

明 細 書

発明の名称：

半導体デバイス検査方法及び半導体デバイス検査装置

技術分野

[0001] 実施形態の一側面は、半導体デバイス検査方法及び半導体デバイス検査装置に関する。

背景技術

[0002] 従来から、3次元的に半導体チップが積層された半導体デバイスの電気特性を解析する手法として、ロックインO B I R C H (Lock-in Optical Beam Induced Resistance Change) が知られている (例えば、下記非特許文献1 参照)。この手法によれば、半導体デバイスにレーザをスキャンしながら抵抗等の電気特性の変化を測定することにより、非破壊での半導体デバイスの故障解析が実現される。

先行技術文献

非特許文献

[0003] 非特許文献1: K.J.P. Jacobs et al., “Lock-in thermal laser stimulation for non-destructive failure localization in 3-D devices”, Microelectronics Reliability, Vol.76-77(2017), Pages188-193.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 上述したような従来の手法においては、半導体チップがレーザの照射方向に複数の層で積層された半導体デバイスを対象にした場合に、積層構成に対応して電気特性を解析することが望まれていた。

[0005] そこで、実施形態の一側面は、かかる課題に鑑みてなされたものであり、半導体デバイスの積層構成に対応した電気特性を解析することが可能な半導体デバイス検査方法及び半導体デバイス検査装置を提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

- [0006] 実施形態の一側面に係る半導体デバイス検査方法は、半導体デバイスに対して電力を供給すると同時に半導体デバイスの電力の供給に応じた電気特性を測定するステップと、第1の周波数で強度変調された光と、第1の周波数よりも高い第2の周波数で強度変調された光を半導体デバイスに走査し、当該走査に応じた第1の周波数成分及び第2の周波数成分の電気特性を示す特性信号を取得するステップと、半導体デバイスにおける光の光軸方向の第1の位置の電気特性が反映される第1の走査位置の特性信号の位相成分を基準にして、任意の走査位置の特性信号の位相成分を補正するステップと、半導体デバイスにおける光の光軸方向の第1の位置と異なる第2の位置の電気特性が反映される第2の走査位置の特性信号の位相成分を特定し、当該位相成分を用いて任意の走査位置の特性信号の位相成分を規格化するステップと、任意の走査位置の規格化された特性信号の位相成分に基づいた結果を出力するステップと、を備える。
- [0007] あるいは、実施形態の他の側面に係る半導体デバイス検査装置は、半導体デバイスに対して電力を供給すると同時に半導体デバイスの電力の供給に応じた電気特性を測定する測定器と、第1の周波数で強度変調された光と、第1の周波数よりも高い第2の周波数で強度変調された光を半導体デバイスに走査する光走査装置と、光の走査に応じた第1の周波数成分及び第2の周波数成分の電気特性を示す特性信号を取得する信号取得装置と、特性信号を処理するプロセッサと、を備え、プロセッサは、半導体デバイスにおける光の光軸方向の第1の位置の電気特性が反映される第1の走査位置の特性信号の位相成分を基準にして、任意の走査位置の特性信号の位相成分を補正し、半導体デバイスにおける光の光軸方向の第1の位置と異なる第2の位置の電気特性が反映される第2の走査位置の特性信号の位相成分を特定し、当該位相成分を用いて任意の走査位置の特性信号の位相成分を規格化し、任意の走査位置の規格化された特性信号の位相成分に基づいた結果を出力する。
- [0008] 上記一側面あるいは他の側面によれば、第1の周波数で変調された光と第

2の周波数で変調された光とを半導体デバイスに走査しながら第1の周波数成分及び第2の周波数成分の半導体デバイスの電気特性を測定した特性信号が取得される。そして、取得された任意の走査位置の特性信号の位相成分が、半導体デバイスの光の光軸方向の第1の位置の電気特性が反映される走査位置の特性信号の位相成分を基準に補正されてから、半導体デバイスの当該光軸方向の第2の位置の電気特性が反映される走査位置の特性信号の位相成分が特定され、当該位相成分を用いて任意の走査位置の特性信号の位相成分が規格化される。さらに、任意の走査位置の規格化された特性信号の位相成分に基づいた結果が出力される。これにより、半導体デバイスの任意の走査位置における層構造を推定することができ、半導体デバイスの積層構成に対応した電気特性を解析することができる。

発明の効果

[0009] 本発明の一側面によれば、半導体デバイスの積層構成に対応した電気特性を解析することができる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]実施形態にかかる半導体検査装置1の概略構成図である。

[図2]図1の検査装置19のハードウェア構成の一例を示すブロック図である。

[図3]半導体検査装置1の測定対象の半導体デバイスSの積層構造の一例を示す図である。

[図4]検査装置19で取得された複数の周波数成分の特性信号を二次元画像で表現したイメージを示す図である。

[図5]検査装置19によって解析された位相成分 θ と周波数の平方根 $f^{1/2}$ との関係をプロットしたグラフである。

[図6]検査装置19によって補正された位相成分 θ と周波数の平方根 $f^{1/2}$ との関係をプロットしたグラフである。

[図7]検査装置19によって規格化された位相成分 θ と周波数のスケーリング値 Ω との関係をプロットしたグラフである。

[図8]検査装置 1 9 によって出力された傾き β の二次元画像 G_{β} の一例を示す図である。

[図9]検査装置 1 9 によって出力された温度係数 γ_1 及び温度係数 γ_2 のそれぞれの二次元画像 G_{γ_1} , G_{γ_2} の一例を示す図である。

