

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6801110号  
(P6801110)

(45) 発行日 令和2年12月16日(2020.12.16)

(24) 登録日 令和2年11月27日(2020.11.27)

(51) Int.Cl.

F 1

H01L 21/66	(2006.01)	H01L 21/66	P
G01N 21/21	(2006.01)	G01N 21/21	Z
G01N 21/27	(2006.01)	G01N 21/27	B

請求項の数 27 (全 31 頁)

(21) 出願番号	特願2019-531857 (P2019-531857)	(73) 特許権者	500049141 ケーレルエー コーポレイション
(86) (22) 出願日	平成29年8月16日 (2017.8.16)		アメリカ合衆国 カリフォルニア ミルピ
(65) 公表番号	特表2019-532518 (P2019-532518A)		タス ワン テクノロジー ドライブ
(43) 公表日	令和1年11月7日 (2019.11.7)	(74) 代理人	110001210 特許業務法人 Y K I 国際特許事務所
(86) 國際出願番号	PCT/US2017/047159	(72) 発明者	シェエイブ ホウサム アメリカ合衆国 カリフォルニア サン
(87) 國際公開番号	W02018/044572		ノゼ ピエモント ロード 1195
(87) 國際公開日	平成30年3月8日 (2018.3.8)	(72) 発明者	ジャオ チャン アメリカ合衆国 カリフォルニア ミルピ
審査請求日	令和2年8月11日 (2020.8.11)		タス ダグラス コート 191
(31) 優先権主張番号	62/381,987		
(32) 優先日	平成28年8月31日 (2016.8.31)		
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		
(31) 優先権主張番号	15/649,843		
(32) 優先日	平成29年7月14日 (2017.7.14)		
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】異方性誘電率を用いた半導体構造のモデル依拠光学計測

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

未仕上げの多層半導体ウェハ上に作成された構造に対しあるスペクトル域に亘り第1量の照明を提供する第1照明器と、

前記第1量の照明に応じ計測中の構造から第1量の光を集め、前記計測中の構造のスペクトル応答を示す第1量のスペクトルデータを生成する第1分光計であり、前記第1照明器と前記第1分光計とが第1組の計測システムパラメタに従い構成されている、第1分光計と、

前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルを含む計測モデルに依拠し前記計測中の構造に係る一通り又は複数通りの注目幾何パラメタの値を推定するよう構成された当てはめ分析モジュールであって、前記異方性モデルが前記構造の誘電率を特徴づける、複数のスカラー成分を有する多次元テンソルを含み、前記複数のスカラー成分のうち少なくとも1つのスカラー成分の値が、前記多次元テンソルの前記複数のスカラー成分うちの別の1つのスカラー成分の値とは異なる、当てはめ分析モジュールと、

を備える計測システム。

## 【請求項 2】

請求項1に記載の計測システムであって、前記計測中の構造が、別種素材からそれぞれ作成された2個以上の幾何フィーチャを有し、前記計測モデルが、個々の別種素材に係る光分散についての別の異方性モデルを含む計測システム。

## 【請求項 3】

10

20

請求項 1 に記載の計測システムであって、前記一通り又は複数通りの注目幾何パラメタの値の推定が、前記計測モデルで以てする前記第 1 量のスペクトルデータの回帰を伴う計測システム。

**【請求項 4】**

請求項 1 に記載の計測システムであって、前記第 1 照明器及び前記第 1 分光計が分光エリプソメータ又は分光リフレクトメータとして構成されている計測システム。

**【請求項 5】**

請求項 1 に記載の計測システムであって、前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルがその光分散の行列関数を含む計測システム。

**【請求項 6】**

請求項 5 に記載の計測システムであって、前記行列関数の非対角要素それぞれが 0 値であり、その行列関数の対角要素のうち 2 個以上が異なる値である計測システム。

**【請求項 7】**

請求項 1 に記載の計測システムであって、前記光分散についての異方性モデルが、三通りの主方向それに係る一通り又は複数通りの光分散パラメタを含み、当該一通り又は複数通りの光分散パラメタの値であり当該三通りの主方向のうち少なくとも一通りに係る値が、当該一通り又は複数通りの光分散パラメタの値であり当該三通りの主方向のうちその他に係る値と異なる計測システム。

**【請求項 8】**

請求項 1 に記載の計測システムであって、更に、

20

前記計測中の構造に対し第 2 量の照明を提供する第 2 照明器と、

前記第 2 量の照明に応じ前記計測中の構造から第 2 量の光を集め、その計測中の構造のスペクトル応答を示す第 2 量のスペクトルデータを生成する第 2 分光計であり、前記第 2 照明器とその第 2 分光計とが第 2 組の計測システムパラメタに従い構成されている、第 2 分光計と、

を備える計測システム。

**【請求項 9】**

請求項 8 に記載の計測システムであって、前記第 1 照明器と前記第 2 照明器が同じ照明器であり、前記第 1 分光計と前記第 2 分光計が同じ分光計である計測システム。

**【請求項 10】**

30

請求項 8 に記載の計測システムであって、前記第 1 組の計測システムパラメタが、アジマス角、入射角、照明光偏向、光電場方向又はそれらの任意の組合せを含み、前記第 2 組の計測システムパラメタが、それらアジマス角、入射角、照明光偏向及び光電場方向のうちいずれかの別の値を含む計測システム。

**【請求項 11】**

請求項 8 に記載の計測システムであって、前記一通り又は複数通りの注目幾何パラメタの値の推定が、前記計測モデルで以てする前記第 1 量及び第 2 量のスペクトルデータの回帰を伴い、その計測中の構造の素材に係る一通り又は複数通りの光分散パラメタが当該第 1 量及び第 2 量のスペクトルデータの回帰中は浮動し且つ当該一通り又は複数通りの注目幾何パラメタの値が当該第 1 量及び第 2 量のスペクトルデータの回帰中は拘束され同じ値を探る計測システム。

40

**【請求項 12】**

請求項 11 に記載の計測システムであって、前記一通り又は複数通りの光分散パラメタの初期値であり前記第 1 量及び第 2 量のスペクトルデータの回帰にて採用されるものが、当該一通り又は複数通りの光分散パラメタのバルク等方値である計測システム。

**【請求項 13】**

請求項 12 に記載の計測システムであって、前記一通り又は複数通りの光分散パラメタの前記バルク等方値が、その素材の膜の分光計測で決定される計測システム。

**【請求項 14】**

請求項 1 に記載の計測システムであって、前記多次元テンソルの前記複数のスカラー成

50

分のうちの 1 つまたは複数のスカラー成分が前記計測中の構造の幾何パラメタの関数である計測システム。

**【請求項 15】**

請求項 14 に記載の計測システムであって、前記幾何パラメタが前記注目幾何パラメタのうち一つである計測システム。

**【請求項 16】**

請求項 14 に記載の計測システムであって、前記多次元テンソルの前記複数のスカラー成分のうちの 1 つまたは複数のスカラー成分が複数個の高調波発振子関数を含む計測システム。

**【請求項 17】**

未仕上げの多層半導体ウェハ上に作成された構造に対しあるスペクトル域に亘り第 1 量の照明を提供するステップと、

前記第 1 量の照明に応じ計測中の構造から第 1 量の光を集めるステップと、

前記計測中の構造のスペクトル応答を示す第 1 量のスペクトルデータを生成するステップと、

前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルを含む計測モデルに依拠しその計測中の構造に係る一通り又は複数通りの注目幾何パラメタの値を推定するステップであって、前記異方性モデルが前記構造の誘電率を特徴づける、複数のスカラー成分を有する多次元テンソルを含み、前記複数のスカラー成分のうち少なくとも 1 つのスカラー成分の値が、前記多次元テンソルの前記複数のスカラー成分のうちの別の 1 つのスカラー成分の値とは異なるステップと、

を有する方法。

**【請求項 18】**

請求項 17 に記載の方法であって、前記計測中の構造が、別種素材からそれぞれ作成された 2 個以上の幾何フィーチャを有し、前記計測モデルが、個々の別種素材に係る光分散についての別の異方性モデルを含む方法。

**【請求項 19】**

請求項 17 に記載の方法であって、前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルがその光分散の行列関数を含む方法。

**【請求項 20】**

請求項 17 に記載の方法であって、前記光分散についての異方性モデルが、三通りの主方向それぞれに係る一通り又は複数通りの光分散パラメタを含み、当該一通り又は複数通りの光分散パラメタの値であり当該三通りの主方向のうち少なくとも一通りに係る値が、当該一通り又は複数通りの光分散パラメタの値であり当該三通りの主方向のうちその他に係る値と異なる方法。

**【請求項 21】**

請求項 17 に記載の方法であって、前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルがその計測中の構造の幾何パラメタの関数である方法。

**【請求項 22】**

請求項 21 に記載の方法であって、前記幾何パラメタが前記注目幾何パラメタのうち一つである方法。

**【請求項 23】**

未仕上げの多層半導体ウェハ上に作成された構造に対しあるスペクトル域に亘り第 1 量の照明を提供する第 1 照明器と、

前記第 1 量の照明に応じ計測中の構造から第 1 量の光を集め、前記計測中の構造のスペクトル応答を示す第 1 量のスペクトルデータを生成する第 1 分光計であり、前記第 1 照明器とその第 1 分光計とが第 1 組の計測システムパラメタに従い構成されている、第 1 分光計と、

命令が格納されている非一時的コンピュータ可読媒体と、

を備え、それら命令が 1 個又は複数個のプロセッサによって実行されたときに、当該 1

10

20

30

40

50

個又は複数個のプロセッサによって、前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルを含む計測モデルに依拠しその計測中の構造に係る一通り又は複数通りの注目幾何パラメタの値が推定され、前記異方性モデルが前記構造の誘電率を特徴づける、複数のスカラー成分を有する多次元テンソルを含み、前記複数のスカラー成分のうち少なくとも1つのスカラー成分の値が、前記多次元テンソルの前記複数のスカラー成分のうちの別の1つのスカラー成分の値とは異なる、計測システム。

**【請求項24】**

請求項23に記載の計測システムであって、前記計測中の構造が、別種素材からそれぞれ作成された2個以上の幾何フィーチャを有し、前記計測モデルが、個々の別種素材に係る光分散についての別の異方性モデルを含む計測システム。 10

**【請求項25】**

請求項23に記載の計測システムであって、前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルがその光分散の行列関数を含む計測システム。

**【請求項26】**

請求項23に記載の計測システムであって、前記光分散についての異方性モデルが、三通りの主方向それぞれに係る一通り又は複数通りの光分散パラメタを含み、当該一通り又は複数通りの光分散パラメタの値であり当該三通りの主方向のうち少なくとも一通りに係る値が、当該一通り又は複数通りの光分散パラメタの値であり当該三通りの主方向のうちその他に係る値と異なる計測システム。

**【請求項27】**

請求項23に記載の計測システムであって、前記計測中の構造の光分散についての異方性モデルが前記計測中の構造の幾何パラメタの関数である計測システム。 20

**【発明の詳細な説明】**

**【技術分野】**

**【0001】**

記述されている諸実施形態は、半導体製造にて採用される構造及び素材の光学的特徴解説・記述(optical characterization)システムに関する。

**【背景技術】**

**【0002】**

(関連出願への相互参照)

本件特許出願は、「半導体構造の限界寸法、膜厚及び禁制帯幅の光学計測方法」(Method of Optical Measurements of Critical Dimensions, Film Thickness and Bandgap of Semiconductor Structures)と題する2016年8月31日付米国仮特許出願第62/381987号に基づき米国特許法第119条の規定による優先権を主張するものであるので、当該仮特許出願の主題をこの参照を以て本願に繰り入れることにする。 30

**【0003】**

半導体デバイス例えば論理デバイス及び記憶デバイスは、通常、一連の処理工程を基板又はウェハに適用することで製造される。それら半導体デバイスの諸フィーチャ(外形特徴)及び構造階層群はそれら処理工程により形成される。例えばリソグラフィは、就中、半導体ウェハ上でのパターン生成を伴う半導体製造プロセスの一つである。半導体製造プロセスの別例としては、これに限られるものではないが化学機械研磨、エッチング、堆積及びイオンインプランテーションがある。複数個の半導体デバイスを1枚の半導体ウェハ上に作成し、その上で個別の半導体デバイスへと分けるようにするとい。 40

**【0004】**

半導体ウェハ上に作成される構造の幾何形状は、リソグラフィ露出中の処理条件によって左右される。プロセスパラメタ例えば焦点、照射量及びスキャナ収差が、もたらされる構造の形状に対し様々に影響するし、またそれが作成対象構造の種類により左右される。例えば、比較的孤立している構造が焦点変化に対しより敏感である一方、比較的密な構造は照射量変化に対しより敏感である。デバイスの機能性及び製造歩留まりはパターニング工程、例えばリソグラフィ、堆積、エッチング等々により形成される構造の質によって、 50

