

明 細 書

発明の名称：半導体検査装置及び半導体検査方法

技術分野

[0001] 本開示は、半導体デバイスについての検査を行う半導体検査装置、及び半導体検査方法に関するものである。

背景技術

[0002] 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）。

[0003] 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、EOFM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。

先行技術文献

特許文献

[0004] 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

[0005] 上記したEOP、EOFM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計測にオシロスコープやデジタイザなどを用いた場合、計測可能な周波数の上限が、例えば7～8GHz程度となっ

ている。一方で、LSI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10ps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、従来の検査装置では、このような高速での反射光の強度の時間変化の計測を十分な精度で行うことは難しい。

[0006] 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について多数回の積算を行うことが考えられる。しかしながら、従来の検査装置では、電気信号の高速での積算を行うことも困難である。

[0007] 実施形態は、検査対象の半導体デバイスにプローブ光を照射したときの反射光の強度の時間変化を高速で計測することが可能な半導体検査装置、及び半導体検査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

[0008] 実施形態は、半導体検査装置である。半導体検査装置は、(1)所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して、第1波長のプローブ光を照射し、半導体デバイスでプローブ光が反射された反射光を出力する検査光学系と、(2)検査光学系から出力された反射光を検出する光検出器を有し、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測部と、(3)第1波長とは異なる第2波長の計測光を供給する計測光源、及び光計測部から出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、(4)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、(5)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、(6)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、テスト周期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を有し、（７）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。

[0009] 実施形態は、半導体検査方法である。半導体検査方法は、（１）所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して、第１波長のプローブ光を照射し、半導体デバイスでプローブ光が反射された反射光を出力する検査ステップと、（２）検査ステップで出力された反射光を検出する光検出器を用い、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測ステップと、（３）光計測ステップで出力された電気信号に基づいて、第１波長とは異なる第２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、（４）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、（５）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、（６）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、テスト周期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、（７）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。

[0010] 他の実施形態は、半導体検査装置である。半導体検査装置は、（１）所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して第１波長のプローブ光を照射し、半導体デバイスでプローブ光が反射された反射光を出力する検査光学系と、（２）検査光学系から出力された反射光を検出する光検出

器を有し、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測部と、（３）第１波長とは異なる第２波長の計測光を供給する計測光源、及び光計測部から出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、（４）ストリークカメラを有し、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、（５）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、（６）ストリークカメラは、光信号の入力に応じて、光信号の時間波形を示す波形画像を出力し、（７）波形解析部は、ストリークカメラ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。

[0011] 上記した半導体検査装置、及び半導体検査方法では、検査対象の半導体デバイスに対して第１波長のプローブ光を照射し、その反射光を光検出器で検出して、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形の電気信号を生成する。そして、この電気信号を光変調器によって第２波長の光信号へと変換した後、光信号の時間波形を、ストリーク管を含みストリークカメラとして構成された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。

[0012] 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用いて波形計測を行うことにより、半導体デバイスから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を高速で計測することができる。また、上記構成では、プローブ光の第１波長と、第１波長とは異なる計測光の第２波長とをそれぞれ適切に設定することにより、プローブ光による半導体デバイスの検査と、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とを好適に両立して、反射光の強度の時間変化を精度良く計測することが可能となる。

発明の効果

[0013] 実施形態の半導体検査装置、及び半導体検査方法によれば、検査対象の半

導体デバイスに対して所定波長のプローブ光を照射したときの反射光の強度の時間変化を高速で計測することが可能となる。

図面の簡単な説明

[図1]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。

[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

[0015] 以下、添付図面とともに、半導体検査装置、及び半導体検査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。

[0016] 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。

[0017] 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。

- [0018] 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。
- [0019] 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、E OFM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。
- [0020] 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。
- [0021] 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1.3 μm の光を用いることができる。

[0022] 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。

[0023] 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。

[0024] 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。

[0025] 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。

- [0026] 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。
- [0027] 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。
- [0028] 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の間には、必要に応じて固浸レンズを設置してもよい。
- [0029] 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。

- [0030] 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。
- [0031] 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。
- [0032] 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。
- [0033] 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 2 5 及び第 2 光計測部 6 1 に対して、9 0 : 1 0 の分岐比で分岐される。また、光分岐器 2 4 と第 2 光計測部 6 1 との接続には、例えば F C コネクタが用いられる。