[図10]半導体検査装置 1 による解析処理の手順を示すフローチャートである。

[図11]本開示の変形例によって生成された差画像のイメージを示す図である。

[図12]本開示の変形例によって生成された出力画像のイメージを示す図である。

[図13]本開示の変形例の測定対象の半導体デバイス S の積層構造の一例を示す図である。

[図14]本開示の変形例の測定対象の半導体デバイス S の積層構造の一例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、添付図面を参照して、本発明の実施形態について詳細に説明する。
なお、説明において、同一要素又は同一機能を有する要素には、同一符号を用いることとし、重複する説明は省略する。

[0012] 図 1 は、実施形態にかかる半導体デバイス検査装置である半導体検査装置 1 の概略構成図である。半導体検査装置 1 は、測定対象物 (DUT: Device Under Test) である半導体デバイスの故障個所の解析を行うために各箇所の電気特性を測定するための装置である。この半導体検査装置 1 の測定対象としては、複数の半導体チップが 2 層以上で積層された半導体デバイスが好適に用いられる。なお、図 1 においては、電気信号の装置間の流れを実線矢印で示し、光信号の装置間の流れを点線矢印で示す。

[0013] すなわち、半導体検査装置 1 は、電圧印加装置 3 及び電流測定装置 5 を含む測定器 7 と、光源 9 と、信号源 11 と、光走査装置 13 と、ロックインアンプ (信号取得装置) 15 と、光検出器 17 と、検査装置 19 とを含んで構

成される。以下、半導体検査装置 1 の各構成要素について詳細に説明する。

[0014] 測定器 7 は、2 つの端子を有し、その 2 つの端子が半導体デバイス S に電氣的に接続されることにより、半導体デバイス S 内に形成される回路に電圧印加装置 3 から定電圧を印加して電力を供給し、その供給に応じて 2 つの端子間の半導体デバイス S 内を流れる電流を、電流測定装置 5 において電気特性として測定する。

[0015] 光源 9 は、例えばレーザ光を照射するレーザ光源（照射源）である。光源 9 は、信号源 11 によって可変の周波数で生成される交流信号を受けて、その交流信号に含まれる周波数で強度変調したレーザ光を生成する。この交流信号は、単一の周波数成分を有する信号であってもよいし、複数の周波数成分を含む信号（例えば、矩形波信号）であってもよい。光走査装置 13 は、光源 9 から照射されたレーザ光を半導体デバイス S に向けて導光して照射させるとともに、半導体デバイス S におけるレーザ光の照射位置を半導体デバイス S の表面に沿って 2 次元的に走査させる。ここで、光走査装置 13 におけるレーザ光の 2 次元的な走査は、検査装置 19 によって制御される。また、光走査装置 13 は、レーザ光の照射に応じて半導体デバイス S の表面から生じた反射光を光検出器 17 に向けて導光する。なお、光源 9 はインコヒーレントな光を生成する SLD や LED、ランプ光源等でもよい。

[0016] ロックインアンプ 15 は、信号源 11 から出力される交流信号をモニターするとともに測定器 7 によって測定された電気特性を示す特性信号を受け、特性信号のうちのレーザ光の変調周波数の周波数成分を抽出（ロックイン検出）して検査装置 19 に出力する。このとき、ロックインアンプ 15 は、交流信号に含まれる複数の周波数成分に応じて、複数の周波数成分を抽出してもよい。光検出器 17 は、光走査装置 13 によって走査されたレーザ光に応じて半導体デバイス S によって生じた反射光を受け、反射光の強度を示す強度信号を検査装置 19 に出力する。

[0017] 検査装置 19 は、ロックインアンプ 15、光検出器 17、及び光走査装置 13 に電氣的に接続され、光走査装置 13 による 2 次元的な走査を制御する

とともに、ロックインアンプ15からの特性信号及び光検出器17からの強度信号を処理するデータ処理装置である。

[0018] 図2は、検査装置19のハードウェア構成を示している。図2に示すように、検査装置19は、物理的には、プロセッサであるCPU (Central Processing Unit) 101、記録媒体であるRAM (Random Access Memory) 102又はROM (Read Only Memory) 103、通信モジュール104、及び入出力モジュール106等を含んだコンピュータ等であり、各々は電気的に接続されている。検査装置19の機能は、CPU101及びRAM102等のハードウェア上にプログラム等を読み込ませることにより、CPU101の制御のもとで、通信モジュール104、及び入出力モジュール106等を動作させるとともに、RAM102におけるデータの読み出し及び書き込みを行うことで実現される。なお、検査装置19は、入出力デバイスとして、ディスプレイ、キーボード、マウス、タッチパネルディスプレイ等を含んでいてもよいし、ハードディスクドライブ、半導体メモリ等のデータ記録装置を含んでいてもよい。また、検査装置19は、複数のコンピュータによって構成されていてもよい。