制限される。

#### 【0005】

集積回路フィーチャの横方向寸法（例 . C D）は、第一義的に、その製造プロセスフローに随伴するリソグラフィツールの分解能が限度となる。リソグラフィプロセス及びエッチングプロセスは絶え間なく進歩し小寸法化に向かっている。多重パターニング技術が広く採用され、それによる集積回路の横方向寸法縮小が図られている。今日、193 nmなる波長で作動する先進的リソグラフィツールでは、多重パターニング技術（例 . 二重パターニングや三重パターニング）が採用されており、それによりその横方向寸法が20 nm未満のフィーチャが実現されている。横方向寸法は、今後の製造テクノロジノードにて更に縮まることが見込まれている。

10

#### 【0006】

計量プロセスは半導体製造プロセス中の諸工程にて用いられており、それによりウェハ上の欠陥を検出することで歩留まり向上が促進されている。光学計量技術は、サンプル破壊のリスクなしで高いスループットが得られる可能性を提供している。多数の光学計量依拠技術、例えばスキャタロメトリ（散乱計測法）、エリプソメトリ（楕円偏向法）及びリフレクトメトリ（反射計測法）装置並びにそれらに係る分析アルゴリズムが、限界寸法、膜厚、禁制帯幅、組成、オーバレイその他、ナノスケール構造のパラメタを解明すべく、広く用いられている。

#### 【0007】

既存のモデル依拠計量法には、通常、構造パラメタをモデル化し次いで計測する、一連のステップが含まれている。典型的には、個別の計量ターゲットから計測データが収集される（例 . D O E スペクトル）。光学システム、分散パラメタ及び幾何フィーチャの正確なモデルが定式化される。膜スペクトルの計測結果を集めることで素材による分散が判別される。そのターゲット構造のパラメトリックな幾何モデルが光学モデルと共に生成される。加えて、シミュレーション近似（例 . スラビング、厳密結合波解析（R C W A）等々）を注意深く実行することで、過大な誤差の入り込みを回避する必要がある。離散化パラメタ及び R C W A パラメタが定義される。一連のシミュレーション、分析及び回帰を実行することで、その幾何モデルが精細化され、どのモデルパラメタを浮動させるかが決定される。合成スペクトルのライブラリが生成される。そして、それらライブラリ及び幾何モデルを用い計測が実行される。

20

#### 【0008】

光学計量プロセスは半導体製造プロセス中の諸工程にて用いられており、それによりウェハ側の欠陥を検出することで歩留まり向上が促進され且つデバイス性能の最適化が図られている。デザインルール及び処理窓のサイズが縮小され続けているため、特徴の解明・記述がより難しくなっている。加えて、複雑な構造の特徴を記述するにはより多数のパラメタが必要になり、そのことがパラメタ相関の増大につながっている。結果として、ターゲットの特徴を記述するパラメタを、入手可能な計測結果と信頼性よく分離させることができないことも、しばしばである。

30

#### 【0009】

既存方法では、計測下半導体構造を構成する素材が光学的に等方性である（即ち素材パラメタがアジマス角、入射角、電場偏向等々によらず同じである）と仮定されている。フィーチャサイズが小さい場合、そのことが原因で、単純な光学的限界寸法（O C D）構造ですら顕著なサブシステムミスマッチが生じ、相異なる計測機構の組合せ間ではことによくスペクトルフィット品質が貧弱になり、幾何プロファイルが不正確になり、参照計測結果（例 . 透過電子顕微鏡法（T E M）、C D 走査電子顕微鏡法（C D S E M）等々）との多大な不一致が生じ、並びに媒体コントラストが低くなるため、結果として幾何パラメタ間相関が高めになる。これらの問題については、この参照を以てその主題の全容を本願に繰り入れる論文たる非特許文献1にてより詳細に記述されている。

40

#### 【0010】

これらの難題に応えるべく、より複雑な光学計量ツールが開発されてきた。例えば、照

50

明角が複数通りのツール、照明波長が短めのツール、照明波長域が広めのツール、並びに反射信号からの情報捕捉がより無欠なツール（例・より以前からある反射率信号やエリプソメトリ信号に加え複数個のミュラー行列要素を計測するツール）が開発されてきた。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【特許文献1】米国特許第7478019号明細書

【非特許文献】

【0012】

【非特許文献1】"Nanoscale optical critical dimension measurement of a contact hole using deep ultraviolet spectroscopic ellipsometry", by H. Chouaib and Q. Zhou, published in J. Vac. Sci. Technol. B 31, 011803 (2013) 10

【非特許文献2】"Data feed-forward for improved optical CD and film metrology" by L.Mihardja et al.,published in Proc. SPIE 8324, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI, 83241H (March 29, 2012)

【非特許文献3】"Apply multiple target for advanced gate ADI critical dimension measurement by scatterometry technology" by Wei-Jhe Tzai et al.,published in Proc. SPIE 8324, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI, 832420 (March 29, 2012)

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

しかしながら、これらの手法では、多くの先進的ターゲット（例・複雑な3D構造、10nmより小さい構造、不透明素材を採用している構造）の計測及び計測アプリケーション（例・ラインエッジ粗さ計測やライン幅粗さ計測）に係る根本的難題が信頼性よく克服されていない。

【0014】

従って、半導体製造プロセスにて構造及び素材の特徴を解明することができ高スループットなシステム及び方法を開発することが、有益であろう。とりわけ、そのフィーチャサイズが小さい（例・20nm未満の）半導体構造のインライン計量向けに、強力で信頼でき安定な手法を開発することが、有益であろう。 30

【課題を解決するための手段】

【0015】

小サイズ半導体構造（例・CD構造、オーバレイ構造、薄膜等々）の光学的モデル依拠計測を実行する方法及びシステムであり、計測下構造を構成する一種類又は複数種類の素材の光分散特性についての異方性特徴記述を採用するものが、本願にて提示される。これにより幾何パラメタ間相関が低減され、計測感度の向上、計測正確度の向上、並びに複数個の計測下素材間の計測コントラストの強調が果たされる。

【0016】

幾つかの実施形態では、その計測下構造が、別種素材からそれぞれ作成された2個以上の幾何フィーチャを有する。それらの実施形態のうち幾つかでは、構造モデルに、それら別種素材のうち一種類又は複数種類の光分散特性についての異方性特徴記述を含める。 40

【0017】

更なる態様では、モデル依拠計測が、2個以上の計測サブシステムから集めた計測データを、計測下素材の光分散についての異方性特徴記述と組み合わせたものに依拠し、実行される。

【0018】

別の態様では、モデル依拠計測が、計測下幾何の主軸に揃うよう選択されたアジャス角にて実行される。この設定は、單一方向に沿い周期性を呈するパターンのフィーチャを有するスタック構造について計測を実行するときに、有益たりうる。こうした実施形態では 50

、計測下構造についての素材特徴記述が各回計測に係るアジマス角に依存し変化する。

**【0019】**

別の更なる態様では、一通り又は複数通りの注目パラメタの初期推定値が、計測ターゲットに対する入射照明ビームの向きをある単一の向きにして実行された光学計測を踏まえ、求められる。それら初期推定値が注目パラメタの開始値として実装され、複数通りの向きでの光学計測で集められた計測データで以てする計測モデルの回帰に供される。こうすることで、注目パラメタの密推定値が比較的少量の情報処理労力で以て求まり、その密推定値をより大規模なデータセットに亘る回帰向けの開始点として実装することで、その注目パラメタの精細推定値が少な総情報処理労力で以て得られる。

**【0020】**

ある例では、各計測チャネル（即ちサブシステム）の光分散パラメタの初期値が、同種の計測下素材からなる膜ターゲットから求まったバルクパラメタ値又は分散パラメタ値と共にシードされる。

**【0021】**

別の態様では、モデル依拠計測が、誘電率行列の非対角要素が0値であると仮定する、との想定で以て実行される。これにより、電磁モデル構築及び当てはめ分析が顕著に簡略化される。

**【0022】**

別の態様では、半導体構造の光学的モデル依拠計測に、その計測下構造を構成する一種類又は複数種類の素材の光分散についての特徴記述であり、その構造の幾何形状に依存するものが、組み込まれる。

**【0023】**

更なる態様では、それら光分散パラメタが、基本的幾何パラメタの推定値が反復的に更新されるにつれ回帰中に変化する。ある例では、それら浮動素材パラメタを用い注目構造パラメタが監視され、量子効果の特徴を記述する光応答モデルがその監視に用いられる。この意味で、部分的に幾何パラメタにより特徴が記述される素材パラメタ値の推定は、幾何パラメタに対する計測感度を高めるものである。

**【0024】**

更なる態様では、誘電率を記述する多次元テンソルの要素のうち1個又は複数個が別様にモデル化される。例えば、多次元テンソルの相異なる要素 $i_j ( , g )$  向けに別々の多発振子モデルを用いてもよい。そのモデルを構成する個別の発振子モデルに係る発振子定数は構造幾何に依存する。

**【0025】**

幾つかの実施形態では、等方性モデルに依拠し推定された分散パラメタ値と、光分散の異方性モデルに依拠し推定された同種の分散パラメタの値との間の違いに基づき、注目幾何パラメタが推定される。

**【0026】**

更なる態様では、個別の計測アプリケーションに係る計測レシピを最適化することで、感度の最高化と、光分散の異方性モデルを構成する浮動パラメタ間の相関の最低化とが、図られる。

**【0027】**

別の更なる態様では、推定された注目パラメタに少なくとも部分的に基づき半導体ウェハの製造プロセスを制御することで、デバイス性能が改善される。

**【0028】**

別の更なる態様では、計測下構造の別々のフィーチャに係る注目パラメタの個別推定が、同じスペクトル応答データに基づき実行される。例えば、計測下ウェハが複数個の層及び構造フィーチャを有していることがある。計測で得られるスペクトル応答データには、それらの層及びフィーチャ全てからの寄与分が含まれる。それらの層及びフィーチャそれぞれの寄与分を捉える計測モデルを用いることで、個別の物理層又は分析下フィーチャに係る注目パラメタを個別に求めることができる。

10

20

30

40

50

## 【0029】

上述したのは概要であり、従って簡略化、一般化及び細部省略が必然的に含まれているので、本件技術分野に習熟した者（いわゆる当業者）にはご理解頂けるように、この概要是専ら例証的なものであって、如何様にであれ限定的なものではない。本願記載の装置及び／又はプロセスの他の態様、新規特徴及び長所については本願中で説明される非限定的詳細記述にて明らかとなろう。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0030】

【図1】本発明の少なくとも1個の実施形態に従い、半導体ウェハ上に作成された構造のスペクトル応答を計測するシステム100を描出する概略図である。

10

【図2】図1に示すシステム100の情報処理システム116により実現されるモデル構築兼分析エンジンの例140を描出する図である。

【図3】例えばシステム100により計測される構造の例150を描出する図である。

【図4】例えばシステム100により計測される構造の別例155を描出する図である。

【図5】図1に示す計測システム100によりある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の実成分値nを描出する描線図160である。

【図6】図1に示す計測システム100によりある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の虚成分値kを描出する描線図165である。

【図7A】例えば計測システム100により計測される構造の例170をある方向から描出する図である。

20

【図7B】例えば計測システム100により計測される構造の例170を別の方向から描出する図である。

【図7C】例えば計測システム100により計測される構造の例170を別の方向から描出する図である。

【図8A】相異なる二通りのアジマス角での構造170の計測に係る計測データの分析を踏まえ推定されたある注目パラメタの値を、相異なる二通りの誘電率特徴記述で以て示す図である。

【図8B】相異なる二通りのアジマス角での構造170の計測に係る計測データの分析を踏まえ推定された別の注目パラメタの値を、相異なる二通りの誘電率特徴記述で以て示す図である。

30

【図8C】相異なる二通りのアジマス角での構造170の計測に係る計測データの分析を踏まえ推定された更に別の注目パラメタの値を、相異なる二通りの誘電率特徴記述で以て示す図である。

【図8D】相異なる二通りのアジマス角での構造170の計測に係る計測データの分析を踏まえ推定された更に別の注目パラメタの値を、相異なる二通りの誘電率特徴記述で以て示す図である。

【図9】例えば計測システム100により計測される構造の例190を描出する図である。

【図10】図1に示す計測システム100によりある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の実成分値nを描出する描線図である。

40

【図11】図1に示す計測システム100によりある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の虚成分値kを描出する描線図である。

【図12A】計測下素材の誘電率についての異方性及び等方性特徴記述に関し、第1アジマス角及び第2アジマス角での計測データの分析を踏まえ推定されたCDパラメタ値間の差分を描出する描線図である。

