(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)公表番号
特表2024-537695
(P2024-537695A)
(43)公表日　令和6年10月16日(2024.10.16)

(51)国際特許分類			FI			テーマコード（参考）
H01L	*21/66*	*(2006.01)*	H01L	21/66	Z	2H197
H01L	*21/02*	*(2006.01)*	H01L	21/02	Z	4M106
G03F	*7/20*	*(2006.01)*	G03F	7/20	521	

審査請求　未請求　予備審査請求　未請求　（全41頁）

(21)出願番号　特願2024-518197(P2024-518197)
(86)(22)出願日　令和4年9月23日(2022.9.23)
(85)翻訳文提出日　令和6年3月21日(2024.3.21)
(86)国際出願番号　PCT/US2022/044531
(87)国際公開番号　WO2023/049341
(87)国際公開日　令和5年3月30日(2023.3.30)
(31)優先権主張番号　17/484,204
(32)優先日　令和3年9月24日(2021.9.24)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
(81)指定国・地域　AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,
最終頁に続く

(71)出願人　000219967
東京エレクトロン株式会社
東京都港区赤坂五丁目３番１号
(71)出願人　514028776
トーキョー エレクトロン ユーエス ホールディングス，インコーポレーテッド
アメリカ合衆国 テキサス州 ７８７４１
オースティン グローブ・プールバード ２４００
(74)代理人　100107766
弁理士　伊東 忠重
(74)代理人　100070150
弁理士　伊東 忠彦
(72)発明者　イップ，ネーサン
アメリカ合衆国 テキサス州 ７８７４１
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　フィンガープリントに基づく半導体製造プロセス欠陥検出を使用する方法及びプロセス

(57)【要約】
プロセス変数及び欠陥に対するモデルフィンガープリントの変化率を通したプロセスモデルの感度計算が提供される。フィンガープリント感度テーブルが生成され、プロセス変数がフィンガープリント感度のセットに関連付けられる。入力基板のフィンガープリントは、プロセスモデルで使用される同じフィンガープリント方法を適用することにより、生産プロセスを通して監視される。入力基板フィンガープリントとプロセスモデル予測フィンガープリントとの間の差分の計算が行われる。この差分フィンガープリントは、差分の原因である可能性が最も高いプロセス変数を見出すためにフィンガープリント感度のテーブルに対して比較される。プロセス変数と基板上の実測値との間の空間的関係が取得され得る。フィンガープリント感度を通した相関は、欠陥のあるプロセスツールを指摘する能力を向上させる。差分フィンガープリントは、基板上の欠陥の形成を識別することもできる。

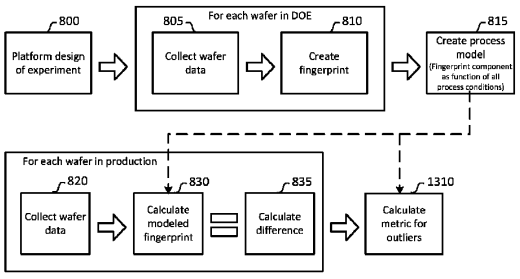


Figure 13

【特許請求の範囲】
【請求項１】
半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法であって、前記作製プロセスは、少なくとも１つのプロセスステップを含み、前記少なくとも１つのプロセスステップは、複数のプロセス変数に関連付けられ、前記方法は、
前記少なくとも１つのプロセスステップに対して実験計画プロセスを行うことであって、前記複数のプロセス変数は、複数の実験計画半導体ウェーハに対して変更される、行うことと、
前記複数の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することであって、前記実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、前記実験計画ウェーハ測定値が取得される前記実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、
各実験計画半導体ウェーハについて、前記取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することと、
前記複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、前記少なくとも１つのプロセスステップのプロセスモデルを作成することと、
生産半導体ウェーハ上で前記少なくとも１つのプロセスステップを行うことと、
前記生産半導体ウェーハの前記第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することであって、前記生産ウェーハ測定値のそれぞれは、前記生産ウェーハ測定値が取得される前記生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、
前記取得された生産半導体ウェーハ測定値から生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリントを作成することと、
前記生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリント及び前記プロセスモデルを利用して、前記少なくとも１つのプロセスステップの欠陥のあるプロセス変数を検出することと
を含む、方法。
【請求項２】
前記少なくとも１つのプロセスステップの前記プロセスモデルを利用して、前記生産半導体ウェーハのモデル化フィンガープリントを計算することを更に含む、請求項１に記載の方法。
【請求項３】
前記モデル化フィンガープリントと前記生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリントとの間の差分を計算することと、
前記少なくとも１つのプロセスステップの前記欠陥のあるプロセス変数を検出するとき、前記計算された差分を利用することと
を更に含む、請求項２に記載の方法。
【請求項４】
前記欠陥のあるプロセス変数は、前記計算された差分をプロセスモデル感度に対して比較して、特定のプロセス変数に欠陥があるかどうかを判定することを促進することによって検出される、請求項３に記載の方法。
【請求項５】
前記特定のプロセス変数は、確率決定を利用して識別される、請求項４に記載の方法。
【請求項６】
前記特定のプロセス変数は、前記計算された差分を前記プロセスモデル感度に対して比較することによって取得された複数のプロセスモデル項を解析して、所定の欠陥確率レベルを超えるプロセス変数を識別することによって識別される、請求項５に記載の方法。
【請求項７】
半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法であって、前記作製プロセスは、複数のプロセスステップを含み、前記複数のプロセスステップの少なくとも

第１のものは、複数のプロセス変数に関連付けられ、前記方法は、
実験計画プロセスを行うことであって、前記実験計画プロセスは、
一連の実験計画半導体ウェーハについて、前記一連の実験計画半導体ウェーハ上で前記複数のプロセスステップの前記第１のものを行うことであって、前記複数のプロセス変数の値の少なくとも１つ又は複数は、前記一連の実験計画半導体ウェーハのそれぞれに対して変更される、行うことと、
前記一連の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することであって、前記実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、前記実験計画ウェーハ測定値が取得される前記実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、
各実験計画半導体ウェーハについて、前記取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することと、
前記複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、前記複数のプロセスステップの前記第１のもののプロセスモデルを作成することと
を含む、行うことと、
少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上で前記複数のプロセスステップの前記第１のものを行うことと、
前記生産半導体ウェーハの前記第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することであって、前記生産ウェーハ測定値のそれぞれは、前記生産ウェーハ測定値が取得される前記生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、
前記取得された生産ウェーハ測定値から生産ウェーハプロセスステップフィンガープリントを作成することと、
前記生産ウェーハプロセスステップフィンガープリント及び前記プロセスモデルを利用して、欠陥のあるプロセス変数を検出することと
を含む、方法。
【請求項８】
前記複数のプロセスステップの前記第１のものの前記プロセスモデルを利用して、前記生産半導体ウェーハのモデル化フィンガープリントを計算することを更に含む、請求項７に記載の方法。
【請求項９】
前記モデル化フィンガープリントと前記生産ウェーハプロセスステップフィンガープリントとの間の差分を計算することを更に含む、請求項８に記載の方法。
【請求項１０】
前記モデル化フィンガープリントと前記生産ウェーハプロセスステップフィンガープリントとの間の差分を計算することと、
前記複数のプロセスステップの前記第１のものの前記欠陥のあるプロセス変数を検出するとき、前記計算された差分を利用することと
を更に含む、請求項８に記載の方法。
【請求項１１】
前記欠陥のあるプロセス変数は、前記計算された差分を前記プロセスモデルの変数感度レベルに対して比較して、特定のプロセス変数が、前記欠陥のあるプロセス変数であると判定することを促進することによって検出される、請求項１０に記載の方法。
【請求項１２】
前記欠陥のあるプロセス変数は、確率決定を利用して識別される、請求項１１に記載の方法。
【請求項１３】
前記欠陥のあるプロセス変数は、前記計算された差分を前記変数感度レベルに対して比較することによって取得された複数のプロセスモデル項を解析して、所定の欠陥確率レベルを超えるプロセス変数を識別することによって識別される、請求項１２に記載の方法。

【請求項１４】
前記欠陥のあるプロセス変数は、確率決定を利用して識別される、請求項８に記載の方法。
【請求項１５】
前記欠陥のあるプロセス変数は、前記計算された差分を変数感度レベルに対して比較することによって取得された複数のプロセスモデル項を解析して、所定の欠陥確率レベルを超えるプロセス変数を識別することによって識別される、請求項１４に記載の方法。
【請求項１６】
半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法であって、前記作製プロセスは、複数のプロセスステップを含み、前記複数のプロセスステップの少なくとも第１のものは、複数のプロセス変数に関連付けられ、前記方法は、
実験計画プロセスを行うことであって、前記実験計画プロセスは、
一連の実験計画半導体ウェーハについて、前記一連の実験計画半導体ウェーハ上で前記複数のプロセスステップの前記第１のものを行うことであって、前記複数のプロセス変数の値の少なくとも１つ又は複数は、前記一連の実験計画半導体ウェーハのそれぞれに対して変更される、行うことと、
前記一連の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することであって、前記実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、前記実験計画ウェーハ測定値が取得される前記実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、
各実験計画半導体ウェーハについて、前記取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することと、
前記複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、前記複数のプロセスステップの前記第１のもののプロセスモデルを作成することと
を含む、行うことと、
少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上で前記複数のプロセスステップの前記第１のものを行うことと、
前記少なくとも１つの生産半導体ウェーハの前記第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することであって、前記生産ウェーハ測定値のそれぞれは、前記生産ウェーハ測定値が取得される前記少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、
前記複数のプロセスステップの第１のものの前記プロセスモデルを利用して、前記生産半導体ウェーハのモデル化フィンガープリントを計算することと、
前記少なくとも１つの生産半導体ウェーハの前記計算されたモデル化フィンガープリント及び前記プロセスモデルを利用して、前記少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の欠陥を検出することであって、前記プロセスモデルは、欠陥検出の正確性を改善するようにプロセス変数の変動を考慮するために利用される、検出することと
を含む、方法。
【請求項１７】
前記少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の前記欠陥は、空間的に局所的な異常を識別し、且つプロセス変数の変動を考慮して欠陥の誤検出を除去することによって判定される、請求項１６に記載の方法。
【請求項１８】
前記取得された生産ウェーハ測定値と、前記計算されたモデル化フィンガープリントとの間の差分を計算することを更に含む、請求項１６に記載の方法。
【請求項１９】
取得された生産ウェーハ測定値と、前記計算されたモデル化フィンガープリントとの間の差分を計算することと、
前記少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の前記欠陥を検出するとき、前記計算された

差分を利用することと
を更に含む、請求項１６に記載の方法。
【請求項２０】
前記少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の前記欠陥は、空間的に局所的な異常を識別し、且つプロセス変数の変動を考慮して欠陥の誤検出を除去することによって判定される、請求項１９に記載の方法。
【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9月２４日に出願された「Ｍｅｔｈｏｄ ａｎｄ Ｐｒｏｃｅｓｓ Ｕｓｉｎｇ Ｆｉｎｇｅｒｐｒｉｎｔ Ｂａｓｅｄ Ｓｅｍｉｃｏｎｄｕｃｔｏｒ Ｍａｎｕｆａｃｔｕｒｉｎｇ Ｐｒｏｃｅｓｓ Ｆａｕｌｔ Ｄｅｔｅｃｔｉｏｎ」という名称の米国特許出願公開第１７／４８４，２０４号明細書の利益及びそれに対する優先権を主張するものであり、その内容は、あらゆる目的のために全体として参照により援用される。
【０００２】
本開示は、基板の処理に関する。一実施形態では、本開示は、マイクロ電子デバイスを形成するために使用される基板の処理のための新規な方法を提供する。
【背景技術】
【０００３】
マイクロ電子デバイスは、マイクロメートル以下のスケールの個々の電子デバイス及び構成要素又はそれらの集合である。個々のマイクロ電子デバイスは、設計に従って接続されて組み合わせを形成し得るトランジスタ、コンデンサ、インダクタ、抵抗器、ダイオード等の電子部品を含み得る。接続は、絶縁体によって絶縁された垂直導体及び側方導体の多層相互接続回路網を集積することによって形成され得る。組み合わせは、データの記憶及び検索、計算、信号処理及び電子画像捕捉又はそれらの組み合わせ等の複雑な機能を集合的に実行する電子回路を形成し得る。集積回路（ＩＣ）は、マイクロチップと呼ばれることもあり、そのようなデバイスの一例である。ＩＣは、産業、軍事及び民生用途のための多くの電子システムで使用されている。
【０００４】
通常、マイクロ電子デバイスは、基板（例えば、半導体ウェーハ等）上に形成され、基板上の材料、例えば半導体、絶縁体及び導体のパターニングされた層のスタックの一部として生産される。通常、基板処理は、多様なプロセスツールを順番に使用することを通して各種のプロセス層を形成、注入、処理、パターニング、エッチング等するために、各種のプロセスツールを使用する一連のプロセスステップを伴う。処理技術の革新により、マイクロ電子デバイス内の構成要素のパッキング密度を高めるために、最小フィーチャサイズは、定期的に縮小されてきた。構成要素が多くなるにつれて、電子回路の機能が強化され、それによりマイクロ電子デバイスがより複雑なタスクを実行できるようになっている。
【０００５】
各マイクロ電子デバイス内の電子部品の数の増加に伴って基板処理の複雑性が増大し、基板処理における幾何学的形状が縮小し続けるにつれて、基板上に構造を形成するための技術的課題が増大している。歩留まりの高い半導体作製方法によって生産される低コストの電気機械的に機能的なマイクロ電子デバイスを提供するために、半導体ウェーハ作製製造システム、製造方法及び製造ツールの革新が必要とされ得る。
【０００６】
基板処理の複雑性の増大及び幾何学的形状の減少により、より精密な製造ツール及びそれらの製造ツールの制御も必要となる。欠陥のあるツール部品は、基板処理によって形成されるデバイスの性能不良につながることがある。欠陥のある部品を早期に検出すること

により、コストを節約し、破局的故障を防ぐことができる。欠陥のある部品を検出する従来の方法は、均一な閾値を設定するか、又は機械に異常を検出するセンサを設置することにより、処理されたウェーハを検査することである。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００７】

基板処理で利用される種々のプロセスステップ及びプロセスツールを監視及び制御するための改善された技法を提供することが望ましいであろう。

【課題を解決するための手段】

【０００８】

プロセス変数に対するモデルフィンガープリントの変化率を通したプロセスモデルの感度計算が提供される。フィンガープリント感度のテーブルが生成され、プロセス変数がフィンガープリント感度のセットに関連付けられる。入力基板のフィンガープリントは、プロセスモデルで使用される同じフィンガープリント方法を適用することにより、生産プロセスを通して監視される。入力基板フィンガープリントと、プロセスモデルを使用して計算される予測フィンガープリントとの間の差分の計算が行われる。この差分フィンガープリントは、差分の原因である可能性が最も高いプロセス変数を見出すためにフィンガープリント感度のテーブルに対して比較される。次に、この可能性を順位付けするチャートが作成され、ユーザに報告され得る。プロセス変数と基板上の実測値との間の空間的関係が取得され得る。フィンガープリント感度を通した直接相関は、欠陥のあるプロセスツールを指摘する能力を向上させる。別の代替形態では、フィンガープリントプロセスは、基板上に形成された欠陥を検出するために利用され得る。例えば、特定のプロセスステップにおいて基板上に形成される可能性のある微粒子は、本明細書に説明されるフィンガープリント比較プロセスの使用を通して検出され得る。

【０００９】

欠陥のあるプロセスツール（又はプロセスツールの部品）は、被処理基板のフィンガープリントに有意な影響を与える可能性がある。同様に、欠陥は、被処理基板のフィンガープリントに有意な影響を与える可能性がある。開示される方法は、プロセス変数関連のドリフトを検出して、欠陥のあるプロセスツール及び／若しくは部品を早期に識別し、且つ／又はプロセスステップにおける欠陥の形成を検出するためにフィンガープリントモデリングを使用する詳細を提示する。開示される技法は、欠陥のあるツール及び／又は欠陥を検出するためにセンサ入力を必要としない。そのため、寄与するフィンガープリント成分を有するプロセス変数を分離し、プロセス変数感度に基づいて検出することにより、基板処理プロセスの問題の根本原因又は欠陥のあるツール及び／若しくは部品を識別する代替方法が提供される。同様に、開示される方法は、プロセスステップにおける欠陥の形成を検出するためにフィンガープリントモデリングを使用する詳細を提示する。開示される技法は、欠陥へのセンサ入力を必要としない。そのため、フィンガープリント技法の使用により、欠陥を形成する基板処理問題を識別する代替方法が提供される。

