号であり、波形計測ステップにおいて、ストリーク管の蛍光面は、所定周期について複数周期の光信号の時間波形が積算された蛍光像を生成する構成としてもよい。

[0154] 上記構成では、電気信号を光信号に変換した後にストリーク管を用いて波形計測を行うとともに、蛍光面による蛍光像の生成及び撮像素子による波形画像の取得において、光信号の時間波形を積算することにより、電気信号の時間波形の多数回の積算を光学的に高速で行うことができる。

[0155] 第3態様の電気信号計測装置では、上記第1または第2態様の構成において、波形計測部の入力光学系は、シリンドリカルレンズ、パウエルレンズ、及びアナモルフィックプリズムペアの少なくとも1つを含む構成としてもよい。

[0156] 波形計測部の入力光学系において、上記の光学素子を用いることにより、光信号による掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像を好適に形成することができる。

[0157] 第4態様の電気信号計測装置では、上記第1～第3態様のいずれかの構成において、信号変換部の光変調器は、EO変調器である構成としてもよい。

[0158] このように、計測光を強度変調する光変調器として、EO変調器を用いることにより、電気信号の光信号への変換を好適に行うことができる。

[0159] 第5態様の電気信号計測装置では、上記第1～第4態様のいずれかの構成において、信号変換部は、電気信号の時間波形に応じて電気信号から光信号への信号変換動作のON/OFFを制御する変換制御用光変調器を有する構成としてもよい。

[0160] 第3態様の電気信号計測方法では、上記第1または第2態様の構成において、信号変換ステップにおいて、電気信号の時間波形に応じて電気信号から光信号への信号変換動作のON/OFFを制御する変換制御用光変調器を用いる構成としてもよい。

- [0161] この場合、第6態様の電気信号計測装置では、上記第5態様の構成において、信号変換部の変換制御用光変調器は、ストリーク管における主掃引に対応する期間に信号変換動作をONとし、戻り掃引に対応する期間に信号変換動作をOFFとする構成としてもよい。
- [0162] また、第4態様の電気信号計測方法では、上記第3態様の構成において、信号変換ステップにおいて、変換制御用光変調器は、ストリーク管における主掃引に対応する期間に信号変換動作をONとし、戻り掃引に対応する期間に信号変換動作をOFFとする構成としてもよい。
- [0163] このように、信号変換部において、信号変換に用いられる光変調器とは別に、変換制御用光変調器を設けることにより、上記のようにストリーク管における主掃引、戻り掃引に応じて信号変換動作のON／OFFを制御するなど、具体的な計測条件に応じて、様々な計測制御を行うことが可能となる。また、変換制御用光変調器としては、信号変換用の光変調器と同様に、例えばEO変調器を好適に用いることができる。
- [0164] 第7態様の電気信号計測装置では、上記第1～第6態様のいずれかの構成において、波形計測部において、ストリーク管は、電気信号の時間波形を計測すべき期間に応じて掃引周期の位相を調整する構成としてもよい。
- [0165] 第5態様の電気信号計測方法では、上記第1～第4態様のいずれかの構成において、波形計測ステップにおいて、ストリーク管は、電気信号の時間波形を計測すべき期間に応じて掃引周期の位相を調整する構成としてもよい。
- [0166] このように、波形計測部のストリーク管において、掃引周期の位相を調整する構成によっても、具体的な計測条件に応じて、様々な計測制御を行うことが可能となる。
- [0167] 第8態様の電気信号計測装置では、上記第1～第7態様のいずれかの構成において、信号変換部は、光信号として、それぞれ電気信号の時間波形に対応する時間波形を有するとともに変換条件が互いに異なる2種類以上の光信号を生成する構成としてもよい。
- [0168] 第6態様の電気信号計測方法では、上記第1～第5態様のいずれかの構成

において、信号変換ステップにおいて、光信号として、それぞれ電気信号の時間波形に対応する時間波形を有するとともに変換条件が互いに異なる２種類以上の光信号を生成する構成としてもよい。

[0169] このように、信号変換部において、互いに異なる２種類以上の光信号を生成し、波形計測部において、それらの光信号それぞれの時間波形を計測することにより、例えば遅延時間が互いに異なる２種類の光信号について計測してアイパターン観察を行うなど、様々な計測を行うことが可能となる。

[0170] 第９態様の電気信号計測装置では、上記第１～第８態様のいずれかの構成において、計測光の所定波長は、１１５ｎｍ以上１６００ｎｍ以下の波長範囲内で設定される構成としてもよい。

[0171] 第７態様の電気信号計測方法では、上記第１～第６態様のいずれかの構成において、計測光の所定波長は、１１５ｎｍ以上１６００ｎｍ以下の波長範囲内で設定される構成としてもよい。

[0172] 光信号の生成に用いられる計測光の波長を上記のように設定することにより、計測光を電気信号で強度変調した光信号のストリーク管による波形計測を好適に行って、電気信号の時間波形を精度良く計測することができる。