【図12B】計測下素材の誘電率についての異方性及び等方性特徴記述に関し、第1アジマス角及び第2アジマス角での計測データの分析を踏まえ推定された高さパラメタ値間の差分の描線図を描出する図である。

【図13】例えば計測システム100により計測される構造の例220を描出する図である。

50

【図14】例えば計測システム100により計測される構造の例230を描出する図である。

【図15】例えば計測システム100により計測される構造の例240を描出する図である。この例では、20nm未満の限界寸法を有するシリコンフィン構造241が計測されている。

【図16】様々なCD値のフィン構造に関し、ローレンツモデルを構成する第1発振子に係る共鳴エネルギー値E1を描出する描線図である。

【図17】様々なCD値のフィン構造241に関し、ローレンツモデルを構成する第2発振子に係る共鳴エネルギー値E2を描出する描線図である。

【図18】本発明の少なくとも1個の新規態様に係るシステム100による実行に適したプロセスフロー300を描出する図である。 10

#### 【発明を実施するための形態】

##### 【0031】

以下、背景例及び本発明の幾つかの実施形態でありその例が添付図面に描かれているものについて、詳細に示す。

##### 【0032】

小サイズ半導体構造（例.CD構造、オーバレイ構造、薄膜等々）の光学的モデル依拠計測を実行する方法及びシステムであって、その計測下構造を構成する一種類又は複数種類の素材の光分散特性について異方性特徴記述を採用するものが、本願にて提示されている。これにより幾何パラメタ間相関が低減され、ひいては計測感度の向上、計測正確度の向上、並びに複数個の計測下素材間の計測コントラストの強調がもたらされる。 20

##### 【0033】

幾つかの実施形態では、半導体構造の光学的モデル依拠計測に、その計測下構造を構成する一種類又は複数種類の素材の誘電率又は複素屈折率についての異方性特徴記述が組み込まれる。

##### 【0034】

一般に、電気変位場Dは、 $\epsilon_0$ を真空誘電率とする式（1）

$$D = \epsilon_0 E \quad (1)$$

に記載の如く、誘電率 $\epsilon$ によって入射電場Eに関連付けされる。

##### 【0035】

慣例的に、計測下半導体構造を構成する素材は等方性（即ち入射光に対する素材の応答が方向によらず同一）なものとして扱われている。即ち、その誘電率がスカラー関数 $\epsilon$ として扱われている。しかしながら、方向に対する誘電関数の依存性を考慮に入れるに際しては、誘電関数が多次元テンソルとして扱われる。幾つかの実施形態では誘電関数が行列 $\epsilon_{ij}$ として扱われる。例えば、相直交する三通りの主方向x、y及びzにより定式化される三次元空間にて、D場のx、y及びz成分が、式（2）

##### 【数1】

$$\epsilon_{ij}(\lambda) = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

に記載の誘電率行列 $\epsilon_{ij}$ を通じE場のx、y及びz成分に関連付けされる。 40

##### 【0036】

この実施形態では、光分散についての異方性特徴記述に含まれる光分散パラメタ $\epsilon_{ij}$ が三通りの主方向それぞれに関連付けされており、三通りの主方向のうち少なくとも一通りに係る光分散パラメタの値が他とは異なる。ある例では、 $\epsilon_{zz}$ の値が $\epsilon_{xx}$ 及び $\epsilon_{yy}$ の値とは異なるものになる。複素屈折率n及びkは、式（3）

##### 【数2】

$$n(\lambda) + ik(\lambda) = \sqrt{\epsilon(\lambda)} \quad (3)$$

によって誘電率に関連付けされる。このように、誘電率行列の各要素を分散パラメタ  $n$  及び  $k$  により表すことができ、その逆も可能である。

#### 【0037】

一般に、本願記載の異方性光分散モデルの特徴は、どのようなものであれ有用な光分散指標により記述することができる。例えば、複素屈折率の実成分 ( $n$ ) 及び虚成分 ( $k$ ) により異方性光分散モデルの特徴を記述してもよい。別の例では、複素誘電率の実成分 ( $_1$ ) 及び虚成分 ( $_2$ ) により異方性光分散モデルの特徴が記述されよう。他の例では、 $\sqrt{n^2 - k^2}$  の二乗平方根、吸収定数  $= 4 \pi k / \lambda$  、導電率 ( $\sigma$ ) 、表皮深さ ( $\delta$ ) 、及び減衰定数  $(\alpha / 2) * \sqrt{\mu / \epsilon}$  、但し  $\mu$  は自由空間透磁率、等々のうちいずれかにより異方性光分散モデルの特徴が記述されよう。他の例では、上掲の光分散指標の任意の組合せにより光分散モデルが記述されよう。上掲の光分散指標は非限定的な例なる趣旨で提示されている。他の光分散指標又は指標組合せも考慮に値する。10

#### 【0038】

図1には、本発明の少なくとも1個の実施形態に従い、半導体ウェハ上に作成された構造のスペクトル応答を計測するシステム100が描かれている。図1に示すように、本システム100を用い、並進ステージ110上に配置された半導体ウェハ112に備わる1個又は複数個の構造114について、分光エリプソメトリを実行することができる。本態様によれば、そのシステム100に、照明器102及び分光計104が装備された分光エリプソメータ（楕円偏光計）を具備させることができる。本システム100の照明器102は、指定波長域（例. 150 ~ 2500 nm）の照明を生成し、半導体ウェハ112の表面上に位置する構造114にその照明を差し向けるよう、構成されている。翻って、分光計104は、構造114への照明の送給に応じ半導体ウェハ112の表面から光を受け取るよう構成されている。更に注記すべきことに、照明器102に発する光が偏光子107を用い偏向され、それにより偏向照明ビーム106が生成されている。その輻射はウェハ112上に位置する構造114により反射され、検光子109を介し分光計104へと通されている。この構成によれば、集光ビーム108の態で分光計104により受け取られた輻射を、照明ビーム106を組成する入射輻射と比較することで、構造114のスペクトル分析を行うことができる。20

#### 【0039】

更なる実施形態によれば、本システム100に1個又は複数個の情報処理システム116を具備させることができる。当該1個又は複数個の情報処理システム116を分光計104に可通信結合させてもよい。ある態様によれば、1枚又は複数枚のウェハを対象に分光計104により実行された一連の分光計測の結果を受け取るよう、当該1個又は複数個の情報処理システム116を構成することができる。当該一通り又は複数通りのサンプリングプロセスの結果をその分光計から受け取った上で、当該1個又は複数個の情報処理システム116により、構造114の分光計測を表す計測モデルに係る構造パラメタの値を計算してもよい。ある例によれば、その情報処理システム116によって、分光計104で捕捉したスペクトルで以てするその計測モデルの回帰に依拠し、構造114に備わるフィーチャの限界寸法(CD)の値を抽出することができる。30

#### 【0040】

別の更なる実施形態によれば、その情報処理システム116によって、一通り又は複数通りの構造パラメタの導出値に少なくとも部分的に依拠し半導体ウェハの製造プロセスを制御することができる。例えば、情報処理システム116を、計測対象半導体ウェハの製造を担う1個又は複数個の製造ツール（例. リソグラフィツール、エッティングツール等々）へとプロセス制御パラメタ値を送るよう、構成してもよい。40

#### 【0041】

ご認識頂くべきことに、本件開示の随所に記載されている諸ステップを单一のコンピュータシステム116により実行してもよいし、その代わりに複数個のコンピュータシステム116により実行してもよい。更に、本システム100に備わる様々なサブシステム、例えば分光エリプソメータ101に、上述した諸ステップのうち少なくとも一部を実行す50

るのに適したコンピュータシステムを具備させてもよい。従って、上掲の記述は、本発明に対する限定事項としてではなく、単なる例証として解釈されるべきである。更に、本願記載の方法実施形態のうちいずれかの他のいずれかのステップ(群)を実行するよう、当該1個又は複数個の情報処理システム116を構成してもよい。

#### 【0042】

別の実施形態によれば、そのコンピュータシステム116を、エリプソメータ101の分光計104又は照明器サブシステム102に、本件技術分野で既知な何らかの要領で可通信結合させることができる。例えば、当該1個又は複数個の情報処理システム116を、エリプソメータ101の分光計104に備わる情報処理システムと、照明器サブシステム102に備わる情報処理システムとに、結合させててもよい。また例えば、分光計104及び照明器102を単一のコンピュータシステムによって制御してもよい。この形態によれば、本システム100のコンピュータシステム116を単一のエリプソメータ側コンピュータシステムに結合させることができる。10

#### 【0043】

本システム100のコンピュータシステム116を、伝送媒体例えば有線区間及び/又は無線区間を含むそれにより自システムのサブシステム(例. 分光計104、照明器102等)からデータ又は情報を受け取り及び/又は捕捉するよう、構成してもよい。この形態によれば、その伝送媒体を、本システム100のコンピュータシステム116・他サブシステム間データリンクとして働かせることができる。更に、その情報処理システム116を、格納媒体(即ちメモリ)を介し分光結果を受け取るよう構成してもよい。例えば、エリプソメータの分光計を用い取得した分光結果を恒久的又は半恒久的記憶デバイスに格納すればよい。この構成によれば、それら分光結果を外部システムからインポートすることができる。20

#### 【0044】

更に、そのコンピュータシステム116により伝送媒体を介し外部システムにデータを送ってもよい。更には、本システム100のコンピュータシステム116を、伝送媒体例えば有線区間及び/又は無線区間を含むそれにより他システムからデータ又は情報(例. 検査システムからの検査結果や計量システムからの計量結果)を受け取り及び/又は捕捉するよう、構成してもよい。この形態によれば、その伝送媒体を、本システム100のコンピュータシステム116・他サブシステム間データリンクとして働かせることができる。更に、そのコンピュータシステム116により伝送媒体を介し外部システムへとデータを送ってもよい。30

#### 【0045】

その情報処理システム116には、これに限られるものではないが、パーソナルコンピュータシステム、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、イメージコンピュータ、並列プロセッサその他、本件技術分野で既知なあらゆるデバイスが含まれうる。総じて、語「情報処理システム」を広義に定義し、記憶媒体から得た命令を実行するプロセッサを1個又は複数個有するデバイス全てを包括させることができる。

#### 【0046】

本願記載の方法等の方法を体現するプログラム命令120を、キャリア媒体118上で伝送させ又はその媒体上に格納してもよい。そのキャリア媒体が伝送媒体、例えばワイヤ、ケーブル又は無線伝送リンクであってもよい。また、そのキャリア媒体にコンピュータ可読媒体、例えばリードオンリメモリ、ランダムアクセスメモリ、磁気若しくは光ディスク、又は磁気テープが備わっていてもよい。40

#### 【0047】

図1に描かれた実施形態に係るシステム100は、更に、本願記載の如く構成されうる。加えて、そのシステム100は、本願記載の方法実施形態(群)のうちいずれかを構成する他のいずれかのステップ(群)を実行するよう構成されうる。

#### 【0048】

図2は、情報処理システム116により実現されるモデル構築兼分析エンジンの例14

50

0を描いた図である。図2に示すように、モデル構築兼分析エンジン140は、計測下試料に備わる被計測構造の構造モデル142を生成する構造モデル構築モジュール141を有している。幾つかの実施形態では、構造モデル構築モジュール141に、構造モデル142を生成するためのプロセスモデルも組み込まれる。

#### 【0049】

ある態様では、構造モデル142に試料の異方性素材特性が組み込まれる。幾つかの実施形態では、計測下構造に、それぞれ別種素材から作成された2個以上の幾何フィーチャが備わる。こうした実施形態のうち幾つかでは、その構造モデルに、それら別種素材のうち一種類又は複数種類の光分散特性についての異方性特徴記述が組み込まれる。幾つかの実施形態では、構造モデル構築モジュール141が、米国カリフォルニア州ミルピタス所在のKLA-Tencor Corporationにより製造されたAccuShape(登録商標)ソフトウェア製品の態で実現される。ある例によれば、そのAccuShape(登録商標)ソフトウェアに一組の幾何フィーチャ(例. 1D層、2D台形、3Dボスト等々)を組み込んでおき、それらを一体化及びパラメタ化することで、計測下構造を模すことができる。加えて、そのAccuShape(登録商標)ソフトウェアに一組の異方性構築ブロックを組み込んでおき、ユーザがそれを利用して異方性素材挙動を任意のモデル化構造フィーチャに割り当てるように、することができる。ある例によれば、そのAccuShape(登録商標)ソフトウェアによってユーザに選択肢、即ちモデル化計測下構造の各幾何フィーチャに関し主方向毎に別のn( )及びk( )値を割り当てるという選択肢を、提供することができる。この形態によれば、ユーザが、どの素材(即ちモデル化構造のうちどの部分)の特徴を異方性分散特性で以て記述するのかを、選択することができる。10

