

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5873227号  
(P5873227)

(45) 発行日 平成28年3月1日(2016.3.1)

(24) 登録日 平成28年1月22日(2016.1.22)

(51) Int.Cl. F I  
GO 1 N 1/28 (2006.01) GO 1 N 1/28 F

請求項の数 17 外国語出願 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2008-308265 (P2008-308265)	(73) 特許権者	501419107
(22) 出願日	平成20年12月3日(2008.12.3)		エフ・イー・アイ・カンパニー
(65) 公開番号	特開2009-139379 (P2009-139379A)		アメリカ合衆国オレゴン州97124, ヒルズバラ, ノースイースト・ドーソンクリーク・ドライブ5350
(43) 公開日	平成21年6月25日(2009.6.25)	(74) 代理人	100103171
審査請求日	平成23年11月15日(2011.11.15)		弁理士 雨貝 正彦
審査番号	不服2014-5522 (P2014-5522/J1)	(72) 発明者	マシュー・ブレイ
審査請求日	平成26年3月25日(2014.3.25)		アメリカ合衆国 97219 オレゴン州
(31) 優先権主張番号	60/992, 998		ポートランド エスタブリュー ジャン・ツリー・コート 6205
(32) 優先日	平成19年12月6日(2007.12.6)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 デコレーションを用いたスライス・アンド・ビュー

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

荷電粒子ビームを用いて、基板(122)上の隠れた欠陥(302)を観察する方法であって、

(a) 前記基板の方にイオン・ビーム(118)を誘導して、少なくとも第1の材料および第2の材料を含む垂直壁(404)を露出させるトレンチ(402)を前記基板内でミリングし、前記第1の材料と前記第2の材料との界面が、露出された垂直壁の電子ビーム画像中には最初は見えていないようなステップと、

(b) 前記垂直壁から材料をエッチングするためのエッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビーム(143)を誘導し、前記第1の材料が前記第2の材料よりも速い速度でエッチングされ、前記第1の材料と前記第2の材料との間のエッチング速度の差が電子ビーム画像中で前記第1の材料と前記第2の材料との間の界面を可視化するのに十分であるようなステップと、

(c) 前記垂直壁の方に電子ビームを誘導して前記垂直壁の電子ビーム画像を形成し、該画像が前記第1の材料と前記第2の材料との間の界面を示すようなステップと、

(d) 前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記垂直壁から材料を除去して、少なくとも前記第1の材料および前記第2の材料を含んでいる次の垂直壁を露出させ、前記第1の材料と前記第2の材料との界面が、新たに露出された垂直壁の電子ビーム画像中には最初は見えておらず、前記垂直壁と前記次の垂直壁との間の距離が60nmであるようなステップと、

10

20

( e ) 画像化するために、ステップ ( b ) から ( d ) を 5 回繰り返すステップと、  
( f ) 前記垂直壁から材料をエッチングするためのエッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビーム ( 1 4 3 ) を誘導し、前記第 1 の材料が前記第 2 の材料よりも速い速度でエッチングされ、前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間のエッチング速度の差が電子ビーム画像中で前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間の界面を可視化するのに十分であるようなステップと、

( g ) 前記垂直壁の方に電子ビームを誘導して前記垂直壁の電子ビーム画像を形成し、該画像が前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間の界面を示すようなステップと、

( h ) 前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記垂直壁から材料を除去して、少なくとも前記第 1 の材料および前記第 2 の材料を含んでいる次の垂直壁を露出させ、前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との界面が、新たに露出された垂直壁の電子ビーム画像中には最初は見えておらず、前記垂直壁と前記次の垂直壁との間の距離が 5 0 n m であるようなステップと、

( i ) 画像化するために、前記 5 回繰り返すステップの後に、ステップ ( f ) から ( h ) を繰り返すステップと、  
を含む、方法。

【請求項 2】

前記垂直壁から材料をエッチングするためのエッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビーム ( 1 4 3 ) を誘導するステップが、前記垂直壁から 3 0 n m 未満除去するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記垂直壁から材料をエッチングするためのエッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビームを誘導するステップが、前記垂直壁から 2 0 n m 未満除去するステップを含む、請求項 1 または 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記基板の方にイオン・ビームを誘導して基準マーク ( 3 0 8 ) をミリングするステップをさらに含み、前記基板を移動させなくてもイオン・ビームを前記基準マークと前記トレンチとの間で移動できるように、前記基準マークが前記トレンチに十分に近接している、請求項 1 から 3 のいずれかに記載の方法。

