

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7598393号
(P7598393)

(45)発行日 令和6年12月11日(2024.12.11)

(24)登録日 令和6年12月3日(2024.12.3)

(51)国際特許分類		F I	
H 0 1 L	21/66 (2006.01)	H 0 1 L	21/66 P
H 0 1 L	21/60 (2006.01)	H 0 1 L	21/92 6 0 4 T
G 0 1 B	11/02 (2006.01)	H 0 1 L	21/66 J
		G 0 1 B	11/02 H
請求項の数 26 (全29頁)			
(21)出願番号	特願2022-578865(P2022-578865)	(73)特許権者	500049141
(86)(22)出願日	令和3年8月6日(2021.8.6)		ケーエルエー コーポレーション
(65)公表番号	特表2023-536564(P2023-536564 A)		アメリカ合衆国 カリフォルニア ミルピタス ワン テクノロジー ドライブ
(43)公表日	令和5年8月28日(2023.8.28)	(74)代理人	110001210
(86)国際出願番号	PCT/US2021/044859		弁理士法人Y K I 国際特許事務所
(87)国際公開番号	WO2022/032046	(72)発明者	ヤング スコット エー
(87)国際公開日	令和4年2月10日(2022.2.10)		アメリカ合衆国 カリフォルニア ソケル
審査請求日	令和6年6月17日(2024.6.17)		プレスコット ロード 4 4 4 0
(31)優先権主張番号	63/062,446	(72)発明者	バスカー クリス
(32)優先日	令和2年8月7日(2020.8.7)		アメリカ合衆国 カリフォルニア サン
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		ノゼ クイーンズブリッジ コート 1 0 6 1
(31)優先権主張番号	17/393,979	(72)発明者	ニコライデス レナ
(32)優先日	令和3年8月4日(2021.8.4)		アメリカ合衆国 カリフォルニア カスト
最終頁に続く		最終頁に続く	

(54)【発明の名称】 深層学習を用いた三次元構造の検査または計測

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

試料についての情報を決定するように構成されたシステムであって、
前記試料の画像を生成するように構成された撮像サブシステムであって、2つ以上の三次元構造が前記試料上に形成される、撮像サブシステムと、
1つ以上のコンピュータシステムと、
前記1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネントであって、前記試料の画像のうちの1つ以上に基づいて前記2つ以上の三次元構造の高さを予測するように構成された深層学習モデルを備える1つ以上のコンポーネントと、
を備え、
前記1つ以上のコンピュータシステムは、
前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分位置を位置特定及び分離するように構成され、前記深層学習モデルに入力される入力画像は、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の分離部分のみを含み、
2つ以上の三次元構造の予測された高さに基づいて試料についての情報を決定するように構成される、システム。

【請求項2】

前記2つ以上の3次元構造は、ウェハ上に形成された1つ以上のバンプである、請求項1に記載のシステム。

【請求項3】

前記情報を決定することは、前記2つ以上の三次元構造のいずれかが欠陥があるかどうかを決定することを含む、請求項1に記載のシステム。

【請求項4】

前記情報は、前記2つ以上の三次元構造の平均高さ計測を含む、請求項1に記載のシステム。

【請求項5】

前記深層学習モデルに入力される前記入力画像は、前記試料の単一経路において前記撮像サブシステムによって収集される、請求項1に記載のシステム。

【請求項6】

前記深層学習モデルに入力される前記入力画像は、単一焦点値で前記撮像サブシステムによって収集される、請求項1に記載のシステム。

【請求項7】

前記試料の画像は、前記試料の明視野画像または暗視野画像を含む、請求項1に記載のシステム。

【請求項8】

前記試料の画像は、前記試料の明視野画像および暗視野画像を含む、請求項1に記載のシステム。

【請求項9】

前記1つ以上のコンピュータシステムはさらに、前記試料または2つ以上の焦点オフセットを有する異なる試料の撮像サブシステムによって生成された前記試料の画像を用いて前記深層学習モデルを訓練するように構成される、請求項1に記載のシステム。

【請求項10】

前記1つ以上のコンピュータシステムはさらに、前記三次元構造の特徴の既知の値とともに、その上に形成される三次元構造を有する異なる試料の撮像サブシステムによって生成される前記試料の画像を用いて前記深層学習モデルを訓練するように構成される、請求項1に記載のシステム。

【請求項11】

前記1つ以上のコンピュータシステムはさらに、それぞれ、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の1つ以上の部分を位置特定及び分離し、分離された1つ以上の部分に基づいて、それぞれ、個々の前記2つ以上の三次元構造のための個々の1つ以上のトリミングされたパッチ画像を生成するように構成される、請求項1に記載のシステム。

【請求項12】

前記1つ以上のコンピュータシステムはさらに、テンプレートマッチングによって、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分位置特定及び分離するように構成される、請求項1に記載のシステム。

【請求項13】

前記1つ以上のコンピュータシステムはさらに、前記試料の設計情報に基づいて、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分位置特定及び分離するように構成される、請求項1に記載のシステム。

【請求項14】

前記1つ以上のコンピュータシステムはさらに、前記1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネント内に含まれる位置特定用に構成されたYOLOネットワークに前記試料の画像を入力することによって、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分位置特定及び分離するように構成される、請求項1に記載のシステム。

【請求項15】

前記1つ以上のコンピュータシステムはさらに、前記1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネント内に含まれる位置特定用に構成された追加の深層学習モデルに前記試料の画像を入力することによって、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分位置特定及び分離するように構成される、請求項

10

20

30

40

50

1 に記載のシステム。

【請求項 1 6】

前記深層学習モデルはさらに、畳み込みニューラルネットワークとして構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 1 7】

前記深層学習モデルは、畳み込み層と完全結合層との組み合わせを含む、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 1 8】

前記深層学習モデルはさらに、A l e x N e tとして構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 1 9】

前記深層学習モデルはさらに、Y O L Oネットワークとして構成され、前記Y O L Oネットワークはさらに、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分の前記位置特定及び分離するように構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 2 0】

前記撮像サブシステムはさらに、検査サブシステムとして構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 2 1】

前記撮像サブシステムはさらに、計測サブシステムとして構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 2 2】

前記撮像サブシステムはさらに、光ベースのサブシステムとして構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 2 3】

前記撮像サブシステムはさらに、電子ビームサブシステムとして構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 2 4】

前記試料はウェハである、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 2 5】

試料についての情報を決定するためのコンピュータに実装される方法を実行するための1つ以上のコンピュータシステム上で実行可能なプログラム命令を記憶する、コンピュータ可読媒体であって、前記コンピュータに実装される方法は、

撮像サブシステムを用いて前記試料の画像を生成するステップであって、2つ以上の三次元構造が前記試料上に形成される、ステップと、

前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分の位置特定及び分離するステップと、

前記1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネントに含まれる深層学習モデルに前記試料の画像のうちの1つ以上を入力することによって、前記試料の画像のうちの1つ以上に基づいて前記2つ以上の三次元構造の高さを予測するステップであり、前記深層学習モデルに入力される入力画像は、前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の分離部分のみを含み、

前記2つ以上の三次元構造物の予測された高さに基づいて前記試料についての情報を決定するステップ

を含む方法。

【請求項 2 6】

試料についての情報を決定するためのコンピュータに実装される方法であって、

撮像サブシステムを用いて試料の画像を生成するステップであって、2つ以上の三次元構造が試料上に形成される、ステップと、

前記2つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の部分の位置特定及び分離するステップと、

10

20

30

40

50

前記 1 つ以上のコンピュータシステムによって実行される 1 つ以上のコンポーネントに含まれる深層学習モデルに 1 つ以上の入力画像を入力することによって、1 つ以上の前記試料の画像に基づいて前記 2 つ以上の三次元構造の高さを予測するステップであり、前記深層学習モデルに入力される入力画像は、前記 2 つ以上の三次元構造に対応する前記試料の画像の分離部分のみを含み、

前記 2 つ以上の三次元構造の予測された高さに基づいて前記試料についての情報を決定するステップと、

を含み、前記位置特定及び分離するステップ、並びに前記決定するステップを前記 1 つ以上のコンピュータシステムによって実行する方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、概して、試料についての情報を決定するように構成された方法およびシステムに関する。特定の実施形態は、深層学習（DL）人工知能（AI）を用いたパンプ高さ三次元（3D）検査および／または計測のための方法およびシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

以下の説明および実施例は、このセクションに含まれることによって先行技術であるとは認められない。

【0003】

論理デバイスおよびメモリデバイスなどの半導体デバイスを製造することは、典型的には、半導体デバイスの様々な特徴および複数のレベルを形成するために、多数の半導体製造プロセスを使用して半導体ウェハなどの基板を処理することを含む。例えば、リソグラフィは、レチクルから半導体ウェハ上に配置されたレジストにパターンを転写することを含む半導体製造プロセスである。半導体製造プロセスのさらなる例は、化学機械研磨（CMP）、エッチング、堆積、およびイオン注入を含むが、これらに限定されない。複数の半導体デバイスは、単一の半導体ウェハ上に配置製造され、次いで個々の半導体デバイスに分離され得る。

【0004】

検査プロセスは、製造プロセスにおけるより高い歩留まり、したがってより高い利益を促進するためにウェハ上の欠陥を検出するために半導体製造プロセス中の様々なステップで使用される。検査は、ICなどの半導体デバイスを製造する上で常に重要な部分であった。しかしながら、半導体デバイスの寸法が減少するにつれて、より小さい欠陥がデバイスの故障を引き起こし得るため、検査は、許容可能な半導体デバイスの製造の成功にとってさらに重要になる。

【0005】

欠陥レビューは、典型的には、検査プロセスによってそれ自体で検出された欠陥を再検出し、高倍率光学系又は走査型電子顕微鏡（SEM）のいずれかを使用してより高い分解能で欠陥に関する追加情報を生成することを含む。したがって、欠陥レビューは、欠陥が検査によって検出されたウェハ上の離散的な位置で実行される。欠陥レビューにより生成された欠陥に対するより高い解像度のデータは、プロファイル、粗さ、より正確なサイズ情報などの欠陥の属性を決定するのに適している。

【0006】

計測プロセスはまた、プロセスを監視および制御するために半導体製造プロセス中の様々なステップで使用される。計測プロセスは、ウェハ上で欠陥が検出される検査プロセスとは異なり、現在使用されている検査ツールを使用して判定することができないウェハの 1 つ又は複数の特性を測定するために計測プロセスが使用される点で検査プロセスとは異なる。例えば、計測プロセスは、プロセスの性能を 1 つ以上の特性から決定できるように、プロセス中にウェハ上に形成された特徴（フィーチャ）の寸法（例えば、線幅、厚さなど）などのウェハの 1 つ以上の特性を測定するために使用される。さらに、ウェハの 1 つ

10

20

30

40

50

または複数の特性が許容できない場合（例えば、特性の所定の範囲外である）、ウェハの1つまたは複数の特性の測定値を使用して、プロセスによって製造される追加のウェハが許容できる特性を有するようにプロセスの1つまたは複数のパラメータを変更することができる。

【0007】

計測プロセスはまた、検査によって検出された欠陥が欠陥レビューにおいて再検討される欠陥レビュープロセスとは異なり、計測プロセスが、欠陥が検出されていない位置で実行され得るという点で、欠陥レビュープロセスとは異なる。言い換えれば、欠陥レビューとは異なり、計測プロセスがウェハ上で実行される位置は、ウェハ上で実行される検査プロセスの結果とは無関係であり得る。特に、計測プロセスが実行される場所は、検査結果とは無関係に選択され得る。加えて、計測が実行されるウェハ上の位置は、検査結果とは無関係に選択され得るので、ウェハに対する検査結果が生成され、使用のために利用可能になるまで欠陥レビューが実行されるウェハ上の位置を決定することができない欠陥レビューとは異なり、計測プロセスが実行される位置は、ウェハに対して検査プロセスが実行される前に決定され得る。回路集積の大規模化および半導体デバイスのサイズの縮小により、レチクルおよび製造されたデバイスは、限界寸法（CD）、高さ、膜厚および組成などの特徴変動にますます敏感になってきている。特定の例では、三次元（3D）検査および計測は、TSV（スルーシリコンビア）およびバンプ構造、または粒子形状（サイズおよび高さ）を評価するためなど、半導体産業においてしばしば使用される。高さの変動は、補正されない場合、最終デバイスが電氣的タイミング誤差により所望の性能を満たさない原因となり得る。さらに悪いことに、それらは最終デバイスを誤動作させ、歩留まりに悪影響を及ぼす可能性がある。