[0034] 光検出器 2 5 は、光分岐器 2 4 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 2 5 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 2 5 としては、例えば、高速での検出動作が可能な P I N フォトダイオード（P I N - P D）を用いることが好ましい。

[0035] 光検出器 2 5 として P I N - P D 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 2 5 としては、P I N - P D 以外にも、例えば、アバランシェフォトダイオード（A P D）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。

[0036] A C アンプ 2 6 は、光検出器 2 5 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 2 A へと出力する。この A C アンプ 2 6 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 2 A 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。

[0037] 再び図 1 を参照する。電気信号計測装置 2 A は、信号変換部 3 0、及び波形計測部 4 0 を含んで構成されている。信号変換部 3 0 は、光計測部 2 0 の A C アンプ 2 6 から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 4 0 へと出力する。波形計測部 4 0 は、信号変換部 3 0 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 5 0 へと出力する。なお、電気信号計測装置 2 A の構成については、具体的には後述する。

[0038] 制御装置 5 0 は、検査制御部 5 1、及び波形解析部 5 2 を含んで構成されている。検査制御部 5 1 は、半導体検査部 1 0、光計測部 2 0、プローブ光源 2 1、走査制御部 5 5、及び電気信号計測装置 2 A 等の装置各部の動作を制御することで、半導体検査装置 1 A における半導体デバイス D の検査を制御、実行する。波形解析部 5 2 は、電気信号計測装置 2 A の波形計測部 4 0 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、反射光の強度の時間変化に応じて光計測部 2 0 で生成された電気信号の時間波形を求める。

[0039] また、図 1 に示す構成では、制御装置 5 0 に対して、入力部（入力装置）5 3、及び表示部（表示装置）5 4 が設けられている。入力部 5 3 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 1 A における半導体検査、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 5 4 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。

[0040] 制御装置 5 0 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、及び波形解析装置として機能する。また、検査制御部 5 1 及び波形解析部 5 2 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。

[0041] 図 1 に示す半導体検査装置 1 A において、第 2 光計測部 6 1、第 2 波形計測部 6 2、及び周波数解析部 6 3 は、従来の検査装置と同様の手法で EOP、E OFM を行う装置部分である。第 2 光計測部 6 1 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 6 2 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 6 3 は、例えば E OFM 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。

[0042] このような構成において、電気信号計測装置 2 A 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 6 2 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 1 0 の電圧印加部 1 2 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 2 A、第 2 波形計測部 6 2、周波数解析部 6 3 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。

[0043] 次に、図 1 に示した半導体検査装置 1 A において用いられている電気信号計測装置 2 A の構成、及び動作について説明する。

[0044] 図 3 は、信号変換部 3 0 及び波形計測部 4 0 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 2 A 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 2 A には、必要に応じて、制御装置 5 0 の波形解析部（波形解析装置）5 2 が含まれる。

[0045] なお、図 3 においては、電気信号計測装置 2 A に対し、光計測部 2 0、テストヘッド 1 2 a、及びテストヘッド 1 2 a に接続された遅延発生器（DG : Delay Generator）1 9 を図示するとともに、それらを便宜的に電気信号供給部 8 0 としている。電気信号供給部 8 0 において、光計測部 2 0 は、電気信号出力部 8 1 として機能し、テストヘッド 1 2 a は、同期信号出力部 8 2 として機能し、遅延発生器 1 9 は、トリガ信号出力部 8 3 として機能している。遅延発生器 1 9 は、テストヘッド 1 2 a 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。

[0046] 信号変換部 3 0 は、計測光源 3 1、光減衰器 3 2、及び光変調器 3 3 を有して構成されている。計測光源 3 1 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 4 0 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。

- [0047] この場合、計測光の第 2 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、115 nm 以上 1600 nm 以下の波長範囲内で設定することが好ましく、さらに、十分な感度を得るために、200 nm 以上 1050 nm 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 850 nm 或いは波長 780 nm 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。
- [0048] 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。
- [0049] 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。
- [0050] 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

。

[0051] これらの点を考慮すると、光変調器 33 として、E O 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 E O 変調器、A O 変調器、M O 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 S L D、L E D を用いることが好ましい。

[0052] 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、E O 結晶 330、結晶 330 上に形成された光導波路 331 ~ 334、R F 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 E O 変調器として構成されている。E O 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。