【請求項 5】

ステップ ( b ) から ( d ) を繰り返すステップが、イオン・ビームを誘導して前記基準マークを少なくとも 1 回画像化して、イオン・ビームの位置決めを較正するステップを含む、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

イオン・ビームを誘導して前記基準マークを少なくとも 1 回画像化して、イオン・ビームの位置決めを較正するステップが、イオン・ビームを誘導して、ステップ ( d ) を各々繰り返す前に前記基準マークを少なくとも 1 回画像化して、イオン・ビームの位置決めを較正するステップを含む、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記基準マークをミリングするステップが、表面に対してほぼ直角にイオン・ビームを誘導するステップを含み、エッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビームを誘導するステップが、前記垂直壁に対して直角ではない角度で電子ビームを誘導するステップを含む、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 8】

イオン・ビームを用いて前記基板の画像を形成するステップをさらに含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

エッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビームを誘導するステップが、二フッ化キセノンの存在下で前記垂直壁の方に電子ビームを誘導するステップを含む、請求項 1 から 8 のいずれかに記載の方法。

10

20

30

40

50

## 【請求項 10】

前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記基板にトレンチをミリングするステップが、ウエハ検査システムからの欠陥ファイルから欠陥の座標を取得するステップと、この特定された欠陥座標の近傍にトレンチをミリングするステップとを含む、請求項 1 から 9 のいずれかに記載の方法。

## 【請求項 11】

ステップ (d) またはステップ (h) を少なくとも 1 回繰り返すステップが、欠陥の一部を露出させるステップを含む、請求項 10 に記載の方法。

## 【請求項 12】

前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記垂直壁から 30 nm 乃至 60 nm の材料を除去するステップが、除去された材料の厚さよりも大きいイオン・ビーム径を有するイオン・ビームを誘導するステップを含む、請求項 1 から 11 のいずれかに記載の方法。

## 【請求項 13】

ステップ (a) から (i) を実行する前に、前記基板の表面上に保護コーティングを堆積させるステップをさらに含む、請求項 1 から 12 のいずれかに記載の方法。

## 【請求項 14】

荷電粒子ビームを用いて欠陥を観察する装置であって、  
イオン・ビームを生成、集束、および誘導するイオン・ビーム・カラムと、  
電子ビームを生成、集束、および誘導する電子ビーム・カラムと、  
前記電子ビームおよび前記イオン・ビームの操作を制御するコントローラとを備え、  
該コントローラが、

(a) 基板の方にイオン・ビーム (118) を誘導して、少なくとも第 1 の材料および第 2 の材料を含む垂直壁 (404) を露出させるトレンチ (402) を基板内でミリングし、前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との界面が、露出された前記垂直壁の電子ビーム画像中には最初は見えていないような、格納されたコンピュータ命令と、

(b) 前記垂直壁から材料をエッチングするためのエッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビーム (143) を誘導し、前記第 1 の材料が前記第 2 の材料よりも速い速度でエッチングされ、前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間のエッチング速度の差が電子ビーム画像中で前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間の界面を可視化するのに十分であるような、格納されたコンピュータ命令と、

(c) 前記垂直壁の方に電子ビームを誘導して前記垂直壁の電子ビーム画像を形成し、該画像が前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間の界面を示すような、格納されたコンピュータ命令と、

(d) 前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記垂直壁から材料を除去して、少なくとも前記第 1 の材料および前記第 2 の材料を含んでいる次の垂直壁を露出させ、前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との界面が、新たに露出された垂直壁の電子ビーム画像中には最初は見えておらず、前記垂直壁と前記次の垂直壁との間の距離が 60 nm であるような、格納されたコンピュータ命令と、

(e) 画像化するために、前記コンピュータ命令 (b) から (d) を 5 回繰り返す、格納されたコンピュータ命令と、

(f) 前記垂直壁から材料をエッチングするためのエッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビーム (143) を誘導し、前記第 1 の材料が前記第 2 の材料よりも速い速度でエッチングされ、前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間のエッチング速度の差が電子ビーム画像中で前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間の界面を可視化するのに十分であるようなコンピュータ命令と、

(g) 前記垂直壁の方に電子ビームを誘導して前記垂直壁の電子ビーム画像を形成し、該画像が前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との間の界面を示すようなコンピュータ命令と、

(h) 前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記垂直壁から材料を除去して、少なくとも前記第 1 の材料および前記第 2 の材料を含んでいる次の垂直壁を露出させ、前記第 1 の材料と前記第 2 の材料との界面が、新たに露出された垂直壁の電子ビーム画像中には最