【００１０】

一実施形態では、半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法が提供され、作製プロセスは、少なくとも１つのプロセスステップを含み、少なくとも１つのプロセスステップは、複数のプロセス変数に関連付けられる。本方法は、少なくとも１つのプロセスステップに対して実験計画プロセスを行うことであって、複数のプロセス変数は、複数の実験計画半導体ウェーハに対して変更される、行うことと、複数の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することであって、実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、各実験計画半導体ウェーハについて、取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することと、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、少なくとも１つのプロセスステップ

のプロセスモデルを作成することと、生産半導体ウェーハ上で少なくとも１つのプロセスステップを行うことと、生産半導体ウェーハの第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することであって、生産ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、取得された生産半導体ウェーハ測定値から生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリントを作成することと、生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリント及びプロセスモデルを利用して、少なくとも１つのプロセスステップの欠陥のあるプロセス変数を検出することとを含む。

【００１１】

本方法は、少なくとも１つのプロセスステップのプロセスモデルを利用して、生産半導体ウェーハのモデル化フィンガープリントを計算することを更に含み得る。

【００１２】

本方法はまた、モデル化フィンガープリントと生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリントとの間の差分を計算することと、少なくとも１つのプロセスステップの欠陥のあるプロセス変数を検出するとき、計算された差分を利用することとを含み得る。一実施形態では、欠陥のあるプロセス変数は、計算された差分をプロセスモデル感度に対して比較して、特定のプロセス変数に欠陥があるかどうかを判定することを促進することによって検出される。一実施形態では、特定のプロセス変数は、確率決定を利用して識別される。一実施形態では、特定のプロセス変数は、計算された差分をプロセスモデル感度に対して比較することによって取得された複数のプロセスモデル項を解析して、所定の欠陥確率レベルを超えるプロセス変数を識別することによって識別される。

【００１３】

別の方法は、半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法であって、作製プロセスは、複数のプロセスステップを含み、複数のプロセスステップの少なくとも第１のものは、複数のプロセス変数に関連付けられる。本方法は、実験計画プロセスを行うことを含み得る。実験計画プロセスは、一連の実験計画半導体ウェーハについて、一連の実験計画半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うことであって、複数のプロセス変数の値の少なくとも１つ又は複数は、一連の実験計画半導体ウェーハのそれぞれに対して変更される、行うことと、一連の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することであって、実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、実験計画ウェーハ測定値が取得される実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、各実験計画半導体ウェーハについて、取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することと、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、複数のプロセスステップの第１のもののプロセスモデルを作成することとを含み得る。本方法は、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うことと、生産半導体ウェーハの第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することであって、生産ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、取得された生産ウェーハ測定値から生産ウェーハプロセスステップフィンガープリントを作成することと、生産ウェーハプロセスステップフィンガープリント及びプロセスモデルを利用して、欠陥のあるプロセス変数を検出することとを更に含む。

【００１４】

本方法は、複数のプロセスステップの第１のもののプロセスモデルを利用して、生産半導体ウェーハのモデル化フィンガープリントを計算することを更に含み得る。本方法は、モデル化フィンガープリントと生産ウェーハプロセスステップフィンガープリントとの間の差分を計算することも含み得る。本方法はまた、モデル化フィンガープリントと生産ウェーハプロセスステップフィンガープリントとの間の差分を計算することと、複数のプロセスステップの第１のものの欠陥のあるプロセス変数を検出するとき、計算された差分を利用することとを含み得る。幾つかの実施形態では、欠陥のあるプロセス変数は、計算された差分をプロセスモデルの変数感度レベルに対して比較して、特定のプロセス変数が、

欠陥のあるプロセス変数であると判定することを促進することによって検出される。幾つかの実施形態では、欠陥のあるプロセス変数は、確率決定を利用して識別される。幾つかの実施形態では、欠陥のあるプロセス変数は、計算された差分を変数感度レベルに対して比較することによって取得された複数のプロセスモデル項を解析して、所定の欠陥確率レベルを超えるプロセス変数を識別することによって識別される。他の実施形態では、欠陥のあるプロセス変数は、確率決定を利用して識別される。

【００１５】

別の実施形態では、半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法が提供され、作製プロセスは、複数のプロセスステップを含み、複数のプロセスステップの少なくとも第１のものは、複数のプロセス変数に関連付けられる。本方法は、実験計画プロセスを行うことを含み得、実験計画プロセスは、一連の実験計画半導体ウェーハについて、一連の実験計画半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うことであって、複数のプロセス変数の値の少なくとも１つ又は複数は、一連の実験計画半導体ウェーハのそれぞれに対して変更される、行うことと、一連の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することであって、実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、実験計画ウェーハ測定値が取得される実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、各実験計画半導体ウェーハについて、取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することと、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、複数のプロセスステップの第１のもののプロセスモデルを作成することとを含む。本方法はまた、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うことと、少なくとも１つの生産半導体ウェーハの第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することであって、生産ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる、取得することと、複数のプロセスステップの第１のもののプロセスモデルを利用して、生産半導体ウェーハのモデル化フィンガープリントを計算することと、少なくとも１つの生産半導体ウェーハの計算されたモデル化フィンガープリント及びプロセスモデルを利用して、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の欠陥を検出することであって、プロセスモデルは、欠陥検出の正確性を改善するようにプロセス変数の変動を考慮するために利用される、検出することとを含む。

【００１６】

幾つかの実施形態では、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の欠陥は、空間的に局所的な異常を識別し、且つプロセス変数の変動を考慮して欠陥の誤検出を除去することによって判定される。本方法は、取得された生産ウェーハ測定値と、計算されたモデル化フィンガープリントとの間の差分を計算することを更に含み得る。本方法はまた、取得された生産ウェーハ測定値と、計算されたモデル化フィンガープリントとの間の差分を計算することと、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の欠陥を検出するとき、計算された差分を利用することとを含み得る。

【００１７】

本発明及びその利点のより詳細な理解は、添付図面と併用される以下の説明を参照することによって得ることができ、図面では、同様の参照番号が同様の特徴を示す。しかしながら、添付図面は、開示される概念の例示的な実施形態のみを例示するものであり、したがって開示される概念が他の均等に有効な実施形態も許容し得るため、範囲を限定するものと見なすべきでないことに留意すべきである。

【図面の簡単な説明】

【００１８】

【図１Ａ】一実施形態による、ウェーハ作製製造システムのプロセスステップの測定可能な結果の一例を例示する。

【図１Ｂ】図１Ａに例示される測定可能な結果の一例のフィンガープリントを例示する。

【図１Ｃ】図１Ａに例示される測定可能な結果の一例のフィンガープリントを例示する。

【図２】一実施形態による、ウェーハ作製計測のインライン測定値からフィンガープリントモデル、伝達関数及びプロセスステップのプロセスモデルを生成するために使用されるウェーハ作製製造システムにおける一例の方法の一部を例示するフローチャートである。
【図３Ａ】一実施形態による、インライン測定タイプの測定フィンガープリントが生成される一例の方法の一部を例示する。
【図３Ｂ】一実施形態による、インライン測定タイプの測定フィンガープリントが生成される一例の方法の一部を例示する。
【図３Ｃ】一実施形態による、インライン測定タイプの測定フィンガープリントが生成される一例の方法の一部を例示する。
【図４Ａ】一実施形態による、インライン測定タイプの測定フィンガープリントのプロセスモデルが生成される一例の方法の一部を例示する。
【図４Ｂ】一実施形態による、インライン測定タイプの測定フィンガープリントのプロセスモデルが生成される一例の方法の一部を例示する。
【図４Ｃ】一実施形態による、インライン測定タイプの測定フィンガープリントのプロセスモデルが生成される一例の方法の一部を例示する。
【図４Ｄ】一実施形態による、インライン測定タイプの測定フィンガープリントのプロセスモデルが生成される一例の方法の一部を例示する。
【図５】一実施形態による、ウェーハ作製計測のインライン測定値からフィンガープリントモデル、伝達関数及びプロセスモジュールのプロセスモデルを生成するために使用されるウェーハ作製製造システムにおける一例の方法の一部を例示するフローチャートである。
【図６Ａ】一実施形態による、測定フィンガープリントからフィンガープリントの階層を生成する一例の方法を例示する。
【図６Ｂ】一実施形態による、測定フィンガープリントからフィンガープリントの階層を生成する一例の方法を例示する。
【図６Ｃ】一実施形態による、測定フィンガープリントからフィンガープリントの階層を生成する一例の方法を例示する。
【図７】一実施形態による、ベースラインプロセスフローのモデルを生成する一例の方法を例示する一般化されたフローチャートである。
【図８】半導体ウェーハと共に使用するための、フィンガープリントに基づく欠陥検出技法を実施するための例示的なワークフロー図を例示する。
【図９】薄膜形成プロセスに対する各種のプロセス変数を例示する例示的なテーブルを例示する。
【図１０】モニターウェーハのグリッド全体にわたって空間的に収集された膜厚生データ並びにフィンガープリントモデルによって提供される、対応する係数強度及び係数を例示する。
【図１１Ａ】「良品」及び「不良」ウェーハの膜厚例に関して図８のワークフローステップの一部を例示する。
【図１１Ｂ】「良品」及び「不良」ウェーハの膜厚例に関して図８のワークフローステップの一部を例示する。
【図１２Ａ】「良品」及び「不良」ウェーハの欠陥確率に対してプロセス変数（プロセスモデル項）をプロットしたチャートを例示する。
【図１２Ｂ】「良品」及び「不良」ウェーハの欠陥確率に対してプロセス変数（プロセスモデル項）をプロットしたチャートを例示する。
【図１３】半導体ウェーハと共に使用するための、フィンガープリントに基づく欠陥検出技法を実施するための例示的なワークフロー図を例示する。
【図１４Ａ】本明細書で開示する技法を利用する例示的な方法を例示する。
【図１４Ｂ】本明細書で開示する技法を利用する例示的な方法を例示する。
【図１５Ａ】本明細書で開示する技法を利用する例示的な方法を例示する。
【図１５Ｂ】本明細書で開示する技法を利用する例示的な方法を例示する。

【図１６Ａ】本明細書で開示する技法を利用する例示的な方法を例示する。
【図１６Ｂ】本明細書で開示する技法を利用する例示的な方法を例示する。
【発明を実施するための形態】
【００１９】
半導体ウェーハ等の基板を作製するための既存の手法は、基板全体に適用されるか、又は基板全体にわたって適用されると仮定される単一の値であるメトリックを使用する。これらのメトリックの従来の適用は、個々のウェーハ又はサンプルウェーハの測定値に基づく。
【００２０】
これらの従来の手法は、各測定値に関連するか又は関連付けられた情報を破棄又は無視する。例えば、そのような情報は、空間的測定値又は測定値間の相関を含み得る。そのような情報は、潜在的に有価値である。エッジ配置誤差（ＥＰＥ）は、歩留まりに相関付けることができるメトリックを形成する異なる測定値の組み合わせの一例である。
【００２１】
Ｆｏｎｓｅｃａ及びＩＰによるＳｙｓｔｅｍｓ ａｎｄ Ｍｅｔｈｏｄｓ ｆｏｒ Ｍａｎｕｆａｃｔｕｒｉｎｇ Ｍｉｃｒｏｅｌｅｃｔｒｏｎｉｃ Ｄｅｖｉｃｅｓという名称の、２０１９年１０月２８日に出願された係属中の米国特許出願公開第１６／６６６，０８７号明細書（その開示内容が全体として参照により明示的に援用される）では、製造歩留まりに相関するメトリックのフィンガープリント（ＦＰ）が、１つ又は複数の半導体ウェーハの複数の空間場所において行われた１つ又は複数のインライン測定から生成される方法を採用する製造システムについて説明している。
【００２２】
参照により援用される米国特許出願公開第１６／６６６，０８７号明細書で説明されている技術は、種々の実施形態において、はるかに多くの利用可能な情報を使用して構築されたプロセスモデルを生成することにより、空間情報を維持する。加えて、この技術は、種々の実施形態において、半導体製造に動的に適用することができ、フィードバック制御ループを使用して自動化されるのに適している。
【００２３】
本明細書に説明された半導体ウェーハ作製製造システム製造方法及び製造ツールの実施形態は、半導体ウェーハ作製の技法によって生産されるマイクロ電子デバイスの製造歩留まり及び製造コストを改善し得る。半導体ウェーハ作製は、一連のプロセスモジュールの実行として説明され得、各プロセスモジュールは、一連のユニットプロセスステップを含む。一例のユニットプロセスステップは、順次プロセスフローに従って実行されて、層、例えば活性層、ダミーゲート層、ソース－ドレイン層、金属ゲート層、接点層等を作製する表面準備、イオン注入、熱ステップ（例えば、急速熱酸化（ＲＴＯ）、急速熱アニール（ＲＴＡ）及びレーザアニール）、フォトリソグラフィステップ（例えば、レジストコート、露光、現像及びストリッピング）、電気メッキ、プラズマ堆積、プラズマエッチング、ウェットエッチング、化学機械研磨（ＣＭＰ）等を含む。それぞれのプロセスモジュールは、活性モジュール、ダミーゲートモジュール等と呼ばれ得る。半導体ウェーハ製造ラインの製造歩留まりは、仕様のセットに準拠する電気的にテスト可能なメトリック（例えば、トランジスタ漏出、抵抗器抵抗、回路機能性等）を有する、完成したマイクロ電子デバイスの割合であると見なされ得る。
【００２４】
製造歩留まりに相関するメトリックのフィンガープリント（ＦＰ）は、１つ又は複数の半導体ウェーハの複数の空間場所において行われた１つ又は複数のインライン測定から生成される。各層について、層に適切なメトリックのＦＰは、以下に更に詳述されるように生成される。例えば、ダミーゲート層のエッジ配置誤差（ＥＰＥ）のＦＰを生成し得る。幾つかの実施形態では、各ＦＰは、測定値の空間情報を保持するそれぞれのメトリックの数学的モデルである。幾つかの実施形態では、数学的モデルは、インライン測定値が取得されたウェーハ上の場所の空間座標の数学的関数である。数学的関数は、基底関数と呼ば

れる、数学的関数の有限級数で展開され得る。その場合、ＦＰは、モデル関数の級数展開のそれぞれの項の係数の順序付き集合を含む係数ベクトルによって表され得る。以下に更に詳述するように、層メトリックのＦＰは、ＦＰの階層の複合物であり得る。例えば、活性層ＥＰＥのＦＰは、マンドレル（側壁イメージ転写（ＳＩＴ）に使用される）の高さ、ピッチウォーク（マルチパターニング技法の場合）、オーバーレイ（例えば、活性マスクとアラインメントマスクとの間のアラインメント誤差）等、幾つかのＦＰからの寄与を含む複合数学的モデルであり得る。次に、これらのＦＰ（例えば、マンドレルの高さ、ピッチウォーク及びオーバーレイ）は、例えば、マンドレルの堆積薄膜厚、側壁ハードマスクのマルチパターンのピッチ、オーバーレイパターンにおけるフィーチャの寸法等のインライン測定値の１つ又は複数のＦＰから導出され得る。

【００２５】

インライン測定値は、ウェーハ作製生産ラインの終わりに製造歩留まりに最終的に影響し得る先行プロセスステップの結果を識別するように設計される。当業者に既知のように、処理ステップの結果は、調整可能なプロセスパラメータのセットによって調節され得る。プロセスパラメータは、一般に、１つ又は複数のプロセスステップを実行するために選択される機器設定である。例えば、ダミーゲートプロセスモジュールにおけるレジスト現像プロセスステップ後のダミーゲートレジストＥＰＥ測定値は、レジストコートステップにおけるウェーハスピン速度、フォトレジスト露光ステップ中の露光時間及び焦点面の位置によって調節され得る。したがって、ダミーゲートレジストＥＰＥのＦＰの各係数は、調整可能なプロセスパラメータ、この例ではスピン速度、露光及びフォーカスによって調節され得る。プロセスパラメータ（例えば、スピン速度、露光及びフォーカス）のセットに対するＦＰ係数（例えば、ダミーゲートレジストＥＰＥ　ＦＰ）の応答は、独立変数のセットの数学的関数としてモデリングされ得、各変数は、ＥＰＥの単位（例えば、ナノメートル）に適宜正規化されたプロセスパラメータの数値表現である。これらの数学的記述は、ダミーゲートレジストＥＰＥのプロセスモデルを集合的に形成する。

【００２６】

この例では、ダミーゲートレジストＥＰＥは、直接測定値であるため、そのＦＰは、ＦＰの階層中の最下位レベルＦＰの１つである。この実施形態では、プロセスモデルは、ダミーゲートレジストＥＰＥ　ＦＰを正確にモデリングすることにより、ダミーゲートレジストＥＰＥ測定値における空間情報を保持し得ることに更に留意され得る。一般に、２つ以上の測定値タイプがあり得る（例えば、ＥＰＥ、ラインエッジラフネス（ＬＥＲ）、オーバーレイ、限界寸法（ＣＤ）、線幅ラフネス（ＬＷＲ）等）。それぞれのプロセスモデルを有する最下位レベルＦＰは、プロセスステップの各測定値タイプについて生成され得る。現在又は前のプロセスステップにおいて取得された測定値のインライン測定値ＦＰとの組み合わせ及び計算（例えば、２つの測定値間の差）を行い、そのプロセスステップの次の上位レベルのＦＰを作成し得る。