#### 【0050】

その構造モデル142は、光応答関数構築モジュール143への入力として受け取られる。光応答関数構築モジュール143は、その構造モデル142に少なくとも部分的に依拠し計測モデル145を生成する。ある態様では、光応答関数構築モジュール143にて、計測下構造の光分散特性についての異方性特徴記述が採用され、それにより本願記載の如く計測モデル145が生成される。20

#### 【0051】

幾つかの実施形態では、光応答関数構築モジュール143により計測下構造に対する入射ビームの光学的相互作用が解明され、その解明に電磁ソルバが用いられ、その電磁ソルバにて厳密結合波解析(RCWA)、有限要素法(FEM)、モーメント法、面積分法、体積積分法、有限差分時間領域(FDTD)法その他のアルゴリズムが採用される。幾つかの実施形態では、本願記載の光分散モデルが、米国カリフォルニア州ミルピタス所在のKLA-Tencor Corporationから入手可能なオフライン分光分析(OLSA)スタンドアロンソフトウェアの膜厚計測ライブラリ(FTML)なる態で実現される。30

#### 【0052】

計測モデル145は当てはめ分析モジュール147への入力として受け取られる。その当てはめ分析モジュール147は、そのモデルによる光応答を対応する計測データ135と比較することで、所与組の計測システムパラメタ値138(例. 入射角、アジマス角、照明偏向、電場方向等々)に関し、その試料の幾何特性及び素材特性を求める。40

#### 【0053】

当てはめ分析モジュール147は、計測で得られた分光データを、任意個数の相異なるデータ当てはめ及び最適化技術によって分析する。非限定的な例を以て言えば、当てはめ分析モジュール147で、ライブラリマッチング技術、高速次数低減モデリング技術、回帰、機械学習アルゴリズム例えばニューラルネットワーク、サポートベクタマシン(SVM)、次元縮小アルゴリズム例えば主成分分析(PCA)、独立成分分析(ICA)、局所線形埋込(LLS)、スパース表現技術例えばフーリエ又はウェーブレット変換技術、カルマンフィルタリング、並びに同種又は異種ツール間マッチングを促進するアルゴリズ50

ム等々を、実施することができる。分光計測データの当てはめは、注目幾何及び／又は素材パラメタに対し感度のあるどのような種類の光テクノロジ向けにも、有益である。試料パラメタは、試料との光ビーム相互作用の記述に適正なモデルが用いられる限り、決定論的なもの（例．C D、S W A等々）でも統計的なもの（例．側壁粗さのr m s高、粗さ相関長等々）でもかまわない。

#### 【0054】

幾つかの例では、実験データに対するモデル化データの当てはめが二乗値の最小化により達成される。例えば、光学計測では二乗値を

#### 【数3】

$$\chi_{\text{opt}}^2 = \frac{1}{N_{\text{opt}}} \sum_j^{N_{\text{opt}}} \frac{(S_j^{\text{opt-model}}(v_1, \dots, v_L) - S_j^{\text{opt-experiment}})^2}{\sigma_{\text{opt},j}^2} \quad (4)$$

10

として定義することができる。

#### 【0055】

但し、 $S_j^{\text{opt-experiment}}$ は「チャネル」 $j$ にて計測された光信号135であり、引数 $j$ により一組のシステムパラメタ例えば入射角、アジマス角、照明偏向等々が記述されている。 $S_j^{\text{opt-model}}(v_1, \dots, v_L)$ は「チャネル」 $j$ に係るモデル化された光信号 $S_j$ 、特に一組の構造（ターゲット）パラメタ $v_1, \dots, v_L$ に關しその値を求めたものであり、それらパラメタにより幾何特性（C D、側壁角、オーバレイ等々）及び素材特性（屈折率等々）が記述されている。 $\sigma_{\text{opt},j}$ は第 $j$ チャネルに係る不確定性である。 $N_{\text{opt}}$ はその光学計量におけるチャネルの総数である。 $L$ は計量ターゲットの特徴を記述するパラメタの個数である。

20

#### 【0056】

式（4）では、別々のチャネルに係る不確定性に相關がないことが仮定されている。別々のチャネルに係る不確定性に相關がある例では、それら不確定性間の共分散を計算すればよい。それらの例では、光学計測に関する二乗値を

#### 【数4】

$$\chi_{\text{opt}}^2 = \frac{1}{N_{\text{opt}}} \left( \vec{S}_j^{\text{opt-model}}(v_1, \dots, v_M) - \vec{S}_j^{\text{opt-experiment}} \right)^T V_{\text{opt}}^{-1} \left( \vec{S}_j^{\text{opt-model}}(v_1, \dots, v_M) - \vec{S}_j^{\text{opt-experiment}} \right) \quad (5)$$

30

と表すことができる。

#### 【0057】

但し、 $V_{\text{opt}}$ は光チャネル不確定性の共分散行列であり、 $T$ は転置を表している。

#### 【0058】

幾つかの例では、当てはめ分析モジュール147により、その計測モデル145で以て光学計測データ135に対する当てはめ分析を実行することで、少なくとも1個の試料パラメタ値が分解・解明される。幾つかの例では $\sigma_{\text{opt}}^2$ が最適化される。ある例では、指定スペクトル域に亘る誘電率の実成分（ $\epsilon_1$ ）及び虚成分（ $\epsilon_2$ ）の光分散モデルのパラメタ値が、回帰プロセスを利用して求められる。この構成によれば、計測されたスペクトルデータに対し、指定された異方性分散モデルを用いて回帰分析を適用することができる。

40

#### 【0059】

先に述べた通り、光学データの当てはめは二乗値の最小化により達成される。とはいえる、一般には、光学データの当てはめは他の関数でも達成されうる。

#### 【0060】

幾つかの例では、モデル構築兼分析エンジン140にて、フィードサイドウェイ分析、フィードフォワード分析及びパラレル分析の任意な組合せにより、計測パラメタの正確度が改善される。フィードサイドウェイ分析とは、同じ試料の別エリア上で複数個のデータ

50

セットを採取し、第 1 データセットから求めた共通パラメタを第 2 データセット側に引き渡して分析に供することである。フィードフォワード分析とは、別々の試料上でデータセットを採取し、ステップ的コピーイグザクトパラメタフィードフォワード手法を用い爾後の分析に共通パラメタを先行供給することである。パラレル分析とは、複数個のデータセットに対する非線形当てはめ方法論の並列的又は同時的適用であり、少なくとも 1 個の共通パラメタが当てはめ中に結合されるもののことである。

#### 【 0 0 6 1 】

複数ツール兼構造分析とは、フィードフォワード、フィードサイドウェイ又はパラレル分析のうち、回帰に依拠するもの、ルックアップテーブルに依拠するもの（即ち「ライブラリ」マッチング）、或いは複数個のデータセットの他の当てはめ手順に依拠するもののことである。複数ツール兼構造分析方法及びシステムの例が K L A - T e n c o r C o r p . 名義の 2 0 0 9 年 1 月 1 3 日付特許文献 1 に記載されているので、この参照を以てその全容を本願に繰り入れることにする。フィードフォワード分析についての付加的な議論が論文たる非特許文献 2 にて述べられているので、この参照を以てその主題の全容を本願に繰り入れることにする。パラレル分析についての付加的な議論が論文たる非特許文献 3 にて述べられているので、この参照を以てその主題の全容を本願に繰り入れることにする。

10

#### 【 0 0 6 2 】

幾つかの実施形態では、一通り又は複数通りの光分散パラメタ（例 .  $n(\lambda)$  、  $k(\lambda)$  等々）が当てはめ分析時に変数として扱われる。この形態では、分散パラメタの値が個別の計測毎に光電場方向、光偏向、照明入射角及び照明アジマス角に依存し変化しうることとなる。従って、その異方性素材応答が、小サイズフィーチャを有する構造（例 . 20 nm 未満のフィーチャサイズを呈する半導体構造）の分光計測中に効果的に捕捉される。

20

#### 【 0 0 6 3 】

多くの新世代半導体構造では、その素材寸法が非常に小さいため、量子効果が計測正確度、サブシステムマッチング等々に顕著な影響を及ぼす。フィーチャサイズがドブローアイ波長未満に縮まるとき予期せぬ光応答挙動が現れる。それらの例では、計測下ナノ構造を構成する一種類又は複数種類の素材が、入来する光学照明に対し元素レベルで異方性光応答を呈する。幾つかの例では、それらの光分散パラメタ（例 . 屈折率  $n(\lambda)$  及び消衰係数  $k(\lambda)$  ）が素材寸法（例 . 厚み、 C D 、 S W A ）に依存する。幾つかの例では、それら素材寸法が、その計測を実行するに当たり採用された計測サブシステムにより左右される。

30

#### 【 0 0 6 4 】

慣例的に、バルク分散パラメタ値が仮定され C D 構造の計測に供されている。しかしながら、発明者が発見したところによれば、計測下素材のバルク計測で得られた分散パラメタ値は、同種素材から作成された小サイズフィーチャの光学的モデル依拠計測での使用においてはもはや有効でない。それらの例では、小サイズフィーチャをかたどる半導体素材が、同種素材からなる厚いバルク層とは異なる形態で計測光と相互作用する。これは、金属及びある種の薄い半導体フィーチャ（例 . ポリシリコン、シリコン、シリコンゲルマニウム、炭化シリコン等々）の光学計測にて顕現する。

40

#### 【 0 0 6 5 】

図 3 に、例えば 65° なる入射角にて作動中の S E 計測システム 100 により計測される構造の例 150 を示す。構造 150 は極単純な膜スタック計量ターゲットであり、基板 112 に対し横向きの（即ち x y 平面に沿った）タングステン薄層を有している。この例では、厚み T を有するタングステン薄層 152 が別種素材層 151 の上に作成されている。照明光 153 が照明源 102 によりもたらされるのに応じ光 154 が分光計 104 により集められる。

#### 【 0 0 6 6 】

図 4 に、例えば 65° なる入射角にて作動中の計測システム 100 により計測される構造の別例 155 を示す。構造 155 は C D ターゲットであり、基板 112 に対し縦向きの

50

(即ち  $x$   $y$  平面に対し垂直な) C D 構造 157 を有している。この例では、厚み T を有するタンゲステン C D 構造 157 が、数層からなる別種素材構造 156 内に作成されている。照明光 158 が照明源 102 によりもたらされるのに応じ光 159 が分光計 104 により集められる。

#### 【0067】

図 5 に、図 1 に示す計測システム 100 によってある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の実成分値  $n$  の描線図 160 を示す。この例では、複素屈折率の実成分値及び虚成分値を浮動させつつ、対応する計測モデルでの計測スペクトルの回帰を、構造 150 の計測との関連で行っている。同様に、複素屈折率の実成分値及び虚成分値を浮動させつつ、対応する計測モデルでの計測スペクトルの回帰を、構造 155 の計測との関連で行っている。描線 162 は、図 3 に示した構造 150 の計測に係る  $n$  の推定値を示している。描線 161 は、図 4 に示した構造 155 の計測に係る  $n$  の推定値を示している。  
10

#### 【0068】

同様に、図 6 に、図 1 に示す計測システム 100 によりある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の虚成分値  $k$  の描線図 165 を示す。描線 167 は、図 3 に示した構造 150 の計測に係る  $k$  の計測値を示している。描線 166 は、図 4 に示した構造 155 の計測に係る  $k$  の計測値を示している。

#### 【0069】

慣例的に期待されるところによれば、 $n$  及び  $k$  の計測値はどちらの構造 150 及び 155 でも同じになるべきである。しかしながら、この例では、膜構造及び C D 構造に係る厚み T を 10 nm にすると、 $n$  及び  $k$  の計測値が大きく異なってくる。この例で描出されているところによれば、分散パラメタ（即ち  $n$  及び  $k$ ）の値は、計測下構造の寸法と、周囲にある構造に対するタンゲステン構造の向きとに対し、非常に敏感である。C D 構造 155 の場合、タンゲステンナノ構造内の自由電子が、近隣の界面にて周囲素材の影響を受ける。結果として、その C D 構造 155 は異方性素材応答挙動を呈する。  
20

#### 【0070】

膜構造 150 の分散は秀逸なスペクトル当てはめ度で以て計測されている（即ち  $^2 \sim 10$ ）。それに対し、同じ膜分散モデル（即ち同じ分散パラメタ値）を C D 構造 155 の計測向けに採用すると、スペクトル当てはめ度が比較的貧弱になる（即ち  $^2 \sim 1500$ ）。このことが指し示しているように、膜スタック構造 150 に係るタンゲステン膜分散は、小線幅構造例えは C D 構造 155 では有効でない。やはり指し示しているように、タンゲステンの光学特性は 10 nm なるタンゲステン線幅 T にて顕著に変化する。  
30