【0008】

3D構造の高さを測定し、高さに基づいてそのような構造に欠陥があるかどうかを判定することは、他の構造測定および欠陥検出とは異なる問題を提示し得る。例えば、ウェハおよび他の半導体技術関連試料の検査および計測のために設計された多くのシステムおよび方法を使用して、異なる焦点オフセットで試料を撮像し、次いで、どの焦点オフセットが、最良焦点にあるように見える構造の画像を生成するかに基づいて、構造の高さを決定することによって、高さを測定し、高さ関連欠陥を検出することができる。特に、構造が、異なる焦点設定で生成された幾つかの画像のうちの1つの画像において焦点が合っているように見える場合、これは、概して、撮像されている構造の表面が、その1つの画像を生成するために使用される焦点設定に対応する焦点面の位置と一致することを意味する。次いで、その表面の高さを、その焦点設定に基づいて決定することができる。

【0009】

したがって、3D構造の高さを測定し、および／または高さに基づいて欠陥を検出するために使用されるシステムおよび方法には、いくつかの明らかな欠点があり得る。特に、いくつかのそのようなシステムおよび方法では、異なる焦点オフセットにおける試料の画像を同時に生成することができ、これは確かに可能であるが、そのようなシステムのハードウェアは比較的複雑であり、今日使用されているほとんどの検査および計測ツールとは異なりやすい。したがって、高さの測定または高さに関連する欠陥の決定は、比較的高価なツールおよびそのような測定および検査に特有のツール（すなわち、検査および計測により一般的に利用可能なツールとは違う）を必要とする可能性がある。そのような複雑で高価なツールハードウェアを回避する1つの方法は、それぞれが異なる焦点設定で試料の複数の走査を実行することである。しかしながら、そのような方法は、単なる1つではなく複数のスキャンを実行することに関係する、明らかに増加したコストおよび時間を含む、それら自体の欠点を有する。

【0010】

画像が、ただ1回の走査で異なる焦点オフセットで生成されるか、または複数回の走査で異なる焦点オフセットで生成されるかにかかわらず、そのようなシステムおよび方法はまた、不利なことに、撮像のために使用される焦点オフセットのうちの1つに対応する焦

点面位置のうちの1つが、測定または検査されている構造の高さと一致する確率に依拠する。明らかに、ほとんどのそのようなシステムおよび方法は、実用目的のために有限数の焦点オフセットを使用することになり、したがって、焦点面が、測定または検査されている高さに偶然に対応するか否かは、測定がどれだけ正確であるか、および検査がどれだけ敏感であるかに影響を及ぼし得る。そのような方法に使用される焦点オフセットの賢明な選択は、それらの精度および／または感度を最大化するのに役立ち得るが、焦点オフセット選択に起因する測定および検査誤差の可能性を完全に排除することはできない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【文献】米国特許出願公開第2017／0191946号

【文献】国際公開第2020／002705号

【文献】米国特許出願公開第2019／0130188号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

したがって、上述の欠点の1つまたは複数を有さない、試料上に形成された3D構造の情報を決定するためのシステムおよび方法を開発することが有利であろう。

【課題を解決するための手段】

【0013】

様々な実施形態の以下の説明は、添付の特許請求の範囲の主題を限定するものとして決して解釈されるべきではない。

一実施形態は、試料についての情報を決定するように構成されたシステムに関する。このシステムは、試料の画像を生成するように構成された撮像サブシステムを含む。1つ以上の三次元（3D）構造が試料上に形成される。システムはまた、1つ以上のコンピュータシステムと、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネントとを含む。1つ以上のコンポーネントは、画像のうちの1つ以上に基いて1つ以上の3D構造の高さを予測するように構成された深層学習（DL）モデルを含む。1つ以上のコンピュータシステムは、1つ以上の3D構造の予測された高さに基いて試料についての情報を決定するように構成される。システムはさらに、本明細書に説明されるように構成されてもよい。別の実施形態は、試料の情報を決定するためのコンピュータ実装方法に関する。この方法は、撮像サブシステムを用いて試料の画像を生成するステップを含む。1つ以上の3D構造が試料上に形成される。本方法はまた、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネントに含まれるDLモデルに画像のうちの1つ以上を入力することによって、画像のうちの1つ以上に基いて1つ以上の3D構造の高さを予測するステップを含む。さらに、この方法は、1つ以上の3D構造の予測された高さに基いて試料についての情報を決定することを含む。決定は、1つまたは複数のコンピュータシステムによって実行される。

【0014】

上記の方法のステップの各々は、本明細書に記載されるようにさらに実行され得る。加えて、上述の方法の実施形態は、本明細書に記載される任意の他の方法の任意の他のステップを含んでもよい。さらに、上述の方法は、本明細書に記載のシステムのいずれかによって実行することができる。

【0015】

別の実施形態は、試料についての情報を決定するためのコンピュータ実装方法を実行するための1つまたは複数のコンピュータシステム上で実行可能なプログラム命令を記憶する非一時的なコンピュータ可読媒体に関する。コンピュータ実装方法は、上述の方法のステップを含む。コンピュータ可読媒体は、本明細書で説明するようにさらに構成され得る。コンピュータ実装方法のステップは、本明細書でさらに説明されるように実行されてもよい。加えて、プログラム命令が実行可能であるコンピュータ実装方法は、本明細書で説

10

20

30

40

50

明される任意の他の方法の任意の他のステップを含んでもよい。

【0016】

本発明のさらなる利点は、好ましい実施形態の以下の詳細な説明の利益を得て、添付の図面を参照して、当業者には明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】本明細書に記載されるように構成されるシステムの実施形態の側面図を示す概略図である。

【図1a】本明細書に記載されるように構成されるシステムの実施形態の側面図を示す概略図である。

【図2】バンプの例の断面図およびその設計が経時的にどのように変化するかを示す概略図である。

【図3】様々な高さを有するバンプの例の断面図と、本明細書に記載の実施形態によってバンプについて決定することができる情報とを示す概略図である。

【図4】本明細書に記載の撮像サブシステムの実施形態によって走査されている試料上のバンプの例の断面図と、撮像サブシステムによって生成された画像の平面図とを示す概略図である。

【図5】試料についての情報を決定するための方法の一実施形態を示すフローチャートである。

【図6】1つ以上のコンピュータシステムに本明細書で説明するコンピュータ実装方法を実行させるためのプログラム命令を記憶する非一時的コンピュータ可読媒体の一実施形態を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

本発明は、種々の修正および代替形態を受け入れる余地があるが、その特定の実施形態が、例として図面に示され、本明細書で詳細に説明される。図面は縮尺通りではない場合がある。しかしながら、図面およびその詳細な説明は、本発明を開示される特定の形態に限定することを意図するものではなく、逆に、添付の特許請求の範囲によって定義される本発明の精神および範囲内に入る全ての修正、均等物、および代替を網羅することを意図することを理解されたい。

【0019】

ここで図面を参照すると、図は縮尺通りに描かれていないことに留意されたい。特に、図の要素のいくつかの縮尺は、要素の特性を強調するために大きく誇張されている。図面は同じ縮尺で描かれていないことにも留意されたい。同様に構成され得る複数の図に示される要素は、同じ参照番号を使用して示されている。本明細書において別段の注記がない限り、説明および図示される要素のいずれも、任意の好適な市販の要素を含み得る。

【0020】

概して、本明細書に記載される実施形態は、試料についての情報を決定するための方法およびシステムに関する。本明細書で説明されるいくつかの実施形態は、深層学習（ディープラーニング）（DL）人工知能（AI）を使用するバンプ高さ三次元（3D）検査および計測のために構成される。試料についての情報を決定するように構成されたシステムの一実施形態を図1に示す。システムは、1つ以上のコンピュータシステム（例えば、コンピュータサブシステム46およびコンピュータシステム102）と、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネント（構成要素）100を含む。このシステムは、試料の画像を生成するように構成された撮像サブシステム10も含む。一実施形態では、撮像サブシステムは、光ベースのサブシステムとして構成される。例えば、図1の実施形態では、撮像サブシステムは、試料からの光を検出し、それによって試料の画像を生成する間に、試料の物理的バージョンにわたって光を走査するか、または試料の物理的バージョンに光を向けるように構成される。撮像サブシステムはまた、本明細書でさらに説明されるように、複数のモードで走査（または指向）および検出を行う

10

20

30

40

50

ように構成されてもよい。

【0021】

図1に示すシステムの実施形態では、撮像サブシステム10は、光を試料14に向けるように構成された照明サブシステムを含む。照明サブシステムは、少なくとも1つの光源を含む。図1に示すように、照明サブシステムは、光源16及び／又は光源34を含む。照明サブシステムは、1つ以上の斜角および／または1つ以上の垂直角を含むことができる1つ以上の入射角で試料に光を向けるように構成することができる。例えば、図1に示すように、光源16からの光は、光学素子18を通り、次いでレンズ20を通して、斜めの入射角で試料14に向けられる。斜入射角は、例えば試料の特性に応じて変化し得る任意の適切な斜入射角を含むことができる。光源34からの光は、光学要素36、ビームスプリッタ38および26、次いでレンズ24を通して、垂直（または実質的に垂直）入射角で試料14に指向されてもよい。光源34からの光が試料に向けられる角度が正確に垂直でない場合、実質的に垂直の入射角を上述のように、例えば試料の特性に基づいて選択することができる。

10

【0022】

撮像サブシステムは、異なる時間に異なる入射角で試料に光を向けるように構成することができる。例えば、撮像サブシステムは、光源の一方からの光を試料に向け、次いで、光源の他方からの光を試料に向けるように構成することができる。撮像サブシステムはさらに、または代替的に、同時に複数の入射角で試料に光を向けるように構成することができる。例えば、照明サブシステムは、複数の照明チャネルを含んでもよく、照明チャネルのうちの1つは、図1に示されるように、光源16、光学要素18、およびレンズ20を含んでもよく、照明チャネルのうちの別のものは、光源34、光学要素36、およびレンズ24を含んでもよい。複数の照明チャネルからの光が同時に試料に向けられる場合、異なる入射角で試料に向けられる光の1つまたは複数の特性（例えば、波長、偏光など。）は、異なる入射角での試料の照明から生じる光が互いに分離され、検出器で別々に検出され得るように異なり得る。

20

【0023】

同じ照明チャネルを、異なる時間に異なる特性を有する試料に光を向けるように構成することもできる。例えば、場合によっては、光学素子18および36をスペクトルフィルタとして構成することができ、スペクトルフィルタの特性は、異なる波長の光を異なる時間に試料に向けることができるように、様々な異なる方法（例えば、スペクトルフィルタをスワップアウトすることによる）で変更することができる。照明サブシステムは、異なるまたは同じ特性を有する光を異なるまたは同じ入射角で順次または同時に試料に向けるための、当技術分野で知られている任意の他の適切な構成を有することができる。

30

【0024】

一実施形態では、光源16および34はそれぞれ、広帯域プラズマ（BBP）光源を含んでもよい。このようにして、光源によって生成され、試料に向けられる光は、広帯域光を含むことができる。しかしながら、光源は、当技術分野において既知の任意の好適な波長で光を生成するように構成された、当技術分野において既知の任意の好適なレーザ、アークランプ、多色発光ダイオード（LED）等の任意の他の好適な光源を含んでもよい。レーザまたは他の光源は、単色またはほぼ単色である光を生成するように構成されてもよい。このように、レーザまたは他の光源は、狭帯域レーザまたは光源であってもよい。光源はまた、複数の離散波長または波長帯で光を生成する多色光源を含んでもよい。光源16および34はまた、場合によっては1つ以上の異なる発光特性（例えば、異なる波長を放出するレーザ）を有する同じタイプの光源、または異なるタイプの光源（例えば、一方の光源はBBP光源であってもよく、他方の光源はレーザであってもよい）であってもよい。光学素子18からの光は、レンズ20によって試料14上に集束され、光学素子36からの光は、レンズ24によって試料14上に集束される。レンズ20および24は、単一の屈折光学素子として図1に示されているが、実際には、レンズ20および24はそれぞれ、組み合わせてそれぞれの光学素子からの光を試料に集束させるいくつかの屈折