[0173] 第１０態様の電気信号計測装置では、上記第１～第９態様のいずれかの構成において、波形解析部は、信号変換部における光信号の生成がＯＮの状態を取得された波形画像を、光信号の生成がＯＦＦの状態を取得されたベース画像に基づいて補正する構成としてもよい。

[0174] 第８態様の電気信号計測方法では、上記第１～第７態様のいずれかの構成において、波形解析ステップにおいて、信号変換ステップにおける光信号の生成がＯＮの状態を取得された波形画像を、光信号の生成がＯＦＦの状態を取得されたベース画像に基づいて補正する構成としてもよい。

[0175] このように、波形画像をベース画像に基づいて補正し、この補正後の波形画像を用いて電気信号の時間波形を求めることにより、電気信号の時間波形をさらに精度良く計測することができる。

産業上の利用可能性

[0176] 実施形態は、電気信号の時間波形を高速で計測することが可能な電気信号計測装置、及び電気信号計測方法として利用可能である。

符号の説明

[0177] 1 A…半導体検査装置、2 A～2 D…電気信号計測装置、D…半導体デバイス、1 0…半導体検査部、1 1…検査光学系、1 2…電圧印加部、1 2 a…テストヘッド、1 2 b…テストボード、1 3…暗箱、1 4…ステージ、1 5…走査光学系、1 6…結像光学系、1 7…対物レンズ、1 8…ターレット、1 9…遅延発生器、2 0…光計測部、2 1…プローブ光源、2 2…光カプラ、2 3…光増幅器、2 4…光分岐器、2 5…光検出器、2 6…ACアンプ、

3 0…信号変換部、3 1…計測光源、3 2…光減衰器、3 3…光変調器、3 3 a…第1光変調器、3 3 b…第2光変調器、3 4…変換制御用光変調器、3 5…光カプラ、3 6 a…第1光遅延器、3 6 b…第2光遅延器、3 7…光カプラ、4 0…波形計測部、4 1…入力光学系、4 2…ストリーク管、4 3…出力光学系、4 4…撮像素子、4 5…同期部、5 0…制御装置、5 1…検査制御部、5 2…波形解析部、5 3…入力部、5 4…表示部、5 5…走査制御部、6 1…第2光計測部、6 2…第2波形計測部、6 3…周波数解析部、

3 3 0…EO結晶、3 3 1…入力光導波路、3 3 2…第1分岐光導波路、3 3 3…第2分岐光導波路、3 3 4…出力光導波路、3 3 5…RF電極、3 3 6…バイアス電極、3 3 7 a～3 3 7 d…グランド電極、

4 1 0、4 1 4…シリンドリカルレンズ、4 1 8…パウエルレンズ、4 1 1、4 1 2、4 1 3、4 1 5、4 1 6、4 1 7、4 1 9…レンズ、4 3 0、4 3 1…レンズ、

4 2 0…外囲管、4 2 1…光電面、4 2 2…加速電極、4 2 3…垂直掃引電極、4 2 4…水平掃引電極、4 2 5…MCP、4 2 6…蛍光面、4 2 8…反射ミラー、

8 0…電気信号供給部、8 1…電気信号出力部、8 2…同期信号出力部、

83…トリガ信号出力部。

請求の範囲

- [請求項1] 所定波長の計測光を供給する計測光源、及び時間波形の計測対象として入力された電気信号に基づいて前記計測光を強度変調する光変調器を有し、前記光変調器による変調後の前記計測光を、前記電気信号の前記時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する信号変換部と、
- 前記信号変換部から出力された前記光信号の前記時間波形についての計測を行う波形計測部と、
- 前記波形計測部による前記光信号の前記時間波形の計測結果に基づいて前記電気信号の前記時間波形を求める波形解析部と、
- を備え、
- 前記波形計測部は、
- 前記光信号の入力に応じて電子を生成する光電面、前記電気信号の前記時間波形に応じて設定された掃引周期で前記光電面からの電子を所定の掃引方向に掃引する掃引電極、及び前記掃引電極によって掃引された電子を入力して前記光信号の前記時間波形を示す蛍光像を生成する蛍光面を含むストリーク管と、
- 前記ストリーク管の前記蛍光面において生成された前記蛍光像を撮像して波形画像を出力する撮像素子と、
- 前記光信号を前記光電面へと入力する入力光学系と、
- を有し、
- 前記波形解析部は、前記撮像素子から出力された前記波形画像に基づいて前記電気信号の前記時間波形を求めるとともに、
- 前記波形計測部の前記入力光学系は、前記光信号を前記掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として前記光電面へと入力する、電気信号計測装置。
- [請求項2] 前記電気信号は、前記時間波形が所定周期で繰り返す電気信号であり、

前記波形計測部において、前記ストリーク管の前記蛍光面は、前記所定周期について複数周期の前記光信号の前記時間波形が積算された前記蛍光像を生成する、請求項 1 に記載の電気信号計測装置。

[請求項3] 前記波形計測部の前記入力光学系は、シリンドリカルレンズ、パウエルレンズ、及びアナモルフィックプリズムペアの少なくとも 1 つを含む、請求項 1 または 2 に記載の電気信号計測装置。

