

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7618889号
(P7618889)

(45)発行日 令和7年1月21日(2025.1.21)

(24)登録日 令和7年1月10日(2025.1.10)

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 L 21/66 (2006.01)

H 0 1 L 21/66

J

請求項の数 15 (全17頁)

(21)出願番号	特願2024-503722(P2024-503722)	(73)特許権者	516312501
(86)(22)出願日	令和4年7月18日(2022.7.18)		オントゥー イノヴェイション インコーポレイテッド
(65)公表番号	特表2024-527847(P2024-527847 A)		アメリカ合衆国マサチューセッツ州 0 1 8 8 7 , ウィルミントン , ジョンスピン・ロード 1 6
(43)公表日	令和6年7月26日(2024.7.26)	(74)代理人	100094569
(86)国際出願番号	PCT/US2022/073857		弁理士 田中 伸一郎
(87)国際公開番号	WO2023/004294	(74)代理人	100103610
(87)国際公開日	令和5年1月26日(2023.1.26)		弁理士 ▲吉▼田 和彦
審査請求日	令和6年3月15日(2024.3.15)	(74)代理人	100109070
(31)優先権主張番号	63/223,121		弁理士 須田 洋之
(32)優先日	令和3年7月19日(2021.7.19)	(74)代理人	100067013
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		弁理士 大塚 文昭
		(74)代理人	100120525

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 低コントラスト非参照欠陥検出

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半導体デバイスにおける欠陥を検出する方法であって、
前記半導体デバイスの画像の複数のバイナリスライスを生成することと、
前記画像の統計的コントラスト特性に基づいて、前記複数のバイナリスライスのうちの各バイナリスライスをセグメントにセグメント化することと、
前記セグメントのサブセットを機械学習ネットワークに入力することであって、前記セグメントの前記サブセットは、前記サブセットに含まれない他のセグメントと比較して、より高いコントラストプロファイルを有するセグメントを含む、入力することと、
前記画像内の少なくとも 1 つの欠陥の存在又は不在を識別する前記機械学習ネットワークの出力を受信することと、を含む、方法。

10

【請求項 2】

前記機械学習ネットワークが多層機械学習モデルを含み、各バイナリスライスが異なるグレースケールレベルに対応する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記機械学習ネットワークが、少なくとも 1 つの訓練画像を用いて教師あり機械学習技術を使用して、
訓練画像スライスを作成するために、前記少なくとも 1 つの訓練画像の複数のバイナリスライスを生成し、
前記少なくとも 1 つの訓練画像の統計的コントラスト特性に基づいて、前記訓練画像ス

20

ライスのうちの各スライスをセグメント化し、

既知の欠陥を有する 1 つ以上のセグメントに対して欠陥ラベルを受信し、前記既知の欠陥を有しない 1 つ以上のセグメントに対して欠陥なしラベルを受信し、

前記少なくとも 1 つの訓練画像の前記セグメントを前記機械学習ネットワークに入力し、かつ

前記セグメントの前記ラベルに基づいて前記機械学習ネットワークに参照出力を提供することによって、欠陥を検出するように訓練され、

前記機械学習ネットワークは、その出力が前記参照出力と実質的に一致するまで反復動作を実行する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

10

前記欠陥が、低コントラストウォーターマーク欠陥である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記画像の少なくとも 1 つの特徴を強調するために前記画像を変換することと、

一連の線形フィルタ及び非線形フィルタを用いて前記画像をフィルタリングすることを含む、前記画像を前処理することと、を更に含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記統計的コントラスト特性が、ヒストグラム、範囲、標準偏差、最小 - 最大、平均、及び明画素に対する暗画素の比のうちの 1 つ以上によって定義される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

20

前記方法が、グラフィック処理ユニット (GPU) 及びコンピュータ処理ユニット (CPU) を使用して実行される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

半導体デバイスの画像をキャプチャする検出器と、

機械の 1 つ以上のプロセッサと、

命令を記憶するメモリと、を備え、前記命令は、前記 1 つ以上のプロセッサによって実行されると、前記機械に、

前記半導体デバイスの前記画像の複数のバイナリスライスを生成することと、

前記画像の統計的コントラスト特性に基づいて、前記複数のバイナリスライスのうちの各バイナリスライスをセグメントにセグメント化することと、

30

前記セグメントのサブセットを機械学習ネットワークに入力することであって、前記セグメントの前記サブセットは、前記サブセットに含まれない他のセグメントと比較して、より高いコントラストプロファイルを有するセグメントを含む、入力することと、

前記画像内の少なくとも 1 つの欠陥の存在又は不在を識別する前記機械学習ネットワークの出力を受信することを含む動作を実行させる、検査システム。

【請求項 9】

前記機械学習ネットワークが多層機械学習モデルを含み、各バイナリスライスが異なるグレースケールレベルに対応する、請求項 8 に記載の検査システム。

【請求項 10】

前記機械学習ネットワークが、少なくとも 1 つの訓練画像を用いて教師あり機械学習技術を使用して、

40

訓練画像スライスを作成するために、前記少なくとも 1 つの訓練画像の複数のバイナリスライスを生成し、

前記少なくとも 1 つの訓練画像の統計的コントラスト特性に基づいて、前記訓練画像スライスのうちの各スライスをセグメント化し、

既知の欠陥を有する 1 つ以上のセグメントに対して欠陥ラベルを受信し、前記既知の欠陥を有しない 1 つ以上のセグメントに対して欠陥なしラベルを受信し、

前記少なくとも 1 つの訓練画像の前記セグメントを前記機械学習ネットワークに入力し、

前記セグメントの前記ラベルに基づいて前記機械学習ネットワークに参照出力を提供することによって、欠陥を検出するように訓練され、

50

前記機械学習ネットワークは、その出力が前記参照出力と実質的に一致するまで反復動作を実行する、請求項 8 に記載の検査システム。

【請求項 1 1】

前記欠陥が、低コントラストウォーターマーク欠陥である、請求項 8 に記載の検査システム。

【請求項 1 2】

前記動作が、

前記画像の少なくとも 1 つの特徴を強調するために前記画像を変換することと、一連の線形フィルタ及び非線形フィルタを用いて前記画像をフィルタリングすることを含む、前記画像を前処理することと、を更に含む、請求項 8 に記載の検査システム。

10

【請求項 1 3】

前記統計的コントラスト特性が、ヒストグラム、範囲、標準偏差、最小 - 最大、平均、及び明画素に対する暗画素の比のうちの 1 つ以上によって定義される、請求項 8 に記載の検査システム。

【請求項 1 4】

前記 1 つ以上のプロセッサが、グラフィック処理ユニット (GPU) を含む、請求項 8 に記載の検査システム。

【請求項 1 5】

命令を具体化する機械記憶媒体であって、前記命令は、機械によって実行されると、前記機械に、請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載の方法を実行させる、機械記憶媒体。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

(関連出願の相互参照)

本出願は、2021 年 7 月 19 日に提出された米国特許仮出願第 63 / 223, 121 号に対する優先権の利益を主張し、その内容は、参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。

【0002】

(発明の分野)