[0019] 図3は、半導体検査装置1の測定対象の半導体デバイスSの積層構造の一例を示す。半導体デバイスSは、例えば、半導体回路部C1及び配線部W1を含む第1層L1と、半導体回路部C2及び配線部W2を含む第2層L2と、層間配線部W12とを少なくとも有する、多層構造の半導体デバイスである。なお、図3においては、層間に存在する絶縁層の図示を省略している。このような半導体デバイスSにおいては、半導体検査装置1の電圧印加装置3による電圧の印加に伴って、第1層L1にのみに電流が生成される領域A1、第2層L2にのみに電流が生成される領域A2、及び、第1層L1及び第2層L2の両方に電流が生成される領域A12が、層間の界面方向、すなわち半導体デバイスSの表面Suに沿って生ずる。このような半導体デバイスSには、レーザ光の光軸が層間の界面（表面Su）に略垂直となるように第1層L1側からレーザ光が照射される。これにより、レーザ光の集光されて

いる第1層L1の位置から熱が伝搬する。そのため、領域A1への照射に対して得られる特性信号には、光軸方向において光源9に近い第1の位置にある第1層L1の電気特性が反映される。また、領域A2への照射に対して得られる特性信号には、光軸方向において光源9から遠い第2の位置にある第2層L2の電気特性が反映される。また、領域A12への照射に対して得られる特性信号には、第1層L1及び第2層L2の両方の電気特性が反映される。

[0020] 以下、検査装置19の機能について詳細に説明する。

[0021] 検査装置19は、少なくとも、第1の周波数 f_1 で強度変調されたレーザー光、及び第1の周波数よりも高い第2の周波数で強度変調されたレーザー光を、半導体デバイスS上の領域A1、A2、A12を含む領域に2次元的に走査するように光走査装置13を制御する。本実施形態では、検査装置19は、第1及び第2の周波数 f_1 、 f_2 以外の複数の周波数で強度変調されたレーザー光も半導体デバイスSに走査するように制御する。このような複数の周波数で強度変調されたレーザー光は、別々に照射されてもよい。また、矩形波に強度変調したレーザー光のような形態で、複数の周波数で強度変調されたレーザー光を同時に照射したような状態を実現してもよい。

[0022] また、検査装置19は、上記の複数の変調周波数 f_1 、 f_2 、…のレーザー光の走査の制御に応じて、複数の周波数成分 f_1 、 f_2 、…毎にロックイン検出された特性信号を、その位相及び振幅もしくは複素数で表現した信号として半導体デバイスSの走査位置毎に取得し、それらの特性信号を二次元画像に変換して解析する。図4には、検査装置19で取得された複数の周波数成分毎の特性信号を二次元画像で表現したイメージを示している。この二次元画像は、ガウシアンフィルタ等のフィルタが適用されてもよい。理論的には、半導体デバイスS上の各走査位置に対するレーザー光の照射時に得られる特性信号の振幅及び位相を複素数によって表した信号 S_G は、第1層L1及び第2層L2における温度変化をそれぞれ ΔT_1 及び ΔT_2 とし、第1層L1及び第2層L2における温度係数をそれぞれ γ_1 及び γ_2 とすると、下記式（

1) ;

$$S G = \gamma_1 \Delta T_1 + \gamma_2 \Delta T_2 \quad \cdots (1)$$

で表される。検査装置 19 は、このような特性を利用した各層毎の特性信号の解析機能を有する。

[0023] ここで、半導体デバイス S の領域 A 1 に含まれる少なくとも 1 つの走査位置は、設計データに基づいてユーザによって予め検査装置 19 に設定されている。あるいは、当該走査位置は、設計データに基づいて予め検査装置 19 において自動的に特定されている。またあるいは、当該検査装置 19 は、後述する位相成分が周波数に対する変化が最も小さい場所を走査位置として設定してもよい。

[0024] そして、検査装置 19 は、各走査位置で得られた特性信号の位相成分 θ を取得し、その位相成分 θ と周波数の平方根 $f^{1/2}$ との関係を走査位置毎に解析する。図 5 には、検査装置 19 によって解析された位相成分 θ と周波数の平方根 $f^{1/2}$ との関係をプロットしたグラフを示す。このように、領域 A 1 内の走査位置に対応する位相成分 θ の解析点 P 1 と、領域 A 2 内の走査位置に対応する位相成分 θ の解析点 P 2 と、領域 A 1 2 内の走査位置に対応する位相成分 θ の解析点 P 1 2 とが、異なった特性を有するように得られる。