[0053] 図 4 に示す構成では、矩形形状の E O 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。

[0054] 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。

[0055] 第 1、第 2 分岐光導波路 332、333 の間には、その入力側に R F 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。R F 電

極 3 3 5 に対して、第 1 分岐光導波路 3 3 2 を挟んでグラウンド電極 3 3 7 a が設けられ、第 2 分岐光導波路 3 3 3 を挟んでグラウンド電極 3 3 7 b が設けられている。また、バイアス電極 3 3 6 に対して、第 1 分岐光導波路 3 3 2 を挟んでグラウンド電極 3 3 7 c が設けられ、第 2 分岐光導波路 3 3 3 を挟んでグラウンド電極 3 3 7 d が設けられている。

[0056] 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、R F 電極 3 3 5 またはバイアス電極 3 3 6 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。E O 結晶 3 3 0 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 3 3 2、3 3 3 の間での光路差が変化し、出力光導波路 3 3 4 から出力される干渉光の強度が変化する。

[0057] E O 結晶 3 3 0 上で入力側に位置する R F 電極 3 3 5 には、計測光の強度変調に用いられる、光計測部 2 0 からの電気信号が印加される。これにより、光変調器 3 3 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 3 3 6 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。

[0058] 上記のように E O 変調器を用いた光変調器 3 3 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 3 3 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 3 3 として、光集積回路 (P I C : 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。

[0059] 再び図 3 を参照する。波形計測部 4 0 は、入力光学系 4 1、ストリーク管 4 2、出力光学系 (結像光学系) 4 3、撮像素子 4 4、及び同期部 4 5 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 4 2 を含

む波形計測部40には、遅延発生器19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。

[0060] 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、MCP425については、設けない構成としてもよい。

[0061] なお、以下の各図において、図5にxyz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。

[0062] 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。

[0063] 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。

[0064] 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。

[0065] 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6.5μm×6.5μm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。

[0066] 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。

[0067] 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。

[0068] 波形計測部40のストリークカメラは、上記のような半導体デバイスDの検査を好適に実行するため、電圧印加部12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。

[0069] 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。

[0070] 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800fs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。

[0071] 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 4 2 の前段に設けられた入力光学系 4 1 の構成について説明する。上記の構成では、ストリーク管 4 2 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 4 2 1 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。

[0072] 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 4 1 は、光信号をストリーク管 4 2 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。

[0073] 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。

[0074] 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。

[0075] 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。

[0076] 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。

[0077] 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1 5 μ mである。

[0078] 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3 0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示し、図10 (b) は、光信号の生成がOFFの状態を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。

[0079] 図1～図3に示した半導体検査装置1 A、及び電気信号計測装置2 Aによって行われる半導体検査方法は、検査ステップと、光計測ステップと、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。検査ステップでは、半導体検査部1 0において、半導体デバイスDに対してプローブ光を照射し、半導体デバイスDからの反射光を出力する。なお、検査ステップにおいて、電圧印加部1 2を用いて、半導体デバイスDに対して所定のテストパターンを印加する電圧印加ステップを行ってもよい。

[0080] 光計測ステップでは、光検出器2 5を含む光計測部2 0において、半導体

デバイスDからの反射光を検出し、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する。信号変換ステップでは、電気信号計測装置2Aの信号変換部30において、光計測部20から出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、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。

[0081] 波形計測ステップでは、電気信号計測装置2Aの波形計測部40において、ストリーク管42及び撮像素子44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。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、それによって半導体デバイスDについて所定の検査を行う。

[0082] 上記実施形態による半導体検査装置1A、電気信号計測装置2A、及び半導体検査方法の効果について説明する。

[0083] 図1～図8に示した半導体検査装置1A、及び半導体検査方法では、検査対象の半導体デバイスDに対してプローブ光源21から第1波長のプローブ光を照射し、その反射光を光検出器25で検出して、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形の電気信号を生成する。そして、この電気信号を光変調器33によって第2波長の光信号へと変換した後、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。

[0084] 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を用いて波形計測を行うことにより、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する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、プローブ光の第1波長と、第1波長とは異なる計測光の第2波長とをそれぞれ適切に設定することにより、プローブ光による半導体デバイスDの検査と、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による波形計測とを好適に両立して、反射光の強度の時間変化を精度良く計測することが可能となる。