#### 【0071】

この例では、 $n$  値及び  $k$  値を浮動させることで C D 構造 155 向けに別の素材分散モデルを発展させた。描線 161 及び 166 に描かれているのは、その新規モデルに対する計測値当てはめの結果である。この例では、スペクトル当てはめ度が極めて良好になり（即ち  $^2 < 100$ ）、旧来のモデル化手法に対し多大な改良となった。図 5 及び図 6 に描かれているように、消衰係数  $k$  はタンゲステンを閉じ込めると強まり、屈折率  $n$  も大きくなる。

#### 【0072】

更なる態様では、モデル依拠計測が、2 個以上の計測サブシステムから集めた計測データに基づき、計測下素材の光分散についての異方性特徴記述と結びつけて実行される。複数個の計測サブシステムにより計測データを集めそれに基づきナノスケールフィーチャの計測を実行するとき、異方性誘電関数によってその基礎素材の特徴を記述すると、その計測がより正確になる。これらの例では、計測下構造についての異方性素材特徴記述が、相異なる何個の計測システムでデータを収集するか、相異なる何通りの計測システムパラメタ又はパラメタ組合せでそれを行うかに依存し変化する。本件特許出願の目的からすれば、計測サブシステムとは、ある特定組の計測システムパラメタにて計測を実行するよう構成されたある特定の計測システムのことである。従って、計測システムを変化させ又は計測システムパラメタ値を変化させると別の計測サブシステムになる。幾つかの例では、計  
40  
50

測下構造についての異方性素材特徴記述を諸計測サブシステム間で変化させるため、入射角、照明偏向、光電場方向等々のうちいずれかを変化させる。

#### 【0073】

一般に、多くのモデル依拠計測を、複数個の計測チャネル（即ちサブシステム）から集めた計測データに基づき実行することで、パラメタ感度の最適化、計測精度の向上、並びに他パラメタに対する相関の低減を図ることができる。SE計測システムを用いるメリットの一つは、広範な計測サブシステムを利用できることである。例えばSEシステムは、広範な入射角（AOI）、検光子角（AA）、アジマス角（AZ）及び波長を有するものにすることができる。ある例によれば、アジマス角により計測感度及び精度多大な影響を及ぼすことができる。分光計測システム、例えば米国カリフォルニア州ミルピタス所在のKLA-Tencor Corporationが製造しているSpectraShape（商標）、Shelby（商標）及びViking（商標）システムは、多岐に亘る光テクノロジを提供することで、広範な構造についての包括的且つ迅速な特徴記述を可能にするものである。10

#### 【0074】

慣例的に、計量ターゲットに取り組むに当たっては、別々のサブシステムから集めた計測データ間に強いパラメタ相関があることが面倒な問題となる。別種サブシステム間のパラメタ相関が強いことは、複数個の計測チャネルがある特定の計測モデルに係る注目パラメタの値に関し一致しないことを、実質的に意味している。しかしながら、モデル依拠計測を、2個以上の計測サブシステムで集めた計測データに依拠し、計測下素材の光分散についての異方性特徴記述と結びつけて実行することで、パラメタ相関が低減される。20

#### 【0075】

幾つかの実施形態では、モデル依拠計測が、二通り以上のアジマス角で集めた計測データに基づき、計測下素材の光分散についての異方性特徴記述と結びつけて実行される。

#### 【0076】

図7Aに、例えば計測システム100により計測される構造の例170の描像を示す。この例では、構造170が、シリコン浅溝分離（シャロウトレンチアイソレーション；STI）構造260と、そのSTI構造260の頂部上に作成された窒化シリコンフィン構造261とを有している。

#### 【0077】

図7Bに、図7A～図7Cに示すyz平面に沿った構造170の断面の描像を示す。図7Bに示すように、構造170は、トレンチ深さD、そのトレンチの上部限界寸法（TC-D）、並びに窒化シリコンフィン構造の高さ（H）によりパラメタ化されている。この例では、計測システム100により、構造170が相異なる二通りのアジマス角にて（即ち相異なる2個の計測サブシステムにて）計測される。図7Bには、図7A～図7Cに示すyz平面に対し揃った向きの照明源102により照明光172がもたらされるのに応じ、分光計104により集められた光171が、描かれている。この角度では、照明光172の向きが、構造170に備わるフィン構造の周期性方向に対し平行な方向を向く（即ちy方向に対し平行になる）。

#### 【0078】

図7Cに、図7A～図7Cに示すxz平面に沿った構造170の断面の描像を示す。図7Cには、図7A～図7Cに示すxz平面に対し揃った向きの照明源102により照明光174がもたらされるのに応じ、分光計104により集められた光173が、描かれている。この角度では、照明光174の向きが、構造170に備わるフィン構造の周期性方向に対し垂直な方向を向く（即ちy方向に対し垂直になる）。

#### 【0079】

注目パラメタ（即ちH、D、TC-D及びMCDオフセット）の値を、相異なる二通りのアジマス角での構造170の計測に係る計測データの分析に依拠し、誘電率についての相異なる二通りの特徴記述で以て推定した。図8A～図8Dはそれら分析を描いたものである。4050

**【 0 0 8 0 】**

図 8 A に、第 1 アジマス角（即ち周期性方向に対し平行な角度）での計測データの分析に依拠し推定された高さパラメタ値 H と、第 2 アジマス角（即ちその周期性方向に対し垂直な角度）での計測データの分析に依拠するそれと、の間の差分についての描線図 175 を示す。描線 176 は、計測下素材の誘電率について等方性モデルが採用されているときの差分値を描いたものである。描線 177 は、計測下素材の誘電率について異方性特徴記述が採用されているときの差分値を描いたものである。

**【 0 0 8 1 】**

図 8 B に、第 1 アジマス角での計測データの分析に依拠し推定されたトレンチ深さパラメタ値 D と、第 2 アジマス角でのそれと、の間の差分についての描線図 178 を示す。描線 179 は、計測下素材の誘電率について等方性モデルが採用されているときの差分値を描いたものである。描線 180 は、計測下素材の誘電率について異方性特徴記述が採用されているときの差分値を描いたものである。

**【 0 0 8 2 】**

図 8 C に、第 1 アジマス角での計測データの分析に依拠し推定された上部 C D パラメタ値 T C D と、第 2 アジマス角でのそれと、の間の差分についての描線図 181 を示す。描線 182 は、計測下素材の誘電率について等方性モデルが採用されているときの差分値を描いたものである。描線 183 は、計測下素材の誘電率について異方性特徴記述が採用されているときの差分値を描いたものである。

**【 0 0 8 3 】**

図 8 D に、第 1 アジマス角での計測データの分析に依拠し推定された M C D オフセットパラメタ（即ちピッチウォーク）値と、第 2 アジマス角でのそれと、の間の差分についての描線図 184 を示す。描線 185 は、計測下素材の誘電率について等方性モデルが採用されているときの差分値を描いたものである。描線 186 は、計測下素材の誘電率について異方性特徴記述が採用されているときの差分値を描いたものである。

**【 0 0 8 4 】**

図 8 A ~ 図 8 D に描かれているように、等方性モデルを採用すると、相異なる 2 個の計測サブシステム（即ち相異なる二通りのアジマス角）間の一一致が貧弱になる。x 方向沿いシリコン M C D が非常に長いのに対し、y 方向沿いシリコン M C D がこの具体例の場合 14 nm 未満であることからすれば、これは理解できることである。量子効果及び界面効果は共に 20 nm 未満で顕著であるので、異方性素材モデルが有利になりうる。描線 177、180、183 及び 186 にて示した計測例では、分散パラメタ n 及び k を浮動させつつ両計測サブシステムに係る計測データの分析を行っている。図 8 A ~ 図 8 D に描かれているように、異方性モデルを採用すると、それら相異なる 2 個の計測サブシステム間の一一致が秀逸になる。

**【 0 0 8 5 】**

図 9 に、例えば計測システム 100 により計測される構造の例 190 の描像を示す。この例では、構造 190 が、シリコン基板 191 上に位置する二酸化シリコン 192 で囲まれたタンゲステン格子構造 193 を有している。そのタンゲステン格子の C D は約 10 nm であり、同タンゲステン格子の高さは約 30 nm である。

**【 0 0 8 6 】**

この例では、分散パラメタ n 及び k を相異なる 2 個の計測サブシステムに関し浮動させている。それら 2 個の計測サブシステムは相直交する二通りのアジマス角（例 . A z = 0 ° 及び A z = 90 ° ）である。分散パラメタ値の回帰に係るシード値は、どちらの計測サブシステムについても、タンゲステン膜ターゲット（例 . 図 3 に示した構造 150 ）の計測値に設定した。図 2 に示す当てはめ分析モジュール 147 により回帰を実行し、両計測サブシステムに関し n 及び k を最適値に到達させた。分散パラメタの最適化なし（即ち等方性素材モデル）では、スペクトル当てはめ度が極めて貧弱になった（即ち  $\chi^2 \sim 1500$  ）。これに対し、各計測サブシステムに係る分散パラメタそれぞれの最適化後には（即ち異方性素材モデルでは）、スペクトル当てはめ度が非常に良好になった（即ち  $\chi^2 \sim 50$  ）。

10)。

#### 【0087】

図10に、図1に示す計測システム100によりある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の実成分値nの描線図194を示す。描線197は、タンゲステン膜ターゲット(例・図3に示す構造150)の計測に係るnの計測値を示している。描線196は、0°なるアジマス角でのタンゲステン格子構造193(図9に示すそれ)の計測に係るnの計測値を示している。描線195は、90°なるアジマス角でのタンゲステン格子構造193の計測に係るnの計測値を示している。

#### 【0088】

同様に、図11に、図1に示す計測システム100によりある照明波長域に亘り計測された複素屈折率の虚成分値kの描線図198を示す。描線201は、タンゲステン膜ターゲット(例・図3に示す構造150)の計測に係るkの計測値を示している。描線199は、0°なるアジマス角でのタンゲステン格子構造193(図9に示すそれ)の計測に係るkの計測値を示している。描線200は、90°なるアジマス角でのタンゲステン格子構造193の計測に係るkの計測値を示している。

#### 【0089】

図10及び図11に示すように、タンゲステン格子構造193について等方性特徴記述が採用されている場合、顕著な計測誤差が見込まれる。

#### 【0090】

注目パラメタ(即ちH及びCD)の値を、相異なる二通りのアジマス角での構造190の計測に係る計測データの分析に依拠し、誘電率についての相異なる二通りの特徴記述で以て推定してみた。図12A及び図12Bはそれら分析の結果を描いたものである。

#### 【0091】

図12Aに、第1アジマス角での計測データの分析に依拠し推定されたCDパラメタ値と、第2アジマス角での計測データの分析に依拠するそれと、の間の差分についての描線図205を示す。描線206は、計測下素材の誘電率について等方性モデルが採用されているときの差分値を描いたものである。描線207は、計測下素材の誘電率について異方性特徴記述が採用されているときの差分値を描いたものである。

#### 【0092】

図12Bに、第1アジマス角での計測データの分析に依拠し推定された高さパラメタ値Hと、第2アジマス角でのそれと、の間の差分についての描線図208を示す。描線210は、計測下素材の誘電率について等方性モデルが採用されているときの差分値を描いたものである。描線209は、計測下素材の誘電率について異方性特徴記述が採用されているときの差分値を描いたものである。

#### 【0093】

図12A及び図12Bに描かれているように、等方性モデルを採用すると、相異なる2個の計測サブシステム(即ち相異なる二通りのアジマス角)間の一致が貧弱になる。ある方向に沿ったタンゲステンCDが非常に長いのに対し、他方向のそれが約10nmであることからすれば、これは理解できることである。描線207及び209にて示した計測例では、分散パラメタn及びkを浮動させつつ、両計測サブシステムに係る計測データの分析を行った。図12A及び図12Bに描かれているように、異方性モデルを採用すると、相異なる2個の計測サブシステム間の一致が秀逸になる。

#### 【0094】

上掲の諸例では、計測下構造についての異方性素材特徴記述が、各計測に係るアジマス角の変化に依存して変化する。しかしながら、一般に、計測下構造についての異方性素材特徴記述が、計測システムパラメタ値のどのような組合せにおける変化に依存して変化するのでもよい。