[0025] また、検査装置 19 は、上記のようにして得られた任意の走査位置の位相成分 θ の各解析点を、予め既知の走査位置の解析点 P 1 を基準にして、その解析点 P 1 における位相成分 θ を相殺するように補正する。このとき、検査装置 19 は、位相成分 θ の相殺により $-\pi$ から π に（あるいはその逆に）値が不連続に変化した場合には、その後の解析に支障を与えないように、位相成分 θ に -2π （あるいは 2π ）を加えて位相の連続性を保つように処理する。図 6 には、検査装置 19 によって補正された位相成分 θ と周波数の平方根 $f^{1/2}$ との関係をプロットしたグラフ示す。このようにして補正された位相成分 θ の周波数の平方根 $f^{1/2}$ に対する特性は、領域 A 1, A 2, A 1 2 間で異なった特性を示す。すなわち、領域 A 1 に対応する特性は常にゼロに近い値を持ち、領域 A 2 に対応する特性は周波数の平方根 $f^{1/2}$ に対して傾き α の

線形な特性を持ち、領域 A 1 2 に対応する特性は極値を持つ特性となる。

[0026] そして、検査装置 1 9 は、上記のようにして補正された任意の走査位置の位相成分 θ の特性から、異なる周波数の平方根 $f^{1/2}$ の間の変化が線形的である特性を有する特性を、領域 A 2 に対応する走査位置の特性として特定する。このとき、検査装置 1 9 は、解析点が第 1 の周波数 f_1 及び第 2 の周波数 f_2 しか持たない場合には、2 つの周波数 f_1 、 f_2 の平方根 $f^{1/2}$ の間の変化が相対的に大きい走査位置の特性を、領域 A 2 に対応する走査位置の周波数特性として特定してもよい。さらに、検査装置 1 9 は、特定した領域 A 2 に対応する走査位置の解析点 P 2 を基に、その解析点 P 2 の異なる周波数の平方根 $f^{1/2}$ 間の傾き（変化率） α を基準にして、任意の走査位置の位相成分 θ の特性を対象に、その位相成分 θ の周波数の平方根 $f^{1/2}$ に対する変化率を規格化する。具体的には、任意の走査位置の特性において、横軸を $\Omega = |\alpha| \times f^{1/2}$ でスケーリングするようにその特性を規格化する。このとき、傾き α は、複数の解析点 P 2 を近似した直線の傾きから求められてもよいし、解析点 P 2 が第 1 の周波数 f_1 及び第 2 の周波数 f_2 に対応した 2 点しか持たない場合には 2 点間の傾きから求められてもよい。

[0027] 図 7 には、検査装置 1 9 によって規格化された位相成分 θ と周波数のスケーリング値 Ω との関係をプロットしたグラフを示す。このとき、上記式（1）の理論式より、周波数が低い箇所（ゼロに近い箇所）の位相成分 θ の傾きは、下記式（2）；

[0028] [数1]

$$\left. \frac{d\theta}{d\Omega} \right|_{\Omega \sim 0} = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad \dots (2)$$

によって表される。変調周波数が低い場合には、特性信号 S G に第 1 層 L 1 及び第 2 層 L 2 の電気特性が特性信号に反映されるが、変調周波数が高い場合には第 2 層 L 2 の電気特性は特性信号に反映されなくなる。

[0029] この性質を利用して、検査装置 1 9 は、十分高い変調周波数で得られた特

性信号で表現された二次元画像の各画素の値を、第1層L1の温度係数 γ_1 として取得する。ただし、第2層L2の寄与がゼロになることはなく少なからず存在するため、位相のばらつき具合とシグモイド関数を基に重みを決定するフィルタを適用した後の数値を温度係数 γ_1 とする。このフィルタによれば、次のようにして重みが決定される。すなわち、注目画素の振幅と位相をそれぞれ R_0 、 θ_0 とし、その周辺の画素の振幅と位相をそれぞれ R_i 、 θ_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$ 、 N は自然数)とした場合に、下記式(3)；

[0030] [数2]

$$s = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \cos(\theta_i - \theta_0)}{N} \quad \dots (3)$$

によって値 s を算出し、この値 s を基に、下記式(4)；

[0031] [数3]

$$w = \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{s - s_{th}}{r}\right)} \quad \dots (4)$$

によって重み w を決定する。

[0032] さらに、検査装置19は、上述した機能により規格化された任意の走査位置の位相成分 θ の解析点を参照しながら、解析点のスケーリング値 Ω に対する傾き(変化率) β を、 $\Omega = 0$ の近傍において算出する。この傾き β は、第1の周波数 f_1 に対応する解析点と第2の周波数 f_1 に対応する解析点との間の傾きから求められてもよいし、3点以上の解析点を近似する曲線を求め、その曲線の $\Omega = 0$ における接線の傾きから求められてもよい。そして、検査装置19は、決定された当該走査位置に対応する画素における温度係数 γ_1 と、当該走査位置に対応して算出された傾き β とを、上記式(2)に代入することにより、当該走査位置における温度係数 γ_2 を算出する。

[0033] 検査装置19は、このような温度係数 γ_2 の算出をそれぞれの走査位置に関して繰り返すことにより、各走査位置毎に温度係数 γ_1 及び温度係数 γ_2 を求める。また、検査装置19は、各走査位置毎に算出された傾き β を二次元画