本開示は、概して、半導体デバイスの欠陥、特に低コントラスト欠陥の検出に関する。

30

【背景技術】

【0003】

半導体デバイスのサイズが小さくなり、複雑さが増すにつれて、小さな欠陥であってもそれらの性能に悪影響を及ぼす可能性がある。例えば、いくつかのデバイスは、製造中に水スクラビング又は洗浄を受け、これにより、ウォーターマーク欠陥が残る場合がある。これらの欠陥は、欠陥エリアと欠陥なしエリアとの間のコントラスト差が最小であり、検出を困難にするので、低コントラスト欠陥の一例であると考えられる。半導体デバイスは、欠陥を検出するために、製造プロセス中に頻繁に検査される。

【0004】

しかし、いくつかの検査技術は、低コントラスト欠陥を正確に検出することが困難である。更に、いくつかの検査技術は、ばらつき又は欠陥を検出するために参照画像を使用するため、それらの検査技術の使用を困難にする場合がある。

40

【発明の概要】

【0005】

本開示は、半導体デバイスにおける欠陥を検出する方法であって、半導体デバイスの画像の複数のバイナリスライスを生成することと、画像の統計的コントラスト特性に基づいて、複数のバイナリスライスのうちの各バイナリスライスをセグメントにセグメント化することと、セグメントのサブセットを機械学習ネットワークに入力することであって、セグメントのサブセットは、サブセットに含まれない他のセグメントと比較して、より高いコントラストプロファイルを有するセグメントを含む、入力することと、画像内の少なく

50

とも1つの欠陥の存在又は不在を識別する機械学習ネットワークの出力を受信することと、を含む、方法を説明する。

【0006】

本開示はまた、半導体デバイスの画像をキャプチャする検出器と、機械の1つ以上のプロセッサと、命令を記憶するメモリと、を含み、命令は、1つ以上のプロセッサによって実行されると、機械に、半導体デバイスの画像の複数のバイナリスライスを生成することと、画像の統計的コントラスト特性に基づいて、複数のバイナリスライスのうちの各バイナリスライスをセグメントにセグメント化することと、セグメントのサブセットを機械学習ネットワークに入力することとであって、セグメントのサブセットは、サブセットに含まれない他のセグメントと比較して、より高いコントラストプロファイルを有するセグメントを含む、入力することと、画像内の少なくとも1つの欠陥の存在又は不在を識別する機械学習ネットワークの出力を受信することとを含む動作を実行させる検査システムを説明する。

10

【0007】

本開示は更に、命令を具体化する機械記憶媒体であって、命令は、機械によって実行されると、機械に、半導体デバイスの画像の複数のバイナリスライスを生成することと、画像の統計的コントラスト特性に基づいて、複数のバイナリスライスのうちの各バイナリスライスをセグメント化してセグメントを作成すること、セグメントのサブセットを機械学習ネットワークに入力することとであって、セグメントのサブセットは、サブセットに含まれない他のセグメントと比較して、より高いコントラストプロファイルを有するセグメントを含む、入力することと、画像内の少なくとも1つの欠陥の存在又は不在を識別する機械学習ネットワークの出力を受信することとを含む動作を実行させる、機械記憶媒体を説明する。

20

【0008】

添付の図面の様々な図面は、本開示の例示的な実装形態を単に例解するものであり、その範囲を限定するものとみなされるべきではない。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】図1は、本主題の例による検査システムを例解する。

【0010】

【図2】図2は、本主題の例による前処理プロセスを例解する。

【0011】

【図3】図3は、本主題の例による、機械学習ネットワークを使用して画像内の欠陥を検出するためのフレームワークを例解する。

【0012】

【図4】図4は、本主題の例による訓練プロセスのフロー図を例解する。

【0013】

【図5】図5は、本主題の例による欠陥検出プロセスのフロー図を例解する。

【0014】

【図6】図6は、本主題の例による欠陥検出結果を例解する。

40

【0015】

【図7】図7は、本明細書で考察される技術（例えば、方法論）のうちのいずれか1つ以上が実行され得る機械を備える例のブロック図を例解する。

【発明を実施するための形態】

【0016】

本明細書では、製造プロセス中にCMOSイメージセンサなどの半導体デバイスを検査するための欠陥検出技術の例を開示する。欠陥には、スクラッチ、汚れなどの一般的な欠陥、並びにウォーターマークなどの低コントラスト欠陥が含まれ得る。検出技術は、参照画像を使用することなく、教師あり機械学習ネットワークを使用して、欠陥を検出することができる。

50

【 0 0 1 7 】

検出技術の訓練及び通常動作モードが、説明される。第一に、機械学習ネットワークは、訓練モード中に様々な欠陥を検出するように構成及び訓練される。訓練モードでは、検査される半導体デバイスのタイプ（例えば、ダイ）の1つ以上の訓練画像が使用される。訓練画像は、画像のコントラストを強調するための前処理、及び画像の1つ以上の特定の特徴を強調するための他のタイプの変換を受けてもよい。バイナリスライスが画像から取られてもよく、各バイナリスライスは、グレースケールレベルの異なる範囲に対応する。各バイナリスライスは、次いで、統計的特性を使用してセグメント化されてもよく、各セグメントは、画像のその領域に対するコントラストプロファイルによって定義される。既知の欠陥を有するセグメントはそれに応じてラベル付けされ、既知の欠陥を有しないセグメントもそれに応じてラベル付けされる。セグメントは、多層機械学習ネットワークに供給され、出力は、ラベル（例えば、欠陥又は欠陥なし）に基づいて設定される。機械学習ネットワークは、それ自体を、セグメント及びセグメントの欠陥ラベルに基づいて欠陥を検出するように訓練する。

10

【 0 0 1 8 】

第二に、通常動作モードでは、前処理、バイナリスライシング、及びセグメント化の最初のいくつかのステップが、訓練モードと同様の状態で実行されてもよく、これは、事前定義された規則及びアルゴリズムに基づいて実行される。次いで、相対的なコントラストプロファイルに基づくセグメントのサブセットが、訓練された機械学習ネットワークに供給され得る。次いで、機械学習ネットワークは、その訓練及び構成に基づいて、検査中に半導体デバイスの画像内の欠陥を検出し得る。それによって、本検出技術は、参照画像を使用することなく、高速で正確な状態で低コントラスト欠陥を検出することができる。

20

【 0 0 1 9 】

図1は、本明細書の他の箇所に図示及び説明される1つ以上の技術を実行するために使用され得るような検査システム100の例示的な部分を例解する。この例では、検査システム100は、半導体ダイ（例えば、CMOSイメージセンサ用）などの基板102を検査するものとして示されている。

【 0 0 2 0 】

検査システム100は、基板102上に投影する放射ビーム（例えば、電磁波）を放出する照明源110を含み得る。放射ビームは、基板の表面を調べるインテロゲーションビームを生み出すものとみなすことができる。照明源110は、単色又は広帯域光源を含んでもよい。例えば、照明源110は、1つ以上の波長範囲で動作する1つのLED又は複数のLEDであり得る。別の例では、照明源110は、異なる波長、強度、偏光状態などで放射ビームを提供する複数の光源を含むことができる。