【００２７】

プロセスステップの測定可能な結果は、多くの場合、入力ウェーハの状態に依存する。例えば、ダミーゲートレジストパターンのＥＰＥは、フィンＦＥＴと呼ばれるフィン形トランジスタ構造の作製を含むプロセスフローにおける活性レベルでのシャロートレンチアイソレーション（ＳＴＩ）酸化物の上に突出して形成されたフィンの高さによって影響を受け得る。活性プロセスモジュールにおいて測定されるフィン高さは、活性フィン高さＦＰによって正確に再現され得る。入力ウェーハの状態は、一般に、前のプロセスモジュール及び現在のプロセスモジュールの完了したプロセスステップの両方によって決定される。したがって、前のプロセスモジュールの最上位レベルＦＰ及び現在のプロセスモジュールにおける完了したステップの最上位レベルＦＰは、後続のプロセスステップにおける測定値に相関し得、したがって、それから生成されるＦＰに相関し得る。この例では、活性フィン高さＦＰは、ＥＰＥ、ＣＤ、ＬＥＲ、ＬＷＲ及びオーバーレイのダミーゲートレジストＦＰ等のダミーゲート層におけるインライン測定値の１つ又は複数のＦＰに影響を及ぼし得る。ＦＰ対間（例えば、活性フィン高さＦＰとダミーゲートレジストＥＰＥ　ＦＰ

との間）のそのような相関は、プロセスフローについて特性評価され、後続のプロセスステップの測定（最下位レベル）ＦＰの生成での使用に適した伝達関数として前のプロセスステップからフィードフォワードされる。一実施形態では、伝達関数は、先のＦＰ（例えば、活性フィン高さＦＰ）の係数ベクトルを、後続のプロセスステップの最下位レベルＦＰ（例えば、ダミーゲートレジストＥＰＥ　ＦＰ）の係数ベクトルに組み込むことができる成分ベクトルにマッピングする変換行列として実施され得る。一般に、伝達関数は、後続のプロセスステップで行われた測定から導出されたメトリックのＦＰに対する、前のプロセスステップのウェーハ特性から計算されたメトリックの影響を含むように使用され得る変換行列、微分方程式のセット、ルックアプテーブル、統計的相関関数のセット又は反復アルゴリズム等の任意の数値モデルを使用して実施され得る。更に、前のプロセスステップにおける１つ又は複数のＦＰモデルを現下のプロセスステップにおける測定値ＦＰの少なくとも一部にマッピングする伝達関数として、現下のプロセスステップにおけるウェーハ特性に対する前の処理の影響を公式化したが、他の公式も考えられる。例えば、伝達関数は、現下のプロセスステップにおける１つ又は複数のインラインウェーハ作製計測データの組み合わせ／計算から導出されるメトリックのＦＰモデルの少なくとも一部への前のステップにおけるプロセスパラメータのマッピングを記述するように公式化され得る。前の処理の影響が最下位レベルＦＰに組み込まれると、前のプロセスステップとの相関は、最下位レベルＦＰを使用してその後形成される任意の上位レベルＦＰに自然に含まれる。

【００２８】

プロセスモジュールのプロセスステップのＦＰを生成した後、組み合わせ及び計算を適用して、次の上位レベルのＦＰを生成し得、これは、更に後述するように、プロセスモジュール又は層のＦＰであり得る。例えば、ダミーゲートレジストＣＤ　ＦＰ、ダミーゲートエッチングバイアスＦＰ及びオーバーレイ等のダミーゲートプロセスモジュールにおけるプロセスステップの幾つかのＦＰを組み合わせて、ダミーゲート層のダミーゲートＣＤＦＰを生成し得る。

【００２９】

ＦＰを使用し、生の測定データの空間座標を保持し、再現するＦＰ係数のプロセスモデルを生成する方法の実施形態は、半導体ウェーハ作製生産ラインの監視及び制御に有利である。空間情報を提供するＦＰ係数ベクトルの監視を使う統計的プロセス制御（ＳＰＣ）戦略は、ウェーハ作製生産ラインの歩留まりを低下させる可能性のあるプロセスエクスカーションの原因を識別することを容易にする。例えば、径方向依存性の増大が、その１つが径方向ガス流を表す幾つかのプロセスパラメータによって影響を受け得るメトリックのＦＰの係数の異常から観測される場合、それは、異常なガス流を示唆し得る。介入が製造歩留まりの回復を成功させ得る機器及び機器設定の高速識別を促進するために、異常値を示すＦＰ係数のプロセスモデルを空間情報と併せて利用して、異常をシミュレートすることができる。

【００３０】

伝達関数を使用して前のプロセスステップとの相関が組み込まれたＦＰ係数ベクトルを生成することにより、ウェーハ作製製造システムに幾つかの独自の利点が提供される。伝達関数法は、測定値ＦＰの係数ベクトルを２つの成分ベクトルに効果的に分割する。１つは前の処理と相関する成分ベクトルであり、もう１つは現下の完了したプロセスステップと相関する現下ステップベクトルと呼ばれる成分ベクトルである。先のステップのフィンガープリントと相関する成分は、処理履歴から予測可能であり、測定値ＦＰの伝達ベクトル又は伝達成分と呼ばれる。ＦＰ係数ベクトルのそのような分解は、所与のプロセスステップで観測された逸脱を、入力ウェーハ状態に起因する部分と現下のプロセスステップに起因する部分とに分割するために使用され得る。更に、予測可能性は、是正動作をフィードフォワードするか、又は更なる処理を終える早期判断を行うために使用され得る。

【００３１】

伝達関数法は、後続のプロセスステップにおけるメトリックのＦＰへの全ての先のプロ

セスステップの影響を保持することにより、作製プロセスフロー全体のプロセスモデルの正確性を上げる。この能力は、以下に更に後述するように、生産ラインの歩留まりを改善するようにプロセスパラメータを調整するコンピュータ支援解析で有利に使用され得る。プロセスモデルと共に、空間情報は、機器設定を最適化して製造歩留まりを高める、より的を絞った調整に役立ち得る。更に、解析は、製造歩留まりへの影響が大きいため、更なる投資に値する特定の機器を識別し得、製造歩留まりへの影響がごくわずかな状態でより安価な代替を使用し得る特定の機器を識別することもできる。

【００３２】

先に概説した製造システム及び方法について、図１～図８を参照して以下に更に詳細に例示する。

【００３３】

図１Ａのウェーハマップは、結果がウェーハ上の複数のダイ場所において繰り返される同じタイプの測定値の集合である、ウェーハ作製製造システムのプロセスステップの直接測定可能な結果１００の一例（例えば、レジストパターニングステップのＥＰＥ測定値）を例示する。１つのサンプルウェーハ又はそのようなウェーハの集合上の空間場所（例えば、二次元（２Ｄ）矩形座標ｘ及びｙ又は極座標ｒ及びθ）に関連付けられたデータ値を含むデータセットは、ウェーハマップとして表示され得る。ウェーハマップでは、各データ点は、ウェーハの二次元画像において関連付けられた空間座標に従ってエリアを与えられる。図１Ａの画像等の本明細書におけるウェーハマップでは、データ点は、グレースケールによって示された値を有するモザイク式矩形として描写される。

【００３４】

生データ（例えば、直接測定されたＥＰＥ値及びそれらの関連座標）を処理して、フィンガープリント（ＦＰ）モデルを作成し得る。特に、回帰分析等の解析を行って、生データ値への最良フィッティング、例えばＥＰＥの測定値と、最適化されたパラメータを使用してＦＰモデルによって計算された値との間の最小誤差を求めて、関数のパラメータを選択及び調整し得る。解析は、管理可能な有限数の調整可能パラメータを用いて、生データにおける空間パターンを再現し得る２Ｄ空間座標の適切な数学的関数を選択することを含む。例えば、例えば液体フォトレジストが回転中のウェーハの中央領域に導入され、径方向遠心力によってウェーハ表面にわたって分布するプロセスステップの影響を受けやすいことがあり得る測定では、モデル関数は、ゼルニケ多項式の有限級数（又はフーリエ級数及びベッセル関数等の他の関数）として数学的に表現される、極座標ｒ及びθの関数であるように選択され得る。各多項式は、それぞれの数値係数によって加重される。これらの係数は、生データへの最良フィッティングを得るために解析中に値を最適化し得るモデルのフィッティングパラメータである。係数の順序付き集合は、係数ベクトルと呼ばれ、各係数は、係数ベクトルの一成分である。集合的に、成分（ゼルニケ多項式の順と同じ順に配置される）は、生データのＦＰモデルを構成する。図１Ｂに例示される係数ベクトルは、図１Ａのウェーハマップによって描写される生データのＦＰモデルの一例である。図１ＢにおけるＦＰモデルに使用されるモデル関数は、図１Ｂにおいて順にプロットされた２１個の係数によって加重された最初の２１個のゼルニケ多項式の級数を含む。図１Ｃのウェーハマップ１２０は、図１Ｂに例示される最適化されたＦＰモデルを使用して計算される、モデリングされた値を描写する。２つのウェーハマップ（図１Ａ及び図１Ｃ）から観測し得るように、図１ＢのＦＰモデルは、生データをかなり正確に再現することが可能である。

【００３５】

場合により、初期ＦＰモデル（例えば、図１Ｂの２１次元係数ベクトル）は、支配的なモデルパラメータを識別することを含むように解析を展開することによって更に簡易化され得る。係数ベクトルの主成分が少数（例えば、計算されたデータ値に有意に影響する５つの係数）のみある場合、例えば、２１個の係数を含む初期ＦＰモデルは、識別された少数の主係数、例えば５つの主係数によって近似され得る。幾つかの実施形態では、更なる処理及び計算について、低次元（例えば、５次元）係数ベクトルが初期高次元（例えば、

２１次元）ＦＰモデルを置換し得る（残りの係数は、無視される）。
【００３６】
図２は、上述した技法を実施する一例のシステム２００における１つのプロセスステップの実行フローを例示するフローチャートである。一例のシステム２００は、半導体ウェーハの作製と協働して行われる。場合により、協働は、作製自体の一体部分である一例のシステム２００を含み得る。以下に詳述するように、ベースライン（基準計画）ウェーハ作製プロセスに加えて、処理ステップを行い、測定値を取得し、高信頼度で正確なモデルパラメータを抽出し得る。
【００３７】
一例のプロセスについて、本明細書では、いかなる限定でもなく簡潔性のために、システム２００によって行われるものとして解説する。図３及び図４は、図２のフローチャートに付随して、システム２００におけるステップの幾つかの解説に役立つ。図３は、ウェーハ上の測定場所の座標の関数としての測定値ＦＰの生成を例示するために使用される。図４は、システム２００が、プロセスパラメータの変更に対するフィンガープリントモデルの係数の応答を計算するプロセスモデルを生成するために使用する方法を解説するために使用される。
【００３８】
プロセスステップの結果の予測数学的モデルを作成するためにシステム２００において使用される方法のステップ毎の説明での最初のステップである、図２のシステム２００のフローチャートにおけるブロック２１０によって示されるように、ＦＰ、伝達関数及びプロセスモデルを含むモデルは、ベースライン作製プロセスフローに従って処理された半導体ウェーハの１つ又は複数の特性（例えば、高密度ラインのパターンにおけるラインのレジストＣＤ）のインライン測定値を取得することである。取得された各測定値は、測定値が取得されるウェーハ空間場所に関連付けられ、取得された各測定値は、図１Ａを参照して説明したものと同様のウェーハマップによってグラフィカルに描写され得る。図３Ａのグラフ３００は、各ウェーハ上の同じ場所のセットにおけるベースライン処理済みウェーハの集合から収集された測定値、例えばＣＤ測定値の生データのウェーハマップである。
【００３９】
より一般的には、ブロック２１０の動作は、その収集データの空間情報を伴う半導体ウェーハのインライン作製計測データの収集として説明され得る。このインライン作製計測データは、ベースライン作製プロセスフローのあるプロセスステップから生じる特性のウェーハの、ウェーハについて、ウェーハ上、ウェーハ内及びウェーハに対して行われたインライン測定値から生成される。測定は、プロセスステップ中又はプロセスステップの完了後に行われ得る。すなわち、インライン作製計測データは、ベースライン半導体作製プロセスフローのプロセスステップにおいて形成されたウェーハの特性の測定値である。
【００４０】
プロセスステップにおけるインライン作製計測データは、プロセスステップにおいて処理された材料の薄膜（例えば、堆積した薄膜の厚さ）、処理された薄膜におけるパターン（例えば、レジスト現像ステップにおけるレジスト線幅）、プロセスステップにおける処理によって完成したデバイス（例えば、相互接続レベルにおける金属ＣＭＰにより）、材料のエッチングによって露出した完成途中のデバイス（例えば、アラインメントマーク）等についての測定値から導出し得る。本明細書では、プロセスステップは、その瞬間に作製の焦点となっている材料薄膜の処理であり得る。多くの場合、薄膜は、上部又は最上部薄膜である。例えば、薄膜は、堆積、クリーニング若しくはエッチングされる薄膜又は堆積、クリーニング若しくはエッチングが行われたばかりの薄膜である。
【００４１】
場合により、例えば、インライン作製計測データは、作製の現在の焦点となっている薄膜に直接隣接する薄膜、その隣接層におけるパターン、隣接層によって完成したデバイス、隣接層によって露出した完成途中のデバイス等についての測定値から導出され得る。多くの場合、現下の隣接層は、最上部薄膜の直下の層である。

【００４２】
更に他の場合、例えば、インライン作製計測データは、ウェーハの複数の隣接層について又はウェーハ自体の測定値から導出され得る。例えば、ウェーハの複数の隣接層は、内部の電気的及び／又は機械的に相互作用するマイクロ電子デバイスを含み得る。
【００４３】
通常、インライン作製計測データは、半導体作製中、材料のパターンの共通のスタックを使用する複数の半導体ウェーハからの測定値（半導体ウェーハからの測定値に基づく計算）を含む。異なるタイプのインライン作製計測データの例には、ＥＰＥ、グリッドＣＤ測定値、ブロックＬＷＲ測定値、グリッドＬＷＲ測定値、ブロックＣＤ測定値、エッジプロファイル、選択的堆積及び／又は選択的エッチングの選択性、形成されたマイクロ電子デバイスの電気特性、コンタクトホールＣＤ、コンタクトホールエッジラフネス（ＣＥＲ）及び楕円率、短い及び長いライン及びトレンチの先端間距離、２つのパターニングされた層間のオーバーレイ誤差測定値、薄膜厚及び厚さ均一性、単一ツールの動作後に行われる測定、単一プロセスモジュールの全てのツール後に行われる測定、複数のプロセスモジュール後に行われる測定及びそれらの組み合わせからなる群から選択される測定及び／又は計算インライン作製計測データ等の測定データ及び／又は計算データがある。
【００４４】
ブロック２２０において、システムは、データのモデリングに適切な２Ｄ空間座標（ｘ，ｙ）又は（ｒ，□）の数学的関数を選択する。一実施形態では、モデル関数は、基底関数の有限級数であり、先に解説したように、級数の各項を加重する数値係数は、データの係数ベクトル又はＦＰと呼ばれる。基底関数は、一般に、ゼルニケ多項式、ルジャンドル多項式又はベッセル関数等の直交関数であり、長い計算時間を要する非常に長い級数を使用する必要なく、関心のあるインライン測定値タイプを正確にモデリングし得るように選択され、モデルの特性は、インライン測定ステップの幾つかの物理的構成要素（例えば、スピンコーティングプロセスの径方向特性）に相当する。
【００４５】
次のブロック２３０において、システム２００は、最適化アルゴリズムに従い、測定値タイプの取得された空間測定値に最良フィッティングする係数の有限集合を最適化する計算を実行してそれぞれのＦＰモデルを取得する。プロセスステップにおいて取得されたインライン作製計測データの各測定値タイプについてＦＰモデルを生成し得る。これらの測定値ＦＰは、最初の（最下位）レベルのＦＰである。
【００４６】
インライン測定値及びそれぞれのＦＰの生成を図３Ａ～図３Ｃに例示する。図３Ａは、ベースライン処理を使用して現下のプロセスステップにおいて処理された１つ又は複数のウェーハから取得された測定値タイプのインライン作製計測生データを示す。グラフは、各測定値タイプの空間座標に配置され、各データの数値を表すようにグレースケールを使用して陰影が付けられたモザイク式矩形のウェーハマップとしてデータを表示する。図３Ａに描写されるデータは、次に、極座標（ｒ，□）の関数であるゼルニケ多項式の有限（例えば、２１項の）級数を使用してモデリングされる。
【００４７】
２１個の係数の最適化された集合は、図３Ｂにヒストグラムとして表示され、横軸は、ゼルニケ多項式の次数であり、縦軸は、それぞれの係数の強度である。幾つかの実施形態では、項数は、調整可能であり得、例えば最適化後の最小フィッティング誤差が許容可能な閾値よりも高い場合、より高次の多項式を級数に追加し得る。
【００４８】
図３Ｂのヒストグラムに見られるように、係数の幾つかは、他のものと比較して相対的に小さく、各項の寄与はそれぞれの係数の強度に比例するため、過度のフィッティング誤差を導入せずにモデルを簡易化することが可能であり得ることを示す。しかしながら、基底関数が２Ｄ空間座標の関数であり、したがって項の相対的寄与がウェーハの表面上の場所にも依存することを考慮することも重要である。例えば、ウェーハの中心近くで支配的