- [0085] 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20GHz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。
- [0086] ここでは、フェムト秒レーザからのパルスレーザ光を、40GHz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1550nm、繰り返し周波数は100MHz、パルス幅は100fs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20GHz帯域のDPO72004Cを使用している。
- [0087] 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。
- [0088] 上記実施形態の検査装置1A及び検査方法では、波形計測部40において、ストリーク管42の蛍光面426が、半導体デバイスDの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。
- [0089] 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、計測対象である半

導体デバイスDからの反射光の強度等の条件に応じて、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。

[0090] 上記実施形態の検査装置1A及び検査方法では、半導体デバイスDに対して、テスト周期で電圧が時間変化するテストパターンを印加する電圧印加部12を設け、波形計測部40は、電圧印加部12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構成としてもよい。

[0091] この場合、半導体デバイスDにテストパターンを印加することにより、半導体デバイスDの状態がテスト周期で時間変化する。そして、電圧印加部12からの同期信号またはトリガ信号を用いて、ストリーク管42を含む波形計測部40における光信号の時間波形の計測動作を制御することにより、テストパターンの印加に起因する半導体デバイスDからの反射光の強度の時間変化を好適に計測することができる。

[0092] 上記実施形態の検査装置1A及び検査方法では、プローブ光及び計測光の波長の設定については、上述したように、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され、計測光の第2波長は、200nm以上1050nm未満の波長範囲内で設定されることが好ましい。これにより、プローブ光による半導体デバイスDの検査と、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による波形計測とを好適に両立することができる。

[0093] なお、半導体検査装置へのストリークカメラの適用については、例えば、半導体デバイスDからのプローブ光の赤外反射光を直接、ストリークカメラで計測する構成も考えられる。しかしながら、半導体検査に用いられる赤外光の波長域では、ストリーク管の光電面における量子効率が、例えば1%程度と低く、十分な計測効率を得ることができない。また、そのような波長域の光に適用が可能な赤外光電面は、製造歩留まりが悪いという問題もある。

これに対して、上記のように反射光を検出して電気信号を生成し、電気信号を別波長の光信号に変換した後にストリークカメラで計測することにより、高効率かつ高速で波形計測を行うことができる。

[0094] 上記実施形態の検査装置 1 A 及び検査方法では、波形解析部 5 2 は、信号変換部 3 0 における光信号の生成が O N の状態で取得された波形画像を、光信号の生成が O F F の状態で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 5 2 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、反射光の強度の時間変化を精度良く計測することができる。

[0095] 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 4 2 の蛍光面 4 2 6 または撮像素子 4 4 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、半導体検査装置 1 A 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。

[0096] 例えば、信号変換部 3 0 の光変調器 3 3 に用いられる E O 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 3 3 に対して放熱対策を行うとともに、波形計測部 4 0 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。

[0097] 上記のような時間による特性ドリフトの補正では、十分な補正効果を得るため、短時間で波形画像取得及びベース画像取得を切り替えて行うことが好ましい。しかしながら、本装置では、高速の信号を取り扱う必要があるため、スイッチ等で計測を切り替えることは難しい。そのため、上記の計測切替においては、例えば、光増幅器 2 3 として用いられる S O A の電源制御による O N / O F F 切替、光検出器 2 5 として用いられる P I N - P D の O N / O F F 切替、A C アンプ 2 6 の O N / O F F 切替などを用いることができる。特に、最も高速かつゲイン特性への影響が小さい方法として、光増幅器 2

3のSOAのON/OFF切替を用いることが好ましい。

[0098] 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る、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0.1mW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、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300 mV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、0.15 mV~1.5 mV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を十分に広くすることができる。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。

[0108] 上記構成における反射光の強度の時間変化の計測条件について、さらに具体的に説明する。光信号を計測、積算する場合、そのDC成分の除去が重要となる。光センサには飽和という問題があり、計測可能な光量に上限がある。したがって、DC成分を除去せずに光信号の時間変化(AC成分)を計測する場合、ショットノイズの比率の増加、AC成分の測定効率の低下などの問題がある。