[請求項4] 前記信号変換部の前記光変調器は、E O 変調器である、請求項 1 ～ 3 のいずれか一項に記載の電気信号計測装置。

[請求項5] 前記信号変換部は、前記電気信号の前記時間波形に応じて前記電気信号から前記光信号への信号変換動作の ON / OFF を制御する変換制御用光変調器を有する、請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載の電気信号計測装置。

[請求項6] 前記信号変換部の前記変換制御用光変調器は、前記ストリーク管における主掃引に対応する期間に前記信号変換動作を ON とし、戻り掃引に対応する期間に前記信号変換動作を OFF とする、請求項 5 に記載の電気信号計測装置。

[請求項7] 前記波形計測部において、前記ストリーク管は、前記電気信号の前記時間波形を計測すべき期間に応じて前記掃引周期の位相を調整する、請求項 1 ～ 6 のいずれか一項に記載の電気信号計測装置。

[請求項8] 前記信号変換部は、前記光信号として、それぞれ前記電気信号の前記時間波形に対応する時間波形を有するとともに変換条件が互いに異なる 2 種類以上の光信号を生成する、請求項 1 ～ 7 のいずれか一項に記載の電気信号計測装置。

[請求項9] 前記計測光の前記所定波長は、115 nm 以上 1600 nm 以下の波長範囲内で設定される、請求項 1 ～ 8 のいずれか一項に記載の電気信号計測装置。

[請求項10] 前記波形解析部は、前記信号変換部における前記光信号の生成が ON の状態で取得された前記波形画像を、前記光信号の生成が OFF の

状態で取得されたベース画像に基づいて補正する、請求項1～9のいずれか一項に記載の電気信号計測装置。

- [請求項11] 時間波形の計測対象として入力された電気信号に基づいて、所定波長の計測光を強度変調する光変調器を用い、前記光変調器による変調後の前記計測光を、前記電気信号の前記時間波形に対応する時間波形を有する光信号として出力する信号変換ステップと、
- 前記信号変換ステップで出力された前記光信号の前記時間波形についての計測を行う波形計測ステップと、
- 前記波形計測ステップによる前記光信号の前記時間波形の計測結果に基づいて前記電気信号の前記時間波形を求める波形解析ステップと、
- を備え、
- 前記波形計測ステップは、前記光信号の入力に応じて電子を生成する光電面、前記電気信号の前記時間波形に応じて設定された掃引周期で前記光電面からの電子を所定の掃引方向に掃引する掃引電極、及び前記掃引電極によって掃引された電子を入力して前記光信号の前記時間波形を示す蛍光像を生成する蛍光面を含むストリーク管を用い、前記ストリーク管の前記蛍光面において生成された前記蛍光像を撮像して波形画像を出力し、
- 前記波形解析ステップは、前記波形計測ステップで出力された前記波形画像に基づいて前記電気信号の前記時間波形を求めるとともに、
- 前記波形計測ステップにおいて、前記光信号を前記掃引方向と交差する方向に延びるライン状の光像として前記光電面へと入力する、電気信号計測方法。

- [請求項12] 前記電気信号は、前記時間波形が所定周期で繰り返す電気信号であり、
- 前記波形計測ステップにおいて、前記ストリーク管の前記蛍光面は、前記所定周期について複数周期の前記光信号の前記時間波形が積算

された前記蛍光像を生成する、請求項 11 に記載の電気信号計測方法。

[請求項13] 前記信号変換ステップにおいて、前記電気信号の前記時間波形に応じて前記電気信号から前記光信号への信号変換動作の ON/OFF を制御する変換制御用光変調器を用いる、請求項 11 または 12 に記載の電気信号計測方法。

[請求項14] 前記信号変換ステップにおいて、前記変換制御用光変調器は、前記ストリーク管における主掃引に対応する期間に前記信号変換動作を ON とし、戻り掃引に対応する期間に前記信号変換動作を OFF とする、請求項 13 に記載の電気信号計測方法。

[請求項15] 前記波形計測ステップにおいて、前記ストリーク管は、前記電気信号の前記時間波形を計測すべき期間に応じて前記掃引周期の位相を調整する、請求項 11 ～ 14 のいずれか一項に記載の電気信号計測方法。

[請求項16] 前記信号変換ステップにおいて、前記光信号として、それぞれ前記電気信号の前記時間波形に対応する時間波形を有するとともに変換条件が互いに異なる 2 種類以上の光信号を生成する、請求項 11 ～ 15 のいずれか一項に記載の電気信号計測方法。

[請求項17] 前記計測光の前記所定波長は、115 nm 以上 1600 nm 以下の波長範囲内で設定される、請求項 11 ～ 16 のいずれか一項に記載の電気信号計測方法。

[請求項18] 前記波形解析ステップにおいて、前記信号変換ステップにおける前記光信号の生成が ON の状態で取得された前記波形画像を、前記光信号の生成が OFF の状態で取得されたベース画像に基づいて補正する、請求項 11 ～ 17 のいずれか一項に記載の電気信号計測方法。