40

50

および／または反射光学素子を含むことができる。図 1 に示され、本明細書で説明される照明サブシステムは、任意の他の好適な光学要素（図示せず）を含んでもよい。そのような光学要素の例は、偏光コンポーネント、スペクトルフィルタ、空間フィルタ、反射光学要素、アポダイザ、ビームスプリッタ、アパーチャなどを含むが、これらに限定されず、当技術分野で知られている任意のそのような好適な光学要素を含み得る。加えて、撮像サブシステムは、撮像のために使用される照明の種類に基づいて、照明サブシステムの要素のうちの 1 つ以上を変更するように構成されてもよい。

【0025】

撮像サブシステムはまた、光を試料上で走査させるように構成された走査サブシステムを含むことができる。例えば、撮像サブシステムは、撮像中に試料 14 が配置されるステージ 22 を含むことができる。走査サブシステムは、光が試料にわたって走査され得るように試料を移動させるように構成され得る、任意の好適な機械的および／またはロボットアセンブリ（ステージ 22 を含む）を含んでもよい。それに加えて、またはその代わりに、撮像サブシステムは、撮像サブシステムの 1 つ以上の光学素子が試料上で光のいくらかの走査を実行するように構成することができる。光は、蛇行経路または螺旋経路等の任意の好適な様式で、試料にわたって走査されてもよい。

【0026】

撮像サブシステムはさらに、1 つ以上の検出チャンネルを含む。概して、検出チャンネルの各々は、その対応する照明サブシステムによる試料の照明に起因する試料からの光を検出し、検出された光に応答して出力を生成するように構成された検出器を含む。例えば、図 1 に示される撮像サブシステムは、2 つの検出チャンネルを含み、一方はレンズ 24、ビームスプリッタ 26、レンズ 28、素子 30、および検出器 32 によって形成され、他方はレンズ 24、ビームスプリッタ 38、レンズ 40、素子 42、および検出器 44 によって形成される。2 つの検出チャンネルは、異なるまたは同じ収集角度で光を収集および検出するように構成され得る。いくつかの例では、検出器 32 を含む検出チャンネルは、光源 16 からの光による照明によって試料から散乱された光を検出するように構成され、検出器 44 を含む検出チャンネルは、光源 34 からの光による照明によって試料から正反射された光を検出するように構成される。したがって、検出器 32 を含む検出チャンネルは、暗視野（DF）チャンネルとして構成されてもよく、検出器 44 を含む検出チャンネルは、明視野（BF）チャンネルとして構成されてもよい。

【0027】

図 1 は、2 つの検出チャンネルを含む撮像サブシステムの実施形態を示すが、撮像サブシステムは、異なる数の検出チャンネル（例えば、1 つの検出チャンネルのみ、または 2 つ以上の検出チャンネルである）を含んでもよい。1 つのそのような事例では、撮像サブシステムは、1 つ以上の DF チャンネルおよび／または 1 つ以上の BF チャンネルを含んでもよい。したがって、本明細書で説明される撮像サブシステムは、DF のみ、BF のみ、または DF および BF 撮像の両方（同時または逐次）のために構成されてもよい。

【0028】

レンズ 28 及び 40 は、単一の屈折光学素子として図 1 に示されているが、レンズの各々は、1 つ以上の屈折光学素子及び／又は 1 つ以上の反射光学素子を含むことができる。ビームスプリッタ 26 及び 38 は、当該技術分野において既知の任意の好適な構成を有してもよい。図 1 に示すように、レンズ 24 は、光源 34 からの光を試料に向け、光源 16 からの光による照明によって試料から散乱された光と、光源 34 からの光による照明によって試料から正反射された光とを収集するように構成することができる。したがって、検出チャンネルは共通のレンズを共有することができる。しかしながら、検出チャンネルは、いかなる共通要素も共有しなくてもよく、または複数の共通要素（示されていない；例えば、共通のスペクトルフィルタのように）を共有してもよい。要素 30 および 42 はそれぞれ、開口、空間フィルタ、分析器、他の偏光要素またはフィルタ、スペクトルフィルタ等の当技術分野で公知の任意の 1 つ以上の好適な要素を含んでもよい。加えて、1 つの要素のみが、各検出器への光の経路内に位置付けられて示されているが、複数のそのような要

素が、各検出チャネル（例えば、スペクトルフィルタと空間フィルタとの組み合わせである）内で使用されてもよい。

【0029】

1つ以上の検出チャネルは、光電子増倍管（PMT）、電荷結合素子（CCD）、および時間遅延積分（TDI）カメラなど、当技術分野で知られている任意の適切な検出器を含むことができる。検出器はまた、非撮像検出器または撮像検出器を含んでもよい。検出器が非撮像検出器である場合、検出器の各々は、強度などの散乱光の特定の特性を検出するように構成され得るが、撮像平面内の位置の関数としてそのような特性を検出するように構成されないことがある。したがって、撮像サブシステムの検出チャネルの各々に含まれる検出器の各々によって生成される出力は、画像信号または画像データではなく、信号またはデータであってもよい。このような場合、コンピュータサブシステム46などのコンピュータサブシステムは、検出器の非撮像出力から試料の画像を生成するように構成することができる。しかしながら、他の事例では、検出器は、画像信号または画像データを生成するように構成される、撮像検出器として構成されてもよい。したがって、撮像サブシステムは、いくつかの方法で画像を生成するように構成されてもよい。

【0030】

図1は、本明細書で説明されるシステムの実施形態に含まれ得る撮像サブシステムの構成を概略的に図示するために本明細書で提供されることに留意されたい。明らかに、本明細書で説明される撮像サブシステム構成は、市販の撮像システムを設計するときに通慣行されるように、撮像サブシステムの性能を最適化するように変更されてもよい。加えて、本明細書で説明されるシステムは、KLA Corp.、カリフォルニア州ミルピタスから市販されているAltairシリーズのツール等の既存のシステム（たとえば、本明細書で説明する機能を既存のシステムに追加することによって、）を使用して実装されてもよい。いくつかのそのようなシステムに関して、本明細書で説明される実施形態は、システムの随意の機能性（例えば、システムの他の機能に加えて、）として提供されてもよい。代替として、本明細書に説明される撮像サブシステムは、完全に新しい撮像サブシステムを提供するように設計されてもよい。撮像サブシステムはさらに、米国特許7,782,452号（2010年8月24日、Mechanianら）及び米国特許出願公開2009/0059215号（2009年3月5日、Mechanianら）で説明されるように構成されてもよく、それは、あたかも本明細書に完全に記載されるように参照することによって組み込まれる。本明細書に記載される実施形態は、これらの参考文献に記載されるようにさらに構成され得る。

【0031】

コンピュータサブシステム46は、コンピュータサブシステムが試料の走査中に検出器によって生成された出力を受け取ることができるように、任意の適切な様式（たとえば、「有線」および／または「無線」伝送媒体を含み得る1つまたは複数の伝送媒体を介して）で撮像サブシステムの検出器に結合することができる。コンピュータサブシステム46は、検出器の出力を使用して、本明細書でさらに説明されるいくつかの機能を行うように構成されてもよい。

【0032】

図1に示されるコンピュータサブシステム（ならびに本明細書で説明される他のコンピュータサブシステム）はまた、本明細書でコンピュータシステムと呼ばれ得る。本明細書で説明されるコンピュータサブシステムまたはシステムの各々は、パーソナルコンピュータシステム、画像コンピュータ、メインフレームコンピュータシステム、ワークステーション、ネットワークアプライアンス、インターネットアプライアンス、または他のデバイスを含む、種々の形態を成してもよい。概して、「コンピュータシステム」という用語は、メモリ媒体からの命令を実行する1つまたは複数のプロセッサを有する任意のデバイスを包含するように広く定義され得る。コンピュータサブシステムまたはシステムはまた、並列プロセッサ等の当技術分野で公知の任意の好適なプロセッサを含んでもよい。加えて、コンピュータサブシステムまたはシステムは、スタンドアロンツールまたはネットワー

クツールのいずれかとして、高速処理およびソフトウェアを有するコンピュータプラットフォームを含んでもよい。

【0033】

システムが複数のコンピュータサブシステムを含む場合、画像、データ、情報、命令などをコンピュータサブシステム間で送信できるように、異なるコンピュータサブシステムを互いに結合することができる。例えば、コンピュータサブシステム46は、当技術分野で知られている任意の適切な有線および／または無線伝送媒体を含み得る任意の適切な伝送媒体によって、図1に破線によって示されるようにコンピュータシステム102に結合され得る。そのようなコンピュータサブシステムのうちの2つ以上はまた、共有コンピュータ可読記憶媒体（図示せず）によって効果的に結合されてもよい。

10

【0034】

撮像サブシステムは、光学または光ベースの撮像サブシステムであるものとして上記で説明されるが、いくつかの実施形態では、撮像サブシステムは、電子ビームサブシステムとして構成される。図1aに示される1つのそのような実施形態では、撮像サブシステムは、コンピュータサブシステム124に結合された電子カラム122を含む。また、図1aに示すように、電子カラムは、1つまたは複数の要素130によって試料128に集束される電子を生成するように構成された電子ビーム源126を含む。電子ビーム源は、例えば、カソード源またはエミッタ先端を含んでもよく、1つ以上の要素130は、例えば、銃レンズ、アノード、ビーム制限アパーチャ、ゲート弁、ビーム電流選択アパーチャ、対物レンズ、および走査サブシステムを含んでもよく、その全ては、当技術分野で公知の任意のそのような好適な要素を含んでもよい。試料から戻ってきた電子（例えば、二次電子）は、1つ以上の要素132によって検出器134に集束させることができる。1つ以上の要素132は、たとえば、要素130に含まれるのと同じ走査サブシステムであり得る走査サブシステムを含み得る。

20

【0035】

電子カラムは、当技術分野で公知の任意の他の好適な要素を含んでもよい。さらに、電子カラムは、参照により本明細書に完全に規定されているかのように取り込まれる、2014年4月8日にKojimaらに発行された米国特許8,664,594号（2014年4月4日、Jiangら）、8,692,204号、2014年4月15日にGubbensらに発行された8,698,093号、および2014年5月6日にMacDonaldらに発行された8,716,662号に記載されているようにさらに構成することができる。

30

【0036】

電子カラムは、電子が斜めの入射角で試料に向けられ、別の斜めの角度で試料から散乱されるように構成されるものとして図1aに示されているが、電子ビームは、任意の適切な角度で試料に向けられ、試料から散乱されてもよい。さらに、電子ビームサブシステムは、複数のモードを使用して本明細書でさらに説明する試料の画像（例えば、異なる照明角度、集光角度などを有する。）を生成するように構成することができる。電子ビームサブシステムの複数のモードは、撮像サブシステムの任意の画像生成パラメータにおいて異なり得る。

40

【0037】

コンピュータサブシステム124は、上述のように検出器134に結合されてもよい。検出器は、試料の表面から戻ってきた電子を検出し、それによって試料の電子ビーム画像を形成することができる。電子ビーム画像は、任意の適切な電子ビーム画像を含み得る。コンピュータサブシステム124は、検出器134によって生成された出力を使用して、試料について本明細書でさらに説明する1つまたは複数の機能を実行するように構成することができる。コンピュータサブシステム124は、本明細書で説明される任意の追加のステップを行うように構成されてもよい。図1aに示される撮像サブシステムを含むシステムは、本明細書に記載されるようにさらに構成され得る。