[0109] まず、光信号の検出側について考える。具体例として、1秒間に2000点のデータで構成される波形を、ストリークカメラの2000×2000画素のカメラで取得される画像の100フレームから作成する。このとき、1画素の飽和電荷量を30kとすると、データ1点に含まれる電子数は、1秒積算した場合、最大で2000×30k×100で60億個となる。また、データの総電子数は、1秒積算した場合、12兆個となる。

[0110] 上記の場合、信号量に対するショットノイズ基準のS/Nは、1/77000となる。実際には、飽和ギリギリでの計測は難しいため、飽和の半分程度と想定すると、S/Nは1/√2倍となり、ノイズ量は信号量に対して約1/50000となる。このとき、EOPの信号レベルは、上記したように

光量の1万分の1～10万分の1程度であるため、画像取得側では、理想的には S/N は0.5～5程度となる。

[0111] 次に、光信号の入力側について考える。EOPにおける反射光の光量は、上記したように例えば0.1mW程度である。また、このときの光子数は、波長 $1.3\mu\text{m}$ で換算すると毎秒約660兆個である。このときに期待される S/N は、2000点の波形に対して同様に2.3～23程度となる。なお、ここでは、シンクロスキャンモードにおけるアパーチャタイムの $1/6$ を考慮している。

[0112] しかしながら、実際に反射光を直接にストリークカメラに入力する場合、ストリークカメラの光電面の耐久力（ $10\mu\text{W}$ 程度のため光量 $1/10$ ）、量子効率（赤外結晶光電面の場合に $1/100$ ）、及び内部の電子の利用効率（ $1/10$ ）を考慮すると、 S/N は $1/100$ に低下し、0.02～0.2程度となる。すなわち、オフセットを除去せずに計測する場合、計測における S/N を制限するのは、ストリークカメラ内の電子数によるショットノイズとなる。

[0113] これに対して、上記したように、ACアンプ等を介してオフセットを除去することで、光電面への入力光量を抑制しつつ、計測の S/N を向上することができる。上記構成のシステムでは、オフセットを例えば $1/10$ とすることができる。これにより、光電面への入力光量を保ったまま、電子数で決まるショットノイズに対して光信号の振幅を大きくすることで、 S/N を10倍程度改善することができる。

[0114] さらに、アパーチャタイムのみに光を入力することで平均光量を6倍とし、また、波長をずらして量子効率を20%とすることで電子数を20倍に増加させることができる。ただし、光信号の波長が短くなる分、量子ノイズは25%程度増加する。以上より、上記構成での計測において、期待される S/N は、約90倍改善して、1.8～18.0程度となる。すなわち、上記したオフセット除去により、検出側で制限される S/N の上限を超えることができる。

- [0115] 以上の説明は、最速の同期周波数での計測を想定した場合のものであるが、半導体テストでのテスト周期が同期周波数の整数倍となる場合は、光電面側、カメラ側で光量の余裕が発生する。そのため、そのような場合には、それに応じて瞬間的な入力光量を増やすことができる。したがって、通常のEOPにおいて周期が伸びるとS/Nが低下するという問題を低減することができる。
- [0116] 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100GHzで2.25%、また、帯域1GHzでは0.225%となる。また、信号レベルは、0.001%~0.01%である。
- [0117] 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1GHz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10GHzに対して必要な積算回数は5000万回、帯域40GHzに対して必要な積算回数は2億回となる。
- [0118] 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。
- [0119] 半導体検査装置1Aを用いて実行される半導体デバイスDの検査方法の具体的な一例について説明する。まず、検査対象となる半導体デバイスDのパターン像やEOFM像を取得して、半導体デバイスD上において計測対象位置を設定する。次に、第2光計測部61及び第2波形計測部62を用いて通常のEOP計測を行って、半導体デバイスDからの反射光の強度の時間変化

を示す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 E O P 計測のための計測レンジを設定する。

[0120] 次に、E O P 計測で取得された時間波形を表示部 5 4 において表示し、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、光計測部 2 0 及び電気信号計測装置 2 A を用いて計測を行って、波形解析部 5 2 において反射光の強度の時間変化を示す時間波形を求め、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、ベース補正を行ってもよい。

[0121] 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。

[0122] 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。

[0123] 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 4 1 4 は、結像レンズを兼ねている。

[0124] 図 1 4 は、波形計測部 4 0 における入力光学系 4 1 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。

[0125] 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。

[0126] 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。一般には、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。

[0127] 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の構成、及び動作について、さらに説明する。