な項がウェーハのエッジの近くで弱くなる場合がある。

【００４９】

図３Ｃでは、５つの最高係数強度を有する５つの項の寄与は、ウェーハ表面のｘ－ｙ平面の上に３次元表面としてプロットされる。図３Ｂのヒストグラムから見られるように、上から５つの係数は、４次、１２次、１０次、２１次及び１４次のゼルニケ多項式の係数である。図３Ｃのもの等のグラフは、モデルの複雑性の低減に役立つ。更に後述するように、より複雑でないＦＰモデルは、プロセスモデルを生成し、後続の解析を行うための計算時間を短縮するという利点を提供する。

【００５０】

次に、この実施形態では、ブロック２４０において、現在のプロセスステップにおいて取得されたウェーハ特性のインライン測定の結果に対する前のプロセスステップの影響をモデリングするために、現在のプロセスステップにおける測定値ＦＰを分解するための伝達関数が取得される。別の実施形態では、伝達関数は、現在のプロセスステップの全ての測定値ＦＰ及び上位レベルＦＰ（測定値ＦＰと計算との組み合わせを使用する）の生成が完了した後に生成され得る。上述したように、伝達関数は、種々の技法、例えば変換行列、統計的相関関数等を使用して実施及び抽出され得る。

【００５１】

図２のシステム２００のフローチャートのブロック２４０に示されるように、この実施形態では、伝達関数を抽出する方法は、前の処理の記憶が入力ウェーハの状態に埋め込まれることを考慮する。現下のプロセスステップにおける測定値ＦＰの係数ベクトルを分割するロバストな方法を有するために、幾つかの先のプロセスステップにおけるプロセス条件を意図的に変更することにより、入力ウェーハのセットを生成し得る。例えば、フォトレジスト現像ステップにおけるレジストＣＤの測定値ＦＰは、レジストパターンが形成されているウェーハ表面の平坦度と相関すると予期される。したがって、前の平坦化プロセスステップのプロセスパラメータをベースラインプロセスフローから意図的に変更して、入力ウェーハを生成し得、各ウェーハは、平坦化ステップにおいて取得された異なる平坦度ＦＰを有する。次に、非ベースライン入力ウェーハのこの特に準備されたセットの平坦度ＦＰの変動に対するレジストＣＤ測定値の係数ベクトルの応答を解析して、そのベースライン値からのレジストＣＤ　ＦＰの各係数の逸脱の影響の受けやすさを識別する。この情報を使用して、全ての入力ウェーハの平坦度ＦＰの係数ベクトルを、平坦化ステップでのウェーハの平坦度ＦＰとの全ての相関を含むことが予期されるレジストＣＤ係数ベクトルの部分であるそれぞれのレジストＣＤ応答ベクトル（伝達ベクトルと呼ばれる）にマッピングし得る変換行列を定義し得る。この応答ベクトルは、平坦化プロセスの記憶を捕捉し、レジストＣＤ測定値ＦＰから減算されて、現下のプロセスステップでの処理条件とより強く相関することが予期されるレジストＣＤ係数ベクトルの非相関成分（現下ステップベクトルと呼ばれる）を取得し得る。

【００５２】

変換行列は、上述した一例の実施形態では、伝達関数の数学的な実装である。先述したように、他の数学的な実装も可能であることが理解される。

【００５３】

特定のベースラインウェーハ作製プロセスフローの伝達関数は、ウェーハのバッチがウェーハ作製生産ラインによって処理されるたびに生成される必要がない。伝達関数は、一度生成され、将来の使用に利用できるように電子的に記憶され得る。ベースラインウェーハ作製プロセスフローに修正が行われるため、定期的に伝達関数を更新し得る。

【００５４】

図２のフローチャートによって例示される一例の実施形態では、システム２００は、プロセスステップの測定値ＦＰの現下ステップベクトルの応答からそのステップのプロセスモデルを作成する。このプロセスモデルを作成するステップは、ブロック２５０、２６０及び２７０に概説され、図４を参照して説明される。

【００５５】

ブロック２５０において、システム２００は、ベースラインウェーハ作製プロセスフローに規定されたプロセスパラメータ値及びその周辺の幾つかのプロセスパラメータ値を使用して処理されたウェーハのセットからインライン作製測定値データを取得する。各プロセスパラメータは、プロセスモデルが作成されるプロセスステップにおける調整可能な異なる機器設定に関連付けられる。例えば、あるプロセスでは、プロセスの１つ又は複数のツールで利用可能な制御に基づいて条件（例えば、エッチング速度、エッチング時間、ガス濃度等）を調整することができる場合がある。その場合、それらのプロセス条件は、プロセスパラメータである。

【００５６】

図４Ａは、インライン測定値データのウェーハマップ４００の４×４行列によってグラフィカルに描写された生データの一例を例示する。図４Ａにおける一例の行列の各ウェーハマップは、２つのプロセスパラメータ、第１のプロセスパラメータｐａｒ１及び第２のパラメータｐａｒ２の値の対を含む特定のプロセスパラメータベクトルを使用して処理された１つ又は複数のウェーハに対して行われた同じ測定値タイプの測定値に対応する。例えば、ｐａｒ１は、エッチング速度であり得、ｐａｒ２は、エッチング時間であり得る。一般に、変更されるプロセスパラメータの数は、２つ以外であり得る。２つ以上の測定値タイプの測定も行われ得る。図４Ａにおける生データは、４×４行列の行に沿ったウェーハマップがｐａｒ１の４つのパラメータ値に対応する一方、ｐａｒ２のパラメータ値が変わらないままであり、列に沿ったウェーハマップがｐａｒ２の４つのパラメータ値に対応する一方、ｐａｒ１のパラメータ値が変わらないままであるように表示される。

【００５７】

同様にブロック２５０において、システム２００は、図４Ａを参照して上述したように、異なるプロセスパラメータベクトルを使用して処理されたウェーハのセットから取得された生データのＦＰモデルを生成する。各プロセスパラメータベクトルから取得される生データから１つのＦＰモデルが生成される。例えば、図４Ｂに描写される１６個のヒストグラムは、図４Ａに描写される１６個のウェーハマップによって描写される生データのそれぞれのＦＰモデルである。モデル関数は、図１Ｂを参照して説明したものと同様の２１項級数のゼルニケ関数である。各バーは、それぞれのプロセスパラメータベクトル（ｐａｒ１，ｐａｒ２）に対応する測定値タイプのＦＰモデルの２１成分係数ベクトルの係数である。

【００５８】

ブロック２５０を引き続き参照すると、システム２００は、ベースラインプロセスフローの利用可能な伝達関数を利用して、図４Ｂにおける測定値ＦＰ係数ベクトルを分解して、係数ベクトルから伝達ベクトルを減算することにより、各測定値ＦＰの現下ステップベクトルを取得し得る。上述したように、この実施形態では、係数ベクトルの各係数は、２つの部分に分割又は分解される。第１の部分は、伝達関数を使用して計算される伝達ベクトルのそれぞれの係数に等しい。第１の部分は、先のプロセスステップにおいて取得された１つ又は複数のＦＰとの相関を表す。次に、残りの第２の部分は、現下のプロセスステップのプロセス条件によって決定される部分を表す現下ステップベクトルのそれぞれの係数に等しい。現下のプロセスステップのプロセスモデルのパラメータが先のプロセスステップの１つ又は複数におけるプロセスパラメータによって影響を受けないようにするために、現下ステップベクトルを使用してプロセスモデルを生成することが望ましい。

【００５９】

ブロック２６０において、システム２００は、プロセスパラメータ（例えば、ｐａｒ１及びｐａｒ２）の変更に対するフィンガープリントの現下ステップベクトルの各係数の応答をモデリングするモデル関数を選択する。異なるモデル関数を使用して、現下ステップベクトルの各係数、例えば図４Ｃにおいてａ１、ａ２、．．．ａｉ、．．．ａ２０、ａ２１で示されるゼルニケ多項式の２１項級数の２１個の係数をモデリングし得る。図４に例示される例では、１６枚のウェーハ及びそれぞれのＦＰを生成するためにプロセスステップにおいて使用される１６個のプロセスベクトルに対応する、各係数ａｉに１６個のイン

スタンスがある。

【００６０】

ブロック２６０において選択されたモデル関数のモデルパラメータは、各係数ａｉの１６個の値に最良フィッティングするようにブロック２７０において調整されて、プロセスステップの最適化されたプロセスモデルを生成し、プロセスモデルは、図４Ｃにおいてｆ１、ｆ２、．．．ｆｉ、．．．ｆ２０、ｆ２１で示される２１個のモデル関数を含む。各関数ｆｉは、最適化アルゴリズムに従って最適化されている。最初の２つのプロセスモデルｆ１及びｆ２は、２つのプロセスパラメータｐａｒ１及びｐａｒ２の関数としてプロットされた３次元（３Ｄ）表面として図４Ｃにグラフィカルに描写されている。各３Ｄ表面に近い１６個の点は、モデルｆ１及びｆ２の作成に使用された１６個の値ａ１及びａ２であり、プロセスモデルの予測と、ＦＰモデルの現下ステップベクトルの係数との間の良好なフィッティングを例示する。

【００６１】

図４Ｄは、ＦＰモデル及び関連プロセスモデルから計算されたウェーハマップを例示する。図４Ｄのウェーハマップと図４Ａの生データのウェーハマップとの比較は、良好なフィッティングを示し、それによりベースライン処理条件周辺のプロセスパラメータ空間にわたり、空間情報を含む、インライン作製計測データを再現する際の関連プロセスモデルと共にＦＰモデルの予測能力を例示する。

【００６２】

ベースラインウェーハ作製プロセスフローにおけるプロセスステップのプロセスモデルも、ベースライン伝達関数と同様に、一度生成され、将来の使用に利用できるように電子的に記憶され得る。また、伝達関数と同様に、ベースラインプロセスに修正が行われるため、定期的にプロセスモデルを更新し得る。

【００６３】

ベースラインインラインウェーハ作製計測データのフィンガープリントは、リアルタイム歩留まり解析及び高度プロセス制御（ＡＰＣ）の場合、特に製造歩留まりに強く影響するプロセスステップの場合、より頻繁に生成され得る。ＦＰの基準セットをアーカイブして、稼働中の生産ラインから取得されたＦＰセットと比較して異常を検出、解析及び是正し得る。

【００６４】

図２のフローチャートのブロック２８０において、最下位レベルＦＰ（測定値ＦＰである）を結合し、計算を使用して、プロセスステップの関連するメトリックを正確に予測することが可能な上位レベルＦＰ及び関連プロセスモデルを作成し得る。異なる単位を有する複数のＦＰを結合するために、係数の値を正規化して、一貫した単位を取得することが必要であり得る。

【００６５】

上述したように、測定場所の２Ｄ空間座標を含むインライン測定値を使用して生成されたＦＰモデル、伝達関数及び関連プロセスモデルは、ウェーハ作製製造システムにおいて有利に使用することができる。先述し、ブロック２９０に示されるように、システム２００は、ＦＰの支配的な係数及びプロセスモデルの支配的なパラメータを識別し得る。これは、モデルの有意性の低いパラメータを除去することによってモデルの簡易化に役立ち得るのみならず、プロセスパラメータ、機器設定及び機器選択の製造歩留まりに対する影響についての有用な洞察も提供し得る。モデルは、ＡＰＣツールと併せて歩留まり損失を監視し、改良するのに使用することができ、更に後述するように、ベースラインウェーハ作製プロセスフローを改善して、より高い製造歩留まりを提供するために使用することさえできる。

【００６６】

図５のフローチャートは、プロセスモジュール又は層５００、例えば活性層、ゲート層、接点層、金属層等のメトリックのフィンガープリントを生成するために使用され得るフローの一部を例示し、各層は、１つ又は複数のプロセスステップを含む。各プロセスステ

ップにおいて、それぞれのプロセスステップのＦＰ、伝達関数及びプロセスモデルは、例えば、図２に例示されるフローチャートを参照して説明されたフローを使用して、システム２００等の製造システムによって生成され得る。

【００６７】

層（例えば、層５００）のＦＰ、伝達関数及びプロセスモデルは、各プロセスステップのＦＰ、伝達関数及びプロセスモデルを使用した組み合わせ及び計算によって生成され得る。層ＦＰを生成する一例の方法について、図６のフローチャートを参照して解説する。

【００６８】

図５に例示される例では、層５００は、レジストコート、露光、現像、レジストストリッピング等の４つの代表的なプロセスステップ（Ａ、Ｂ、Ｃ、Ｄ）を含む。４つのプロセスステップが例示を目的として示されるが、層５００は、任意の数のステップを含み得る。各プロセスステップに提供される入力は、先のプロセスステップにおいて生成されたＦＰ及び伝達関数と共に入力ウェーハである。

【００６９】

プロセスステップ（例えば、ステップＡ、Ｂ、Ｃ又はＤ）は、当業者に既知のように、塗工機、スキャナ、プラズマエッチング装置、テスト機器等のウェーハ作製の処理機器及び関連する化学物質、真空ポンプ、温度コントローラ等を含む。機器と共に、各プロセスステップは、プロセスパラメータ値、タイミング情報及び入力ウェーハを処理するための命令を含むプロセスレシピを含む。機器は、エッチング速度、ガス流、露光レベル、スピン速度等の調整可能なプロセスパラメータを制御するために使用し得る調整可能な設定を有する。各プロセスパラメータは、一意の大文字斜体下付き文字（Ｊ～Ｕ）によって図５で表されている。例えば、図５の最初の列に見られるように、プロセスステップＡの調整可能なプロセスパラメータは、ＡＪ、ＡＫ及びＡＬである。

【００７０】

１つ又は複数の入力ウェーハは、例えば、所望の材料及び厚さの薄膜を堆積させる等、所望の結果を取得するように選択される１つ又は複数のプロセスレシピを実行することにより、プロセスステップにおいて処理され得る。処理は、種々のセンサを使用して監視され得、処理機器は、プロセスパラメータがプロセスレシピによって意図されるような結果を達成することを保証するように、ＡＰＣシステムによって制御され得る。デフォルトにより、ウェーハは、ベースラインウェーハ作製プロセスフローのベースラインプロセスレシピに従って処理される。

【００７１】

上述したように、ウェーハ特性のインライン測定値は、図２のＦＰモデル生成フローチャートの最初のステップとして収集される。複数のタイプの測定を行うことができ（例えば、堆積した薄膜の厚さ、第１のラインのレジストＣＤ、第２のラインのレジストＣＤ、ステップ高さ、リーク電流等）、各測定値タイプは、下付き文字として一意の文字を有する。図５には、８つの下付き文字（ａ～ｈ）で示される８つの測定値タイプがある。インラインウェーハ作製計測データは、複数のウェーハから収集され得るが、ウェーハ上の場所のセットは、所与のプロセスステップ（例えば、ステップＡ）及び固定の測定値タイプ（例えば、タイプａ）で測定される全てのウェーハについて同じであり得る。空間情報は、各データ点を、データが得られたウェーハ上の場所の２Ｄ空間座標に関連付けることによって保持される。

【００７２】

図５では、同じ測定値タイプの各データ点は、上付き文字（１、２、３、４等）として一意の斜体数値によって識別される。したがって、プロセスステップＡにおけるタイプａのウェーハ測定値（空間情報を含む）のセットは、｛Ａａ１，Ａａ２，Ａａ３，Ａａ４．．．｝で示される。図５の例では、４つのプロセスステップのそれぞれで２つのタイプの測定が行われ、プロセスモジュール５００で合計８つのタイプの測定が行われる。