#### 【0095】

別の態様では、モデル依拠計測が、誘電率行列の非対角要素を0値と仮定する、なる想定で以て実行される。これにより、電磁モデル構築及び当てはめ分析が顕著に単純化され

10

20

30

40

50

る。

#### 【 0 0 9 6 】

更に別の態様では、モデル依拠計測が、計測下幾何の主軸に揃うよう選択されたアジマス角にて実行される。この仮定が有利になりうるのは、一方向に沿い周期性を呈するパターンのフィーチャを有するスタック構造について、計測を実行するときである（例．フィン構造、ゲート構造等々）。それらの例では、周期性方向に揃っている第1方向（例． $A_z = 0^\circ$ ）に沿い計測が実行され、その第1方向に対し垂直な第2方向（例． $A_z = 90^\circ$ ）に沿いもう1回計測が実行される。こうした単純な照明幾何（ $A_z = 0$  及び  $A_z = 90$ ）により、 $p$  偏向及び  $s$  偏向の完全分離が可能となる。とはいっても、偏向分離させた場合でも、エリプソメトリ信号に  $s$  偏向及び  $p$  偏向の双方が含まれるため、エリプソメトリ信号を正確にモデル化するには複数通りの屈折率が必要となる。これらの実施形態では、計測下構造についての素材特徴記述が、各計測に係るアジマス角に依存して変化する。10

#### 【 0 0 9 7 】

別の更なる態様では、一通り又は複数通りの注目パラメタの初期推定値が、計測ターゲットに対する入射照明ビームの向きをある单一の向きにして光学計測を実行した結果に基づき求められる。それら初期推定値が注目パラメタの開始値として実装され、複数通りの向きでの光学計測で集められた計測データで以てする計測モデルの回帰に供される。この形態では、注目パラメタの密推定値が比較的少量の情報処理労力で以て求まり、その密推定値をより大規模なデータセットに亘る回帰向けの開始点として実装することで、その注目パラメタの精細推定値が少な総情報処理労力で以て得られる。20

#### 【 0 0 9 8 】

ある例では、各計測チャネル（即ちサブシステム）の光分散パラメタの初期値が、同じ計測下素材の膜ターゲットから求まったバルクパラメタ値又は分散パラメタ値と共にシードされる。

#### 【 0 0 9 9 】

別の態様では、半導体構造の光学的モデル依拠計測に、その計測下構造を構成する一種類又は複数種類の素材の光分散についての特徴記述であり、その構造の幾何に依存するものが、組み込まれる。幾つかの実施形態では、計測下半導体構造を構成する素材の誘電率が等方性なものとして扱われる。それらの実施形態では誘電率が幾何形状の関数  $(\cdot, g)$  として扱われる。他の幾つかの実施形態では、誘電関数が多次元テンソルとして扱われ、その多次元テンソルの要素のうち1個又は複数個が幾何形状の関数  $_{i,j}(\cdot, g)$  として扱われる。幾つかの実施形態では、光分散指標  $n$  及び  $k$  が、計測下構造の幾何プロファイルに加え、計測サブシステムパラメタ（例．光電場方向、光偏向、AOI、アジマス角等々）に依存する。30

#### 【 0 1 0 0 】

更なる態様では、それら光分散パラメタが、基本的幾何パラメタの推定値が反復的に更新されるにつれて回帰中に変化する。ある例では、それら浮動している素材パラメタを用い注目構造パラメタが監視され、量子効果の特徴を記述する光応答モデルがその監視に用いられる。この意味で、部分的に幾何パラメタによって素材パラメタ推定値の特徴を記述することで、それら幾何パラメタに対する計測感度が増強される。40

#### 【 0 1 0 1 】

半導体構造における量子閉じ込めは、屈折率及び吸収係数の変化を引き起す。これは、ときに、強ビルトイン電場存在下での量子閉じ込めシュタルク効果と呼ばれるものである。半導体量子閉じ込めの場合、その電子正孔間波動関数重複が増大する。これは光吸収の増加をもたらす。加えて、クラマース・クローニヒ関係式に従い屈折率の変化が生じる。ビルトイン電場下にある半導体量子井戸では、その電子正孔間波動関数重複が減少すると光吸収が減少し、それに付随する屈折率の変化が生じる。これらの場合、等方性光素材応答なる仮定は計測誤差につながる。

#### 【 0 1 0 2 】

ある種の素材（例．金属及び半導体）からなる量子井戸構造、量子ワイヤ構造、量子ド50

ット構造等々では量子効果が発生する。量子井戸は、その層の表面又は界面に対し垂直な次元に沿った粒子例えは電子及び正孔の閉じ込めが可能な層として、定義することができる。それに直交する二方向に沿った動きは制約されないままとなる。従って、量子井戸は一次元閉じ込め系である。

#### 【0103】

量子井戸は、別種素材同士を結びつけることで作成することができる。物理的には、量子井戸とは、より広い禁制帯幅を有する他の2個の層によって囲まれた薄層のことである。通常、その薄層のことを「井戸」と呼び、その「井戸」の各側にある周囲層のことをそれぞれ「障壁」と呼んでいる。通常、量子閉じ込め効果が半導体素材にて生じるのは、その井戸構造(例・層)の厚みが20nm未満の場合である。金属では、より大きな厚みでも量子閉じ込め効果が生じうる。10

#### 【0104】

図13に、例えば計測システム100により計測される構造の例220を示す。この例では、厚みTを有するタンゲステン薄層222が、タンゲステンとは異なる素材の層221及び223の間に挟まれている。幾つかの例では、そのタンゲステン層の厚みが20nmとされる。照明源102により照明光224がもたらされるのに応じ光225が分光計104により集められる。半導体膜スタック構造220は量子井戸として作成されている。層222は薄素材層(即ち井戸)であり層221及び223(即ち障壁)間に挟まれている。薄層例えは層221～223の作成には分子線エピタキシ(MBE)、金属有機化学気相堆積法(MOCVD)等の作成テクノロジが用いられる。層221～223は、z方向においては比較的薄く、x方向及びy方向においては比較的大きな寸法を有している。20

#### 【0105】

この例では量子閉じ込めがz方向において発生する。先に述べたように、層222に係る素材・光応答特性は異方性である。この井戸層のz方向沿い誘電率は、x方向沿い及びy方向沿いの誘電率とは異なっている。とはいっても、光応答自体は照明アジマス角とは独立である。

#### 【0106】

図14に、例えば計測システム100により計測される構造の例230を示す。この例では、厚みTを有するタンゲステン薄層が別種素材231によって囲まれている。幾つかの例では、このタンゲステン層の厚みが20nm未満とされる。ある回の計測では、照明光233が照明源102によつてもたらされるのに応じ光235が分光計104により集められる。別の回の計測では、照明光234が照明源102によつてもたらされるのに応じ光236が分光計104により集められる。30

#### 【0107】

先進的リソグラフィ技術、例えは多重パターニング技術によれば、その厚みが20nm未満の横方向(CD)構造の作成が可能である。その半導体製造プロセスフローではx-y平面内量子井戸、例えは図13に示す構造220がMBE及びMOCVDにより意図的に作成される。これに対し、「縦」量子井戸例えは構造230はデバイス寸法縮小の結果として非意図的に作成される。それら非意図的な「縦」量子井戸構造は、デバイスの性能や歩留まりに大きな影響を及ぼさないが、分光計測結果にはまさに大きな影響を持っている。この例では、その井戸層のy方向沿い誘電率がx方向沿い誘電率とは違うものになる。結果としてその光応答が照明アジマス角に依存することとなる。40

#### 【0108】

最も広く用いられている分散モデルはローレンツモデルであり、これは高調波発振子モデルとしても知られている。ローレンツモデルでは、光学照明下素材内で原子に拘束されている電子の発振が高調波発振子のアンサンブルとして扱われる。ある例では、誘電関数の表現が、 $n_b$ を均一な背景屈折率(デフォルト値=1)、Eを波長の関数たる  $E = 1240 / \lambda$  により表される電場エネルギー、 $H_s$ を第s発振子の寄与分、 $\alpha_s$ を第s発振子に係る局所場補正係数とする式(6)50

## 【数5】

$$\varepsilon(E) = n_b + \frac{\sum_{s=1}^m H_s(E)}{1 - \sum_{s=1}^m v_s H_s(E)} \quad (6)$$

にて記述される。 $v_s$  は、金属では 0 に等しく、大抵の半導体では 0 に近く、理想誘電体では 0.333 に等しい。 $H_s$  は、 $R_y$  をリュードベリ定数 (13.6058 eV に等しい)、 $r_0$  をボーア半径 (0.0529177 に等しい)、 $N_s$  を第 s 発振子の相対的重要性を表す第 s 発振子個数密度、 $E_{n_s}$  を第 s 発振子の共鳴エネルギー、 $E_{g_s}$  を第 s 発振子の減衰定数エネルギー、 $\phi_s$  を第 s 発振子の相対位相とする式 (7)

## 【数6】

$$H_s = \frac{16\pi N_s R_y^2 r_0^3}{(E_{n_s}^2 - E^2 + iE_{g_s}E)} e^{-i\Phi_s} \quad (7)$$

にて子細に記述される。共鳴エネルギーの最低値はしばしば禁制帯幅エネルギーと呼ばれる。ローレンツモデルは多くの素材、具体的には半導体素材例えば Si、Ge、SiGe や金属例えば W、Cu、Co 等々をはじめ、数個のピークを有する素材を記述するのに広く用いられている。

## 【0109】

式 (7) 中の発振子パラメタは、閉じ込め方向 (例. 図 13 では z 方向、図 14 では y 方向) に沿った量子閉じ込め効果に対し敏感である。

## 【0110】

共鳴エネルギー  $E_{n_s}$  及び発振子強度  $N_s$  が最も敏感である。加えて、量子閉じ込めを呈する構造のモデルには、エネルギーレベルの離散性故、より多数の発振子が含まれるべきである。

## 【0111】

一次元 (即ち閉じ込め方向沿い) シュレーディンガー方程式により量子井戸の基本特性を記述すると、 $V(z)$  を閉じ込め方向 (この例では z 方向) に沿いその粒子から見た量子井戸ポテンシャル、 $\psi_n$  を波動関数とする式 (8)

## 【数7】

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi_n}{dz^2} + V(z)\psi_n = E_n\psi_n \quad (8)$$

に示すものとなる。その井戸の各側面が無限高であると見なせる場合、式 (8) の解は、 $L_z$  をその井戸の z 方向沿い寸法、 $z$  をその井戸における z 方向沿い位置とする式 (9) 及び (10)

## 【数8】

$$E_n = \frac{-\hbar^2}{2m} \left[ \frac{n\pi}{L_z} \right]^2 \quad n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

$$\psi_n = A \sin\left(\frac{n\pi z}{L_z}\right) \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

により与えられる。

## 【0112】

式 (9) を式 (7) と組み合わせることで明らかになる通り、量子閉じ込め効果がその計測モデルにて考慮されている場合、各発振子のエネルギーレベル ( $E_{n_s}$ ) はその井戸の閉じ込め方向沿い寸法に依存する。

10

20

30

40

50

## 【0113】

シリコン、ゲルマニウム及びセレン化カドミウムのナノ結晶では、室温における禁制帯幅とその構造のサイズdとの間の関係が、 $E_{bandgap}$ をバルク禁制帯幅、 及びをそのナノ構造の素材及びサイズ(即ち量子井戸厚み)に依存するものとする式(11)

$$E_{bandgap}(d) = E_{bandgap_0} + / d \quad (11)$$

により、近似的に与えられる。シリコンナノ構造では、式(11)が式(12)

$$E_{bandgap}(d) = E_{bandgap_0} + 3.73 / d^{1.73} \quad (12)$$

により近似される。

## 【0114】

10

シリコンナノ構造では、式(12)を式(6)及び(7)に代入することで、誘電率を計測下構造の寸法の関数として表すことができる。

## 【0115】

総じて、本件特許出願の技術的範囲内で、幾つかの方法論を、フィーチャの幾何形状及びサイズに対する誘電関数の依存性を繰り入れるのに用いることができる。ある例によれば、マクスウェル・ガーネットの有効媒質理論を採用し、計測下フィーチャの幾何形状及びサイズに対する誘電関数の依存性をモデル化することができる。

## 【0116】

幾つかの例では、光分散パラメタn及びkが、構造の幾何パラメタに対し依存するよう、例えば $n_j$ ( ; C D , H T , S W A )及び $k_j$ ( ; C D , H T , S W A )とパラメタ化される。

20

## 【0117】

ある例では、式(13)

## 【数9】

$$\alpha(\omega, d) = 2.77e6 [ (E/E_{bandgap}) (E_{bandgap}+0.044) / (3E_{bandgap}+0.088) ] (\hbar\omega - E_{bandgap})^{0.5} \quad (13)$$

によって、シリコンナノ構造の光吸収係数が、式(12)に示した禁制帯幅・量子井戸厚み間関係に基づき禁制帯幅の関数として表される。

## 【0118】

30

同様に、式(14)