像として、ディスプレイ等の入出力モジュール 106 に出力し、各走査位置毎に算出された温度係数 γ_1 及び温度係数 γ_2 のそれぞれを、第 1 層 L1 及び第 2 層 L2 の電気特性を示す二次元画像として入出力モジュール 106 に出力する。

[0034] 図 8 には、検査装置 19 によって出力された傾き β の二次元画像 G_β の一例を示し、図 9 には、検査装置 19 によって出力された温度係数 γ_1 及び温度係数 γ_2 のそれぞれの二次元画像 G_{γ_1} , G_{γ_2} の一例を示している。このように、二次元画像 G_β 上に傾き β の各走査位置における分布が反映され、それぞれの二次元画像 G_{γ_1} , G_{γ_2} 上に温度係数 γ_1 及び温度係数 γ_2 の各走査位置における分布が別々に反映される。

[0035] ここで、検査装置 19 は、二次元画像 G_{γ_1} , G_{γ_2} 上に温度係数 γ_1 及び温度係数 γ_2 のそれぞれを反映させる際には、画像上で各層の特性を解析させやすくするために、第 1 層 L1 及び第 2 層 L2 の両方が反応する程度の変調周波数でロックイン検出された特性信号の振幅 R を用いた重み付けをした値 γ_{1w} , γ_{2w} を、下記式 (5) 及び下記式 (6) ;

[0036] [数4]

$$\gamma_{1w} = \frac{\gamma_1}{|\gamma_1| + |\gamma_2|} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{R_{th}}\right) \right) \quad \dots (5)$$

[0037] [数5]

$$\gamma_{2w} = \frac{\gamma_2}{|\gamma_1| + |\gamma_2|} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{R_{th}}\right) \right) \quad \dots (6)$$

により計算してもよい。なお、 R_{th} は、画像を見やすくするために調整するための閾値である。

[0038] 次に、本実施形態に係る半導体検査装置 1 を用いた半導体デバイス S を対象にした解析処理の手順、すなわち、本実施形態に係る半導体デバイス検査方法の流れについて説明する。図 10 は、半導体検査装置 1 による解析処理の手順を示すフローチャートである。

- [0039] まず、測定器 7 によって、半導体デバイス S に対する電力の供給と、半導体デバイス S の電気特性の測定が開始される（ステップ S 1）。次に、検査装置 19 によって光走査装置 13 の動作が制御されることにより、第 1 の周波数 f_1 で強度変調されたレーザ光が半導体デバイス S 上に 2 次元的に走査されると同時に、検査装置 19 においてロックインアンプ 15 によってその第 1 の周波数 f_1 でロックイン検出された特性信号が取得される（ステップ S 2）。
- [0040] さらに、検査装置 19 において、取得された特性信号の二次元分布を示す二次元画像が取得される（ステップ S 3）。その後、レーザ光の変調周波数が第 2 の周波数 f_1 、及び第 1 及び第 2 の周波数以外の周波数に順次変更されて（ステップ S 4）、ステップ S 2 及びステップ S 3 の処理が繰り返されることにより、複数の周波数 f_2 、…でそれぞれロックイン検出された複数の特性信号が取得される。
- [0041] 次に、検査装置 19 によって、各走査位置の特性信号を基に周波数の平方根 $f^{1/2}$ に対する特性信号の位相成分 θ の関係が解析され、半導体デバイス S の領域 A 1 内の位相成分の解析点を基準にして、任意の走査位置の位相成分 θ の解析点が補正される（ステップ S 5）。さらに、検査装置 19 によって、任意の走査位置の位相成分 θ の解析点から半導体デバイス S の領域 A 2 内の走査位置に対応する位相成分 θ の解析点 P 2 が特定され、その解析点 P 2 間の傾き α を基準にして、任意の走査位置の位相成分 θ の解析点の変化率が規格化される（ステップ S 6）。
- [0042] その後、検査装置 19 により、規格化された任意の走査位置の位相成分 θ の解析点における $\Omega = 0$ 近傍の傾き β が算出され、その傾き β と別途取得した当該走査位置における第 1 層 L 1 の温度係数 γ_1 とを基に、当該走査位置における第 2 層 L 2 の温度係数 γ_2 が算出される（ステップ S 7）。その後、解析対象の走査位置が順次変更されて（ステップ S 7）、ステップ S 5～ステップ S 7 の処理が繰り返されることにより、複数の走査位置における温度係数 γ_1 、 γ_2 が取得される。