【0038】

50

図1 aは、本明細書に記載される実施形態に含まれ得る電子ビームサブシステムの構成を概略的に図示するために本明細書に提供されることに留意されたい。上述の光学サブシステムと同様に、本明細書に記載される電子ビームサブシステム構成は、市販の撮像システムを設計するときに通常行われるように、撮像サブシステムの性能を最適化するように変更されてもよい。加えて、本明細書で説明されるシステムは、既存のシステム（たとえば、本明細書で説明する機能を既存のシステムに追加することによって、）を使用して実装され得る。いくつかのそのようなシステムに関して、本明細書で説明される実施形態は、システムの随意の機能性（例えば、システムの他の機能に加えて、）として提供されてもよい。あるいは、本明細書に記載されるシステムは、完全に新しいシステムを提供するように設計されてもよい。

10

【0039】

撮像サブシステムは、光学または電子ビームサブシステムであるものとして上記で説明されるが、撮像サブシステムは、イオンビームサブシステムであってもよい。そのような撮像サブシステムは、電子ビーム源が当技術分野で公知の任意の好適なイオンビーム源と置換され得ることを除いて、図1 aに示されるように構成され得る。加えて、撮像サブシステムは、市販の集束イオンビーム（FIB）システム、ヘリウムイオン顕微鏡（HIEM）システム、および二次イオン質量分析（SIMS）システムに含まれるもの等の任意の他の好適なイオンビームサブシステムであってもよい。

【0040】

本明細書で説明する撮像サブシステムは、複数のモードで試料の出力、例えば画像を生成するように構成することができる。一般に、「モード」は、試料の画像を生成するために使用される撮像サブシステムのパラメータ（または試料の画像を生成するために使用される出力）の値によって定義される。したがって、モードは、撮像サブシステムのパラメータ（出力が生成される試料上の位置以外）の少なくとも1つの値において異なり得る。例えば、光学サブシステムにおいて、異なるモードは、照明のために異なる波長の光を使用し得る。モードは、本明細書でさらに説明されるように、照明波長において異なり得る（例えば、異なるモードに対して異なる光源、異なるスペクトルフィルタなどを使用することによって）。別の例では、異なるモードは、光学サブシステムの異なる照明チャネルを使用してもよい。例えば、上述のように、光学サブシステムは、複数の照明チャネルを含んでもよい。したがって、異なる照明チャネルを異なるモードに使用することができる。モードは、加えて、または代替として、光学サブシステムの1つ以上の収集／検出パラメータにおいて異なってもよい。モードは、撮像サブシステムの任意の1つ以上の変更可能なパラメータ（例えば、照明偏光、角度、波長など、検出偏光、角度、波長など。）において異なってもよい。撮像サブシステムは、例えば、同時に試料を走査するために複数のモードを使用する能力に応じて、同じ走査または異なる走査で異なるモードで試料を走査するように構成することができる。

20

30

【0041】

同様に、電子ビームサブシステムによって生成される出力は、電子ビームサブシステムのパラメータの2つ以上の異なる値を用いて電子ビームサブシステムによって生成される出力、例えば画像を含んでもよい。電子ビームサブシステムの複数のモードは、試料の出力および／または画像を生成するために使用される電子ビームサブシステムのパラメータの値によって定義することができる。したがって、モードは、電子ビームサブシステムの電子ビームパラメータのうちの少なくとも1つの値において異なり得る。例えば、異なるモードは、照明のために異なる入射角を使用してもよい。

40

【0042】

本明細書に記載され、図1および図1 aに示されるサブシステムは、それらが使用される用途に応じて異なる撮像能力を提供するために、1つ以上のパラメータにおいて修正されてもよい。一実施形態では、撮像サブシステムは、検査サブシステムとして構成される。別の実施形態では、撮像サブシステムは、計測サブシステムとして構成される。例えば、図1に示される撮像サブシステムは、検査ではなく計測のために使用される場合、より

50

高い分解能を有するように構成されてもよい。言い換えれば、図 1 および 1 a に示される撮像サブシステムの実施形態は、異なる用途に多少適している異なる撮像能力を有する撮像サブシステムを生成するために、当業者に明白であろういくつかの様式で調整することができる、撮像サブシステムのためのいくつかの一般的かつ種々の構成を説明する。

【0043】

撮像サブシステムが検査サブシステムとして構成されるいくつかの実施形態では、検査サブシステムはマクロ検査用に構成される。このように、本明細書に記載のシステムは、マクロ検査ツールと呼ぶことができる。マクロ検査ツールは、RDL およびポストダイス用途などの比較的ノイズの多い BEOL 層の検査に特に適している。マクロ検査ツールは、本明細書では、必ずしも回折限界ではなく、約 200 nm ~ 約 2.0 ミクロン以上の空間分解能を有するシステムとして定義される。そのような空間分解能は、そのようなシステムが検出できる最小の欠陥が約 200 nm より大きい寸法を有することを意味し、これは、今日市場にある最も高度な検査ツールが検出できる最小の欠陥、したがって「マクロ」検査者の指定よりもはるかに大きい。このようなシステムは、今日市場に出回っている最も高度な検査ツールと比較して、より長い波長の光（例えば、約 500 nm ~ 約 700 nm である）を利用する傾向がある。これらのシステムは、関心のある欠陥（DOI）が比較的大きいサイズを有する場合、および場合によっては毎時 100 ウェハ（wph）以上のスループットが必要とされる場合（ここでのウェハスループットとは、毎時検査される 300 mm ウェハの数を指す）にも使用され得る。

【0044】

上述のように、撮像サブシステムは、試料の物理的バージョンにわたってエネルギー（例えば、光、電子などである。）を走査し、それによって、試料の物理的バージョンのための出力を生成するように構成される。このように、撮像サブシステムは、「仮想」サブシステムではなく、「実際の」サブシステムとして構成されてもよい。しかしながら、図 1 に示す記憶媒体（図示せず）およびコンピュータシステム 102 は、「仮想」システムとして構成されてもよい。特に、記憶媒体およびコンピュータサブシステムは、Duffy らの 2015 年 8 月 29 日に発行された同一譲受人に譲渡された米国特許 8,126,255 号（2012 年 2 月 28 日、Bhaskar ら）及び 9,222,895 号に記載されるような「仮想」検査システムとして構成することができ、これらは両方とも、参照により本明細書に完全に規定されているかのように取り込まれる。本明細書に記載される実施形態は、これらの特許に記載されるようにさらに構成され得る。

【0045】

一実施形態では、試料はウェハである。ウェハは、半導体技術分野で知られている任意のウェハを含むことができる。いくつかの実施形態は、本明細書ではウェハに関して説明されるが、実施形態は、それらを使用することができる試料に限定されない。例えば、本明細書に記載の実施形態は、レチクル、フラットパネル、パーソナルコンピュータ（PC）ボード、および他の半導体試料などの試料に使用することができる。

【0046】

本明細書に記載の実施形態では、1 つ以上の 3D 構造が試料上に形成される。1 つのそのような実施形態では、1 つ以上の 3D 構造は、ウェハ上に形成された 1 つ以上のバンプである。いくつかの実施形態は、「バンプ」に関して本明細書で説明され得るが、本明細書で説明される実施形態は、その高さがユーザにとって興味深い、および／またはその高さが構造を欠陥にし得る、その上に形成された構造を有する任意の試料についての情報を決定するために有用であり得る。1 つ以上の 3D 構造はまた、各インスタンスが同じ設計（たとえそれらが試料上に形成されるときにいくらか異なる特性を有し得るとしても、）を有する、3D 構造の 1 つ以上のインスタンスを含んでもよい。例えば、3D 構造の各々はバンプを含むことができ、バンプはすべて同じ設計を有するが、異なる設計または異なるパターンを有する試料の異なる領域に形成される場合、場合によっては異なる情報を有する。このように、本明細書に記載の実施形態によって高さが予測される 3D 構造のすべては、3D 構造自体について同じ設計特性を有する同じタイプの構造であり得る。

【0047】

しかしながら、本明細書に記載の実施形態によって高さが予測される3D構造のすべてが同じタイプであるとは限らない。例えば、いくつかの試料は、設計通りに異なる特性、例えば、バンプおよびトレースを有する、その上に形成された複数のタイプの3D構造を有してもよく、本明細書で説明される実施形態は、ユーザにとって関心のある3D構造のいずれかまたは全ての高さを予測するために使用されてもよい。いくつかのそのような事例では、別々に訓練される異なるDLモデルが、異なるタイプの3D構造の高さ（したがって、DLモデルの各々は、3D構造タイプのうちの1つのための試料画像と予測構造高さとの間の正確な変換を学習する）を予測するために使用され得る。加えて、コンピュータシステムは、異なる3D構造タイプに対して異なる情報を別々に決定することができ、例えば、バンプ高さ予測のためにトレーニングされたDLモデルの出力のみに基づいてどのバンプに欠陥があるかを決定し、トレース高さ予測のためにトレーニングされたDLモデルの出力のみに基づいてどのトレースに欠陥があるかを別々に決定することができる。それにもかかわらず、異なるタイプの3D構造についての情報を決定するとき、それらの決定ステップの各々は、本明細書でさらに説明されるように実行され得、同じ試料画像が、構造タイプごとにDLモデルに入力され得る。

【0048】

図2は、バンプのいくつかの例、およびバンプが経時的にどのように変化すると予想されるかを示す。特に、図2は、仮想ウェハ200上に形成された異なるバンプを示し、矢印214は、業界バンプロードマップに沿った進行を示す。このように、図2は、時間（年）とともに変化するバンプのための業界技術を示すので、図2に示すバンプ技術の1つのタイプのみが単一のウェハ設計において使用される。概して、この図に示されるバンプから分かるように、バンプサイズおよびピッチは両方とも、経時的に小さくなる。業界バンプロードマップの最も早い地点に示されるバンプ202は、100 μm のサイズおよび150 μm ～200 μm のピッチを有する標準的なC4タイプのバンプである。次の時点で示されているバンプ204は、50 μm のサイズおよび100 μm のピッチを有するファインピッチC4タイプのバンプである。バンプ206は、20 μm ～30 μm のサイズおよび30 μm ～60 μm のピッチを有するマイクロC4タイプのバンプである。バンプ208は、サイズ15 μm ～20 μm 、ピッチ20 μm ～40 μm の銅（Cu）ピラー型バンプである。バンプ210は、10 μm のサイズおよび20 μm のピッチを有する平坦な銅タイプのバンプである。バンプ212は、サイズ5 μm 、ピッチ10 μm のバンプレスタイプのバンプである。本明細書に説明される実施形態は、高さを予測し、図2に示されるバンプのうちのいずれかについての情報を決定するために使用することができる。

【0049】

一実施形態では、3D構造は、ウェハ上に形成された3DNAND構造を含む。3DNAND（ここで、NANDは、半導体デバイスにおける論理ゲートの1つのタイプである非ANDを表す）は、メモリセルの複数の層の垂直スタックを含むタイプの不揮発性フラッシュメモリである。例えば、3DNANDの構造は、概して、ウェハ上に形成された交互の導電層および絶縁層から形成され、窒化シリコンのような材料から形成された電荷トラップおよびシリコン上に形成されたチャネルなどの1つまたは複数の高アスペクト比（HAR）構造によって分離されたシリコンビットセルゲートを含む。メモリセルの垂直積層は、3DNAND構造にその3D品質を与える。

【0050】

本明細書で説明される3D構造はまた、当技術分野で公知の任意の他のHAR構造を含んでもよい。本明細書で使用される場合、「HAR構造」という用語は、10：1を超えるアスペクト比を特徴とする任意の構造を指し、将来の世代のデバイスでは100：1の高さであり得る。HAR構造は、多くの場合、ハードマスク層（例えば、米国特許8,237,213号（Li u、2012年8月7日）を参照されたい）を含み、HARのエッチングプロセスを容易にする。垂直NANDまたはテラビットセルアレイトランジスタ（TCAT）構造に加えて、本明細書に記載される実施形態は、高さが興味深い他のHAR