[0128] 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。

- [0129] 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。
- [0130] 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。
- [0131] 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。
- [0132] 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。
- [0133] この場合、図 17 に示すように、蛍光面 426 には、主掃引による電子像 P5 と、戻り掃引による電子像 P6 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。

- [0134] 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。
- [0135] 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。
- [0136] 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 との間にイメージインテンシファイアを設け、このイメージインテンシファイアの 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。
- [0137] 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 3 3 の後段に配置する構成としてもよい。
- [0138] また、電気信号計測装置 2 B 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 3 4 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 4 0 において、ストリーク管 4 2 は、半導体検査部 1 0 に

おけるテスト周期のうちで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。

[0139] 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) テスタヘッド12aから供給される同期信号、(b) テスタヘッド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。

[0140] 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。

[0141] 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のテストヘッド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。

[0142] 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、テストヘッド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。

[0143] 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。

[0144] 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。

[0145] 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。

[0146] 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。

[0147] 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。

[0148] 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。

[0149] 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。

[0150] 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。

[0151] 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。

[0152] 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。

[0153] 半導体検査装置、及び半導体検査方法は、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、光計測部20の構成について、図2では光増幅器23、光検出器25、及びACアンプ26を有する構成としているが、光増幅器23、及びACアンプ26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、半導体検査部10の構成についても、図1、図2に示した構成に限らず、具体的には様々な構成を用いてよい。

[0154] また、電気信号計測装置2Aの構成についても、図3、図16、図19、図21に示した構成に限らず、具体的には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。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、光計測部20、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。

[0155] 上記実施形態による第1態様の半導体検査装置は、(1)所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して、第1波長のプローブ光を照射し、半導体デバイスでプローブ光が反射された反射光を出力する検査光学系と、(2)検査光学系から出力された反射光を検出する光検出器を有し、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測部と、(3)第1波長とは異なる第2波長の計測光を供給する計測光源、及び光計測部から出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、(4)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、

(5) 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、(6) 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、テスト周期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を有し、(7) 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。

[0156] 上記実施形態による第1態様の半導体検査方法は、(1) 所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して、第1波長のプローブ光を照射し、半導体デバイスでプローブ光が反射された反射光を出力する検査ステップと、(2) 検査ステップで出力された反射光を検出する光検出器を用い、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測ステップと、(3) 光計測ステップで出力された電気信号に基づいて、第1波長とは異なる第2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、(4) 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、(5) 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、(6) 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、テスト周期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、(7) 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。

[0157] 上記実施形態による第13態様の半導体検査装置は、(1) 所定のテスト

周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して第1波長のプローブ光を照射し、半導体デバイスでプローブ光が反射された反射光を出力する検査光学系と、(2)検査光学系から出力された反射光を検出する光検出器を有し、反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測部と、(3)第1波長とは異なる第2波長の計測光を供給する計測光源、及び光計測部から出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、(4)ストリークカメラを有し、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、(5)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、(6)ストリークカメラは、光信号の入力に応じて、光信号の時間波形を示す波形画像を出力し、(7)波形解析部は、ストリークカメラ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。

[0158] 第2態様の半導体検査装置では、上記第1態様の構成において、波形計測部において、ストリーク管の蛍光面は、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。

[0159] 第2態様の半導体検査方法では、上記第1態様の構成において、波形計測ステップにおいて、ストリーク管の蛍光面は、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。

[0160] 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。

[0161] 第3態様の半導体検査装置では、上記第1または第2態様の構成において、半導体デバイスに対して、テスト周期で電圧が時間変化するテストパターンを印加する電圧印加部をさらに備え、波形計測部は、電圧印加部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構成としてもよい。

[0162] 第3態様の半導体検査方法では、上記第1または第2態様の構成において、半導体デバイスに対して、テスト周期で電圧が時間変化するテストパターンを印加する電圧印加ステップをさらに備え、波形計測ステップにおいて、電圧印加ステップで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構成としてもよい。

[0163] 上記構成では、半導体デバイスにテストパターンを印加することにより、半導体デバイスの状態がテスト周期で時間変化する。そして、電圧印加部からの同期信号またはトリガ信号を用いて、ストリーク管を含む波形計測部における光信号の時間波形の計測動作を制御することにより、テストパターンの印加に起因する半導体デバイスからの反射光の強度の時間変化を好適に計測することができる。