【００７３】

最下位レベルＦＰモデルは、各ステップにおけるインラインウェーハ作製計測データか

ら生成され得、例えば、ステップＡには、２つの測定値ＦＰがあり得る。１つはデータセット｛Ａａ１，Ａａ２，Ａａ３，Ａａ４．．．｝のＦＰであり、もう１つはデータセット｛Ａｂ１，Ａｂ２，Ａｂ３，Ａｂ４．．．｝のＦＰである。測定値ＦＰの組み合わせ及び計算を使用して作成されたプロセスステップのフィンガープリントは、図５において、各プロセスステップフィンガープリントを識別するために下付き文字ＦＰ及び数値の上付き文字が付いたプロセスステップ名で示される。例えば、図５では、ステップＡにおける２つのプロセスステップＦＰは、ＡＦＰ１及びＡＦＰ２として示される。２つのプロセスステップフィンガープリントに到達するために２つの測定値セットＡａｎ及びＡｂｎの種々の組み合わせを使用することができる。例えば、ある事例では、プロセスステップフィンガープリントＡＦＰ１を作成するために測定値セットＡａｎが使用され、プロセスステップフィンガープリントＡＦＰ２を作成するために測定値セットＡｂｎが使用される。別の事例では、プロセスステップフィンガープリントＡＦＰ１を作成するために測定値セットＡａｎ及びＡｂｎが一緒に使用され、プロセスステップフィンガープリントＡＦＰ２を作成するために測定値セットＡａｎ又はＡｂｎのいずれかが単独で使用される。複数の他の組み合わせも可能であり、各プロセスステップフィンガープリントは、種々の加重、スケーリング、平均化、フィッティング及び／又は他の技法を使用して、ウェーハ測定値の１つ又は複数のセットから作成される。例示を目的として各プロセスステップについて２つのプロセスステップフィンガープリントが示されているが、各プロセスステップは、１つ又は複数のプロセスステップフィンガープリントを含み得る。

【００７４】

各プロセスステップの伝達関数は、先のプロセスステップで生成されたＦＰモデルと、現下のプロセスステップの測定値ＦＰとの間の相関から生成され得る。図２のフローチャートの説明で解説された相関を識別する一例の方法は、先のプロセスステップ（例えば、図５のステップＢ）においてプロセスパラメータを意図的に変更し、次にベースラインプロセスレシピを使用して現下のプロセスステップ（例えば、ステップＣ）において処理される入力ウェーハとしてそのウェーハを使用することにより、非ベースラインウェーハのセットを生成することを含む。前のステップＢにおけるＦＰの意図的な変動に対する現下のステップＣにおける測定値ＦＰの応答は、プロセスステップＢにおいて観測されたウェーハ特性からプロセスＣの測定可能な結果の変化を予測する伝達関数として変換行列を生成するための情報を提供する。先述したように、あるプロセスステップ（例えば、ステップＢ）におけるウェーハ特性が後続のプロセスステップ（例えば、ステップＣ）における処理の結果に及ぼす影響をモデリングするために、変換行列以外の伝達関数を生成する他の方法を定義することが可能であり得る。

【００７５】

プロセスステップ（例えば、具体的にはステップＡ）の全ての伝達関数が定義されると、それぞれの係数ベクトルによって表されるステップＡの各測定値ＦＰは、前の処理と相関する伝達ベクトルと、前のプロセスステップのプロセスパラメータから分離された現下ステップベクトルに分解され得る。この分離は、図２及び図４を参照して上述した方法を使用して、ステップＡのプロセスパラメータベクトル（ＡＪ，ＡＫ，ＡＬ）のみを変更することによって作製されたウェーハのセットから取得されたインラインウェーハ計測データのセットから、ステップＡの正確なプロセスモデルを作成するという利点を提供する。

【００７６】

プロセスステップ又はプロセスステップの集合を含む層のフィンガープリント、伝達関数及びプロセスモデルを生成できるようにする方法の説明及び解説は、本明細書では例として提供されており、限定するものと見なされるべきではないことが理解される。先述したように、説明された方法以外の方法も可能であり、これらの代替方法は、本開示に提供される説明及び解説から導出され得る。

【００７７】

下位レベル測定値ＦＰのプロセスモデルは、測定値ＦＰから導出された上位レベルＦＰのプロセスモデルを作成するように拡張され得る。２つのプロセスステップＦＰのＡＦＰ

１及びＡＦＰ２を生成するために使用される組み合わせ及び計算は、測定値ＦＰのプロセスモデルのそれぞれの組み合わせ及び計算により、プロセスステップＡのプロセスモデルを作成するために利用することができる。

【００７８】

図６Ａ～図６Ｃは、下位レベルＦＰの組み合わせ及び計算によってＦＰの階層を生成できるようにする方法の一例を例示する。特に、図６では、図６Ａに例示されるフローチャートを使用して、インライン測定値から取得された測定値ＦＰ（最下位レベル）から始まり、ＥＰＥの層レベルＦＰ（ＥＰＥＡと呼ばれる）が生成される。ＥＰＥＡを計算するために使用され得る一例の式が図６Ｂに表示されている。図６Ｃは、測定値ＦＰの取得に使用されるインラインウェーハ作製計測データを異なるプロセスステップで収集し得ることを解説するための、作製された構造の斜視図を例示する。この例では、プロセスステップは、金属－１層と呼ばれるプロセスモジュールに属する。生のインラインデータは、図６Ｃに例示される、金属－１層に形成された２つのパターニングされた薄膜、すなわち第１の薄膜Ａ及び第２の薄膜Ｂに関わる測定値から収集される。

【００７９】

集合的にＦＰ６７０として示される５つのフィンガープリントは、測定値ＦＰ｛６１２，６２２，６２３，６３２，６４２｝のセットを形成し、それから、上位レベルＦＰが、図６Ａに例示されるフローチャートにおいて取得される。上位レベルＦＰ６１１、６２１、６３１及び６４１は、集合的に比較、計算等６６０として示される、種々の比較、計算又は他のプロセスを使用して測定値ＦＰ６７０から図６Ａのフローにおいて生成される。これらのフィンガープリントは、更に比較及び処理されて、オーバーレイ（ＯＬ）ＡＢ６１０、ピッチウォーク（ＰｗａｌｋＡ）６２０、変数Ａ（ＶａｒＡ）６３０（例えば、トレンチ限界寸法（ＣＤ））及び変数Ｂ（ＶａｒＢ）６４０（例えば、ブロックのＣＤ）の集約、代表又は結果としてのフィンガープリントに到達し得る。下付き文字Ａ及びＢは、それぞれ薄膜Ａ及びＢに関するメトリックを指し、下付き文字ＡＢは、薄膜Ａ及びＢの両方に関わるメトリックに使用される。

【００８０】

図６Ｂに表示される式に次に例示されるように、ＦＰ６１０、６２０、６３０及び６４０を使用してフィンガープリントＥＰＥＡを計算し、これは、パターニングされた薄膜Ａのエッジ配置誤差の層レベルフィンガープリントである。本明細書で解説した方法と同様の方法を適用して、ウェーハ作製製造システム及びベースラインプロセスフローの製造歩留まりに関連する他のフィンガープリントを生成することができる。

【００８１】

図６Ａの一例のフローチャートにおける測定値ＦＰのセットの要素は、オーバーレイ６１２、ライン＃４ＣＤ６２２、ライン＃５ＣＤ６２３、トレンチ＃４ＣＤ６３２及びブロック１Ｔ　ＣＤ６４２である。これらの測定値ＦＰの生のインラインウェーハ作製計測データは、図６Ｃに例示されるように、２つのパターニングされた薄膜、すなわち第１のパターニングされた薄膜Ａ（自己整合型クアッドパターニング（ＳＡＱＰ）技法を使用して形成される）及び第２のパターニングされた薄膜Ｂに関わる。測定値ＦＰオーバーレイ６１２は、これらの２つのパターン間のオーバーレイ誤差の測定値を使用する。フィンガープリントライン＃４ＣＤ６２２及びライン＃５ＣＤ６２３は、パターニングされた薄膜Ａを形成するために行われたＳＡＱＰプロセスステップの１つ又は複数において収集されたライン及びスペース測定値から抽出され、その後、ピッチウォークと呼ばれるマルチパターニングメトリックを計算するために使用される。ＦＰトレンチ＃４ＣＤ６３２は、使い捨てマンドレルの両側における自己整合型スペーサの対の形成を含む処理技法によって作成された、図６Ｃのパターニングされた薄膜Ａの隣接するラインの対間のスペースの測定値から生成され得る。フィンガープリントブロック１Ｔ　ＣＤ６４２は、図６Ｃのパターニングされた薄膜Ｂのパターンにおける限界寸法に関わる幾何学的特徴の線幅測定値を使用する。本明細書に提供される測定値の説明から、結果として生じる層ＦＰ　ＥＰＥＡは、異なるプロセスステップにおいて収集されたインラインウェーハ作製計測データを組み

込むことが明らかである。

【００８２】

図６Ａを引き続き参照すると、種々の比較、計算及び組み合わせ６６０を使用して生成された上位レベルＦＰ６１１、６２１、６３１及び６４１は、パターニングされた薄膜Ａのパターンにおけるフィーチャのエッジ配置誤差の計算に関連する幾つかのメトリックを表す。オーバーレイ６１２から導出されるｙオーバーレイ誤差の大きさは、ＦＰ６１１によって表され、ライン＃４ＣＤ６２２及びライン＃５ＣＤ６２３から導出された薄膜Ａのピッチウォークの大きさは、ＦＰ６２１によって表され、トレンチ＃４ＣＤ６３２は、薄膜Ａにおける幾何学的変数／ＣＤ６３１の大きさを決定し、ブロック１Ｔ　ＣＤ６４２は、薄膜Ｂにおける幾何学的変数／ＣＤ６４１の大きさを決定する。比較、計算及び組み合わせは、種々のタイプであり得、例えば単純な代数演算、解析的線形及び非線形関数、ベクトル関数、幾何学的変換、統計解析、数値法のコンピュータアルゴリズム等、又はそれらの組み合わせであり得る。

【００８３】

先述したように、上位レベルＦＰは、更に処理されて、フィンガープリント（ＯＬ）ＡＢ６１０、ＰｗａｌｋＡ６２０、ＶａｒＡ６３０及びＶａｒＢ６４０に到達し得、これらは、図６Ｂに表示される例示的な式６８０に使用される。この例示的な式は、金属－１層レベルＦＰ、ＥＰＥＡを定義するものであり、このＦＰを使用して、その層のエッジ配置誤差を計算することができる。この式では、（ＭＰ）Ａは、最小ピッチラインの幾何学的ライン－スペース比率を指し、ＰｒｅｇＡは、パターンレジストレーション誤差（フォトマスクに起因するパターニング誤差であり、したがって同じ誤差があらゆる露光フィールドで繰り返される）を指し、ＬｓｐｅｃＡは、パターン設計からの幾何学的ライン仕様を表す。式６８０では、ＶａｒＡ、ＶａｒＢ、ＰｒｅｇＡ、（ＯＬ）ＡＢ及びＰｗａｌｋＡは、フィンガープリントであり、（ＭＰ）Ａ及びＬｓｐｅｃＡは、定数である。項目ＰｒｅｇＡ、（ＭＰ）Ａ及びＬｓｐｅｃＡは、図６Ａに示されていないが、例示として式６８０に使用される追加のフィンガープリント／定数である。式は、フォトマスクの仕様書、処理機器のメーカー仕様書等の独立した情報源から取得される種々の定数を含み得る。

【００８４】

層レベルＦＰ　ＥＰＥＡ等の層レベルＦＰは、パレート分析を行って、層のメトリックに影響し、それにより製造歩留まりに影響する支配的な要因を識別するために使用され得る。例えば、図６Ｂの式を使用する計算は、層のＥＰＥに対するオーバーレイ誤差、薄膜Ａのパターンにおけるピッチウォーク、薄膜Ａにおけるトレンチのトレンチ幅の可変性及び薄膜Ｂにおけるラインの線幅変動の寄与を順位付けすることができる。一例では、そのようなパレート分析は、最も支配的な要因が総エッジ配置誤差の約５５％に寄与するオーバーレイ誤差であり、トレンチ幅変動の影響が約１％のみの寄与でごくわずかであることを明らかにする。この例では、ＥＰＥへの寄与は、ウェーハ上の全ての空間場所を組み合わせることによって取得される集合体である。ウェーハ上の特に脆弱な領域、例えばウェーハのエッジ近くの領域における歩留まり損失を更に解析し得るより的を絞った解析を行い得る。そのような解析は、ベースラインプロセスフロー及び製造歩留まりを改善するために使用することができる。

【００８５】

図７に例示されるより一般的なフローチャートは、システム７００が、プロセスステップの伝達関数及びプロセスモデルを作成して、ベースラインウェーハ作製プロセスフローの任意のステップにおけるメトリックのフィンガープリント、ひいてはウェーハ特性を予測する伝達関数及びプロセスモデルを作成するように、上述した方法及び技法を拡張し得るようにするフローの実施形態を説明している。

【００８６】

図７のフローチャートのブロック７１０において、関連空間情報を有するインライン測定値が、ベースラインプロセスフローに従って処理されたウェーハから取得される。このインラインウェーハ作製計測データは、ブロック７２０に示されるように、測定値ＦＰ及

びベースラインプロセスフロー全体を特性評価する上位レベルＦＰを生成するために使用され得る。次に、ブロック７３０において、ベースラインプロセスフローのプロセスステップにおけるプロセスパラメータを変更することにより、非ベースラインウェーハを生成し得る。高度プロセスフローは、複雑であり、数百ものプロセスステップを伴うため、例えば図６Ｂに表示される層レベルフィンガープリントＥＰＥの式を利用して、上述したものと同様のパレート分析を使用して、製造歩留まりに影響する支配的なプロセスステップを最初に識別することが有利であり得る。ブロック７４０において、インライン測定値及びそれぞれのフィンガープリントは、ブロック７３０において生成された非ベースラインウェーハのウェーハ計測データ及び関連プロセスパラメータ値を使用して取得される。

【００８７】

図７における後続ブロックは、関連空間座標及びプロセスパラメータ値と共にインライン測定値から捕捉された情報をどのように利用して、ベースラインプロセスフローの予測モデルを作成し得るかを例示する。

【００８８】

ブロック７５０において、あるプロセスステップにおけるウェーハ特性の変動と後続プロセスステップにおけるウェーハ特性との間の相関をモデリングするために伝達関数が作成される。先のプロセスステップにおける変動は、処理条件の自然な逸脱によって生じ得るか、又は調整可能なプロセスパラメータを変更することによって意図的に生成され得る。ブロック７６０において、特定のプロセスステップにおいて意図的に変更されたプロセスパラメータに対するフィンガープリントの全ての係数又はパラメータの応答が取得される。

【００８９】

ブロック７７０において、前のプロセスステップにおける処理と相関するフィンガープリント応答の成分が伝達関数から計算される。次に、先のプロセスステップに相関しない成分を区分けし得る。この成分を数学的モデルにフィッティングして、現下のプロセスステップのプロセスモデルを取得する。

【００９０】

ブロック７３０において支配的なプロセスステップとして選択された可能性がある全てのプロセスステップのプロセスモデルは、ブロック７８０に示されるように、上述した方法を使用して生成され得る。ブロック７８０において、ベースラインフィンガープリント、伝達関数及びプロセスモデルを使用して、ベースラインプロセスフローの任意のステップにおける関連空間情報を有するウェーハ特性を予測し得る。

【００９１】

フィンガープリント、伝達関数及びプロセスモデルは、集合的に、ウェーハ製造システムによって使用され得るウェーハ作製プロセスフローの数学的モデルを提供する。そのようなモデルが作成されると、ウェーハの生産における製造歩留まりの所望の改善を達成するために、製造システムは、そのようなモデルを使用して、プロセスステップの１つ又は複数を予測、最適化、調整及び／又は制御することができる。換言すれば、モデルを使用して、プロセス条件を修正／改変し得、それにより半導体ダイを含む複数のウェーハをより高い歩留まりで製造することができ、その結果として製造コストが低下する。

【００９２】

例えば、ベースラインフィンガープリントを解析することによって識別された支配的なプロセスステップをより頻繁に監視することができる。生産ラインを監視するために収集されたインライン計測データから生成されたフィンガープリントは、仕様を満たすことができないウェーハ（不適合と呼ばれる）を検出することができるだけでなく、不適合性が高い領域又は不適合の密度が高い領域の空間座標を識別することもできる。そのような情報は、系統的不適合の検出及び判定に有利である。プロセスモデルは、製造歩留まり損失の原因となる可能性があり得るもう１つの機器を識別し、システムが単一ツール又はマルチツールのプロセス制御戦略を採用するための情報を提供するために使用され得る。更に、ＡＰＣツールと併用されるとき、モデルは、製造システムが、不適合を改良して歩留ま