構造に使用することができる。

【0051】

上記の3D構造に加えて、概して、本明細書に記載の実施形態は、そのアスペクト比または他の物理的特性にかかわらず、試料上の任意の構造の高さを予測するために使用することができる。例えば、本明細書で説明される実施形態は、トレース、パッド等の構造の高さを予測するために、たとえこれらの構造が本質的にあまり3Dではないとしても有用であり得る。一般に、必要とされるのは、試料画像を構造の高さに変換する方法を学習した適切に訓練されたDLモデルである。上述のように、システムは、1つ以上のコンピュータシステム（例えば、図1に示されるコンピュータサブシステム46および／またはコンピュータシステム102）と、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネント（例えば、構成要素100）とを含む。1つ以上のコンポーネントは、画像のうちの1つ以上に基いて1つ以上の3D構造の高さを予測するように構成されたDLモデル104を含む。本明細書に説明される実施形態のいくつかの特に有用な実装では、単一の検査焦点での検査実行中に、撮像サブシステムは、検査画像（BFおよびDF）を収集してもよく、1つ以上のコンピュータシステムは、本明細書でさらに説明されるように、検査画像から隆起を切り取ってもよく、事前訓練されたDLモデルは、これらの切り取られた隆起画像を使用して、隆起高さを予測してもよい。

10

【0052】

図4は、概して、本明細書で説明される画像が、バンプ高さを予測するためにDLモデルによって使用され得る理由を示す。特に、本明細書で説明されるような撮像サブシステムは、光が走査方向406に試料にわたって走査されるにつれて、光402を試料404に集束させるように構成される、本明細書でさらに説明されるレンズ等の光学要素400を含んでもよい。図4に示されるように、異なる高さを有する2つの異なるバンプ408および410が、試料上に形成され、光が試料にわたって走査されるにつれて、撮像サブシステムによって撮像されてもよい。したがって、そのような走査は、隆起408の画像414および隆起410の画像416を含む画像412を生成し得る。

20

【0053】

図4から分かるように、異なる高さを有するバンプは、互いに異なるバンプ像を生成する。特に、バンプトップデフォーカスは、バンプ高さによって変化する。例えば、バンプ408は、その高さが許容可能であることを意味する公称バンプであってもよく、バンプ410は、その高さが許容可能よりも小さいことを意味する短いバンプであってもよい。したがって、バンプ408は欠陥がないが、バンプ410は欠陥がない。これらの高さの差は、バンプトップの画像の焦点の合った外観の差をもたらす。特に、公称バンプトップ画像414は、より焦点が合っており、短いバンプトップ画像416は、より焦点が合っている。

30

【0054】

したがって、異なる高さを有する隆起について生成された画像およびそれらの隆起の既知の（またはシミュレートされた）高さを含む訓練セットを用いてDLモデルを訓練することによって、DLモデルは、入力画像を隆起高さにどのように変換するかを学習することができる。DLモデルの出力は、高さのグラウンドトゥース（正解値）測定ではないので、本明細書では「予測された」高さと呼ばれる。言い換えれば、バンプの高さは、既知の（またはシミュレートされた）異なる高さを有するバンプについて生成された訓練バンプ画像間の学習された関係を介して予測される。

40

【0055】

一般に、「深層学習」（DL）（深層構造学習、階層学習、又は深層機械学習としても知られている）は、データの高レベル抽象化をモデル化しようとするアルゴリズムのセットに基づく機械学習（ML）の分岐である。単純なケースでは、ニューロンの2つのセットがあり得る。入力信号を受信するもの、および出力信号を送信するものである。入力層が入力を受け取ると、入力の修正バージョンを次の層に渡す。DLベースのモデルでは、通常、入力と出力との間に多くの層が存在し（また、層はニューロンで作られていないが

50

、そのように考えるのを助けることができる）、アルゴリズムが複数の線形および非線形変換から構成される複数の処理層を使用することを可能にする。

【0056】

DLは、データの学習表現に基づくML法のより広範なファミリーの一部である。観察（例えば、画像）は、ピクセル当たりの強度値のベクトルなどの多くの方法で、又はエッジ、特定の形状の領域などのセットとしてより抽象的な方法で表すことができる。いくつかの表現は、学習タスクの単純化において他の表現よりも優れている。DLの有望性の1つは、手書き特徴を教師なしまたは半教師あり特徴学習および階層的特徴抽出のための効率的なアルゴリズムで置き換えることである。特に、本明細書でさらに説明されるように、DLモデルは、データの適切なトレーニングセットに基づいて学習され得る（そのパラメータが学習され得るという点で）。

10

【0057】

一実施形態では、DLモデルは、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）として構成される。CNNは、通常、局所特徴を抽出するために、畳み込み層およびプーリング層のスタックを含む。畳み込み層は、当技術分野で知られている任意の適切な構成を有することができる。一般に、1つ以上のフィルタを使用して畳み込み関数を入力画像に適用することによって、画像にわたる位置の関数として画像の特徴（すなわち、特徴マップ）を決定するように構成される。1つ以上のプーリング層はまた、当技術分野で知られている任意の適切な構成（たとえば、最大プーリング層）を有し得、概して、最も重要な特徴を保持しながら、1つ以上の畳み込み層によって生成される特徴マップの次元を低減するように構成される。DLモデルは、当技術分野で知られている任意の適切なCNN構成またはアーキテクチャを有し得る。

20

【0058】

別の実施形態では、DLモデルは、畳み込み層と完全結合層との組み合わせを含む。畳み込み層は、上述のように構成することができる。「完全接続層」は、概して、ノードの各々が前の層中のノードの各々に接続される層として定義され得る。完全結合層は、畳み込み層によって抽出された特徴に基づいて分類を実行する。例えば、畳み込み層は、特徴マップを生成し、それによって、本明細書でさらに説明される画像および入力のうちの一つのいずれかを含み得る、画像のための特徴を決定するように構成されてもよい。完全連結層は、特徴選択および高さ予測のために構成される。言い換えれば、完全に接続された層は、特徴マップから特徴を選択し、次いで、1つ以上の3D構造の高さを予測する。選択された特徴は、特徴マップ内の特徴の全て（適切な場合）、または特徴マップ内の特徴の一つのみを含んでもよい。そのようなDLネットワーク（畳み込み層および完全結合層を含むこと）は、高さ予測を出力し、高さ予測は、各高さ予測に関連する信頼性を有する3D構造ごとの高さ予測を含み得る。

30

【0059】

さらなる実施形態では、DLモデルは、AlexNetとして構成される。概して、AlexNetは、いくつかの畳み込み層（例えば、5）と、それに続く、組み合わせて、画像を分類するように構成され、訓練される、いくつかの完全連結層（例えば、3）とを含む。AlexNetとして構成されたニューラルネットワークの例は、Krizhevsky et al., NIPS 2012による「ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks」に記載されており、参照により本明細書に完全に規定されているかのように取り込まれる。本明細書で説明されるDLモデルは、本参考文献で説明されるようにさらに構成され得る。

40

【0060】

DLモデルとして使用され得るAlexNetの1つの簡略化されたバージョンでは、AlexNetへの入力は、撮像サブシステムによって生成される画像内に位置し、隔離される隆起候補のうちの一つのいずれかについて、約32ピクセル×32ピクセルのサイズを有するパッチ画像等の本明細書で説明される画像のうちの一つのいずれかを含み得る、入力画像を

50

含み得る。画像は、プーリング層、畳み込み層、及びプーリング層が続く畳み込み層に入力される。これらの層は、本明細書でさらに説明されるように構成され得る。最終プーリング層の出力は、例えば、2つの異なるセットの完全接続層を含み得る完全接続層に入力される。完全接続層は、本明細書でさらに説明されるように構成されてもよい。最後の完全接続レイヤは、本明細書で説明される出力のいずれかを含み得る出力を生成し得る。たとえば、本明細書でさらに説明するように、出力は、その画像がDLモデルに入力されるパンプの各々についての高さ計測を含み得る。

【0061】

別の実施形態では、DLモデルはGoogLeNetとして構成される。GoogLeNetは、画像を分類するように構成および訓練された、本明細書でさらに説明されるもの等の畳み込み、プーリング、および完全接続層を含んでもよい。GoogLeNetアーキテクチャは、（特に、本明細書で説明されるいくつかの他のネットワークと比較して）比較的多数の層を含み得るが、層のうちのいくつかは、並列に動作している場合があり、互いに並列に機能する層のグループは、概して、開始モジュールと呼ばれる。他の層は連続して動作してもよい。したがって、GoogLeNetは、層のすべてが順次構造に配置されるわけではないという点で、本明細書で説明される他のネットワークとは異なる。GoogLeNetとして構成されたニューラルネットワークの例は、Szegedyらによる「Going Deeper with Convolutions」、CVPR 2015に記載されており、参照により本明細書に完全に規定されているかのように取り込まれる。本明細書で説明されるDLモデルは、本参考文献で説明されるようにさらに構成され得る。

【0062】

さらなる実施形態では、DLモデルは、VGGネットワークとして構成される。VGGネットワークは、アーキテクチャの他のパラメータを固定しながら畳み込み層の数を増加させることによって作成された。深さを増加させるために畳み込み層を追加することは、層のすべてにおいて実質的に小さい畳み込みフィルタを使用することによって可能にされる。本明細書に記載される他のネットワークと同様に、VGGネットワークが作成され、画像を分類するように訓練された。VGGネットワークはまた、畳み込み層と、それに続く完全接続層とを含む。VGGとして構成されたニューラルネットワークの例は、参照により本明細書に完全に規定されているかのように取り込まれるSimonyanらによる「Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition」、ICLR 2015に記載されている。本明細書で説明されるDLモデルは、本参考文献で説明されるようにさらに構成され得る。

【0063】

いくつかの実施形態では、DLモデルは深い残差ネットワークとして構成される。本明細書で説明されるいくつかの他のネットワークと同様に、深層残差ネットワークは、畳み込み層と、それに続く完全連結層とを含んでもよく、それらは、組み合わせで、画像分類のために構成および訓練される。深層残差ネットワークでは、レイヤは、非参照関数を学習する代わりに、レイヤ入力を参照して残差関数を学習するように構成される。特に、いくつかの積層された各層が所望の基礎マッピングに直接適合するようにする代わりに、これらの層は、ショートカット接続を伴うフィードフォワードニューラルネットワークによって実現される残差マッピングに適合するように明示的に許可される。ショートカット接続は、1つ以上の層をスキップする接続である。深い残差ネットは、畳み込み層を含むプレーンニューラルネットワーク構造を取り、それによってプレーンニューラルネットワークを取り、それをその残差学習対応物に変えるショートカット接続を挿入することによって作成され得る。深い残差ネットの例は、Heらによる「Deep Residual Learning for Image Recognition」、NIPS 2015に記載されており、これは、参照により本明細書に完全に規定されているかのように取り込まれる。本明細書で説明されるDLモデルは、本参考文献で説明されるようにさらに構成

され得る。

【0064】

本明細書で説明されるDLモデルは、1つ以上のコンピュータシステムおよび／またはコンピュータシステムによって実行されるコンポーネントの1つによって訓練されてもよく、または訓練されなくてもよい。例えば、別の方法またはシステムは、DLモデルを訓練してもよく、次いで、それは、コンピュータシステムによって実行されるコンポーネントとして使用するために記憶されてもよい。DLモデルはまた、ランタイムの前のいつでもトレーニングまたは構築され得る。1つのそのような例では、DLモデルは、検査レシピトレーニングまたはセットアップ中に構築され得る。本明細書で説明されるDLモデルはまた、訓練されたモデルのセットアップおよび／または展開後の任意の時点で更新、再訓練、または修正されてもよい。

10

【0065】

別の実施形態では、コンピュータシステムは、試料または撮像サブシステムを用いて生成された異なる試料上の3D構造の訓練画像と、訓練画像内の3D構造の対応する高さ情報とを含む訓練セットを生成するように構成される。トレーニングセットは、本明細書でさらに説明する様々な方法で生成され得る。次いで、コンピュータシステムは、DLモデルを訓練するために訓練セットを使用してもよく、または訓練セットは、DLモデルを訓練するために別の方法またはシステムによって使用されてもよい。