## 【数10】

$$\varepsilon_2(\omega, d) = 92 (E_{bandgap}/\hbar\omega) (E_{bandgap}+0.044) / (3E_{bandgap}+0.088) ] (\hbar\omega - E_g)^{0.5} / \hbar\omega \quad (14)$$

によって、誘電関数の虚部が、式(12)に示した禁制帯幅・量子井戸厚み間関係に基づき禁制帯幅の関数として表される。

## 【0119】

光学パラメタのパラメタ化は、有効媒質理論近似の一種に依拠し実行してもよいし、別 の方法で実行してもよい。有効媒質理論その他の理論を用いることで、量子方式に従い誘導関数の挙動を考慮に入れることができる。ある例では、テーブル化されたバルク挙動と、量子効果を呈することがわかっている幾何形状での挙動との間に、直線的遷移が想定される。ルックアップテーブルをバルク・量子挙動間補間付きで用いてもよい。

40

## 【0120】

図15に、例えば計測システム100により計測される構造の例240を示す。この例では、20nm未満の限界寸法を有するシリコンフィン構造241が計測される。

## 【0121】

この例では、相異なる多数のフィン構造が計測されており、そのフィン構造がそれぞれ既知な別々のCD値を有している。5個の高調波発振子を含むローレンツモデルが式(5)及び(6)に従い実装されている。加えて、禁制帯幅エネルギーが式(12)に従い構造

50

241の幾何形状に関連付けされている。バルクシリコンの分散パラメタ値が分散パラメタに係るシード値として用いられている。計測モデルの回帰分析を計測データに基づき実行することで、分散パラメタ値の最適化が図られている。

#### 【0122】

図16に、ローレンツモデルの第1発振子に係る共鳴エネルギーE1の値を様々なCD値のフィン構造241に関し示す。図17に、ローレンツモデルの第2発振子に係る共鳴エネルギーE2の値を様々なCD値のフィン構造241に関し示す。図16及び図17に描かれているように、E1及びE2が共に量子効果に従い変化していることから、井戸が狭まるにつれエネルギーレベルが高まるものと予測される。

#### 【0123】

更なる態様では、誘電率を記述する多次元テンソルの要素のうち1個又は複数個が別様にモデル化される。例えば、その多次元テンソルの別々の要素<sub>i,j</sub>( , g)に関し別々の多発振子モデルを用いてもよい。そのモデルを構成する個別の発振子モデルに係る発振子定数は構造幾何に依存する。それらの例では、その構造を構成する素材の誘電率を記述する多次元テンソルの要素が、その多次元テンソルの他要素とは別様にモデル化される。

#### 【0124】

幾つかの実施形態では、注目幾何パラメタ(例.H、CD、深さ等々)が、等方性モデルに依拠し推定された分散パラメタ値と、光分散の異方性モデルに依拠し推定された同種の分散パラメタの値と、の間の差分に基づき、推定される。ある例では、図1に示した計測システム100の情報処理システム116によって、それぞれ図5、図6に示されているn,kの推定値間の差分に基づき、フィーチャ157の厚みTの値が推定される。

#### 【0125】

図1に示すように、計測システム100は分光エリプソメータである。しかしながら、一般に、計測システム100は、分光エリプソメータ、分光リフレクトメータ(反射率計)、回転偏光子回転補償器型分光エリプソメータ(RPRCSE)、偏向分光リフレクトメータ、フォトリフレクトメータ等々として構成することができる。一般に、本願記載の技術は、どのようなモデル依拠分光計測システムから、或いはモデル依拠分光計測システムのどのような組合せから集まる計測データに対しても、適用することができる。

#### 【0126】

更なる態様では、個別の計測アプリケーションに係る計測レシピ(即ち様々な計測システムパラメタ、様々な計測システム或いはその双方の組合せ)が、光分散の異方性モデルを構成する浮動パラメタ間で、最高感度且つ最低相関となるよう最適化される。

#### 【0127】

図18には、本発明のシステム100による実行に適したプロセスフロー300が描かれている。ある態様によれば、認識されている通り、事前にプログラミングされているアルゴリズムを情報処理システム116に備わる1個又は複数個のプロセッサにより実行することで、プロセスフロー300を構成するデータ処理ステップを実行することができる。以下の記述はシステム100の文脈に従い提示されているが、本願にて認識されている通り、システム100の具体的な構造的側面により限定事項が表されているわけではなく、それらは専ら例証として解釈されるべきである。

#### 【0128】

ブロック301では、未仕上げの多層半導体ウェハ上に作成された構造に対しあるスペクトル域に亘り、例えば照明器102によって第1量の照明を提供する。

#### 【0129】

ブロック302では、第1量の照明に応じ計測下構造から、例えば分光計104によって第1量の光を集める。

#### 【0130】

ブロック303では、計測下構造のスペクトル応答を示す第1量のスペクトルデータを、例えば分光計104によって生成する。

10

20

30

40

50

**【 0 1 3 1 】**

ブロック 304 では、計測下構造の光分散についての異方性特徴記述を含む計測モデルに依拠し、例えば情報処理システム 116 によって、その計測下構造に係る一通り又は複数通りの注目幾何パラメタの値を推定する。

**【 0 1 3 2 】**

別の更なる態様では、推定された注目パラメタに少なくとも部分的に基づき、その半導体ウェハの製造プロセスを制御することで、デバイス性能を向上させる。ある例によれば、本願記載の如く光分散についての異方性特徴記述に依拠し推定された C D 値に基づき、C D を制御することができる。

**【 0 1 3 3 】**

別の更なる態様では、計測下構造に備わる様々なフィーチャに係る注目パラメタの個別推定が、同じスペクトル応答データに基づき実行される。例えば、計測下ウェハが複数個の層及び構造フィーチャを有していることがある。分光計 104 から受け取るスペクトル応答データには、それらの層及びフィーチャ全てからの寄与分が含まれている。それらの層及びフィーチャそれぞれの寄与分を捉える計測モデルを用いることで、分析下にある個別の物理層又はフィーチャに係る注目パラメタを個別に求めることができる。

**【 0 1 3 4 】**

1 個又は複数個の例示的実施形態では、上述の機能がハードウェア、ソフトウェア、ファームウェア又はそれらの任意の組合せの態で実現されうる。ソフトウェアの態で実現する際には、それらの機能が 1 個又は複数個の命令又はコードとしてコンピュータ可読媒体上に格納され又はその媒体上で伝送されうる。コンピュータ可読媒体にはコンピュータ格納媒体及び通信媒体の双方、例えばコンピュータプログラムがある場所から別の場所へと転送するのに役立つ媒体全てが含まれる。格納媒体は、汎用又は専用コンピュータによるアクセスが可能な、どのような入手可能媒体でもよい。限定としてではなく例として言うなら、そうしたコンピュータ可読媒体は、RAM、ROM、EEPROM、CD-ROM その他の光ディスクストレージ、磁気ディスクストレージその他の磁気格納装置をはじめ、命令又はデータ構造の形態を探る所望のプログラムコード手段の搬送又は格納に使用することが可能で、且つ汎用又は専用コンピュータ或いは汎用又は専用プロセッサがアクセスすることが可能な、任意の媒体を以て構成することができる。また、どのような接続であれコンピュータ可読媒体と称して差し支えない。例えば、ソフトウェアをウェブサイト、サーバその他のリモートソースから送信するに当たり同軸ケーブル、光ファイバケーブル、ツイストペア、デジタル加入者線 (DSL) 又は無線テクノロジ例えば赤外線、無線周波数若しくはマイクロ波が用いられるのであれば、それら同軸ケーブル、光ファイバケーブル、ツイストペア、DSL 又は無線テクノロジ例えば赤外線、無線周波数若しくはマイクロ波は媒体の定義に収まる。本願中の用語ディスク (disk/disc) には、コンパクトディスク (CD)、レーザディスク、光ディスク、デジタルバーサタイルディスク (DVD)、フロッピー (登録商標) ディスク及びブルーレイ (登録商標) ディスクを含め、通常はデータが磁気的に再生されるディスク (disk) 及びレーザで以てデータが光学的に再生されるディスク (disc) が含まれる。上掲のものの組合せもまたコンピュータ可読媒体の範囲内に包含させるべきである。

**【 0 1 3 5 】**

本願中の用語「ウェハ」は、総じて、半導体又は非半導体素材で形成された基板を指している。こうした半導体又は非半導体素材の例としては、これに限られるものではないが、単結晶シリコン、シリコンオンインシュレータ、歪みシリコンオンインシュレータ、ヒ化ガリウム及び燐化インジウムがある。こうした基板は半導体製造設備にて目撃及び / 又は処理されることが多い。

**【 0 1 3 6 】**

ウェハ上には 1 個又は複数個の層が形成されうる。例えば、こうした層の例には、これに限られるものではないが、レジスト、誘電体素材、導電素材及び半導体素材が含まれうる。こうした層については相異なる多くの種類が本件技術分野で知られているところ、本

10

20

30

40

50

願中の用語ウェハには、その種類を問わずそうした層がその上に形成されうるウェハを包括する、という意図がある。

#### 【0137】

ウェハ上に形成された1個又は複数個の層がパターニングされていることも未パターニングなこともあります。例えば、ウェハ内に複数個のダイがありそれらがそれぞれ可反復パターンフィーチャを有していることがあります。こうした素材層の形成及び処理を通じ最終的にはデバイスの完成品を得ることができる。相異なる多くの種類のデバイスをウェハ上に形成しうるところ、本願での用語ウェハには、その種類を問わず本件技術分野で既知なデバイスがその上に作成されるウェハを包括する、という意図がある。

#### 【0138】

通常の半導体プロセスには、ロットによるウェハ処理が含まれている。本願で用いるところの「ロット」とは、一緒に処理されるウェハの集団のことである（例。25枚のウェハからなる集団）。ロット内の各ウェハはリソグラフィ処理ツール（例。ステッパー、スキャナ等々）に対する多くの露出フィールドを有している。各フィールド内に複数個のダイが存しうる。ダイは、最終的には単一のチップになる機能ユニットである。ウェハ上に形成された1個又は複数個の層がパターニングされることもパターニングされないこともあります。例えば、ウェハが複数個のダイを有し、そのダイがそれぞれ可反復パターンフィーチャを有していることがある。こうした素材層の形成及び処理により最終的にはデバイスの完成品が得られよう。相異なる多種類のデバイスをウェハ上に形成しうるところ、本願中の用語ウェハには、その種類を問わず本件技術分野で既知なデバイスがその上に作成されるウェハを包括する、という意図がある。

10

#### 【0139】

本願ではウェハを基準にして諸実施形態を記述したが、ご理解頂けるように、それら実施形態を他試料、例えばマスクやフォトマスクとも通称されうるレティクルの構造の特徴記述に、用いることができる。相異なる多種類のレティクルが本件技術分野で既知などころ、本願中の用語「レティクル」、「マスク」及び「フォトマスク」には、本件技術分野で既知なあらゆる種類のレティクルを包括する、という意図がある。

20

#### 【0140】

本願ではウェハに対する構造計測の適用を基準にして諸実施形態を記述したが、ご理解頂けるように、本願中で開示されている方法及びシステムを、半導体構造の限界寸法、半導体構造の層間オーバレイ、並びに半導体構造の素材組成の特徴記述に用いてよい。

30

#### 【0141】

本願記載の諸実施形態は、総じて、光学モデルパラメタ値に依拠し多層構造の注目パラメタを高スループットで求める方法に関するものである。例えば、ある実施形態に係るコンピュータ実行方法では、分光エリプソメータデータから導出された光学モデルパラメタ値に基づき多層構造の限界寸法が求められる。しかしながら、他の諸例では、本願記載の技術を用いた限界寸法、オーバレイ及び素材組成の計測も考慮されうる。同様に、本願記載の方法は、そこから光学モデルパラメタ値が導出されうる計量システムの種類で限定されるものではない。例えば、ある実施形態では、計量システムにリフレクトメータを具備させる。一般に、本願記載の光分散モデルは、様々な広帯域及び狭帯域計量ツールから受け取った計測データの分析に適用することができる。例えば、分光エリプソメータ及びリフレクトメータや多角エリプソメータ及びリフレクトメータは、何個の又はどのような種類の照明源（例。可視、赤外、紫外、真空紫外、深紫外スペクトルにて発光するランプ又はレーザをベースとする光源）を有するものであれ、本件特許出願の技術的範囲内にあるものと認められうる。

40

#### 【0142】

加えて、その計量システムを、パターニング済ウェハ及び/又は未パターニングウェハの検査向けに構成することができる。その検査システムを、LED検査ツール、エッジ検査ツール、背面検査ツール、マクロ検査ツール又はマルチモード検査ツール（1個又は複数個のプラットフォームからデータを同時に取り入れるそれ）として、また光学モデルパ