30

【 0 0 2 1 】

検査システム100はまた、基板102からの再放射（例えば、戻り電磁波又は二次電磁波）を検出及び収集し、基板102又はその一部分の画像を生成する検出器112を含み得る。検出器112は、CMOSベースのカメラ又はTDI（time delay and integration、時間遅延及び積分）ラインスキャンカメラなどの2Dカメラを含み得る。検出器112は、基板102からの再放射を収集し、検出器112内に含まれるイメージセンサ（CCDアレイ又はCMOS又は他の電界効果トランジスタ素子など）上に集束させるための光学及びフィルタリング構成要素を含み得る。

40

【 0 0 2 2 】

実施形態では、検出器112はまた、1つ以上のカメラレンズを含み得る。検出器112は、その中に含まれるイメージセンサ（例えば、CCDアレイ又はCMOS素子）が、基板102の上面に垂直な想像線を参照して所定の角度（例えば、表面法線に対して45°の角度）になるように取り付けられてもよい。実施形態では、検出器112はまた、複数のカメラを含んでもよく、各カメラは、表面法線を参照して同じ又は異なる所定の角度で取り付けられる。

【 0 0 2 3 】

50

検出器 112 は、試験機器 120 に結合することができる。試験機器 120 は、コンピュータ処理ユニット (computer processing unit、CPU) 122、グラフィック処理ユニット (computer processing unit、GPU) 124、フィールドプログラマブルゲートアレイ (field programmable gate array、FPGA) 131 (又は他の好適なアクセラレータ、例えば、データ処理ユニット (data processing unit、DPU)、人工ニューロンネットワーク (artificial neuron network、ANN) など)、メモリ 126、ディスプレイ 128、入力デバイス 130、及び通信インターフェース 132 (例えば、高性能ネットワーク (high performance network、HPC)) を含み得る。試験機器 120 は、例えば、送信信号チェーン、受信信号チェーン、スイッチ回路構成、デジタル及びアナログ回路構成などのフロントエンド回路構成も含み得る。送信信号チェーンは、照明源 110 の制御信号を提供し得る。受信信号チェーンは、検出器 112 から画像信号を受信し得る。

10

【0024】

フロントエンド回路構成は、CPU 122、GPU 124、及び FPGA 131 などの 1 つ以上のプロセッサ回路に結合され、かつそれらによって制御され得る。CPU 122 は、1 つ以上のマルチコアプロセッサとして提供され得る。GPU 124 及び FPGA 131 は、本明細書に説明されるように、画像データの処理及び機械学習ネットワークの性能を加速させるために使用され得る。本明細書に図示及び説明される技術は、より速い処理のために GPU 124 とともに作動する CPU 122 によって実行され得る。

【0025】

CPU 122 及び GPU 124 は、例えば、試験機器 120 に、ビーム透過、放射 / 画像取得、処理、又は検査に関連するデータの記憶のうちの 1 つ以上を実行させるか、又は別様に本明細書に図示及び説明される技術を実行させる命令を実行するために、メモリ 126 に結合され得る。試験機器 120 は、例えば、有線又は無線通信インターフェース 132 を使用して、システム 100 の他の部分に通信可能に結合され得る。

20

【0026】

例えば、本明細書に図示及び説明される 1 つ以上の技術の実行は、試験機器 120 上で、又は他の処理若しくは記憶施設を使用して、例えば、計算施設 140 (例えば、サーバ、クラウド処理システム、データウェアハウス、ラップトップ、タブレット、スマートフォン、デスクトップコンピュータなどの汎用コンピューティングデバイス) を使用して達成され得る。例えば、試験機器 120 上で実行される場合望ましくなく遅いか、又は試験機器 120 の能力を超えるであろう処理タスクは、例えば、試験機器 120 からの要求に回答して、リモートで (例えば、別個のシステム上で) 実行され得る。同様に、撮像データ又は中間データの記憶は、試験機器 120 に通信可能に結合されたりリモート施設を使用して達成され得る。試験機器 120 はまた、例えば、構成情報又は結果の提示のためのディスプレイ 128 と、オペレータコマンド、構成情報、又はクエリに対する応答を受信するための、例えば、キーボード、トラックボール、ファンクションキー又はソフトキー、マウスインターフェース、タッチスクリーン、スタイラスなどのうちの 1 つ以上を含む入力デバイス 130 と、を含み得る。

30

【0027】

上述したように、試験機器 120 は、検査中の基板 102 の 1 つ以上の画像を受信し得る。試験機器 120 は、1 つ以上の画像内の低コントラスト欠陥を含む欠陥を検出するために、本明細書に図示及び説明される 1 つ以上の技術を実行し得る。

40

【0028】

図 2 は、本主題の例による、画像の前処理プロセス 200 を例解する。生画像 202 が取得され得る。例えば、生画像 202 は、図 1 を参照して上述したように、検査システムの検出器 (例えば、検出器 112) によって生成し得る。一例では、生画像 202 は、変換技術によって操作されて、抽象ヒルベルト空間において変換画像を形成することができる。例えば、変換は、フーリエ変換、ラプラス変換、理論的に生成された若しくは経験的に得られた既知の形状との 2D 相関、又は他の適切な変換技術を含み得る。カラー画像の

50

場合、これらのプロセスは、カメラによって提供される元の色の１つ又は組み合わせに適用することができる。

【００２９】

次いで、生画像２０２（又は変換画像）は、線形フィルタ及び非線形フィルタを含む、実空間及び／又はヒルベルト空間における１つ以上のフィルタによってフィルタリングされ得る。例えば、原画像２０２（又は変換画像）は、第１のフィルタ２５２（フィルタ１）によってフィルタリングされて、中間画像の第１のセット、すなわち、それぞれ暗視野画像２０４及び明視野画像２０６を生成し得る。第１のフィルタ２５２は、異なる帯域幅の１つ以上の線形フィルタ、例えば、高帯域フィルタ、低帯域フィルタ、帯域通過フィルタとして提供され得る。中間画像２０２、２０４の第１のセットは、次いで、組み合わせられ、第２のフィルタ２５４（フィルタ２）によってフィルタリングされて、第２の中間画像２０８を生成し得る。第２のフィルタ２５４は、１つ以上の線形フィルタとして提供され得る。第２の中間画像２０８は、前処理済み画像２１０を生成するために、第３のフィルタ２５６（フィルタ３）によってフィルタリングされ得る。第３のフィルタ２５６は、１つ以上の非線形フィルタとして提供され得る。前処理は、画像内のコントラストをより顕著にすることができ、したがって、本明細書で説明するように、画像内の低コントラスト欠陥を検出するのを助ける。

10

【００３０】

次に、画像内のウォーターマークなどの低コントラスト欠陥を含む欠陥を検出する技術について説明する。これらの欠陥は、教師あり機械学習を使用して検出することができる。

20

【００３１】

図３は、機械学習ネットワークを使用して画像内の欠陥を検出するためのフレームワーク３００を例解する。フレームワーク３００は、機械学習ネットワークを訓練するために訓練モードで使用されてもよく、次いで、検査中のデバイスの画像内の欠陥を検出するために通常動作モードで使用されてもよい。訓練モード及び通常動作モードの例については、図４及び図５を参照して後述する。