【0066】

本明細書に記載される実施形態のいずれかにおいて、訓練セットを生成することは、訓練セットがDLモデルを訓練するために使用され得るように、訓練画像および対応する高さ情報を任意の好適な様式で任意の好適なフォーマットで記憶することを含んでもよい。コンピュータシステムは、トレーニングセットについての情報を、本明細書に記載のコンピュータ可読記憶媒体のいずれかに記憶することができる。訓練セットは、訓練および検証のためにサブセットに分割されること、経時的に、またはプロセスが変化するとき等に更新、修正、または置換されることを含む、当技術分野で公知の任意の好適な様式で、コンピュータシステムによって使用されてもよい。次いで、DLモデルは、対応する高さ情報を有する試料パッチ画像を含む訓練セットに基づいて訓練され得る。試料画像は訓練入力であり、対応する高さ情報は訓練出力である。トレーニングは、トレーニング入力をDLモデルに入力することと、DLモデルによって生成される出力がトレーニング出力と一致する（または実質的に一致する）までDLモデルの1つまたは複数のパラメータを変更することを含み得る。トレーニングは、DLモデルの任意の1つまたは複数のトレーニング可能なパラメータを変更することを含み得る。たとえば、トレーニングされるDLモデルの1つ以上のパラメータは、トレーニング可能な重みを有するDLモデルの任意のレイヤについての1つ以上の重みを含み得る。1つのそのような例では、重みは、畳み込み層のための重みを含み得るが、プーリング層のための重みは含まない。

20

30

【0067】

一実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、試料または2つ以上の焦点オフセットを有する異なる試料の撮像サブシステムによって生成された画像を用いてDLモデルを訓練するように構成される。画像が、異なる試料のものである場合、異なる試料は、好ましくは、試料と同じタイプである（すなわち、同じ材料から同じ設計および製造プロセスで形成される）。このようにして、トレーニングのために、実施形態は、様々な焦点オフセットでウェハ画像を収集することができる。1つのそのような例では、撮像サブシステムは、ウェハ表面の周囲の $-30\text{ }\mu\text{m}\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ のz焦点スライスで画像を生成してもよく、それらの画像は、本明細書で説明されるようにDLモデルを訓練するために使用されてもよい。別のそのような例では、撮像サブシステムは、ウェハ表面より $0\text{ }\mu\text{m}\sim 80\text{ }\mu\text{m}$ 上のz焦点スライスで画像を生成してもよく、それらの画像は、本明細書に記載されるようにDLモデルを訓練するために使用されてもよい。一般に、トレーニングのために生成および使用されるトレーニングデータ（例えば、より多くの焦点スライスおよびより多くの隆起）が多いほど、トレーニングされたDLモデルによって予測される高さの精

40

50

度はより良好である。

【0068】

各生成された画像において、コンピュータシステムは、2Dバンブ画像パッチの位置を特定し、切り出すことができ、これは、本明細書に記載される任意の好適な方法で実行され得る。例えば、異なるz焦点オフセットにおける比較的大きいフレーム画像を仮定すると、コンピュータシステムは、1バンブ当たり1パッチで、フレームからパッチを切り取ってもよい。次いで、コンピュータシステムは、バンブ高さグラウンドトゥールズ（正解）データとして焦点オフセットを有するこれらの画像パッチを用いてDLモデルをトレーニングすることができる。そのトレーニングは、本明細書でさらに説明されるように実行され得る。しかしながら、コンピュータシステムは、バンブ高さグラウンドトゥールズ（正解）データとして他のソースからの画像パッチを用いてDLモデルをトレーニングしてもよい。例えば、異なる高さの隆起をシミュレートするために様々な焦点オフセットで動作する撮像サブシステムから完全な画像をつかむことは、様々な既知の隆起高さを有する試料が訓練に利用できない場合に有用であり得る。コンピュータシステムは、様々な焦点オフセットで捕捉された画像を撮影し、それらを切り取ってバンブトップ以外の全てをマスクし、あたかもそれらが様々な高さのバンブであるかのようにDLモデルを訓練することができる。

10

【0069】

しかしながら、別の実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、3D構造の特性の複数の既知の値とともに、その上に形成される3D構造を有する異なる試料の撮像サブシステムによって生成される画像を用いてDLモデルを訓練するように構成される。言い換えれば、異なるプログラムされた高さでその上に形成されたバンブを有するウェハが利用可能である場合、ウェハは、単一の焦点値で撮像サブシステムによって撮像され得る。ウェハ画像内のバンブは、本明細書に説明されるように、位置特定され、分離されてもよい。ウェハの設計に関する情報に基づいて、異なるバンブの既知のプログラムされた高さをそれらのバンブ画像に割り当てることができる。このようにして、位置特定され、分離されたバンブ画像はトレーニング入力であり得、既知のバンブ高さはトレーニング出力であり得る。したがって、既知の所定のバンブ高さおよびバンブ画像は、DLトレーニングのためのグラウンドトゥールズ（正解）としての役割を果たし得る。この訓練はまた、本明細書でさらに説明されるように実行されてもよい。

20

【0070】

グラウンドトゥールズ（正解）トレーニングデータはまた、グラウンドトゥールズ（正解）バンブ高さ測定の任意の他のソースに由来し得る。例えば、グラウンドトゥールズ（正解）バンブ高さ測定ツールが使用のために利用可能である場合、そのグラウンドトゥールズ（正解）バンブ高さ測定ツールは、ウェハ上のバンブが比較的多様なバンブ高さを有する限り、ウェハ上のバンブ高さを測定するために使用され得る。ウェハは、次いで、他のウェハ上のバンブ高さ予測のための画像を生成するために使用される撮像サブシステムによって撮像されてもよい。バンブ画像の位置特定および分離は、次いで、本明細書でさらに説明されるように、それらの画像に対して行われてもよい。試料上のどこでバンブ画像が生成されたかに基づいて、その対応するグラウンドトゥールズ（正解）バンブ高さをグラウンドトゥールズ（正解）測定データから決定することができ、ウェハ上のどこで測定されたかを決定することができる。このようにして、撮像サブシステムバンブ画像および対応するグラウンドトゥールズ（正解）、バンブ高さ測定データは、トレーニングデータのペアに相関され、DLモデルトレーニングのために本明細書に記載されるように使用され得る。

30

40

【0071】

一実施形態では、高さを予測するために使用される画像のうちの1つ以上は、試料の単一パスにおいて撮像サブシステムによって収集される。別の実施形態では、高さを予測するために使用される画像のうちの1つ以上は、単一焦点値で撮像サブシステムによって収集される。例えば、欠陥バンブの発見および／またはバンブ高さ計測の決定などの試料の

50

情報を決定するために使用される画像は、単一のウェハ画像収集パスで生成された画像を含むことができる。加えて、既存の欠陥検査パスを、本明細書で説明される実施形態の画像のソースとして使用することが可能であり得る。言い換えれば、本明細書で説明される実施形態は、DLモデルの適切なトレーニングによって、現在の検査レシピを使用して、DLモデルに入力される画像を生成することが可能であり得る。

【0072】

したがって、本明細書で説明される実施形態の1つの利点は、実質的に正確なバンプ高さ予測のために複数の焦点オフセット（したがって、場合によっては、複数のパス）で生成される画像を必要とするもの等の既存の方法よりもはるかに速いことである。本明細書に記載の実施形態の別の利点は、KLAから市販されているAltair検査ツールなどのツールの既存の撮像および機械的ハードウェアを使用することができることである。例えば、単一の検査焦点での検査実行中に、撮像サブシステムは、検査画像（BFおよびDF）を収集することができ、1つまたは複数のコンピュータシステムは、本明細書でさらに説明するようにバンプを切り出すことができ、予め訓練されたDLモデルは、これらの切り出されたバンプ画像を使用してバンプ高さを予測することができる。本明細書に説明される実施形態は、ツールの既存の欠陥検査アルゴリズムのために使用されるものと同じ対物レンズおよび焦点オフセット画像を使用して、全てのバンプ高さを得ることができるため、本明細書に説明される実施形態は、ユーザウェハ検査ツール時間を節約することができる。ツールは、欠陥検査のために通常のウェハ画像を取り込み、次いで、バンプ高さ測定のために同じ画像を用いることができる。この能力は、しばしば固有の光学系のセットを有する別個の画像捕捉を必要とし得る従来方法と比較してかなりの時間を節約することができる。

【0073】

一実施形態では、画像は、試料のBF画像または試料のDF画像を含む。別の実施形態では、画像は、試料のBF画像および試料のDF画像を含む。このように、トレーニングおよびランタイムのために捕捉される画像は、BFおよびDF撮像モードの両方、またはそれらのモードの一方のみを使用して捕捉される画像を含んでもよい。概して、本明細書に説明される実施形態のために、BFおよびDF画像（または他のマルチモード画像）の両方を使用することが好ましい場合がある。しかし、BF画像のみまたはDF画像のみ（または他のシングルモード画像）も、場合によっては、BF画像とDF画像の両方（または他のマルチモード画像）を使用するときほど性能が良くない（たとえば、精度がいくらか低いことがある）状態で使用することができる。同様に、より小さいまたはより大きい光学倍率もまた、より低いまたはより高い精度および速度で、本明細書に説明される実施形態によって使用されることができる。マルチモードおよびシングルモード画像は、本明細書でさらに説明されるように、撮像サブシステムによって生成されてもよい。

【0074】

一実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、1つ以上の3D構造に対応する画像の部分位置を特定し、分離するように構成され、DLモデルに入力される画像は、1つ以上の3D構造に対応する画像の分離された部分のみを含む。例えば、撮像サブシステムによって生成された試料の各画像において、コンピュータシステムは、2Dバンプ画像パッチの位置を特定し、切り出すことができる。1つのそのような例では、ランタイム中に単一の焦点オフセットで、またはトレーニング中に異なるz焦点オフセットで比較的大きいフレーム画像を仮定すると、コンピュータシステムは、1バンプ当たり1パッチでフレームからパッチをトリミングすることができる。

【0075】

この位置特定および分離ステップは任意選択であり得るが、隆起高さ予測の精度を高めることができる。例えば、本明細書で説明される試料に対して本明細書で説明される撮像サブシステムによって生成される画像は、概して、撮像サブシステム構成、速度対倍率等の最適な動作パラメータ等の事柄に関連するいくつかの理由で、複数の構造と、他のパターン化構造を含んでも含まなくてもよい、構造を圍繞する面積とを含むであろう。言い換

えれば、本明細書で説明される撮像サブシステムは、概して、本明細書で説明されるもの等の試料上の単一構造のみのための画像を生成するように構成されない。代わりに、それらは、有利には、比較的短い時間量で試料上の比較的広い面積の画像を生成するように設計される。本明細書で説明されるDLモデルが、試料上の他の構造の画像、画像データ、信号、またはバンプの周囲の領域からの雑音等を含むバンプ画像を使用して、バンプのバンプ高さを予測するように訓練されることができ、予測の精度は、概して、入力画像がバンプの画像のみを含む場合、より高いであろう。したがって、位置特定および分離ステップは任意選択であり、いくつかの点で自明であると考えられるが、本明細書に記載の実施形態に利点を提供することができる。加えて、本明細書でさらに説明されるように、位置特定および分離ステップは、異なる方法で行われてもよく、例えば、本明細書で説明される撮像サブシステムによって生成される画像の複雑性に起因して、必ずしも自明ではない場合がある。

10

【0076】

別の実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、それぞれ1つ以上の3D構造に対応する画像の1つ以上の部分を見つけて分離し、分離された1つ以上の部分に基づいて、それぞれ個々の1つ以上の3D構造のための個々の1つ以上のトリミングされたパッチ画像を生成するように構成される。例えば、上述のように、DLモデルに入力される各画像が試料上の単一の隆起のみの画像を含むように、撮像サブシステムによって生成される試料画像を修正することが有利であり得る。このように、入力画像はバンプ毎に生成されてもよい。試料画像が、複数のモードで生成された画像（例えば、DF画像およびBF画像の両方）を含む場合、入力画像は、バンプ毎およびモード毎に生成されてもよい。このように、高さが予測される試料上のバンプごとに、試料画像を生成するために使用されるモードごとに入力画像が生成されてもよく、そのバンプについて生成される各入力画像は、切り取られたバンプ画像のみを含んでもよい。位置特定および分離ステップは、本明細書に記載されるように実施され得る。個々の1つ以上の切り取られたパッチ画像の生成は、例えば、マスクを使用して、本明細書でさらに説明されるように行われてもよい。