- [0043] さらに、検査装置 19 によって、全ての走査位置における温度係数 γ_1 、 γ_2 が、重み付けによって値 γ_{1w} 、 γ_{2w} に調整される（ステップ S 10）。最後に、検査装置 19 において、各層 L 1、L 2 における温度係数 γ_{1w} 、 γ_{2w} の分布を示す二次元画像が出力される（ステップ S 10）。
- [0044] 以上説明した半導体検査装置 1 によれば、複数の周波数で変調されたレーザ光を半導体デバイス S に二次元的に走査しながら複数の周波数成分の半導体デバイス S の電気特性をロックイン検出した特性信号が取得される。そして、取得された任意の走査位置の特性信号の位相成分 θ が、半導体デバイス S の第 1 層 L 1 の電気特性が反映される走査位置の特性信号の位相成分 θ を基準に補正される。さらに、半導体デバイス S の第 2 層 L 2 の電気特性が反映される走査位置の特性信号の位相成分 θ が特定され、当該位相成分 θ を用いて任意の走査位置の特性信号の位相成分 θ が規格化される。さらに、任意の走査位置の規格化された特性信号の位相成分 θ に基づいた結果が出力される。これにより、半導体デバイス S の任意の走査位置における層構造を推定することができ、半導体デバイス S の積層構成に対応した電気特性を解析することができる。
- [0045] また、上記のような位相成分 θ の補正により、第 1 層 L 1 の電気特性が反映される走査位置の特性信号の位相成分 θ に対する任意の走査位置の位相成分 θ の相対値が取得できる。これにより、位相成分 θ を基にした層構造の容易な推定が可能となる。
- [0046] また、上記のような位相成分 θ を規格化する際に、特性信号の位相成分 θ の周波数特性を基に走査位置が特定されることで、第 2 層 L 2 の電気特性を反映する特性信号の位相成分 θ が容易に取得できる。その結果、任意の走査位置の層構造の容易な推定が可能となる。具体的には、補正後の特性信号の位相成分 θ の異なる周波数間の変化が相対的に大きい走査位置が特定されている。この場合、第 2 層 L 2 の電気特性を反映する特性信号の位相成分 θ が容易に取得できる。また、補正後の特性信号の位相成分 θ の周波数間の変化が線形的である走査位置が特定されている。この場合も、第 2 層 L 2 の電気

特性を反映する特性信号の位相成分 θ が容易に取得できる。

[0047] また、本実施形態では、特性信号の位相成分 θ の規格化を行うことにより、規格化された任意の位置の特性信号の位相信号 θ の周波数特性が半導体デバイスSの層構造を顕在化した波形となる。その結果、任意の走査位置の層構造の推定の精度が向上する。

[0048] また、本実施形態では、特性信号の位相成分 θ を規格化する際には、第2層L2の電気特性を反映する走査位置の位相成分 θ の周波数の平方根 $f^{1/2}$ に対する変化率を用いて、任意の走査位置の位相成分 θ の周波数の平方根 $f^{1/2}$ に対する変化率が規格化されている。このような構成により、規格化された任意の位置の特性信号の位相信号 θ の周波数特性が半導体デバイスSの層構造をより顕在化した波形となり、任意の走査位置の層構造の推定の精度がより向上する。

[0049] さらに、本実施形態では、任意の走査位置の特性信号の位相成分 θ の周波数に対する傾き β を示す画像が出力される。これにより、半導体デバイスSの任意の走査位置における層構造を視覚化することができ、視覚化された画像を参照することで半導体デバイスSの積層構成に対応した電気特性を解析することができる。

[0050] またさらに、本実施形態では、任意の走査位置における第1層L1の温度係数 γ_1 を示す画像と、任意の走査位置における第2層L2の温度係数 γ_2 を示す画像とが並列に出力されている。このような機能により、半導体デバイスSの任意の走査位置における各層L1、L2毎の電気特性を視覚化することができ、視覚化された画像を基に半導体デバイスSの各層L1、L2の電気特性を解析することができる。

[0051] 以上、本発明の種々の実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではなく、各請求項に記載した要旨を変更しない範囲で変形し、又は他のものに適用したものであってもよい。

[0052] 例えば、検査装置19においては、第1の周波数 f_1 でロックイン検出された特性信号の位相成分 θ と、第1の周波数 f_1 よりも高い第2の周波数 f

2でロックイン検出された特性信号の位相成分 θ との差の二次元分布を示す画像を生成及び出力してもよい。例えば、図11に示すように、第1の周波数 f_1 での位相成分 θ を表す画像 G_{f_1} と、第2の周波数 f_2 での位相成分 θ を表す画像 G_{f_2} を基に、各画像 G_{f_1} 、 G_{f_2} の位相成分 θ の差分を反映した差画像 G_{diff} を生成してもよい。このような差画像 G_{diff} を基に、半導体デバイスSの各走査位置における層の深さの情報を視覚的に取得することができる。検査装置19は、差画像 G_{diff} を出力する際には、位相成分 θ の差を濃淡によって表して出力してもよいし、差をLUT (Look-up Table) 等を参照して色相に変換して出力してもよい。

[0053] また、半導体検査装置1は、レーザ光の二次元走査を、半導体デバイスS上での複数のラインに沿った一次元走査をラインに垂直な方向にずらして繰り返すことにより実行し、その一次元走査毎の変調周波数を、第1の周波数 f_1 及び第2の周波数で交互に変更するように動作してもよい。例えば、第1の周波数 $f_1 = 1\text{ Hz}$ 、第2の周波数 $= 4\text{ Hz}$ に設定される。図12には、このような変形例に係る半導体検査装置1によって、ライン毎に変調周波数 f_1 、 f_2 に対応してロックイン検出されることにより生成される位相成分 θ の二次元分布を表す画像 G_{out} の一例を示している。このような変形例によっても、光源9から遠い位置の層L3の電気特性と、光源9から近い位置の層L4の電気特性とが容易に判別可能となる。