【００３２】

フレームワーク３００は、プリプロセッサ３０２、バイナリ化ユニット３０４、セグメント化ユニット３０６、及び機械学習ネットワーク３０８を含み得る。初期画像３５２（例えば、生画像）がプリプロセッサ３０２に提供され得る。プリプロセッサ３０２は、例えば、図２を参照しながら上記で説明したように、初期画像３５２をフィルタリングして、画像コントラストを強調し、前処理済み画像３５４を生成し得る。次に、前処理済み画像３５４は、最大 n 個のバイナリスライス３５６．１～３５６． n を生成するために異なるグレースケールレベルに対応する異なる閾値を用いて前処理済み画像３５４をバイナリ化するために、バイナリ化ユニット３０４に提供され得る。スライスの数（ n ）は、プログラム可能であってもよく、検査の感度レベル及び検査されるデバイスのタイプに基づいて設定されてもよい。

30

【００３３】

セグメント化ユニット３０６は、セグメント３５８．１～３５８． m を生成するために、前処理済み画像の統計的特性に基づいて各スライスをセグメント化し得る。このセグメント化は、前処理済み画像内の対応する領域のコントラストに関する統計的特性（例えば、ヒストグラム、標準偏差、平均、最小－最大）及び各スライスの統計的特性（例えば、画素密度、エントロピー）に基づいて実行され得る。それによって、各セグメントは、画像のそのそれぞれの領域に対するコントラストプロファイルによって定義することができる。例えば、前処理済み画像のヒストグラム特性及びスライス内の明るい画素の数が、セグメントを定義するために使用され得る。ヒストグラム特性は、コントラスト数値データの近似分布を表すことができる。画像スライスのある領域が別の隣接する領域と異なるとき、それらの領域は異なるセグメントとして定義され得る。したがって、各セグメントは、類似のコントラスト特性を含み得る。

40

【００３４】

50

セグメント化ユニット 306 はまた、セグメントの特性及び前処理済みグレースケール画像内の対応するエリアに基づいて、セグメント化スライス 358 . 1 ~ 358 . m を 2 つのセグメントグループ（又はサブセット）に分割することができる。より高いコントラストプロファイルを有するセグメントは、第 1 のサブセットに属するものとして分類されてもよく、より低いコントラストプロファイルを有するセグメントは、第 2 のサブセットに属するものとして分類されてもよい。より高い又はより低いコントラストプロファイルは、それぞれコントラスト閾値を上回る又は下回るコントラスト特性に基づいて判定されてもよい。

【0035】

次いで、各セグメント化スライス 358 . 1 ~ 358 . m からのバイナリセグメントの第 1 のサブセット（例えば、より高いコントラストプロファイルを有する）は、機械学習ネットワーク 308 に入力され得る。機械学習ネットワーク 308 は、多層機械学習モデルとして提供され得る。例えば、機械学習ネットワーク 308 は、2 つの隠れ層、すなわち、入力層、特徴抽出層、特徴関係層、及び決定層を有する 4 つの層を含み得る。各スライス中のセグメントの第 1 のサブセットからの画素情報は、入力層に送られ得る。入力層内の各ノードは、入力されたセグメントの画素に対応し得る。機械学習ネットワーク 308 は、反復的に、その層内のそのバイアス及び係数を訓練し得る。決定層は、それぞれのセグメント内の欠陥の有無に関する決定を出力することができる。各バイナリスライスに対する第 1 のサブセットに関連付けられたセグメントが、生成されているそれぞれのセグメントにおける欠陥の有無に関する決定を用いて処理された後、欠陥結果 360 が生成され得る。欠陥結果 360 は、初期画像 352 から検出された欠陥を抽出し得る。欠陥結果 360 は、検出された欠陥を高コントラストで示すバイナリ画像であってもよい。一実施形態では、欠陥結果 360 をアルゴリズムに入力して欠陥を分類してもよい。

【0036】

上述したように、フレームワーク 300 は、まず、機械学習ネットワーク 308 を訓練して欠陥を検出するために訓練モードで使用されてもよく、次いで、検査プロセスの一部として画像内の欠陥を検出するために通常動作モードで使用されてもよい。機械学習ネットワークの訓練は、教師ありプロセスであってもよく、検査プロセスが実行される場所のオフサイトで実行されてもよい。訓練は、機械学習ネットワークを訓練するために、既知の欠陥を有する訓練画像（例えば、1 つ以上の訓練画像）のセットを使用してもよい。

【0037】

図 4 は、訓練プロセス 400 のフロー図を例解する。訓練プロセス 400 は、訓練画像のセットを用いて複数回実行され得る。402 において、訓練画像が受信され、上述したように前処理され得る。訓練画像は、通常動作モード中に検査されるべき同じ又は類似のタイプのデバイスの画像に対応し得る。訓練画像は、ウォーターマーク、スクラッチ、汚れなどの特定のタイプの欠陥の存在に基づいて選択されてもよい。前処理は、上述したように、画像コントラストを強調するための一連の線形及び／又は非線形フィルタリングを含んでもよい。

【0038】

404 において、訓練画像は、訓練画像の複数のバイナリスライスを生成するためにバイナリ化され得る。訓練画像は、異なるグレースケールレベルに対応する異なる閾値を用いてバイナリ化され得る。各バイナリスライスは、異なる閾値又はグレースケールレベルに対応し得る。閾値の数は、プログラム可能であってもよく、検査の感度レベル及び検査されるデバイスのタイプに基づいて設定されてもよい。

【0039】

406 において、各バイナリスライスは、前処理済み画像内の各スライス及び対応する領域の特性に関する統計的特性（例えば、ヒストグラム、標準偏差、平均、最小 - 最大）に基づいてセグメント化され得る。それによって、各セグメントは、画像のそのそれぞれの領域に対するコントラストプロファイルによって定義することができる。例えば、画像のヒストグラム特性を使用してセグメントを定義することができる。ヒストグラム特性は

10

20

30

40

50

、コントラスト数値データの近似分布を表すことができる。したがって、各セグメントは、類似のコントラスト特性を含み得る。画像のある領域が別の隣接する領域と異なるとき、それらの領域は異なるセグメントとして定義され得る。

【 0 0 4 0 】

4 0 8 において、セグメントは、セグメントのコントラストプロファイルに基づいて 2 つのグループ又はサブセットに分割され得る。より高いコントラストプロファイルを有するセグメントは、第 1 のサブセットに属するものとして分類されてもよく、より低いコントラストプロファイルを有するセグメントは、第 2 のサブセットに属するものとして分類されてもよい。より高い又はより低いコントラストプロファイルは、コントラスト閾値を使用して判定され得る。

10

【 0 0 4 1 】

4 1 0 において、各セグメントについて、そのセグメントにおける欠陥の有無に関連するラベルが受信され得る。ラベルは、手動プロセスによって生成されてもよい。既知の欠陥を有するセグメントは、欠陥ラベル（例えば、「1」）でラベル付けされてもよく、既知の欠陥を有しないセグメントは、欠陥なしラベル（例えば、「0」）でラベル付けされてもよい。

【 0 0 4 2 】

4 1 2 において、セグメントは、本明細書で説明されるように、機械学習ネットワークに入力され得る。4 1 4 において、第 1 のサブセットの各セグメントのラベル（例えば、欠陥又は欠陥なし）に基づく参照出力が生成され、機械学習ネットワークに提供され得る。

20

【 0 0 4 3 】

4 1 6 において、機械学習ネットワークは、機械学習ネットワークの出力がラベルに基づいて参照出力に実質的に一致するまで、反復動作を実行し得る。機械学習ネットワークは、そのそれぞれの参照出力に実質的に一致する各セグメントについての出力を生成するために、その層におけるそのバイアス及び係数を調整し得る。