20

【0077】

さらなる実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、テンプレートマッチングによって、1つ以上の3D構造に対応する画像の部分位置を特定し、分離するように構成される。図5は、テンプレートを使用して画像内の隆起を特定および分離することを含む、本明細書で説明される実施形態によって実施され得るステップの1つのフローチャートを示す。特に、撮像サブシステム（図5には図示せず）は、試料（図5には図示せず）のDF画像500とBF画像502の両方を生成するように構成することができる。図5に示される画像は、試料上の同じ領域に対応し、したがって、両方とも画像内に同じパターンでバンプ504を含む。図5に示される「画像」は、本明細書で説明される撮像サブシステムによって生成され得る任意の実際の画像を示すことを意味しない。具体的には、BF画像およびDF画像は、概して、図5に示されるものと基本的に同じに見えるのではなく、互いに非常に異なるように見える。さらに、バンプのすべてが、図5に示される画像と同じ寸法を有する完全な円として現れるわけではない。代わりに、これらの「画像」は、本明細書で説明される実施形態が入力画像を予測バンプ高さにどのように変換し得るかを示すために、図5にのみ含まれる。本明細書に記載される他の実施形態におけるように、DLモデルがバンプ高さのランタイム予測のために使用されているとき、画像500および502は、有利には、複数の焦点設定において生成される画像ではなく、バンプ高さ検査および計測のための公称焦点画像のみを含む必要がある。

30

40

【0078】

個々の隆起は、テンプレート506を使用して両方の画像において見つけることができる。特に、テンプレート506は、テンプレートにマッチする画像部分を見つけようと試みるために画像と比較され得る。したがって、テンプレートが、予期されるバンプ画像に基づいて決定される特性を有するとき、テンプレートは、より大きい画像500および502内のバンプ画像の場所を識別するために使用されることができる。画像の部分がバン

50

ブ画像を含むと識別されると、マスク508を画像のその部分に適用して、その画像部分におけるバンプに関係しない画像データまたは信号をできるだけ多く排除し、それによってバンプに関係する画像データまたは信号のみを残すことができる。したがって、テンプレートおよびマスクを適用することによって、画像500および502において見出されるいずれか1つのバンプ画像部分について、分離バンプパッチ画像510および512がそれぞれ生成され得る。したがって、各分離バンプパッチ画像は、単一バンプおよび単一モードのためのものである。

【0079】

次いで、これらの画像は、1つ以上のコンピュータシステムによって、当技術分野で知られている任意の適切な方法でDLモデル514に入力することができる。DLモデル514は、バンプごとに線形出力を生成する多層CNNなど、本明細書で説明するAI DLモデルのいずれかを含み得る。言い換えれば、DLモデルは、回帰出力またはバンプごとの数を生成し得る。DLモデルの出力518は、バンプ高さのリストなどの3D構造ごとの予測高さを含むことができる。次いで、1つ以上のコンピュータシステムは、予測された3D構造ごとの高さを使用して、本明細書で説明する任意の方法で決定された本明細書で説明する試料情報のいずれかを含むことができる試料情報出力520を生成することができる。

【0080】

1つ以上のコンピュータシステムによってDLモデルに入力される画像に加えて、DLモデルは、試料の走査中に撮像サブシステムによって、および／または撮像サブシステムの出力に基づいてコンピュータシステムによって生成され得る、追加の走査出力516などの入力のための1つ以上の追加のチャンネルを有し得る。そのような付加的な走査出力は、ツールテレメトリ自動焦点データ、ステージ位置、温度等を含み得るが、それらに限定されない。コンピュータシステムは、そのようなデータを任意の適切な方法でDLモデルに入力することができる。DLモデルは、本明細書で説明する他のトレーニングが実行されるのと同じ方法でバンプ高さ予測のためにこの追加の情報チャンネルを使用するようにトレーニングされ得る。

【0081】

追加の実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、試料の設計情報に基づいて、1つ以上の3D構造に対応する画像の部分位置を位置特定し、分離するように構成される。例えば、試料の設計情報が、本明細書で説明される実施形態によって使用するために利用可能である場合、あるタイプの画像対設計位置合わせ方法またはシステムを使用して、試料の生成された画像内の3D構造の場所を識別することは、比較的簡単であることができる。一般に、ほとんどの画像対設計位置合わせは、試料上の固有構造の試料画像をその対応する設計情報に位置合わせし、次いで、その位置合わせステップの結果を使用して、例えば座標変換を介して、追加の試料画像を設計情報に位置合わせすることを含む。実施例 image-to-designのアライメント方法で求めることができる米国特許7,676,077号(Kulkarniら、2010年3月9日)、8,041,103号(2011年10月18日発行)、9,830,421号(bhattacharyyaら、2017年11月28日発行)、10,127,653号(Duffyら、2018年11月10日発行)、10,733,744号(Haら、2020年8月4日発行)、米国特許出願公開2021/0097704号(Brauerら、2021年4月1日)、米国特許出願17/308,878号、及び17/334,179号はすべて、本明細書に完全に規定されているかのように、参照により組み込まれる。本明細書に記載される実施形態は、これらの参考文献に記載されるようにさらに構成され得る。

【0082】

別の実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネント内に含まれる位置特定のために構成されたYOLOネットワークに画像を入力することによって、1つ以上の3D構造に対応する画像の部分位置を位置特定し、分離するように構成される。この実施形態では、本明細書に

記載のDLモデルに加えてYOLO DLネットワークを使用することができる。YOLOネットワークは、最初に隆起を発見するように訓練されてもよく、上記で説明されるテンプレートマッチングアプローチよりはるかに確実に機能してもよい。

【0083】

概して、YOLOネットワークは、より大きい画像をより小さい領域に分割し、各領域に対する境界ボックスおよび（クラス）確率を予測する、単一のCNNを含み得る。境界ボックスは、予測される可能性によって重み付けされ得る。YOLOネットワークは、本明細書で説明されるように訓練されてもよく（例えば、トレーニング画像はYOLOネットワークに入力され、境界ボックスおよびそれらの関連クラスはトレーニング出力として入力される）、YOLOネットワークは、当技術分野で公知の任意の好適な構成を有してもよい。そのような実施形態では、次いで、バンプは、YOLOネットワークを使用して発見されてもよく、1つ以上のコンピュータシステムは、バンプ頂部を切り取り、バンプ頂部高さを予測するために、AlexNet等の本明細書に説明されるDLモデルのうちの1つを使用してもよい。

【0084】

YOLOネットワークは、計測することができるほとんどの「関心のある物体」を見つけるように訓練することができるので、本明細書に記載の実施形態にとって特に興味深い。この能力は、バンプ対ディープビアのような実質的に異なる物理的特性を有する3D構造、劇的に異なる形状を有する構造、たとえそれらが類似の形状を有していてもそれらの画像に実質的な差を生じ得る異なる材料から形成され得る構造などの高さを計測するために使用され得るため、本明細書に記載される実施形態にとって特に有用であり得る。YOLOネットワークは、画像内の複数の境界ボックスを同時に予測することができることを含むさらなる利点を有し、これは、撮像サブシステムによって生成される画像が、典型的には、複数の隆起のための画像を含むため有用であり、他のオブジェクト検出方法と比較して極めて高速であり、訓練中に画像全体を見るため、オブジェクト画像に関するコンテキスト情報を符号化することができる。YOLOネットワークに関するさらなる詳細は、「YOLO9000」に見出すことができる：Redmonらによる「Faster, Stronger」、arXiv:1613.08242、2016年8月25日、9ページ、参照により本明細書に完全に規定されているかのように取り込まれる。本明細書に記載される実施形態は、この参考文献に記載されるようにさらに構成され得る。

【0085】

YOLOネットワークは、上述の物体検出に特に有利であり得るが、本明細書で説明される実施形態は、画像内の隆起を見つけるために物体検出に適した当技術分野で知られている任意の他のDLモデルを使用するように構成され得る。例えば、YOLOネットワークは、オブジェクト発見DLネットワークの1つの可能な実施形態にすぎず、YOLOネットワークに機能的に類似する領域ベースの畳み込みニューラルネットワーク（RCNN）等の任意の他の好適なDLネットワークが、オブジェクト検出のために使用されてもよい。このようにして、別の実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネント内に含まれる位置特定のために構成された追加のDLモデルに画像を入力することによって、1つ以上の3D構造に対応する画像の部分を位置特定し、分離するように構成される。追加のDLモデルは、高さ情報を予測するDLモデルから完全に分離することができる。2つのDLモデルはまた、異なるタイプのDLモデルなどの異なる構成を有してもよく、および／または同じタイプのDLモデルであり得るが、異なるように訓練されてもよく、すなわち、オブジェクト検出のために訓練されたものおよび高さ予測のために訓練されたものである。そのようなトレーニングの各々は、本明細書に記載されるように実行され得る。

【0086】

YOLOネットワークまたは機能的に類似のネットワークはまた、オブジェクト検出だけでなく高さ予測のためにも、本明細書で説明される実施形態において使用され得る。例えば、一実施形態では、DLモデルは、YOLOネットワークとして構成され、YOLO

ネットワークは、1つ以上の3D構造に対応する画像の部分位置を位置特定し、分離するように構成される。このようにして、YOLOネットワークは、オブジェクト検出とオブジェクト高さ予測の両方のために使用され得る。隆起を見つけることと隆起または他の3D物体の高さを予測することの両方のために訓練されたYOLOネットワークまたは別の単一のDLモデルを有することは、単一のネットワーク内の機能を組み合わせることは、多くの場合、異なる機能のための別個のネットワークを有するよりもコンピュータ効率的であるため、本明細書に説明される実施形態に利点を提供することができる。しかしながら、YOLOネットワークは、高さ予測のために構成されてもよく、異なるDLモデルは、オブジェクト検出のために使用されるように構成されてもよい。物体検出および高さ予測の両方のために構成されたYOLOネットワークは、本明細書でさらに説明されるようにトレーニングされ得る。

10

【0087】

1つ以上のコンピュータシステムはまた、1つ以上の3D構造の予測された高さに基づいて試料についての情報を決定するように構成される。概して、予測された高さに基づいてコンピュータシステムによって決定される情報は、本明細書に記載されるような任意の検査および／または計測のような情報であり得る。さらに、1つ以上の3D構造の予測された高さに基づいて試料について決定される情報は、本明細書に記載の複数のタイプの情報の組み合わせ（例えば、どの3D構造に欠陥があるかの識別と、平均高さまたは隆起高さのマップのような高さ計測の両方である）とすることができる。

【0088】

一実施形態では、情報を決定することは、1つ以上の3D構造のいずれかが欠陥があるかどうかを決定することを含む。このようにして、コンピュータシステムは、短いバンプを含む欠陥バンプを発見することができる。検査のためのそのような一実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、閾値を上回るバンプ高さ誤差にフラグを立ててもよい。1つの例示的な例では、図3は、試料300上に形成されたピラータイプバンプ例302, 304, および306を示す。撮像サブシステムによって試料に対して生成された画像は、（場合によっては本明細書で説明する前処理を用いて）DLモデルに入力することができ、DLモデルは、バンプの各々について予測された高さを出力する。これらの予測された高さは、設計または所望のバンプ高さであり得る公称バンプ高さ308と比較され得る。予測された高さのいずれかが、その公称バンプ高さを下回る場合、1つ以上のコンピュータシステムは、そのような予測された高さを有するバンプを欠陥または欠陥候補として指定してもよい。例えば、図3に示されるように、バンプ302および304は公称バンプ高さ308を有するが、バンプ306は欠陥のある短いバンプ高さ310を有し、したがって、コンピュータシステムによって欠陥のある短いバンプとして指定され得る。任意の欠陥検出アルゴリズムまたは方法と同様に、コンピュータシステムは、各バンプの予測された高さを、バンプにとって許容できない公称または設計バンプ高さより下（および場合によっては上）のバンプ高さの範囲に対応し得る閾値（または複数の閾値）と比較することができる。バンプが許容可能よりも低い又は高い予測高さを有する場合、そのような比較を介してコンピュータシステムによって検出することができる。バンプのどれに欠陥があるか（例えば、公称バンプ高さと予測バンプ高さとの間の差を、バンプ高さの許容可能な変動に対応する閾値と比較すること、試料上の他のバンプと比較して外側の予測高さを有するバンプを見つけることなどである。）を決定するために、他のアルゴリズムおよび方法を使用することもできる。