[0054] また、検査装置19においては、異なる周波数の平方根 $f^{1/2}$ の間の変化を基に領域A2に対応する走査位置の位相成分 θ の特性を特定していたが、半導体デバイスSの領域A2に含まれる走査位置がユーザによって予め検査装置19に設定されていてもよい。あるいは、検査装置19において当該走査位置が設計データに基づいて予め自動的に特定されてもよい。

[0055] 上記実施形態においては、第1層L1及び第2層L2を含む2層構造の半導体デバイスSを対象にしていたが、検査装置19は、3層構造以上の半導体デバイスSを対象にした解析機能を有していてもよい。

[0056] 例えば、図13に示すような、光源9に近い側から、第1の位置にある第

1層L 1、第2の位置にある第2層L 2、及び第3の位置にある第3層L 3を含む多層構造を有する半導体デバイスSを対象としてもよい。このような半導体デバイスSにおいて、設計データ等から、第1層L 1のみに電流が流れる経路PAを有する領域A 1と、第1層L 1及び第2層に経路PAを有する領域A 1 2と、第2層L 2及び第3層L 3に経路PAを有する領域A 2 3と、第3層L 3のみに経路PAを有する領域A 3が既知であるとする。また、光源9からのレーザ光は第1層L 1に集光されるように照射されるものとする。

[0057] 上記の構成の半導体デバイスSを対象にした場合、検査装置19は、まず、領域A 1の特性信号を基準に全ての走査位置の特性信号の位相補正及び変化率の規格化を行い、領域A 2 3の特性信号を基準に全ての走査位置の特性信号の変化率の規格化を行う。次に、領域A 1の特性信号と領域A 2 3の特性信号を対象に、上記実施形態の解析処理を実行することにより、全ての走査位置における、第1層L 1の温度係数 γ_1 と、第2層L 2及び第3層L 3の温度係数 γ_{23} とを取得する。

[0058] 次に、検査装置19は、領域A 3の特性信号と領域A 1 2の特性信号を対象に、上記実施形態の解析処理を実行して、全ての走査位置における、第3層L 3の温度係数 γ_3 と、第1層L 1及び第2層L 2の温度係数 γ_{12} とを取得する。

[0059] このような変形例によれば、3層構造の半導体デバイスSを対象に、任意の走査位置における層L 1、L 2、L 3毎の電気特性を推定することができる。

[0060] また、検査装置19は、図14に示すような4層構造の半導体デバイスSを対象にした解析機能を有していてもよい。図14に示す半導体デバイスSは、光源9に近い側から、第1の位置にある第1層L 1、第2の位置にある第2層L 2、第3の位置にある第3層L 3、及び第4の位置にある第4層L 4を含む多層構造を有する。このような半導体デバイスSにおいて、設計データ等から、第1層L 1のみに電流が流れる経路PAを有する領域A 1と、

第2層L 2、第3層L 3、及び第4層L 4に経路PAを有する領域A 2 3 4と、が既知であるとする。また、光源9からのレーザ光は第1層L 1に集光されるように照射されるものとする。

[0061] 上記の構成の半導体デバイスSを対象にした場合、検査装置19は、まず、領域A 1の特性信号を基準に全ての走査位置の特性信号の位相補正を行い、領域A 2 3 4の特性信号を基準に全ての走査位置の特性信号の変化率の規格化を行う。次に、領域A 1の特性信号と領域A 2 3 4の特性信号を対象に、上述した実施形態の解析処理を実行することにより、全ての走査位置における、第1層L 1の温度係数 γ_1 と、第2層L 2、第3層L 3、及び第4層L 4の温度係数 γ_{234} とを取得する。その後、検査装置19は、各走査位置の特性信号を対象に、3層構造の半導体デバイスSを対象とした上述した解析処理を実行して、第2層L 2～第4層L 4のそれぞれの温度係数 γ_2 , γ_3 , γ_4 を取得することができる。

[0062] このような変形例によれば、4層構造の半導体デバイスを対象に、任意の走査位置における層L 1, L 2, L 3, L 4毎の電気特性を推定することができ、同様に5層以上の構造の半導体デバイスを対象に任意の走査位置における各層の電気特性を推定することもできる。

[0063] 上述した実施形態では、補正するステップでは、第1の走査位置の特性信号の位相成分を相殺するように任意の走査位置の特性信号の位相成分を補正する、ことが好適である。上述した実施形態では、プロセッサは、第1の走査位置の特性信号の位相成分を相殺するように任意の走査位置の特性信号の位相成分を補正する、ことが好適である。これにより、第1の位置の電気特性が反映される第1の走査位置の特性信号の位相成分に対する任意の走査位置の位相成分の相対値が取得できるので、その位相成分を基にした層構造の容易な推定が可能となる。