【 0 0 4 4 】

プロセス 4 0 0 は、機械学習ネットワークを訓練するために訓練画像のセットに対して繰り返され得る。訓練画像は、異なる特性及び強度を有する異なるタイプの欠陥を検出するように機械学習ネットワークを訓練するために、異なる欠陥を含んでもよい。機械学習ネットワークが訓練プロセスを完了した後、製造中の半導体デバイスの画像内の欠陥を検出するために、機械学習ネットワークを通常動作モードで使用できる。

30

【 0 0 4 5 】

図 5 は、通常動作モードにおける欠陥検出プロセス 5 0 0 のフロー図を例解する。5 0 2 において、検査中のデバイスの画像が受信され、上述したように前処理され得る。画像は、図 1 を参照して上述したように、検査システムの検出器によってキャプチャすることができる。この前処理は、上述したように、画像コントラストを強調するための一連の線形及び/又は非線形フィルタリングを含んでもよい。

【 0 0 4 6 】

5 0 4 において、画像は、訓練画像の複数のバイナリスライスを生成するためにバイナリ化され得る。画像は、異なるグレースケールレベルに対応する異なる閾値を用いてバイナリ化され得る。各バイナリスライスは、異なる閾値又はグレースケールレベルに対応し得る。閾値の数は、プログラム可能であってもよく、検査の感度レベル及び検査されるデバイスのタイプに基づいて設定されてもよい。

40

【 0 0 4 7 】

5 0 6 において、各バイナリスライスは、前処理済み画像のコントラストに関する統計的特性及び各スライス自体の特性（例えば、ヒストグラム、標準偏差、平均、最小 - 最大、）に基づいてセグメント化され得る。それによって、各セグメントは、画像のそれぞれの領域に対するコントラストプロファイルによって定義することができる。例えば、スライスの統計的特性を使用してセグメントを定義することができる。ヒストグラム特性は、コントラスト数値データの近似分布を表すことができる。したがって、各セグメント

50

は、類似の特性を含み得る。画像スライスのある領域が別の隣接する領域と異なるとき、それらの領域は異なるセグメントとして定義され得る。

【 0 0 4 8 】

5 0 8 において、セグメントは、セグメントのコントラストプロファイルに基づいて 2 つのグループ又はサブセットに分割され得る。より高いコントラストプロファイルを有するセグメントは、第 1 のサブセットに属するものとして分類されてもよく、より低いコントラストプロファイルを有するセグメントは、第 2 のサブセットに属するものとして分類されてもよい。より高い又はより低いコントラストプロファイルは、コントラスト閾値を使用して判定され得る。

【 0 0 4 9 】

5 1 0 において、セグメントの第 1 のサブセット（例えば、より高いコントラストプロファイル）は、本明細書で説明されるように、機械学習ネットワークに入力され得る。5 1 2 において、機械学習ネットワークは、その訓練に基づいて、それぞれのセグメント内部の欠陥の有無に関する決定を出力するために、その層を使用して動作を実行し得る。それぞれのセグメントにおける欠陥の有無に関する決定に基づいて、欠陥結果を生成することができる。欠陥結果は、初期画像から検出された欠陥を抽出し得る。欠陥結果は、検出された欠陥を示すバイナリ画像であってもよい。欠陥結果は更に、タイプによって分類され得る。

【 0 0 5 0 】

図 6 は、本明細書で説明する欠陥検出技術の結果の例を例解する。生画像 6 0 2、6 0 4 は、上述のように検出器によって取得された検査中のデバイスの画像を示す。示されるように、生画像 6 0 2、6 0 4 内の欠陥は、識別することが困難な場合がある。結果画像 6 5 2、6 5 4 は、本明細書で説明されるような訓練済み機械学習ネットワークを使用する欠陥検出技術の結果を示す。例えば、結果画像 6 5 2、6 5 4 は、欠陥が白であるバイナリ画像におけるウォーターマーク欠陥を示す。

【 0 0 5 1 】

本明細書で説明されるように、機械学習ネットワークの入力のバイナリ化及びセグメント化は、検出技術の速度を高める。（画像全体ではなく）セグメントのサブセットを使用することによって、機械学習ネットワークの動作及び訓練は、より高速に、より少ないコンピューティングリソースを使用して実行されることができる。機械学習ネットワークは、低コントラスト欠陥を含む欠陥がより容易に識別可能であるバイナリ画像を生成することができる。例えば、5 0 0 0 個の別個のダイを含むウェハは、本明細書に記載の検出技術を使用して数ミリ秒で検査することができる。

【 0 0 5 2 】

本文書に図示及び説明される技術は、図 1 に示されるような検査システム 1 0 0 の一部分又は全体を使用して、又は別様に図 7 に関連して以下で考察されるような機械 7 0 0 を使用して、実行され得る。図 7 は、本明細書で考察される技術（例えば、方法論）のうちのいずれか 1 つ以上が実行され得る機械 7 0 0 を備える一例のブロック図を例解する。様々な例では、機械 7 0 0 は、スタンドアロンデバイスとして動作し得るか、又は他の機械に接続（例えば、ネットワーク化）され得る。ネットワーク化された展開では、機械 7 0 0 は、サーバマシン、クライアントマシン、又はサーバクライアントネットワーク環境では両方の容量で動作し得る。一例では、機械 7 0 0 は、ピアツーピア（peer-to-peer、P 2 P）（又は他の分散型）ネットワーク環境におけるピアマシンとして機能し得る。機械 7 0 0 は、パーソナルコンピュータ（personal computer、P C）、タブレットデバイス、セットトップボックス（set-top box、S T B）、パーソナルデジタルアシスタント（personal digital assistant、P D A）、携帯電話、ウェブアプライアンス、ネットワークルータ、スイッチ若しくはブリッジ、又はその機械によって取られるアクションを指定する命令（順次的な、若しくは別様の）を実行することができる任意の機械であり得る。更に、単一の機械のみが例解されているが、「機械」という用語は、クラウドコンピューティング、サービスとしてのソフトウェア（software as a service、S a a S）、他

10

20

30

40

50

のコンピュータクラスタ構成など、本明細書で考察される方法論のうちのいずれか１つ以上を実行するために、命令のセット（又は複数のセット）を個別に又は共同で実行する機械の任意の集合を含むものとする。