20

30

40

【0089】

別の実施形態では、情報は、1つ以上の3D構造の平均高さ計測を含む。このようにして、コンピュータシステムは、ウェハのエリアにわたる平均バンプ高さなどの実質的に正確なバンプ高さ計測を生成することができる。計測のためのそのような一実施形態では、1つ以上のコンピュータシステムは、正確な測定のためにエリア内のいくつかのバンプ高さを平均化することができる。図3に示される1つのそのような例では、コンピュータシステムは、バンプ302, 304, および306の予測された高さを使用して、水平破線

50

3 1 2 によって示される面積平均高さを決定し得る。

【0090】

そのような平均高さ計測を決定するために使用される予測バンプ高さの数は、明らかに、図3に示されるものと異なってもよく、3つより多くのバンプを含んでもよい。平均高さ計測は、試料上のバンプのすべてよりも少なく、試料上の局所領域内のバンプのみから決定される局所高さ計測、または試料上のバンプのすべて（または少なくとも大部分）、または試料上のバンプのすべてよりも少ないが試料上の領域全体にわたって広がる全体高さ計測とすることができる。複数のそのような計測はまた、ダイまたは試料について決定され得る。

【0091】

1つ以上のコンピュータシステムは、欠陥があると判定された3D構造のいずれかについての情報、高さ計測情報のいずれか、試料全体にわたるバンプ高さのマップ、個々の3D構造の予測高さなど、本明細書に記載の情報のいずれかを含むことができる試料の結果を生成するように構成することができる。欠陥のある3D構造の結果は、欠陥のある3D構造の位置、検出スコア、クラスラベルまたはIDなどの欠陥のある3D構造の分類に関する情報、または当技術分野で知られている任意のそのような適切な情報を含み得るが、これらに限定されない。試料の結果は、コンピュータシステムによって任意の適切な方法で生成することができる。

【0092】

本明細書で説明する実施形態のすべては、実施形態の1つ以上のステップの結果をコンピュータ可読記憶媒体に記憶するように構成され得る。結果は、本明細書で説明される結果のいずれかを含んでもよく、当技術分野で公知の任意の様式で記憶されてもよい。試料の結果は、標準ファイルタイプなどの任意の適切な形式またはフォーマットを有し得る。記憶媒体は、本明細書で説明する任意の記憶媒体または当技術分野で知られている任意の他の好適な記憶媒体を含み得る。結果が記憶された後、結果は、記憶媒体にアクセスされ、本明細書で説明される方法またはシステムの実施形態のいずれかによって使用され、ユーザへの表示のためにフォーマットされ、別のソフトウェアモジュール、方法、またはシステム等によって使用され、試料または同じ種類の別の試料のための1つ以上の機能を果たすことができる。

【0093】

そのような機能には、それだけに限らないが、フィードバックまたはフィードフォワード方式で試料に対して実行された、または実行されることになる製造プロセスまたはステップなどのプロセスを変更することなどが含まれる。例えば、コンピュータシステムは、欠陥3D構造に基づいて試料に対して実行されたプロセスおよび／または試料に対して実行されることになるプロセスに対する1つ以上の変化を判別するように構成されている。プロセスに対する変更は、プロセスの1つ以上のパラメータに対する任意の好適な変更を含んでもよい。コンピュータシステムは、好ましくは、欠陥3D構造が、修正されたプロセスが実行される他の試料上で低減または防止され得るように、欠陥3D構造が、試料上で実行される別のプロセスにおいて試料上で修正または排除され得るように、欠陥3D構造が、試料上で実行される別のプロセスにおいて補償され得るようになど、これらの変化を決定する。コンピュータシステムは、当技術分野で公知の任意の好適な様式で、そのような変化を決定してもよい。

【0094】

次いで、これらの変更は、半導体製造システム（図示せず）またはコンピュータシステムおよび半導体製造システムの両方にアクセス可能な記憶媒体（図示せず）に送信することができる。半導体製造システムは、本明細書に記載のシステムの実施形態の一部であってもなくてもよい。例えば、本明細書で説明される撮像サブシステムおよび／またはコンピュータシステムは、例えば、筐体、電源、試料取扱いデバイスまたは機構等の1つ以上の共通要素を介して、半導体製造システムに連結されてもよい。半導体製造システムは、リソグラフィツール、エッチングツール、化学機械研磨（CMP）ツール、堆積ツールな

10

20

30

40

50

ど、当技術分野で知られている任意の半導体製造システムを含むことができる。

【0095】

上記のシステムの各々の実施形態の各々は、1つの単一の実施形態と一緒に組み合わせることができる。

【0096】

別の実施形態は、試料についての情報を決定するためのコンピュータ実装方法に関する。この方法は、撮像サブシステムを用いて試料の画像を生成するステップを含む。1つ以上の3D構造が試料上に形成される。本方法はまた、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される1つ以上のコンポーネントに含まれるDLモデルに画像のうちの1つ以上を入力することによって、画像のうちの1つ以上に基づいて1つ以上の3D構造の高さを予測するステップを含む。さらに、この方法は、1つ以上の3D構造の予測された高さに基づいて試料についての情報を決定することを含む。決定は、1つ以上のコンピュータシステムによって実行される。

【0097】

本方法のステップの各々は、本明細書にさらに記載されるように実行され得る。本方法はまた、本明細書に説明されるシステム、コンピュータシステム、および／または撮像サブシステムによって行われることができる、任意の他のステップを含んでもよい。1つ以上のコンピュータシステム、1つ以上のコンポーネント（構成要素）、DLモデル、および撮像サブシステムは、それぞれ、本明細書に説明される実施形態のうちのいずれか、例えば、コンピュータシステム102、コンポーネント100、DLモデル104、および撮像サブシステム10に従って構成されてもよい。加えて、上述の方法は、本明細書に記載されるシステムの実施形態のいずれかによって実行されてもよい。

【0098】

さらなる実施形態は、試料についての情報を決定するためのコンピュータ実装方法を実行するための1つ以上のコンピュータシステム上で実行可能なプログラム命令を記憶する非一時的なコンピュータ可読媒体に関する。そのような一実施形態を図6に示す。特に、図6に示すように、非一時的コンピュータ可読媒体600は、コンピュータシステム604上で実行可能なプログラム命令602を含む。コンピュータ実装方法は、本明細書で説明される任意の方法の任意のステップを含んでもよい。

【0099】

本明細書に説明されるもの等の方法を実装するプログラム命令602は、コンピュータ可読媒体600上に記憶されてもよい。コンピュータ可読媒体は、磁気もしくは光ディスク、磁気テープ、または当技術分野で知られている任意の他の好適な非一時的コンピュータ可読媒体などの記憶媒体であり得る。

【0100】

プログラム命令は、とりわけ、プロシージャベースの技法、コンポーネントベースの技法、および／またはオブジェクト指向技法を含む、様々な方法のいずれかで実装され得る。例えば、プログラム命令は、所望に応じて、ActiveX制御、Cオブジェクト、JavaBeans、Microsoft Foundation Classes（「MFC」）、SSE（Streaming SIMD Extension）、または他の技術もしくは方法論を使用して実装されてもよい。コンピュータシステム604は、本明細書に記載される実施形態のいずれかに従って構成され得る。

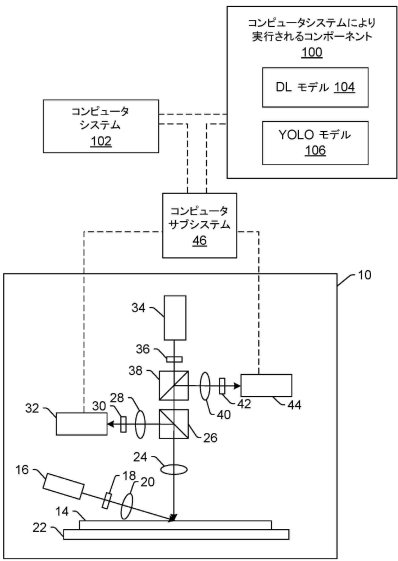
【0101】

本発明のさまざまな態様のさらなる修正および代替実施形態は、この説明を考慮すれば当業者には明らかであろう。例えば、試料についての情報を決定するための方法およびシステムが提供される。したがって、この説明は、単なる例示として解釈されるべきであり、本発明を実施する一般的な方法を当業者に教示する目的のためである。本明細書に示され、記載される本発明の形態は、現在好ましい実施形態として解釈されるべきであることを理解されたい。要素および材料は、本明細書に図示および説明されるものと置換されてもよく、部品およびプロセスは、逆にされてもよく、本発明のある特徴は、独立して利用

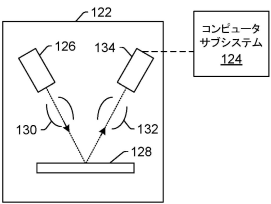
されてもよく、全て、本発明の本説明の利益を享受した後、当業者に明白となるであろう。以下の特許請求の範囲に記載される本発明の精神および範囲から逸脱することなく、本明細書に記載される要素に変更が行われ得る。

【図面】

【図 1】



【図 1 a】



10

20

【図 2】

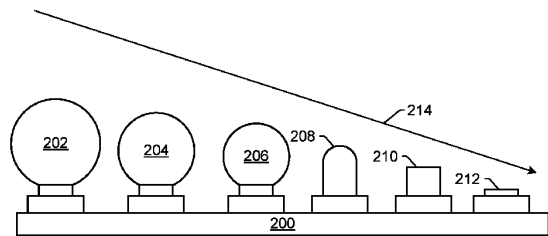
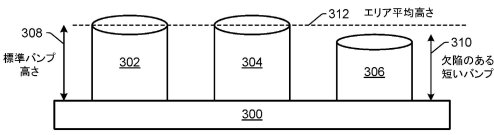


Fig. 2

【図 3】

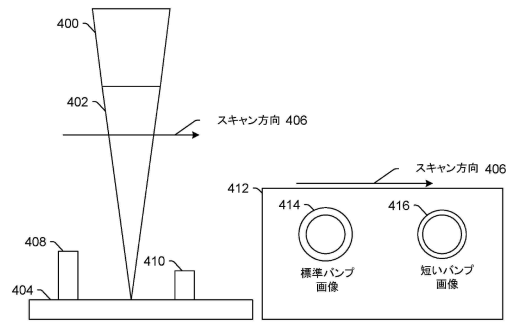


30

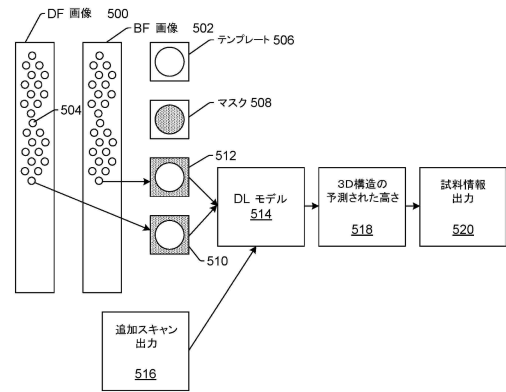
40

50

【図 4】

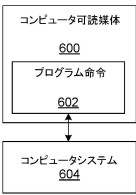


【図 5】



10

【図 6】



20

30

40

50

フロントページの続き

(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

早期審査対象出願

ロ バレー コロンビア ドライブ 1 7 7 4 9

審査官 安田 雅彦

(56)参考文献 国際公開第2020/166076 (WO, A1)
特表2018-519524 (JP, A)
米国特許第10473454 (US, B1)
米国特許出願公開第2017/0191946 (US, A1)
特開2003-109985 (JP, A)
特開2006-135129 (JP, A)
特開2019-132594 (JP, A)
特開2014-115245 (JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H01L 21/66
H01L 21/60
H01L 21/02
G01B 11/00-11/30
G01N 21/00-21/958
G06T 1/00- 1/60
G06T 7/00- 7/90