り損失を回復するために特定のプロセスパラメータへの調整を示唆又は推奨することを補助し得る。場合により、システムは、特定のプロセスパラメータを直接調整し得る。

【００９３】

追加として、プロセスモデル及び伝達関数は、ベースラインプロセスフローを改善するために使用され得る。例えば、システムは、プロセスモデルを使用して、最適化されたフィンガープリントがＥＰＥ等のターゲットメトリックを改善するようにプロセスパラメータを最適化し得る。最適化されたプロセスパラメータは、新しい基準計画（ＰＯＲ）としてプロセスに供給され得、それによりベースラインプロセスフローの製造歩留まりを改善し得る。

【００９４】

これについてこのように説明し得る。システムは、ターゲット半導体ウェーハの関連付けられた予測可能な特性の値のターゲット範囲を取得する。このターゲット範囲は、半導体ウェーハ作製プロセスによって生産される許容可能又は望ましい半導体ウェーハの許容可能又は望ましい値の範囲である。例えば、顧客がＥＰＥの許容可能な値の範囲を指定し得る。

【００９５】

プロセスモデルを使用して、システムは、半導体ウェーハ作製プロセスによって生産される半導体ウェーハの関連付けられた予測可能な特性の値が、取得されたターゲット範囲内にあるように、半導体ウェーハフィンガープリントのプロセスパラメータの１つ又は複数を最適化する。すなわち、プロセスモデルを使用して、システムは、取得されたターゲット範囲内に入ることになる関連付けられた予測可能な特性の値を効果的に生み出すプロセスパラメータの１つ又は複数の値を計算する。当然ながら、幾つかの実装形態では、範囲は、ターゲット値を中心としたプラス／マイナスの範囲であり得る。

【００９６】

更に、このプロセスモデルは空間特性を維持するため、不適合性が高い特定の領域におけるＥＰＥに影響するプロセスパラメータを識別し、製造歩留まりを改善するために調整することができる。

【００９７】

図２及び図７並びに関連付けられた図１、図３～図６に例示された方法は、実行されたとき、計算デバイスのプロセッサに、半導体ウェーハ作製プロセスと連携して動作を行わせる命令を含む非一時的コンピュータ可読記憶媒体において又はそれを使用して実施され得る。加えて、図２及び図７のステップを行うための命令の幾つかは、異なる非一時的コンピュータ可読記憶媒体の別個の場所に記憶され得、異なる計算デバイスの異なるプロセッサで行われるように構成され得る。非一時的コンピュータ可読記憶媒体の例には、不揮発性固体メモリを含む種々のタイプのメモリ及び他の記憶媒体がある。例えば、非一時的コンピュータ可読記憶媒体は、磁気記憶装置（例えば、ハードディスク、フロッピーディスク及び磁気ストリップ）、光ディスク（例えば、コンパクトディスク（ＣＤ）及びデジタル多用途ディスク（ＤＶＤ））、スマートカード、フラッシュメモリデバイス（例えば、サムドライブ、スティック、キードライブ及びセキュアデジタル（ＳＤ）カード）並びに揮発性メモリ及び不揮発性メモリ（例えば、ランダムアクセスメモリ（ＲＡＭ）、読み取り専用メモリ（ＲＯＭ））を含み得るが、これらに限定されない。

【００９８】

例えば、図２のステップ２２０～２９０は、プロセスモデルの開発をもたらす、１つ又は複数のプロセッサで実行されるように構成された命令であり得る。同様に、図７のステップ７２０～７８０は、プロセスモデルの開発をもたらす、１つ又は複数のプロセッサで実行されるように構成され得る命令であり得る。

【００９９】

図１～図７に関連して説明された技法は、フィンガープリントを生成し、フィンガープリントを使用してプロセスモードを作成する方法について説明する。フィンガープリントに基づくモデルの一応用例では、プロセス又はプロセスツールのあらゆる異常を検出する

方法が提供され得る。フィンガープリントに基づくモデルの応用例の別の実施形態では、欠陥を検出する方法が提供される。

【０１００】

プロセス変数に対するモデルフィンガープリントの変化率を通したプロセスモデルの感度計算が提供される。フィンガープリント感度のテーブルが生成され、プロセス変数がフィンガープリント感度のセットに関連付けられる。入力基板のフィンガープリントは、プロセスモデルで使用される同じフィンガープリント方法を適用することにより、生産プロセスを通して監視される。入力基板フィンガープリントと、プロセスモデルを使用して計算される予測フィンガープリントとの間の差分の計算が行われる。この差分フィンガープリントは、差分の原因である可能性が最も高いプロセス変数を見出すためにフィンガープリント感度のテーブルに対して比較される。次に、この可能性を順位付けするチャートが作成され、ユーザに報告され得る。プロセス変数と基板上の実測値との間の空間的関係が取得され得る。フィンガープリント感度を通した直接相関は、欠陥のあるプロセスツールを指摘する能力を向上させる。別の代替形態では、フィンガープリントプロセスは、基板上に形成された欠陥を検出するために利用され得る。例えば、特定のプロセスステップにおいて基板上に形成される可能性のある微粒子は、本明細書に説明されるフィンガープリント比較プロセスの使用を通して検出され得る。

【０１０１】

欠陥のあるプロセスツール（又はプロセスツールの部品）は、被処理基板のフィンガープリントに有意な影響を与える可能性がある。同様に、欠陥は、被処理基板のフィンガープリントに有意な影響を与える可能性がある。開示される方法は、プロセス変数関連のドリフトを検出して、欠陥のあるプロセスツール及び／若しくは部品を早期に識別し、且つ／又はプロセスステップにおける欠陥の形成を検出するためにフィンガープリントモデリングを使用する詳細を提示する。開示される技法は、欠陥のあるツール及び／又は欠陥を検出するためにセンサ入力を必要としない。そのため、寄与するフィンガープリント成分を有するプロセス変数を分離し、プロセス変数感度に基づいて検出することにより、基板処理プロセスの問題の根本原因又は欠陥のあるツール及び／若しくは部品を識別する代替方法が提供される。同様に、開示される方法は、プロセスステップにおける欠陥の形成を検出するためにフィンガープリントモデリングを使用する詳細を提示する。開示される技法は、欠陥へのセンサ入力を必要としない。そのため、フィンガープリント技法の使用により、欠陥を形成する基板処理問題を識別する代替方法が提供される。

【０１０２】

プロセス欠陥検出のための一実施形態では、プロセスモデルが（例えば、上述のように）作成された後、方法及びシステムは、各プロセス変数（又は「ノブ」）に対するフィンガープリントの変化率を通してプロセスモデルの感度を計算することを伴う。フィンガープリント感度のテーブルがこの方法を通して生成され、各プロセス変数はフィンガープリント感度のセットに関連付けられる。このテーブルは、後述するように監視ステップで使用するために記憶され得る。

【０１０３】

一実施形態では、システムは、プロセスモデルで使用される同じフィンガープリント方法を適用することにより、生産ラインを通して入力基板（例えば、入力半導体ウェーハ）のフィンガープリントを監視する。次に、システムは、入力ウェーハフィンガープリントと、プロセスモデルを使用して計算される予測フィンガープリントとの間の差分を計算する。この差分フィンガープリントは、差分の原因である可能性が最も高いプロセス変数を見出すためにフィンガープリント感度のテーブルに対して比較される。次に、この可能性を順位付けするチャートが作成され、ユーザに報告され得る。

【０１０４】

プロセス変数関連の欠陥相関を報告するこのようなチャートを生成する方法は、測定された計測以外のセンサに依拠しないという点でユニークである。センサを使用する従来の方法は、基板に間接的にのみ影響する他のタイプの測定に依存する。フィンガープリント

に基づく方法は、プロセス変数と基板上の実測値との間の空間的関係を検出することが可能である。フィンガープリント感度を通した直接相関は、欠陥のあるプロセス部品を指摘し、且つウェーハ性能不良を早期検出する能力を向上させる。

【０１０５】

欠陥のあるプロセスツール（又はプロセスツールの部品）は、被処理ウェーハのフィンガープリントに有意な影響を与える可能性がある。開示される方法は、プロセス変数関連のドリフトを検出して、欠陥のあるプロセスツール及び／又は部品を早期に識別するために、フィンガープリントモデリングを使用する詳細を提示する。開示される技法は、欠陥のあるツール及び／又は部品を検出するためにセンサ入力を必要としない。そのため、寄与するフィンガープリント成分を有するプロセス変数を分離し、プロセス変数感度に基づいて検出することにより、基板処理プロセスの問題の根本原因又は欠陥のあるツール及び／若しくは部品を識別する代替方法が提供される。

【０１０６】

図８は、半導体ウェーハと共に使用するための、フィンガープリントに基づく欠陥検出技法を実施するための例示的なワークフロー図を例示する。図８に示すように、最初に、ステップ８００において、半導体プロセスフローの１つ又は複数のプロセスステップについて実験計画が行われる。実験計画は、典型的なプロセス環境で潜在的な変化又は変動が生じることが予期され得る多様なプロセス条件及び変数を考慮し得る。実験プロセスは、多数の異なる実験ウェーハ上でそれらのプロセス条件及び変数を単独で且つ／又は種々の組み合わせで変更し得る。次に、ステップ８０５に示すように、実験における各ウェーハについてウェーハデータを収集し得る。ステップ８１０に示すように、フィンガープリントを作成し得る。実験データを使用して、ステップ８１５でプロセスモデルが作成される。プロセスモデルは、全てのプロセス条件の関数としてフィンガープリント成分を提供し得る。

【０１０７】

図８のステップ８１５でプロセスモデルが作成されるとき、そのプロセスモデルは、生産製造プロセスで利用されるウェーハに適用され得る。そのため、製造プロセスフローの特定点における生産製造プロセスの各ウェーハについて、ステップ８２０に示すようにウェーハデータを収集し得る。次に、ステップ８２５に示すように、フィンガープリントを作成し得る。ステップ８１５で作成されたプロセスモデルを利用して、ステップ８２５のフィンガープリントとステップ８３０で計算されたモデル化フィンガープリントとの間の差分をステップ８３５で作成し得る。図１～図７に関して上述した技法は、ステップ８３５の計算された差分を作成するために利用され得る。

【０１０８】

次に、ステップ８３５の計算された差分は、ステップ８１５のプロセスモデルと併せて利用することができ、したがって、ステップ８４０において、プロセスモデル感度に対する計算された差分の比較が行われる。次に、ステップ８４０の比較をステップ８４５で使用して、予期されるモデル化フィンガープリントと比較してウェーハフィンガープリント上で検出された差分を引き起こした、欠陥のあるプロセス変数（「ノブ」）を検出することができる。このようにして、フィンガープリントプロセスを利用して、ウェーハフィンガープリントへの変化を引き起こしたプロセスフロー内の欠陥を検出することができる。

【０１０９】

図９～図１４は、本明細書に説明された技法の例示的な応用例を提供する。より具体的には、これらの図は、半導体ウェーハ上に薄膜が形成される一例のプロセスステップを例示する。この例は、薄膜形成プロセスの欠陥のあるプロセス変数を検出するためのフィンガープリントモデルの使用法を例示する。半導体処理技法には、各特定のプロセスステップ（表面準備、イオン注入、熱ステップ（例えば、急速熱酸化（ＲＴＯ）、急速熱アニール（ＲＴＡ）、レーザアニール等）、フォトリソグラフィステップ（例えば、レジストコート、露光、現像、レジストストリッピング等）、電気メッキ、プラズマ堆積、プラズマエッチング、ウェットエッチング、化学機械研磨（ＣＭＰ）等のステップであるが、これ

らに限定されない）に対する広範囲のプロセス変数が含まれる。これらのプロセスステップのいずれかに対する特定のプロセス変数は、温度、圧力、ガス、ガス流量、電力設定、電圧設定、電流設定、スピン速度、分注量、液体、液体流量、液体密度、時間等を含むが、これらに限定されず、広範囲であり得る。更に、任意の特定のプロセスステップは、各サブステップに対する変数のセットをそれぞれ有する一連のサブステップで構成され得る（例えば、プラズマエッチングプロセス又はプラズマ堆積プロセスは、２つ、３つ、４つ又は更により多くのステップで構成され得る）。

【０１１０】

図９は、薄膜形成プロセスに対する各種のプロセス変数（この場合、Ｐａｒ１～Ｐａｒ１９として示される１９個のプロセスモデル項９００）を例示する例示的なテーブルを例示する。図９に示すように、項は、感度ランク（ランクが小さいほど感度が高い）によって列挙される。図示の例では、Ｐａｒ４が最も小さいランクを有し、したがって最も感度が高い。対応するフィンガープリント項９０５も示されている。図１０は、モニターウェーハのグリッド全体にわたって空間的に収集された膜厚生データを例示する。図１０は、フィンガープリントモデル１０４０によって提供される、対応する係数強度１０２０及び係数１０３０も例示する。

【０１１１】

図８のワークフロー図を参照すると、図１０の係数強度１０２０及び係数１０３０は、図８のステップ８２５のフィンガープリントを提供する。図１１Ａ及び図１１Ｂは、膜厚例に関して図８のワークフローステップ８２５、８３０及び８３５を例示する。より具体的には、図１１Ａは、推定「良品」ウェーハ、この例ではプロセス欠陥なしに処理されたウェーハに適用されるステップを例示する。図１１Ｂは、処理中にプロセス欠陥が生じた「不良」ウェーハに適用されるステップを例示する。図１１Ａに示すように、良品ウェーハの係数及び係数強度は、フィンガープリント１１１０を作成する（図８のステップ８２５等）。予測された係数及び係数強度は、プロセスモデルを使用して計算されて、モデル化フィンガープリント１１２０を作成する（図８のステップ８３０等）。次に、フィンガープリント１１１０とモデル化フィンガープリント１１２０との間の差分を計算することにより、差分フィンガープリント１１３０が取得される。図１１Ｂは、この例で適用される、欠陥のある生産プロセスが施されたウェーハに対するワークフローステップを例示する。図１１Ｂに示すように、不良ウェーハの係数及び係数強度は、フィンガープリント１１４０を作成する（図８のステップ８２５等）。予測された係数及び係数強度は、プロセスモデルを使用して計算されて、モデル化フィンガープリント１１５０を作成する（図８のステップ８３０等）。次に、フィンガープリント１１４０とモデル化フィンガープリント１１５０との間の差分を計算することにより、差分フィンガープリント１１６０が取得される。

【０１１２】

次に、差分フィンガープリント（例えば、図１１Ａの差分フィンガープリント１１３０及び図１１Ｂの差分フィンガープリント１１６０）をプロセスモデル感度に対して比較して、特定のプロセス変数に欠陥があるかどうかの判定を促進することができる。図１２Ａ及び図１２Ｂは、このような比較の例示的な結果を例示する。例えば、差分フィンガープリント１１３０を使用することは、予測フィンガープリントとのいかなる差分も、欠陥のあるプロセス変数のいずれか１つ（又はセット）によって引き起こされていないことを示し得る。図１２Ａに示すように、１９個のプロセス変数（「プロセスモデル項」）は、欠陥のある高い確率を呈するプロセスモデルがないことを示す。より具体的には、図１２Ａは、特定のプロセス変数の欠陥確率１２０４に対してプロセス変数（プロセスモデル項１２０２）をプロットしたチャート１２１０を例示する。この例では、解析されたウェーハは「良品」ウェーハ、すなわち欠陥を示す特定の不良な空間膜厚プロファイルを呈さないウェーハであったため、特定のプロセス変数が顕著な高レベルの欠陥確率を呈することはない。解析に基づいて、実際のウェーハとモデル化された結果との間の差分は、特定の欠陥のあるプロセス変数を示していない。しかしながら、図１２Ｂは、「不良」ウェーハの

確率を示しており、検出された欠陥を明示する。より具体的には、図１２Ｂは、特定のプロセス変数の欠陥確率１２０４に対してプロセス変数（プロセスモデル項１２０２）をプロットしたチャート１２２０を例示する。この例では、プロセス変数の１つに関する欠陥が検出されている。図示のように、プロセスモデル項１０から、９０％を超える高い欠陥可能性１２３０が示されている。解析に基づいて、実際のウェーハ（この場合には不良ウェーハ）とモデル化された結果との間の差分は、プロセス変数１０に関する欠陥を示す。このようにして、ウェーハの処理における欠陥は、フィンガープリント技法を利用して検出及び識別され得る。いつプロセス変数に欠陥があると識別されるべきかを識別するために、各プロセス変数に対して所定の欠陥確率レベルを確立することができる。

【０１１３】

先述したように、本明細書に説明されたフィンガープリント解析技法は、例えば、生じた粒子、パターン崩壊、ボイド、ホットスポット等の、ウェーハ上の局所的欠陥を識別するために利用することもできる。より具体的には、本明細書に説明されたプロセスモデリング技法は、欠陥検出技法と組み合わせることができる。欠陥検出は、ウェーハから取得したデータ内の空間的に局所的な大きいスパイクを探すことによって識別され得るが、そのような技法は、欠陥の誤検出をもたらす場合がある。欠陥の誤検出を低減するために、潜在的なプロセス変数変動も解析と組み合わせることができる。そのため、実験計画プロセスを通して作成されるプロセスモデルは、欠陥解析プロセスで利用される。プロセス変数の変動を考慮することにより、誤検出の発生を低減する、よりロバストな欠陥検出プロセスが達成され得る。