[0164] 第4態様の半導体検査装置では、上記第1～第3態様のいずれかの構成において、光計測部は、検査光学系から出力された反射光を増幅して出力する光増幅器を有し、光検出器は、光増幅器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、半導体検査装置では、上記態様のいずれかの構成において、光計測部の光検出器は、PINフォトダイオードである構成としてもよい。

[0165] これらの構成によれば、半導体デバイスからの反射光の光計測部による計測、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。

[0166] 第5態様の半導体検査装置では、上記第1～第4態様のいずれかの構成において、光計測部は、光検出器から出力された検出信号の交流成分を増幅して電気信号として出力するACアンプなどの増幅素子を有する構成としてもよい。

[0167] このような構成によれば、光検出器の後段の増幅素子で、検出信号の交流成分のみを増幅することにより、検出信号における信号強度の時間変化を抽出するとともに、信号変換部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。

- [0168] 第6態様の半導体検査装置では、上記第1～第5態様のいずれかの構成において、信号変換部の光変調器は、E O変調器である構成としてもよい。
- [0169] このように、計測光を強度変調する光変調器として、E O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。
- [0170] 第7態様の半導体検査装置では、上記第1～第6態様のいずれかの構成において、信号変換部は、テスト周期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。
- [0171] 第4態様の半導体検査方法では、上記第1～第3態様のいずれかの構成において、信号変換ステップにおいて、テスト周期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。
- [0172] この場合、第8態様の半導体検査装置では、上記第7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。
- [0173] また、第5態様の半導体検査方法では、上記第4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。
- [0174] 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E O変調器を好適に用いることができる。
- [0175] 第9態様の半導体検査装置では、上記第1～第8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、テスト周期のうちで電気信

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。

[0176] 第6態様の半導体検査方法では、上記第1～第5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、テスト周期のうちで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。

[0177] 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。

[0178] 第10態様の半導体検査装置では、上記第1～第9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。

[0179] 第7態様の半導体検査方法では、上記第1～第6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。

[0180] 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。

[0181] 第11態様の半導体検査装置では、上記第1～第10態様のいずれかの構成において、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され、計測光の第2波長は、200nm以上1050nm未満の波長範囲内で設定される構成としてもよい。

[0182] 第8態様の半導体検査方法では、上記第1～第7態様のいずれかの構成において、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され、計測光の第2波長は、200nm以上1050nm未

満の波長範囲内で設定される構成としてもよい。

[0183] プローブ光の第1波長と、第1波長とは異なる計測光の第2波長とを上記のように設定することにより、プローブ光による半導体デバイスの検査と、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とを好適に両立することができる。

[0184] 第12態様の半導体検査装置では、上記第1～第11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。

[0185] 第9態様の半導体検査方法では、上記第1～第8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。

[0186] 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、反射光の強度の時間変化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

[0187] 実施形態は、検査対象の半導体デバイスにプローブ光を照射したときの反射光の強度の時間変化を高速で計測することが可能な半導体検査装置、及び半導体検査方法として利用可能である。

符号の説明

[0188] 1A…半導体検査装置、2A～2D…電気信号計測装置、D…半導体デバイス、10…半導体検査部、11…検査光学系、12…電圧印加部、12a…テストヘッド、12b…テストボード、13…暗箱、14…ステージ、15…走査光学系、16…結像光学系、17…対物レンズ、18…ターレット、19…遅延発生器、20…光計測部、21…プローブ光源、22…光カプラ、23…光増幅器、24…光分岐器、25…光検出器、26…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…E O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…R F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…M C P、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、
8 3…トリガ信号出力部。

請求の範囲

- [請求項1] 所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して第1波長のプローブ光を照射し、前記半導体デバイスで前記プローブ光が反射された反射光を出力する検査光学系と、
- 前記検査光学系から出力された前記反射光を検出する光検出器を有し、前記反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測部と、
- 前記第1波長とは異なる第2波長の計測光を供給する計測光源、及び前記光計測部から出力された前記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、前記テスト周期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、
- 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、半導体検査装置。