【 0 0 5 3 】

本明細書に説明される例は、論理若しくは多数の構成要素若しくは機構を含み得るか、又はそれらによって動作し得る。回路構成は、ハードウェア（例えば、単純な回路、ゲート、論理など）を含む有形のエンティティに実装された回路の集合体である。回路構成メンバーシップは、時間及び基礎となるハードウェアの変動性に対してフレキシブルであり得る。回路構成は、単独で又は組み合わせで、動作時に、指定された動作を実行し得る部材を含む。一例では、回路構成のハードウェアは、特定の動作を実施するように不変に設計され（例えば、配線され）得る。一例では、回路構成を備えるハードウェアは、特定の動作の命令を符号化するために、（例えば、物理的状态の変化又は別の物理的特性の変換などを介して磁氣的に、電氣的になど）物理的に変更されるコンピュータ可読媒体を含む、可變的に接続された物理的構成要素（例えば、実行ユニット、トランジスタ、単純回路など）を含み得る。物理的構成要素を接続する際に、ハードウェア構成要素の基礎となる電氣的特性が、例えば、絶縁特性から導電性特性に、又はその逆に変更され得る。命令は、埋め込まれたハードウェア（例えば、実行ユニット又はロード機構）が、動作時に特定の動作の一部分を実施するために、可変接続を介してハードウェア内に回路構成のメンバーを作成することを可能にする。したがって、コンピュータ可読媒体は、デバイスが動作しているときに、回路構成の他の構成要素に通信可能に結合される。一例では、物理的構成要素のうちのいずれかが、２つ以上の回路構成の２つ以上のメンバーで使用され得る。例えば、動作中、実行ユニットは、ある時点で第１の回路構成の第１の回路で使用され、第１の回路構成内の第２の回路によって、又は異なる時間に第２の回路構成内の第３の回路によって、再使用され得る。

【 0 0 5 4 】

機械（例えば、コンピュータシステム）７００は、ハードウェアプロセッサ７０２（例えば、中央処理ユニット（ＣＰＵ）、グラフィック処理ユニット（ＧＰＵ）、ハードウェアプロセッサコア、又はそれらの任意の組み合わせ）、メインメモリ７０４、及び静的メモリ７０６を含み得、それらのうちのいくつか又は全てが、インターリンク（例えば、バス）７０８を介して互いに通信し得る。機械７００は、表示ユニット７１０、英数字入力ユニット７１２（例えば、キーボード）、及びユーザインターフェース（user interface、UI）ナビゲーションデバイス７１４（例えば、マウス）を更に含み得る。一例では、表示ユニット７１０、入力デバイス７１２、及びUIナビゲーションデバイス７１４は、タッチスクリーンディスプレイでもよい。機械７００は、記憶デバイス（例えば、駆動ユニット）７２６、信号生成デバイス７１８（例えば、スピーカ）、ネットワークインターフェースデバイス７２０、及び全地球測位システム（global positioning system、GPS）センサ、コンパス、加速度計、又は他のセンサなどの１つ以上のセンサ７１６を付加的に含み得る。機械７００は、シリアル接続（例えば、ユニバーサルシリアルバス（universal serial bus、USB））、並列接続、又は他の有線若しくは無線（例えば、赤外線（infrared、IR）接続、近距離無線通信（near field communication、NFC）接続など、１つ以上の周辺デバイス（例えば、プリンタ、カードリーダーなど）を通信又は制御するための出力コントローラ７２８を含み得る。

【 0 0 5 5 】

記憶デバイス７２２は、本明細書に説明される技術又は機能のうちのいずれか１つ以上を具現化するか、又はそれらによって利用されるデータ構造若しくは命令７２４（例えば、ソフトウェア）のうちの１つ以上のセットが記憶される機械可読媒体を含み得る。命令７２４はまた、機械７００によるその実行中に、メインメモリ７０４内、静的メモリ７０６内、又はハードウェアプロセッサ７０２内に、完全に又は少なくとも部分的に存在し得る。一例では、ハードウェアプロセッサ７０２、メインメモリ７０４、静的メモリ７０６、又は記憶デバイス７２２のうちの１つ、又はそれらの任意の組み合わせが、機械可読媒

10

20

30

40

50

体を構成し得る。

【 0 0 5 6 】

機械可読媒体は、単一の媒体と例解されるが、「機械可読媒体」という用語は、1つ以上の命令724を記憶するように構成された単一の媒体又は複数の媒体（例えば、集中型若しくは分散型データベース、及び/又は関連付けられたキャッシュ及びサーバ）を含み得る。

【 0 0 5 7 】

「機械可読媒体」という用語は、機械700による実行のための命令を記憶、符号化、若しくは担持することができ、かつ機械700に、本開示の技術のうちのいずれか1つ以上を実行させるか、又はそのような命令によって使用されるか、若しくはそのような命令に関連付けられたデータ構造を記憶、符号化、若しくは担持することができる任意の媒体を含み得る。非限定的な機械可読媒体の例としては、ソリッドステートメモリ、並びに光学及び磁気媒体が挙げられ得る。したがって、機械可読媒体は、一時的な伝搬信号ではない。大規模な機械可読媒体の具体例としては、半導体メモリデバイス（例えば、電氣的にプログラム可能な読み取り専用メモリ（Electrically Programmable Read-Only Memory、E P R O M）、電氣的に消去可能なプログラム可能な読み取り専用メモリ（Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory、E E P R O M））、及びフラッシュメモリデバイスなどの不揮発性メモリ、磁気又は他の相変化若しくは状態変化メモリ回路、内蔵ハードディスク及びリムーバブルディスクなどの磁気ディスク、磁気光学ディスク、並びにC D - R O Mディスク及びD V D - R O Mディスクが、挙げられ得る。

【 0 0 5 8 】

命令724は、いくつかの転送プロトコル（例えば、フレームリレー、インターネットプロトコル（internet protocol、I P）、伝送制御プロトコル（transmission control protocol、T C P）、ユーザデータグラムプロトコル（user datagram protocol、U D P）、ハイパーテキスト転送プロトコル（hypertext transfer protocol、H T T P）など）のうちのいずれか1つを利用するネットワークインターフェースデバイス720を介して、伝送媒体を使用して、通信ネットワーク726を介して更に送信又は受信され得る。例示的な通信ネットワークとしては、特に、ローカルエリアネットワーク（local area network、L A N）、ワイドエリアネットワーク（wide area network、W A N）、パケットデータネットワーク（例えば、インターネット）、携帯電話ネットワーク（例えば、セルラーネットワーク）、一般電話サービス（Plain Old Telephone、P O T S）ネットワーク、及び無線データネットワーク（例えば、W i - F i（登録商標）として既知の米国電気電子学会（Institute of Electrical and Electronics Engineers、I E E E）802.22ファミリの標準、W i M a x（登録商標）として既知のI E E E 802.26ファミリの標準）、I E E E 802.25.4ファミリの標準、ピアツーピア（P2P）ネットワークが挙げられ得る。一例では、ネットワークインターフェースデバイス720は、通信ネットワーク726に接続するための1つ以上の物理的ジャック（例えば、イーサネット、同軸、又は電話ジャック）又は1つ以上のアンテナを含み得る。一例では、ネットワークインターフェースデバイス720は、単一入力多重出力（single-input multiple-output、S I M O）、複数入力多重出力（multiple-input multiple-output、M I M O）、又は複数入力単一出力（multiple-input single-output、M I S O）技術のうちの少なくとも1つを使用して無線通信するための複数のアンテナを含み得る。「伝送媒体」という用語は、機械700による実行のための命令を記憶、符号化、又は担持することができる任意の無形媒体を含むものとし、そのようなソフトウェアの通信を容易にするためにデジタル又はアナログ通信信号若しくは他の無形媒体を含む。

様々な注記

【 0 0 5 9 】

上記の非限定的な態様の各々は、それ自体で成立することができるか、又は本文書に説明される他の態様若しくは他の主題のうちの1つ以上との様々な並べ替え若しくは組み合わせにおいて、組み合わせることができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 0 】