【０１１４】

図１３は、図８の欠陥検出技法と同様の半導体ウェーハと共に使用するための、フィンガープリントに基づく欠陥検出技法を実施するための例示的なワークフロー図を例示する。図１３に示すように、図８と同様のステップ８００、８０５、８１０及び８１５を使用してプロセスモデルを作成する。同様に、ステップ８２０、８３０及び８３５は、図８の同じステップ番号と同様に、図１３に示すように利用され得る。欠陥は、局所的な高周波スパイクに関連付けられ、フィンガープリントは通常長距離の空間変動を捕捉するため、生産ウェーハの場合、フィンガープリント作成ステップは必要とされないことが留意される。そのため、ステップ８３５の計算された差分は、ステップ８２０で収集されたウェーハデータ及びステップ８３０で計算されたモデル化フィンガープリントから取得され得る。ステップ８３５で取得した計算された差分を用いて、次にステップ１３１０において、計算された差分の解析及びプロセスモデルから提供される潜在的なプロセス変数変化の影響の考察を通して欠陥が検出され得る。このようにして、解析により、潜在的なプロセス変数変化の影響が考慮されるため、データ内の空間的に局所的なスパイクをより確信的に欠陥として識別することができる。このようにして、フィンガープリントに基づく欠陥検出を利用して、欠陥の存在のより正確な評価を提供することができる。

【０１１５】

図１４～図１６は、本明細書に説明された処理技法を使用するための例示的な方法を例示する。図１４～図１６の実施形態は、単なる例示であり、追加の方法は、本明細書に説明された技法を利用し得ることを認識されたい。更に、説明されるステップは、排他的であることを意図しないため、図１４～図１６に示す方法に追加の処理ステップを追加し得る。更に、ステップの順序は、異なる順序が生じる場合があり、且つ／又は種々のステップが組み合わされて若しくは同時に行われ得るため、図１４～図１６に示す順序に限定されない。

【０１１６】

図１４は、半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法を例示し、作製プロセスは、少なくとも１つのプロセスステップを含み、少なくとも１つのプロセスステップは、複数のプロセス変数に関連付けられる。図に示すように、ステップ１４０５は、少なくとも１つのプロセスステップに対して実験計画プロセスを行うことを含み、複数のプロセス変数は、複数の実験計画半導体ウェーハに対して変更される。ステップ１

４１０は、複数の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することを含み、実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる。ステップ１４１５は、各実験計画半導体ウェーハについて、取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することを含む。ステップ１４２０は、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、少なくとも１つのプロセスステップのプロセスモデルを作成することを含む。ステップ１４２５は、生産半導体ウェーハ上で少なくとも１つのプロセスステップを行うことを含む。ステップ１４３０は、生産半導体ウェーハの第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することを含み、生産ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる。ステップ１４３５は、取得された生産半導体ウェーハ測定値から生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリントを作成することを含む。ステップ１４４０は、生産半導体ウェーハプロセスステップフィンガープリント及びプロセスモデルを利用して、少なくとも１つのプロセスステップの欠陥のあるプロセス変数を検出することを含む。

【０１１７】

図１５は、半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価する方法を例示し、作製プロセスは、複数のプロセスステップを含み、複数のプロセスステップの少なくとも第１のものは、複数のプロセス変数に関連付けられる。本方法は、実験計画プロセスを行うことを含み、実験計画プロセスは、ステップ１５０５～１５２０を含む。ステップ１５０５は、一連の実験計画半導体ウェーハについて、一連の実験計画半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うことを含み、複数のプロセス変数の値の少なくとも１つ又は複数は、一連の実験計画半導体ウェーハのそれぞれに対して変更される。ステップ１５１０は、一連の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画ウェーハ測定値を取得することを含み、実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、実験計画ウェーハ測定値が取得される実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる。ステップ１５１５は、各実験計画半導体ウェーハについて、取得された実験計画ウェーハ測定値から実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することを含む。ステップ１５２０は、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、複数のプロセスステップの第１のもののプロセスモデルを作成することを含む。次に、本方法は、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うステップ１５２５を含む。ステップ１５３０は、生産半導体ウェーハの第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することを含み、生産ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる。ステップ１５３５は、取得された生産ウェーハ測定値から生産ウェーハプロセスステップフィンガープリントを作成することを含む。ステップ１５４０は、生産ウェーハプロセスステップフィンガープリント及びプロセスモデルを利用して、欠陥のあるプロセス変数を検出することを含む。

【０１１８】

図１６は、半導体ウェーハを製造するための作製プロセスを特性評価することを含む方法を例示し、作製プロセスは、複数のプロセスステップを含み、複数のプロセスステップの少なくとも第１のものは、複数のプロセス変数に関連付けられる。本方法は、実験計画プロセスを行うことを含み、実験計画プロセスは、ステップ１６０５～１６２０を含む。ステップ１６０５は、一連の実験計画半導体ウェーハについて、一連の実験計画半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うことを含み、複数のプロセス変数の値の少なくとも１つ又は複数は、一連の実験計画半導体ウェーハのそれぞれに対して変更される。ステップ１６１０は、一連の実験計画半導体ウェーハから第１の特性の実験計画測定値を取得することを含み、実験計画ウェーハ測定値のそれぞれは、実験計画ウェーハ測定値が取得される実験計画半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる。ステップ１６１５は、各実験計画半導体ウェーハについて、取得された実験計画ウェーハ測定値か

ら実験計画プロセスステップフィンガープリントを作成して、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを提供することを含む。ステップ１６２０は、複数の実験計画プロセスステップフィンガープリントを利用して、複数のプロセスステップの第１のもののプロセスモデルを作成することを含む。ステップ１６２５は、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上で複数のプロセスステップの第１のものを行うことを含む。ステップ１６３０は、少なくとも１つの生産半導体ウェーハの第１の特性の生産ウェーハ測定値を取得することを含み、生産ウェーハ測定値のそれぞれは、測定値が取得される少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の空間場所に関連付けられる。ステップ１６３５は、複数のプロセスステップの第１のもののプロセスモデルを利用して、生産半導体ウェーハのモデル化フィンガープリントを計算することを含む。ステップ１６４０は、生産半導体ウェーハの計算されたモデル化フィンガープリント及びプロセスモデルを利用して、少なくとも１つの生産半導体ウェーハ上の欠陥を検出することを含み、プロセスモデルは、欠陥検出の正確性を改善するようにプロセス変数の変動を考慮するために利用される。

【０１１９】

本明細書に開示される技法で利用される基板は、材料のエッチング及びパターニングが望ましい任意の基板であり得る。例えば、一実施形態では、基板は、その上に１つ又は複数の半導体処理層（それらの全てが一緒に基板を構成し得る）が形成された半導体基板であり得る。一実施形態では、基板は、多様な構造及び層をもたらす複数の半導体処理ステップが施された基板であり得、それらの半導体処理ステップの全てが基板処理技術において既知である。一実施形態では、基板は、形成された種々の構造及び層を含む半導体ウェーハであり得る。一例では、マイクロ電子デバイスが基板上に形成される。

【０１２０】

本発明の更なる修正形態及び代替実施形態は、本明細書の記載を考慮して当業者に明らかになるであろう。したがって、本明細書は、例示としてのみ解釈されるべきであり、本発明を遂行する方法を当業者に教示する目的のためのものである。本明細書に図示し、説明した本発明の形態及び方法は、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。本明細書に例示し、説明したものの代わりに均等な技法を使用することができ、本発明の特定の特徴は、他の特徴の使用とは無関係に利用することができ、これらは、全て本発明の本明細書の記載の利益を享受した後に当業者に明らかになるであろう。

【図面】

【図１Ａ】

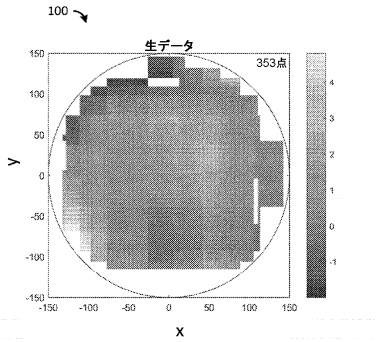


図1A

【図１Ｂ】

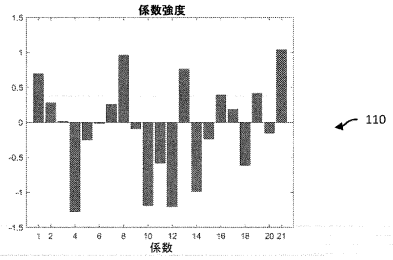


図1B

【図１Ｃ】

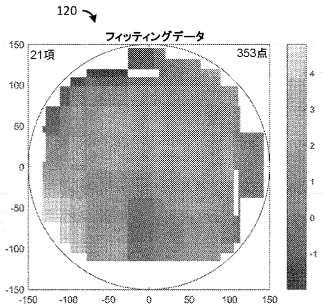


図1C

【図２】

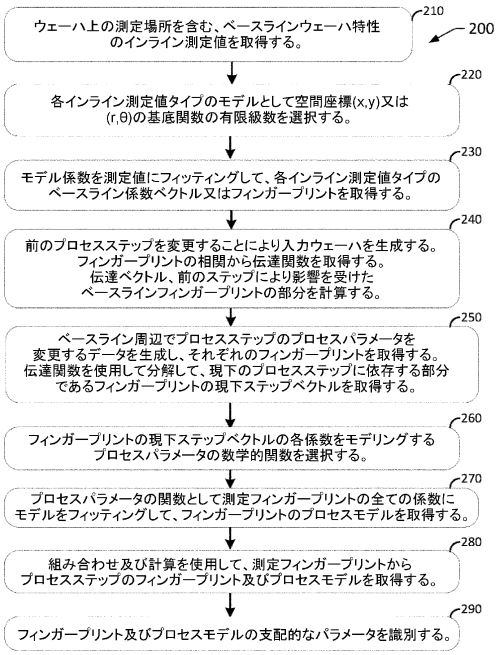


図2

【図３Ａ】

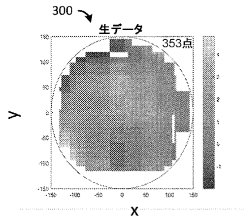


図3A

【図３Ｂ】

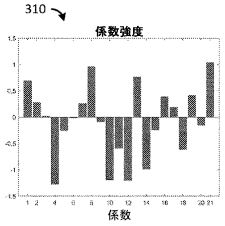


図3B

【図３Ｃ】

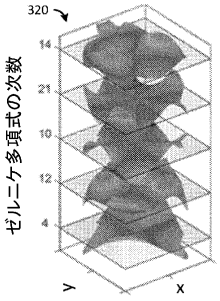


図3C

【図４Ａ】

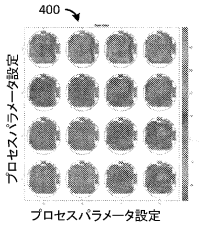


図4A

【図４Ｂ】

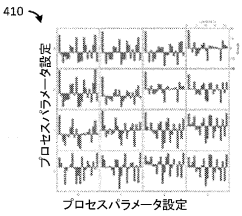


図4B

【図４Ｃ】

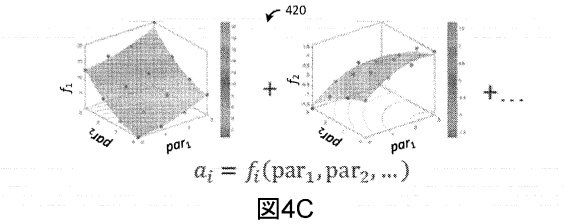


図4C

【図４Ｄ】

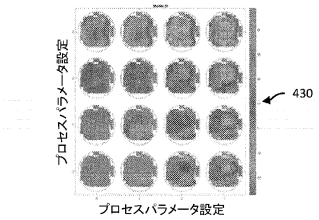


図4D

【図５】

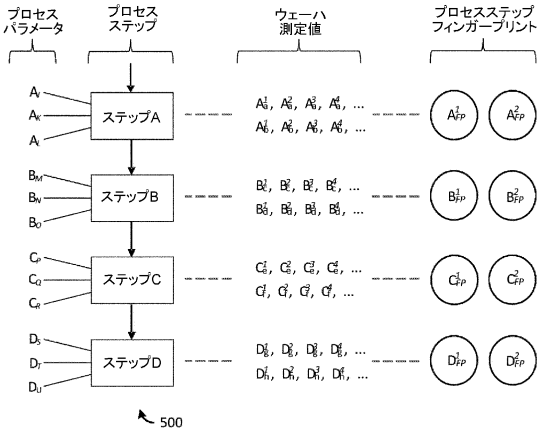


図5

【図６Ａ】

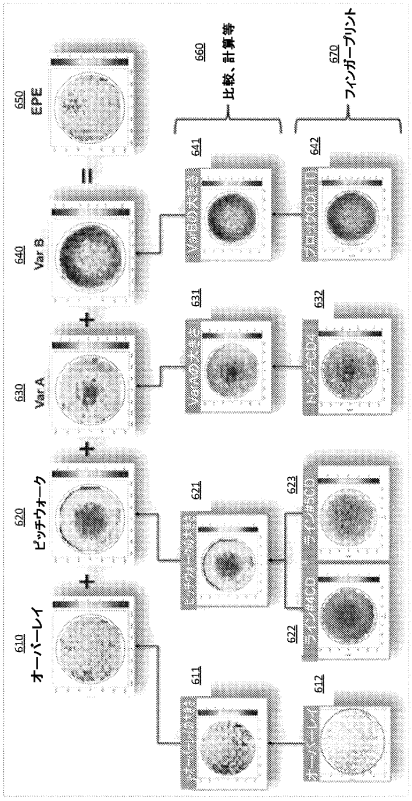


図6A

【図６Ｂ】

$$(EPE)_A = [((Var_B - Var_A) \times (MP)_{A1} - Preg_{A1}) - Lspec_{A1}] - (OL)_{AB} + Pwalk_A$$