- [請求項2] 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、前記テスト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に記載の半導体検査装置。
- [請求項3] 前記半導体デバイスに対して、前記テスト周期で電圧が時間変化するテストパターンを印加する電圧印加部をさらに備え、
前記波形計測部は、前記電圧印加部から供給される同期信号またはトリガ信号に基づいて、前記光信号の前記時間波形についての計測動作を制御する、請求項1または2に記載の半導体検査装置。
- [請求項4] 前記光計測部は、前記検査光学系から出力された前記反射光を増幅して出力する光増幅器を有し、前記光検出器は、前記光増幅器によって増幅された前記反射光を検出する、請求項1～3のいずれか一項に記載の半導体検査装置。
- [請求項5] 前記光計測部は、前記光検出器から出力された検出信号の交流成分を増幅して前記電気信号として出力する増幅素子を有する、請求項1～4のいずれか一項に記載の半導体検査装置。
- [請求項6] 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1～5のいずれか一項に記載の半導体検査装置。
- [請求項7] 前記信号変換部は、前記テスト周期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1～6のいずれか一項に記載の半導体検査装置。
- [請求項8] 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7に記載の半導体検査装置。
- [請求項9] 前記波形計測部において、前記ストリーク管は、前記テスト周期のうちで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1～8のいずれか一項に記載の半導体検査装置。

- [請求項10] 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1～9のいずれか一項に記載の半導体検査装置。
- [請求項11] 前記プローブ光の前記第1波長は、1050nm以上5000nm以下の波長範囲内で設定され、前記計測光の前記第2波長は、200nm以上1050nm未満の波長範囲内で設定される、請求項1～10のいずれか一項に記載の半導体検査装置。
- [請求項12] 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の状態を取得された前記波形画像を、前記光信号の生成がOFFの状態を取得されたベース画像に基づいて補正する、請求項1～11のいずれか一項に記載の半導体検査装置。
- [請求項13] 所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して第1波長のプローブ光を照射し、前記半導体デバイスで前記プローブ光が反射された反射光を出力する検査光学系と、
前記検査光学系から出力された前記反射光を検出する光検出器を有し、前記反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測部と、
前記第1波長とは異なる第2波長の計測光を供給する計測光源、及び前記光計測部から出力された前記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、
ストリークカメラを有し、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、

前記ストリークカメラは、前記光信号の入力に応じて、前記光信号の前記時間波形を示す波形画像を出力し、

前記波形解析部は、前記ストリークカメラ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、半導体検査装置。

[請求項14]

所定のテスト周期で状態が時間変化する半導体デバイスに対して第1波長のプローブ光を照射し、前記半導体デバイスで前記プローブ光が反射された反射光を出力する検査ステップと、

前記検査ステップで出力された前記反射光を検出する光検出器を用い、前記反射光の強度の時間変化に応じた時間波形を有する電気信号を出力する光計測ステップと、

前記光計測ステップで出力された前記電気信号に基づいて、前記第1波長とは異なる第2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、前記テスト周期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、半導体検査方法。

[請求項15] 前記波形計測ステップにおいて、前記ストリーク管の前記蛍光面は、前記テスト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14に記載の半導体検査方法。

[請求項16] 前記半導体デバイスに対して、前記テスト周期で電圧が時間変化するテストパターンを印加する電圧印加ステップをさらに備え、
前記波形計測ステップにおいて、前記電圧印加ステップで供給される同期信号またはトリガ信号に基づいて、前記光信号の前記時間波形についての計測動作を制御する、請求項14または15に記載の半導体検査方法。

[請求項17] 前記信号変換ステップにおいて、前記テスト周期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14～16のいずれか一項に記載の半導体検査方法。

[請求項18] 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17に記載の半導体検査方法。

[請求項19] 前記波形計測ステップにおいて、前記ストリーク管は、前記テスト周期のうちで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14～18のいずれか一項に記載の半導体検査方法。

[請求項20] 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１４～１９のいずれか一項に記載の半導体検査方法。

[請求項21] 前記プローブ光の前記第１波長は、１０５０ｎｍ以上５０００ｎｍ以下の波長範囲内で設定され、前記計測光の前記第２波長は、２００ｎｍ以上１０５０ｎｍ未満の波長範囲内で設定される、請求項１４～２０のいずれか一項に記載の半導体検査方法。

[請求項22] 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の状態を取得された前記波形画像を、前記光信号の生成がＯＦＦの状態を取得されたベース画像に基づいて補正する、請求項１４～２１のいずれか一項に記載の半導体検査方法。