上記の詳細な説明は、詳細な説明の一部を形成する添付図面への参照を含む。図面は、例解として、本発明が実施され得る特定の実装形態を示す。これらの実装形態は、一般に「例」とも称される。そのような例は、図示又は説明されたものに加えて、要素を含み得る。しかしながら、本発明者らはまた、図示又は説明された要素のみが提供される例を企図する。更に、本発明者らはまた、本明細書に図示若しくは説明される特定の例（又はその１つ以上の態様）に関してか、又は他の例（又はその１つ以上の態様）に関してのいずれかで図示又は説明される要素（又はその１つ以上の態様）の任意の組み合わせ又は並べ替えを使用する例を企図する。

【 0 0 6 1 】

この文書と、参照により組み込まれる任意の文書との間に矛盾した使用がある場合、この文書での使用が、優先する。

【 0 0 6 2 】

本文書において、「a」又は「an」という用語は、「少なくとも１つの」又は「１つ以上」の任意の他の例又は使用とは独立して、１つ又は２つ以上を含むように、特許文書において一般的であるように使用される。本文書では、「又は」という用語は、非排他的であることを指すのに用いられており、そのため、別段の記載がない限り、「A又はB」は、「AであるがBではない」、「BであるがAではない」、及び「A及びB」を含む。本文書において、「including（含む）」及び「in which」という用語は、「comprising（備える／含む）」及び「wherein」というそれぞれの用語の平易な英語の等価物として使用されている。また、以下の請求項では、「including（含む）」及び「comprising（備える／含む）」という用語は、オープンエンドであり、すなわち、ある請求項におけるそのような用語の後に列挙された要素に加えて、要素を含むシステム、デバイス、物品、組成物、製剤、又はプロセスが、依然としてその特許請求の範囲に含まれるとみなされる。更に、以下の請求項では、「第１」、「第２」、及び「第３」などの用語は、単に標識として使用され、それらの物体に数値要件を課すことを意図するものではない。

【 0 0 6 3 】

本明細書に説明される方法の例は、少なくとも部分的に機械実装、又はコンピュータ実装され得る。いくつかの例は、上記の例に説明されるような方法を実行するように電子デバイスを構成するように動作可能な命令で符号化されたコンピュータ可読媒体又は機械可読媒体を含み得る。そのような方法の実装形態は、マイクロコード、アセンブリ言語コード、より高いレベルの言語コードなどのコードを含み得る。そのようなコードは、様々な方法を実行するためのコンピュータ可読命令を含み得る。コードは、コンピュータプログラム製品の部分を形成し得る。更に、一例では、コードは、例えば、実行中又は他の時間に、１つ以上の揮発性、非一時的、又は不揮発性の有形のコンピュータ可読媒体上に有形的に記憶され得る。これらの有形のコンピュータ可読媒体の例としては、ハードディスク、リムーバブル磁気ディスク、リムーバブル光ディスク（例えば、コンパクトディスク及びデジタルビデオディスク）、磁気カセット、メモリカード又はスティック、ランダムアクセスメモリ（random access memory、RAM）、読み取り専用メモリ（read only memory、ROM）などが挙げられ得るが、これらに限定されない。

【 0 0 6 4 】

上記の説明は、例解的であり、限定的ではないことを意図している。例えば、上記の例（又はその１つ以上の態様）は、互いに組み合わせて使用され得る。他の実装形態が、上記の説明を検討する際に、例えば、当業者によって、使用され得る。要約は、読者が、本技術的開示の性質を迅速に確認することを可能にするために提供される。要約は、それが、請求項の範囲又は意味を解釈又は限定するために使用されないことを理解して提出される。また、上記の発明を実施するための形態では、本開示を効率化するために、様々な特徴と一緒にグループ化され得る。これは、特許請求されていない開示された特徴が、任意の請求項に必須であることを意図するものと解釈されるべきではない。むしろ、本発明の

10

20

30

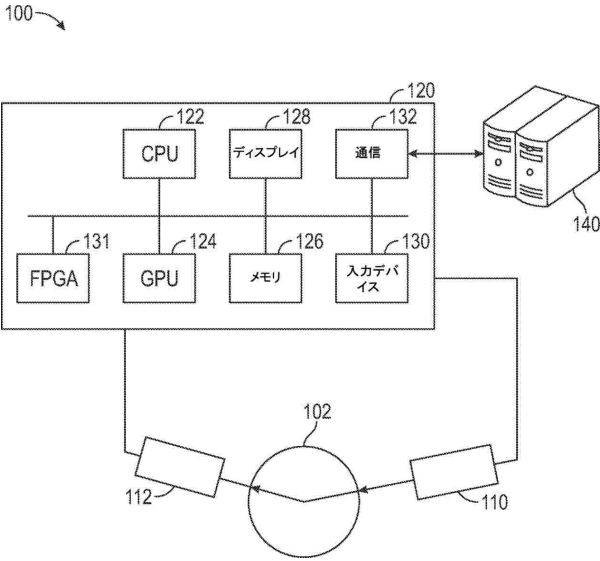
40

50

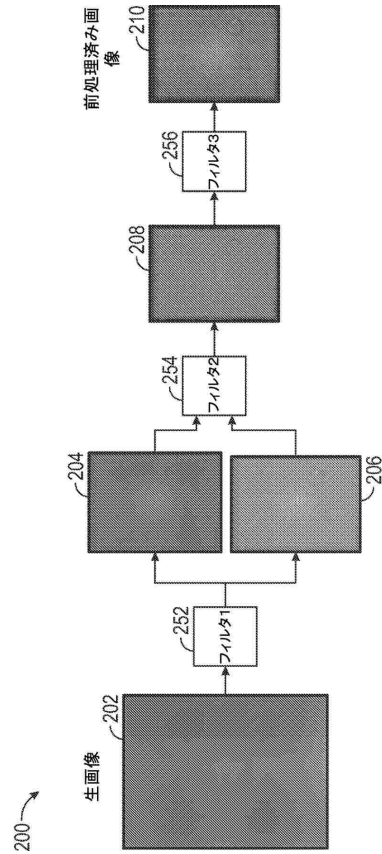
主題は、特定の開示された実装形態の全ての特徴よりも少ない特徴に存在し得る。したがって、以下の請求項は、例又は実装形態として発明を実施するための形態に組み込まれ、各請求項は、別個の実装形態としてそれ自体で成立し、そのような実装形態は、様々な組み合わせ又は並べ替えで互いに組み合わせられ得ることが企図される。