680

図6B

【図６Ｃ】

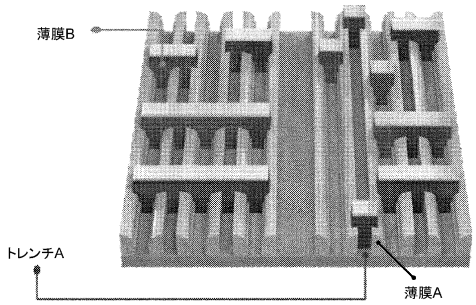


図6C

【図７】

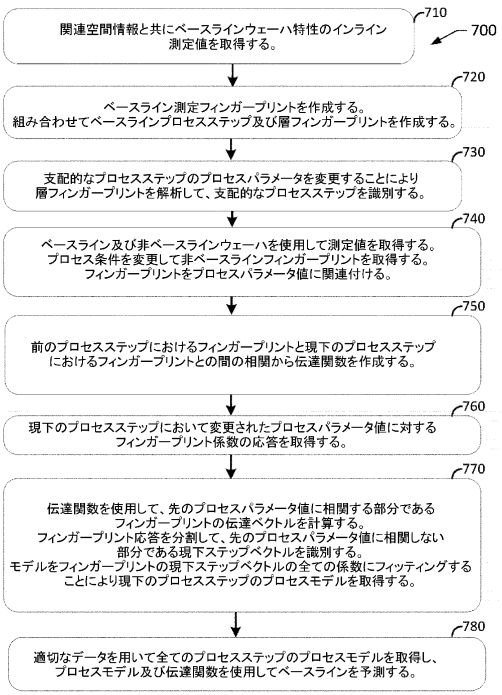


図7

【図８】

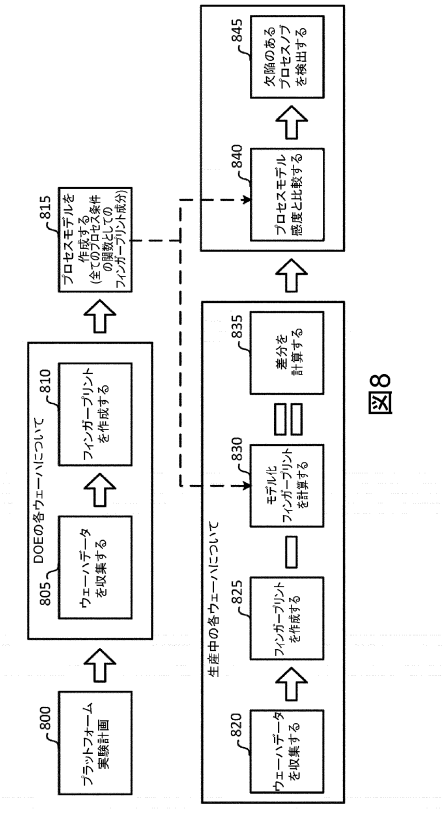


図8

【図９】

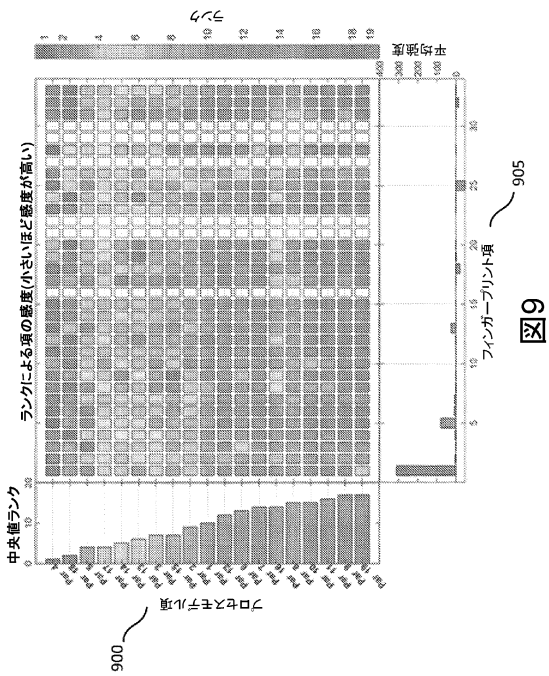


図9

【図１０】

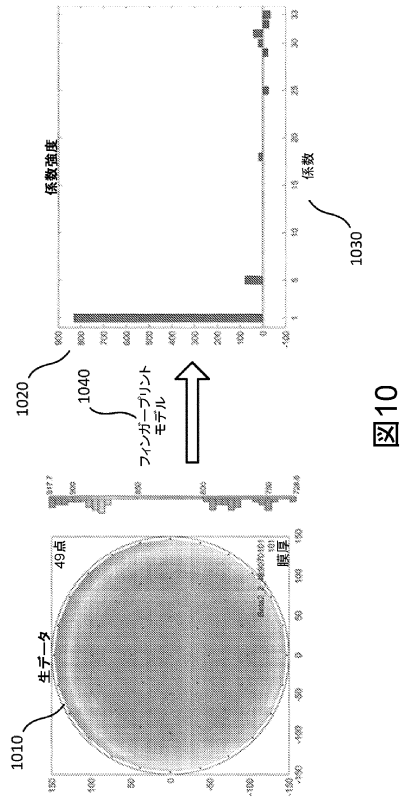


図10

【図１１Ａ】

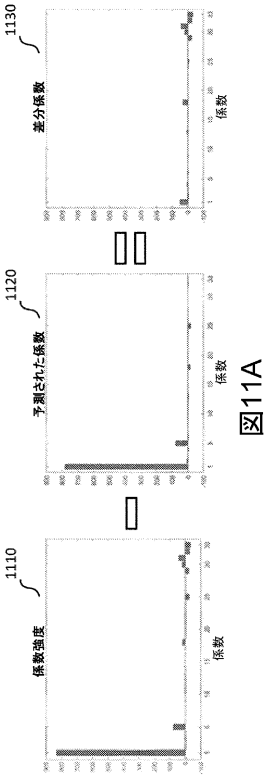


図11A

【図１１Ｂ】

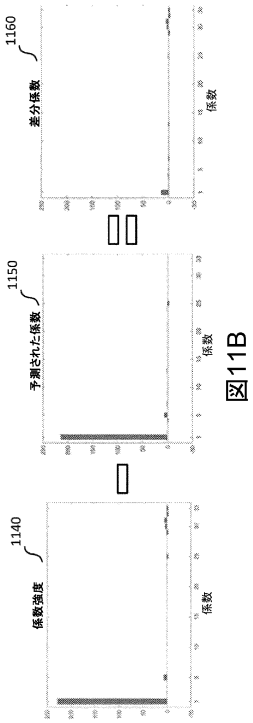


図11B

【図１２Ａ】

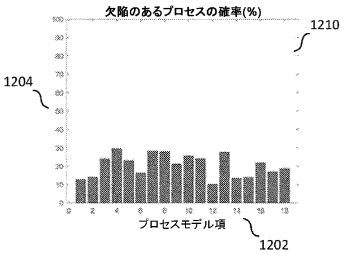


図12A

【図１２Ｂ】

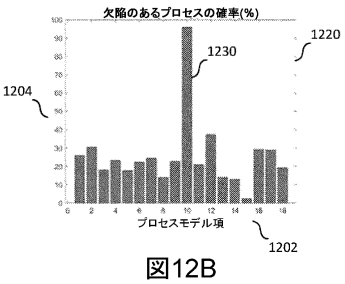


図12B

【図１３】

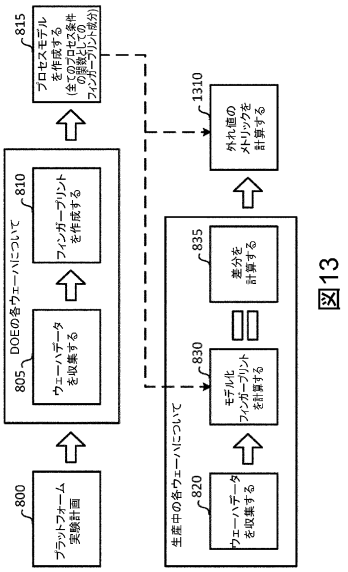


図13

【図１４Ａ】

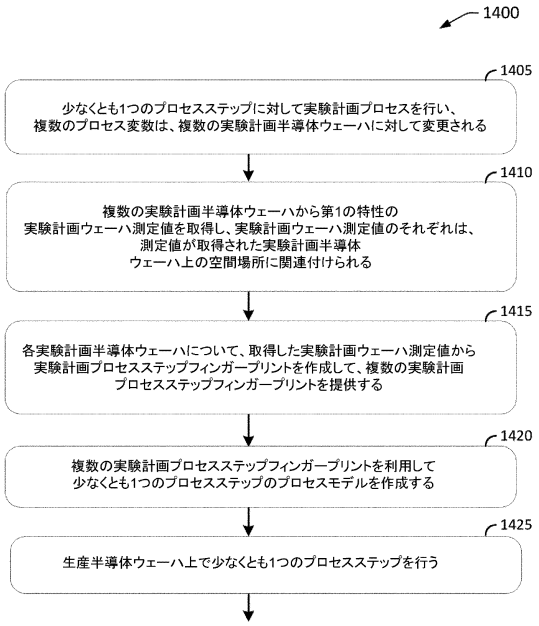


図14Ａ

【図１４Ｂ】

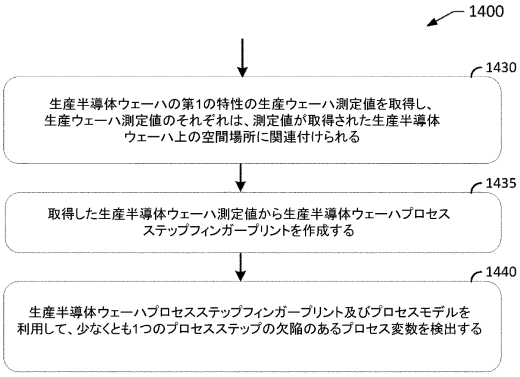


図14Ｂ

【図１５Ａ】

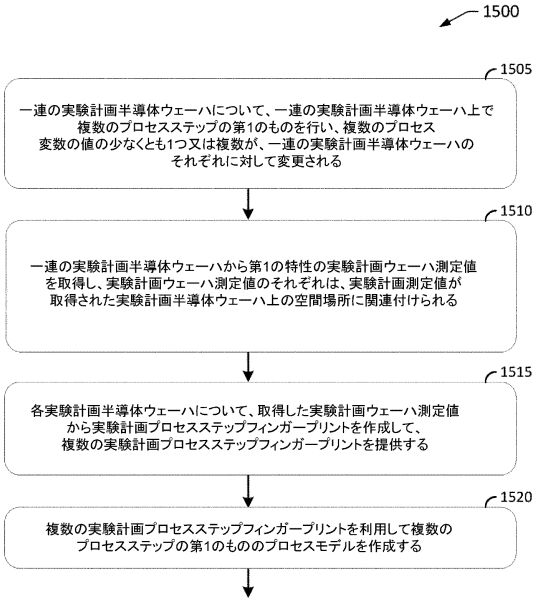


図15Ａ

【図１５Ｂ】

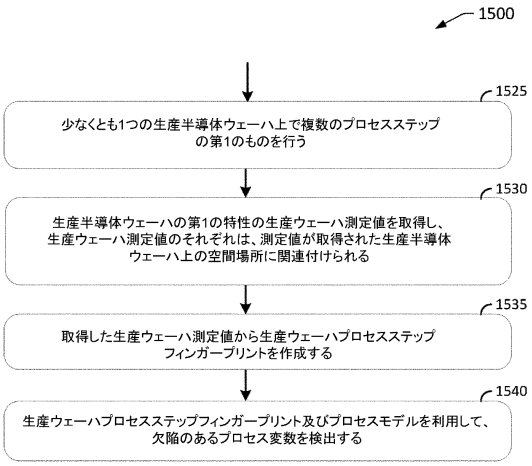


図15Ｂ

【図１６Ａ】

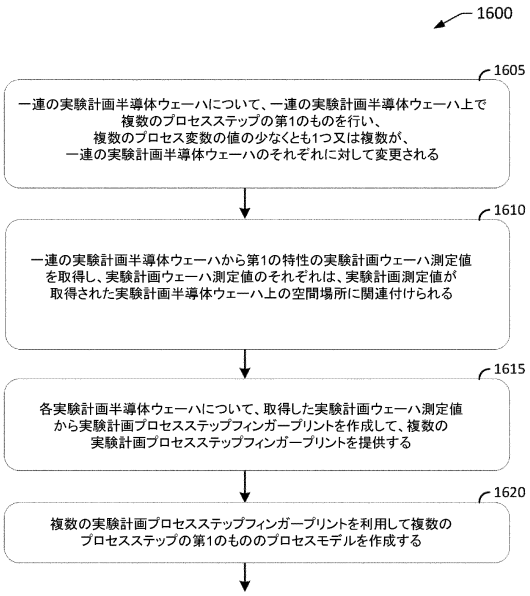


図16Ａ

【図１６Ｂ】

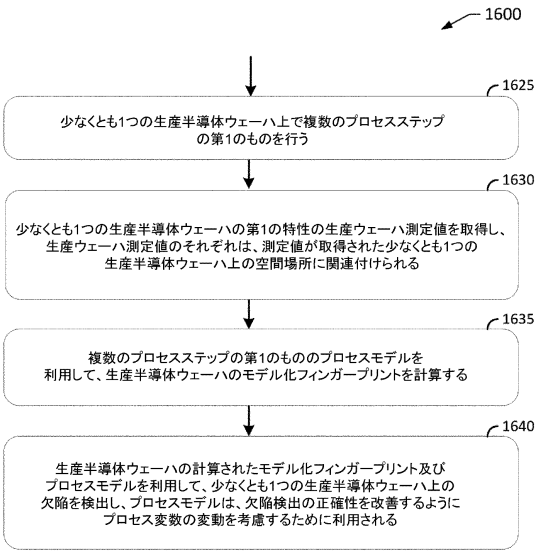


図16Ｂ

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US2022/044531

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L 21/02(2006.01)i; **H01L 21/67**(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L 21/02(2006.01); G01B 5/28(2006.01); G03F 7/20(2006.01); G06N 99/00(2010.01); G06T 7/00(2006.01); H01L 21/66(2006.01); H01L 21/67(2006.01)

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Korean utility models and applications for utility models
Japanese utility models and applications for utility models

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

eKOMPASS(KIPO internal) & Keywords: fingerprint, model, experiment, defect, measurement

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2019-0214285 A1 (KLA-TENCOR CORPORATION) 11 July 2019 (2019-07-11) paragraphs [0021]-[0036], claims 1-8 and figures 1-6	1-20
A	US 2019-0271919 A1 (ASML NETHERLANDS B.V.) 05 September 2019 (2019-09-05) claims 1-2	1-20
A	US 2018-0330493 A1 (MENTOR GRAPHICS CORPORATION) 15 November 2018 (2018-11-15) the entire document	1-20
A	US 2003-0212469 A1 (SHENG-JEN WANG et al.) 13 November 2003 (2003-11-13) the entire document	1-20
A	US 2006-0276976 A1 (M. BRANDON STEELE et al.) 07 December 2006 (2006-12-07) the entire document	1-20

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
13 January 2023	**13 January 2023**
Name and mailing address of the ISA/KR **Korean Intellectual Property Office** **189 Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon** **35208, Republic of Korea** Facsimile No. **+82-42-481-8578**	Authorized officer **PARK, Hye Lyun** Telephone No. **+82-42-481-3463**

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2022)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/US2022/044531

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 2019-0214285 A1	11 July 2019	CN 111566789 A	21 August 2020
		CN 111566789 B	03 December 2021
		IL 275718 A	31 August 2020
		IL 275718 B	01 December 2022
		JP 2021-509772 A	01 April 2021
		JP 7097447 B2	07 July 2022
		KR 10-2020-0096992 A	14 August 2020
		KR 10-2445989 B1	21 September 2022
		TW 201937625 A	16 September 2019
		TW I759574 B	01 April 2022
		US 10580673 B2	03 March 2020
		WO 2019-136015 A1	11 July 2019
US 2019-0271919 A1	05 September 2019	CN 110168447 A	23 August 2019
		CN 110168447 B	06 July 2021
		CN 113376976 A	10 September 2021
		EP 3523698 A1	14 August 2019
		KR 10-2019-0086555 A	22 July 2019
		KR 10-2021-0084671 A	07 July 2021
		KR 10-2273132 B1	05 July 2021
		KR 10-2373843 B1	11 March 2022
		TW 201905968 A	01 February 2019
		TW 202020939 A	01 June 2020
		TW I685881 B	21 February 2020
		US 10816904 B2	27 October 2020
		US 11378891 B2	05 July 2022
		US 2021-0003927 A1	07 January 2021
		WO 2018-233966 A1	27 December 2018
US 2018-0330493 A1	15 November 2018	US 10657638 B2	19 May 2020
US 2003-0212469 A1	13 November 2003	TW 535207 A	01 June 2003
		TW 535207 B	01 June 2003
		US 6807454 B2	19 October 2004
US 2006-0276976 A1	07 December 2006	CN 101069092 A	07 November 2007
		CN 101069092 B	27 April 2011
		EP 1597569 A2	23 November 2005
		EP 1711801 A1	18 October 2006
		EP 1711801 B1	17 June 2009
		EP 1869436 A1	26 December 2007
		EP 1869436 B1	07 October 2009
		JP 2006-517349 A	20 July 2006
		JP 2007-520721 A	26 July 2007
		JP 2008-536104 A	04 September 2008
		JP 4459289 B2	28 April 2010
		KR 10-0950641 B1	01 April 2010
		KR 10-2005-0105197 A	03 November 2005
		KR 10-2007-0112156 A	22 November 2007
		TW 200526949 A	16 August 2005
		TW 200710386 A	16 March 2007
		TW I317809 A	01 December 2009
		TW I317809 B	01 December 2009

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/US2022/044531

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
		TW	I350914	B	21 October 2011
		US	2004-0152250	A1	05 August 2004
		US	2004-0241890	A1	02 December 2004
		US	2005-0059174	A1	17 March 2005
		US	2005-0162178	A1	28 July 2005
		US	2005-0234658	A1	20 October 2005
		US	2007-0010954	A1	11 January 2007
		US	2008-0162066	A1	03 July 2008
		US	6957154	B2	18 October 2005
		US	7092826	B2	15 August 2006
		US	7103482	B2	05 September 2006
		US	7107158	B2	12 September 2006
		US	7308367	B2	11 December 2007
		US	7337076	B2	26 February 2008
		US	7379826	B2	27 May 2008
		US	7634365	B2	15 December 2009
		WO	2004-070355	A2	19 August 2004
		WO	2004-070355	B1	17 March 2005
		WO	2005-083407	A1	09 September 2005
		WO	2006-098925	A1	21 September 2006

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2022)

フロントページの続き

MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,JM,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

，オースティン，グローヴ ブールヴァード ２４００

(72)発明者 ウーリー，メーガン

アメリカ合衆国 テキサス州 ７８７４１，オースティン，グローヴ ブールヴァード ２４００

Ｆターム（参考） 2H197 DA02 DA03 DA09 DB05 DB06 DB10 HA03 JA17 JA22 JA23

4M106 AA01 CA39 CA48 DJ18 DJ20 DJ27