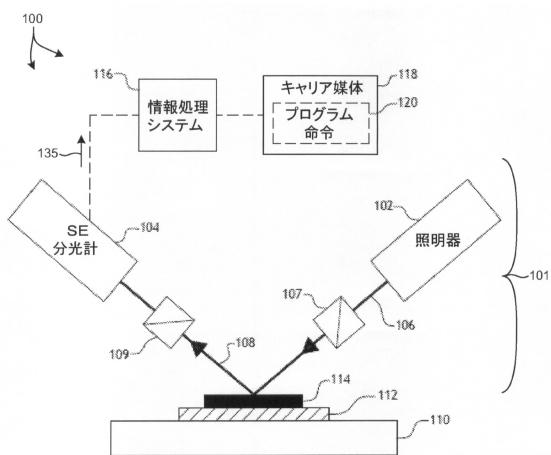
50

ラメタ値に基づく多層構造の構造的特徴の高スループットでの判別から利を受ける他のあらゆる計量又は検査ツールとして構成することができる。従って、語「計量」システム及び「検査」システムを互換的に用いる。

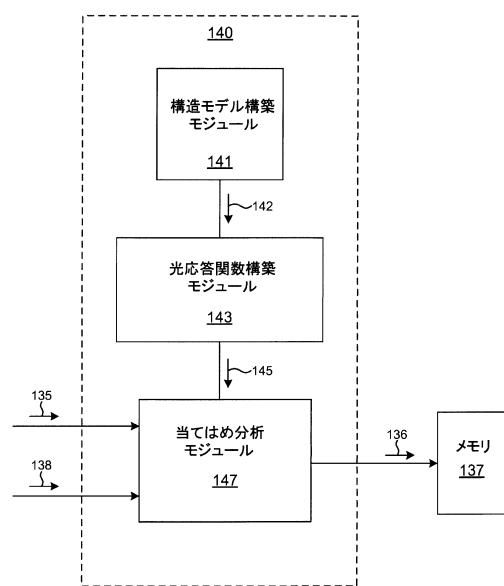
【 0 1 4 3 】

教示目的である特定の諸実施形態を上述したが、本件特許出願の教示は一般的な適用可能性を有するものであり、上述の具体的諸実施形態に限定されるものではない。従って、上述の諸実施形態の諸特徴については、特許請求の範囲中で説明されている発明の技術的範囲から離隔することなく、様々な修正、適合化並びに組合せを実施することができる。

【 図 1 】



【 図 2 】



【図3】

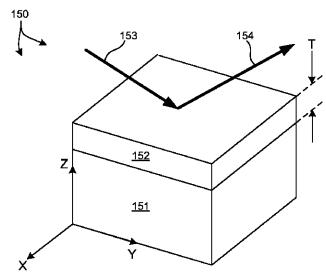


FIG. 3

【図4】

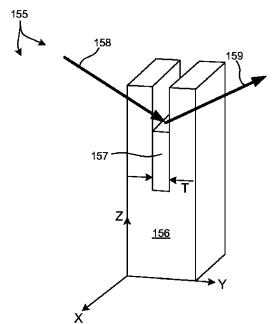


FIG. 4

【図5】

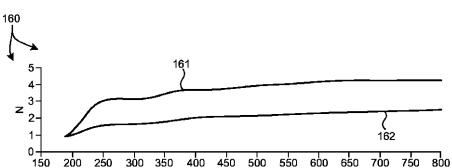


FIG. 5

【図6】

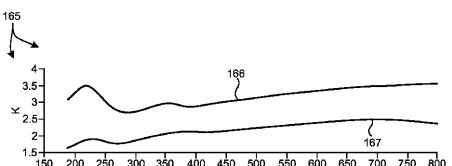


FIG. 6

【図7A】

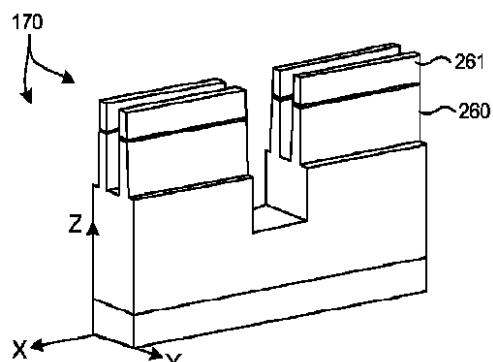


FIG. 7A

【図7B】

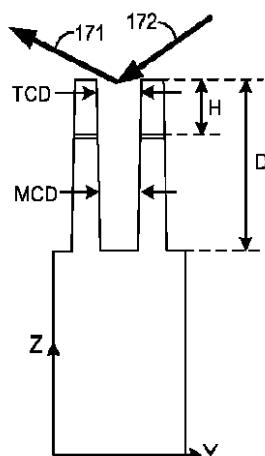


FIG. 7B

【図 7 C】

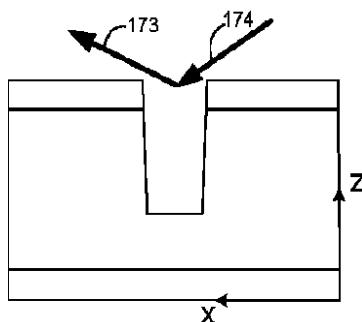
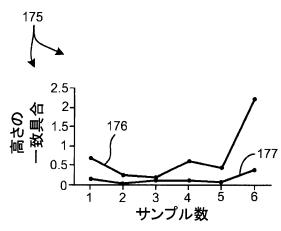
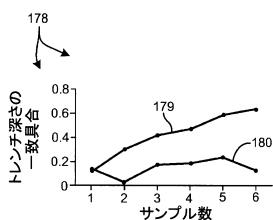


FIG. 7C

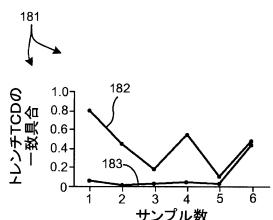
【図 8 A】



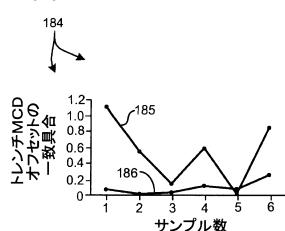
【図 8 B】



【図 8 C】



【図 8 D】



【図 9】

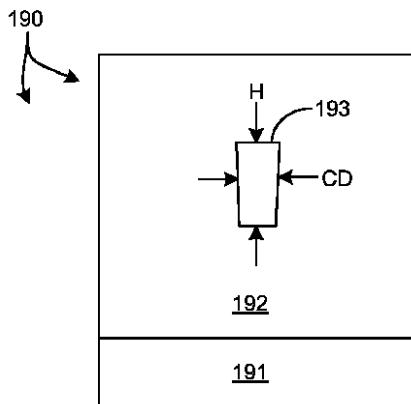
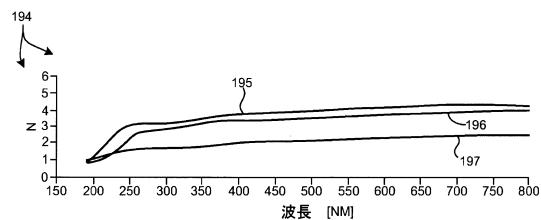
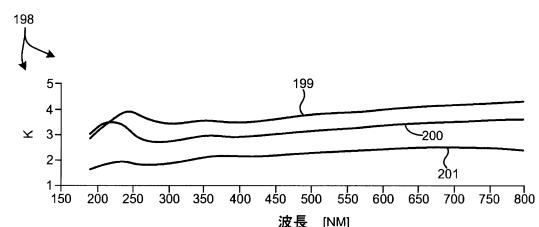


FIG. 9

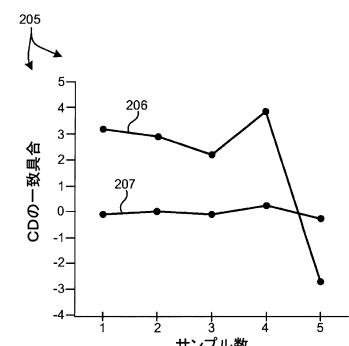
【図 10】



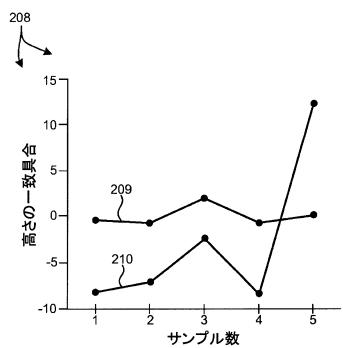
【図 11】



【図 12 A】



【図 1 2 B】



【図 1 4】

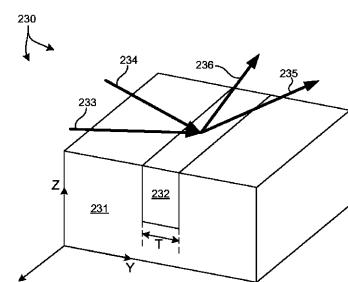


FIG. 14

【図 1 3】

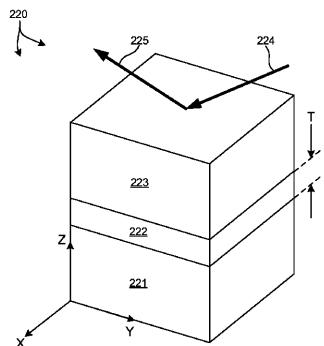


FIG. 13

【図 1 5】

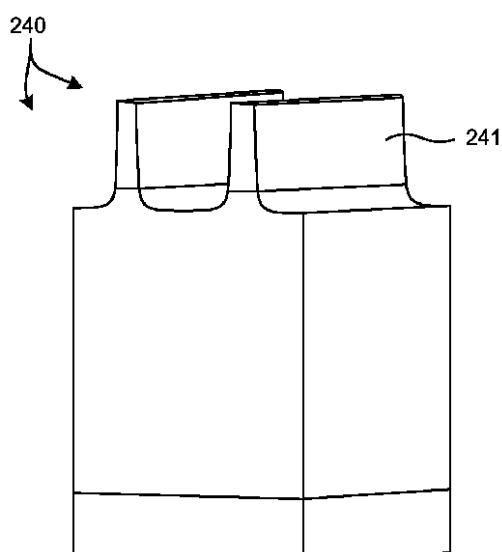
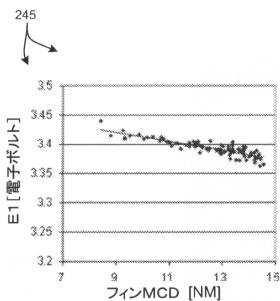
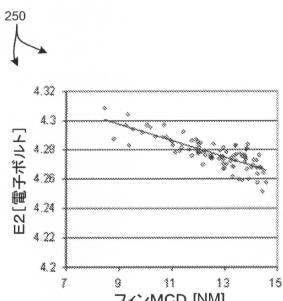


FIG. 15

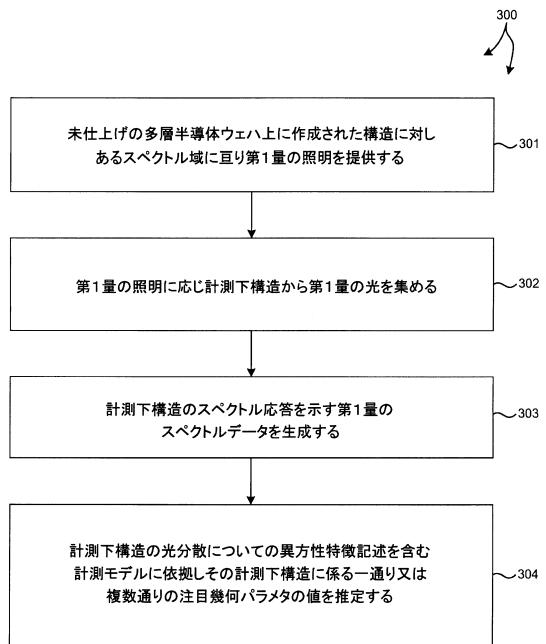
【図 1 6】



【図 1 7】



【図18】



---

フロントページの続き

早期審査対象出願

(72)発明者 シエグロフ アンドレイ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア ロス ガトス オーク リム ウェイ 120 アパートメン  
ト 27

(72)発明者 タン ゼンチェン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア クバチーノ クリフデン ウェイ 20306

審査官 堀江 義隆

(56)参考文献 特開2000-171212(JP,A)  
特表2005-534192(JP,A)  
特表2009-532869(JP,A)  
特表2015-500460(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/66  
G01N 21/21  
G01N 21/27