[0064] また、規格化するステップでは、補正後の特性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化に基づいて、第2の走査位置の特性信号の位相成分を特定する、ことも好適である。また、プロセッサは、補正後の特

性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化に基づいて、第2の走査位置の特性信号の位相成分を特定する、ことも好適である。この場合、特性信号の位相成分の周波数特性を基に第2の走査位置が特定されることで、第2の位置の電気特性を反映する特性信号の位相成分が容易に取得できる。その結果、任意の走査位置の層構造の容易な推定が可能となる。

[0065] さらに、第1の位置は、第2の位置よりも光の照射源に近い位置であり、規格化するステップでは、補正後の特性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化が相対的に大きい走査位置を第2の走査位置とする、ことも好適である。さらに、第1の位置は、第2の位置よりも光の照射源に近い位置であり、プロセッサは、補正後の特性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化が相対的に大きい走査位置を第2の走査位置とする、ことも好適である。この場合、特性信号の位相成分の2つの周波数間の変化の大きさを基に第2の走査位置が特定されることで、第2の位置の電気特性を反映する特性信号の位相成分が容易に取得できる。その結果、任意の走査位置の層構造の容易な推定が可能となる。

[0066] またさらに、規格化するステップでは、第2の走査位置の特性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化を基準に、任意の走査位置の特性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化を規格化する、ことも好適である。またさらに、プロセッサは、第2の走査位置の特性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化を基準に、任意の走査位置の特性信号の位相成分の第1の周波数と第2の周波数との間の変化を規格化する、ことも好適である。かかる構成によれば、規格化された任意の位置の特性信号の位相信号の周波数特性が半導体デバイスの層構造を顕在化した波形となり、任意の走査位置の層構造の推定の精度が向上する。

[0067] さらにまた、取得するステップでは、第1及び第2の周波数以外の周波数で強度変調された光をさらに走査して特性信号を取得し、規格化するステップでは、補正後の特性信号の位相成分の周波数の平方根に対する変化が線形的である走査位置を第2の走査位置とする、ことも好適である。さらにまた

、プロセッサは、第1及び第2の周波数以外の周波数で強度変調された光をさらに走査して特性信号を取得し、補正後の特性信号の位相成分の周波数の平方根に対する変化が線形的である走査位置を第2の走査位置とする、ことも好適である。かかる構成によれば、特性信号の位相成分の周波数の平方根に対する変化の特性を基に第2の走査位置が特定されることで、第2の位置の電気特性を反映する特性信号の位相成分が確実に取得できる。その結果、任意の走査位置の層構造の確実な推定が可能となる。

[0068] また、規格化するステップでは、第2の走査位置の特性信号の位相成分の周波数の平方根に対する変化率を用いて、任意の走査位置の特性信号の位相成分の周波数の平方根に対する変化率を規格化する、ことも好適である。また、プロセッサは、第2の走査位置の特性信号の位相成分の周波数の平方根に対する変化率を用いて、任意の走査位置の特性信号の位相成分の周波数の平方根に対する変化率を規格化する、ことも好適である。かかる構成を採れば、規格化された任意の位置の特性信号の位相信号の周波数特性が半導体デバイスの層構造をより顕在化した波形となり、任意の走査位置の層構造の推定の精度がより向上する。

[0069] さらに、出力するステップでは、任意の走査位置の特性信号の位相成分の周波数に対する変化を示す画像を出力する、ことが好適である。さらに、プロセッサは、任意の走査位置の特性信号の位相成分の周波数に対する変化を示す画像を出力する、ことが好適である。かかる構成を採れば、半導体デバイスの任意の走査位置における層構造を視覚化することができ、視覚化された画像を参照することで半導体デバイスの積層構成に対応した電気特性を解析することができる。

[0070] またさらに、出力するステップでは、任意の走査位置の特性信号の位相成分の周波数に対する変化を基に、任意の走査位置における第1の位置の電気特性を示す画像と、任意の走査位置における第2の位置の電気特性を示す画像と、を少なくとも出力する、ことが好適である。またさらに、プロセッサは、任意の走査位置の特性信号の位相成分の周波数に対する変化を基に、任

意の走査位置における第１の位置の電気特性を示す画像と、任意の走査位置における第２の位置の電気特性を示す画像と、を少なくとも出力する、ことも好適である。この場合、半導体デバイスの任意の走査位置における各層毎の電気特性を視覚化することができ、視覚化された画像を基に半導体デバイスの各層の電気特性を解析することができる。

産業上の利用可能性

[0071] 実施形態は、半導体デバイス検査方法及び半導体デバイス検査装置を使用用途とし、半導体デバイスの積層構成に対応した電気特性を解析することができるものである。

符号の説明

[0072] １…半導体検査装置、３…電圧印加装置、５…電流測定装置、７…測定器、９…光源、１１…信号源、１３…光走査装置、１５…ロックインアンプ（信号取得装置）、１７…光検出器、１９…検査装置、１０１…ＣＰＵ（プロセッサ）、１０２…ＲＡＭ、１０３…ＲＯＭ、１０４…通信モジュール、１０６…入出力モジュール、Ｓ…半導体デバイス。