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

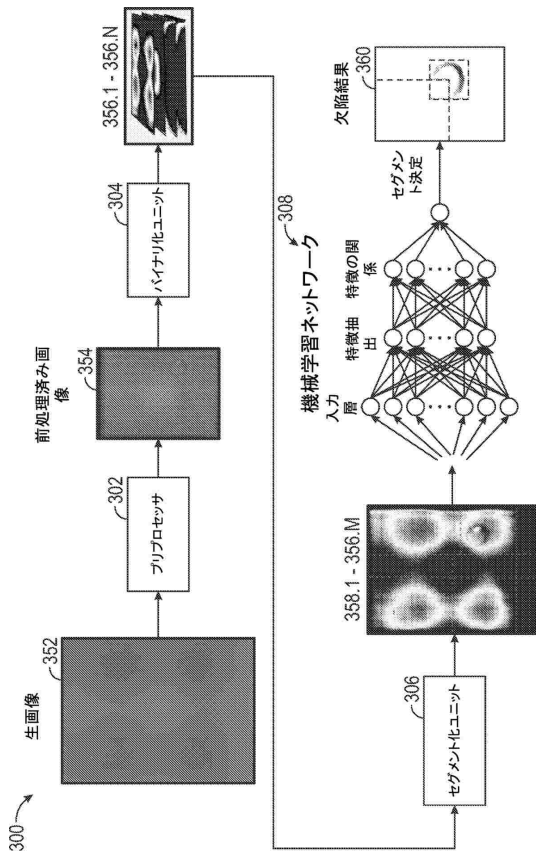
20

30

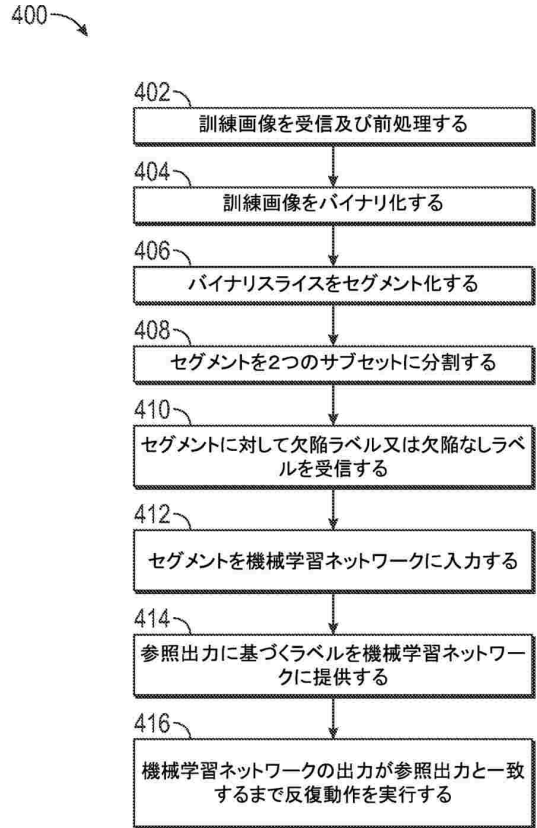
40

50

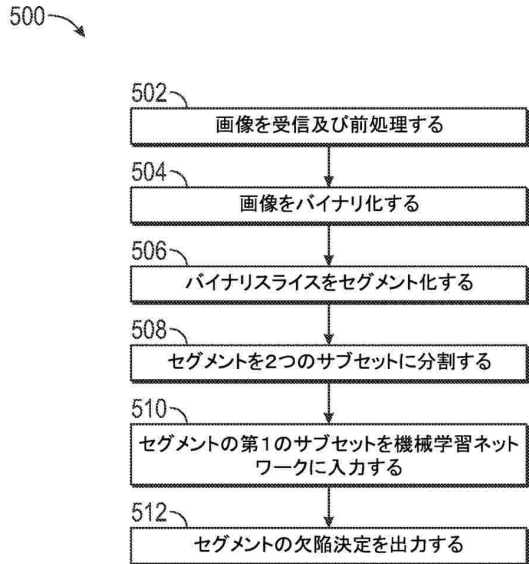
【図 3】



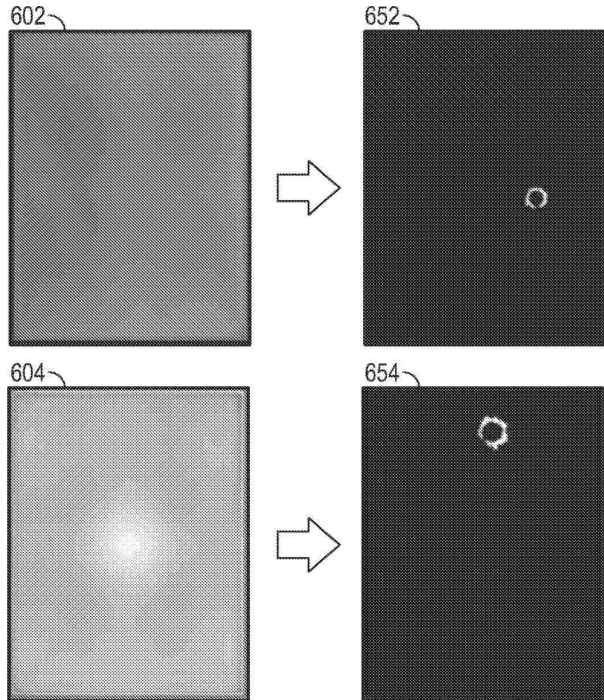
【図 4】



【図 5】



【図 6】



10

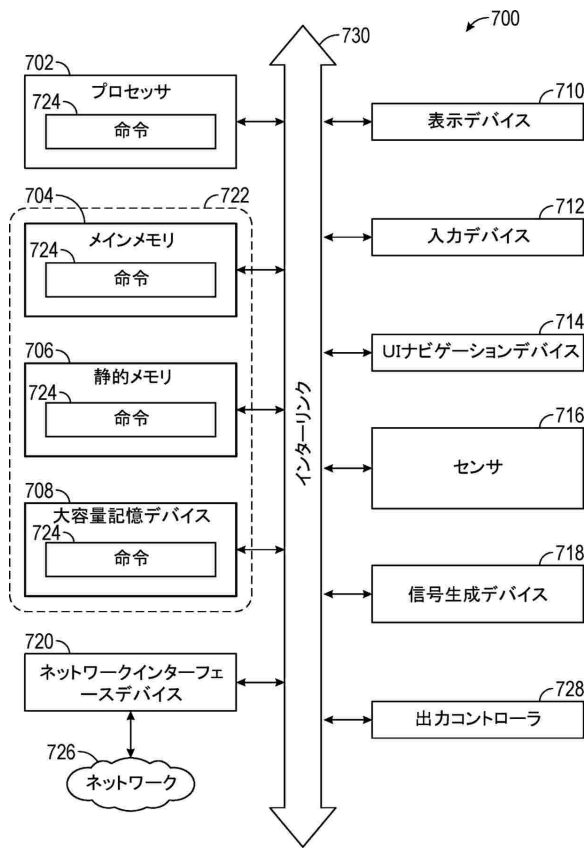
20

30

40

50

【図 7】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

弁理士 近藤 直樹
(74)代理人 100139712
弁理士 那須 威夫
(74)代理人 100141553
弁理士 鈴木 信彦
(74)代理人 100170209
弁理士 林 陽和
(72)発明者 バシスティ ローマン エス
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01887 ウィルミントン ジョンスピン ロード 16
(72)発明者 ダリワル ジャティンダー
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01887 ウィルミントン ジョンスピン ロード 16
(72)発明者 ディン ジアン
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01887 ウィルミントン ジョンスピン ロード 16
審査官 豊島 洋介
(56)参考文献 特開昭61-38450(JP,A)
特開2007-309679(JP,A)
特開2006-266872(JP,A)
特開2001-15564(JP,A)
米国特許出願公開第2019/0333197(US,A1)
韓国公開特許第10-2020-0039049(KR,A)
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G06T 7/00 - 7/90
G06V10/00 - 20/90
G06V30/418
G06V40/16
G06V40/20
H01L21/64 - 21/66