10

20

30

40

50

初は見えておらず、前記垂直壁と前記次の垂直壁との間の距離が50nmであるようなコンピュータ命令と、

(i) 画像化するために、前記コンピュータ命令(e)の後に、前記コンピュータ命令(f)から(h)を繰り返すコンピュータ命令と、  
を含むメモリを備えた、装置。

【請求項15】

エッチング強化ガスの存在下で前記垂直壁の方に電子ビームを誘導するコンピュータ命令が、前記垂直壁から30nm未満除去するコンピュータ命令を含む、請求項14に記載の装置。

【請求項16】

格納されたコンピュータ命令を含むメモリが、前記基板を移動させなくてもイオン・ビームを基準マークと前記トレンチとの間で移動できるように、基板の方にイオン・ビームを誘導して前記トレンチに十分に近接して前記基準マークをミリングするコンピュータ命令をさらに含む、請求項14または15に記載の装置。

【請求項17】

前記基板の方にイオン・ビームを誘導して前記基板に前記トレンチをミリングするコンピュータ命令が、ウエハ検査システムからの欠陥ファイルから欠陥の座標を取得し、この特定された欠陥座標の近傍に前記トレンチをミリングするコンピュータ命令を含む、請求項14に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はナノテクノロジーのための荷電粒子ビーム撮像に関する。

【背景技術】

【0002】

電子システム、光学システム、およびマイクロメカニカル・システムにおいて、一層小型の構造物を構築することをテクノロジーが要求するにつれて、数ナノメートルまたは数十ナノメートル程度の欠陥がデバイスの性能に悪影響を及ぼす可能性がある。このような欠陥は、欠陥の原因を特定して是正するために電子顕微鏡を用いて定期的に検査される。欠陥は、製造中に製品に生じる汚染粒子または製造欠陥(例えば、相互に電氣的に分離したい2つの近接配置された導体間に短絡を生じさせるブリッジ)を含むことがある。

【0003】

集束イオン・ビーム・カラムと電子ビーム・カラムとを備えるデュアル・ビーム装置(例えば、本発明の譲受人であるFEI社製造のCLM(商標)システム)が、欠陥の分析およびプロセスの監視に用いられる。欠陥は一般に、全ウエハ走査検査システム(例えば、KLA-Tencor社製造のシステム)を用いて発見される。このシステムは発見されたすべての欠陥の座標を含む欠陥ファイルを生成する。欠陥は一般に、製造されたウエハの一部を同一であるべきそのウエハの他の部分と比較することによって発見される。正常な外観から外れていることは、欠陥が存在することを示す。欠陥はウエハの表面上にあることもあるし、表面の下にあることもあり、次に塗布されることによって被覆される。このような検査システムは欠陥を発見することはできるが、典型的には欠陥の詳細な情報を提供することは不可能であるので、次いで、欠陥をより詳細に特徴付けするために、ウエハは典型的には電子顕微鏡などの画像化装置に装填される。

【0004】

フォトリソグラフィ・プロセスなどの製造プロセスの監視が目的のデュアル・ビーム装置では、画像認識ソフトウェアが対象の特徴部分を見出し、その対象の特徴部分を自動的に測定する。特徴部分の正確な場所は、リソグラフィ・マスク用の設計データから、またはウエハのレイアウト・データからわかる。次いで、この集束イオン・ビーム・システムは観察に好ましい場所の断面を露出させるために基板内でトレンチをエッチングすることができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 0 5 】

しかし、欠陥の位置が同じ精度ではわからないために、欠陥を観察することはより困難である。走査装置によって決定された欠陥位置が正確になるのは数マイクロメートル以内に限られる。また、走査装置によって用いられる座標系および撮像システムの座標系は典型的には、各システムにおけるウエハの位置決めに差があるためにずれが生じる。この座標系の差は、両システムにおいて同じ基準点を測定することによって決定されるずれの値を用いることによって補償することができる。計算されたずれの値を用いたとしても、欠陥位置が正確であるのは依然として数マイクロメートルに限られる。数十ナノメートルもの小ささの欠陥は製品の機能に悪影響を及ぼす恐れがあるので、そういった小さな欠陥を詳細に発見して詳細に検査することが必要になる。

10

## 【 0 0 0 6 】

欠陥を発見し、検査する1つの方法は、F E I社のDefect Analyzer (商標) 300のソフトウェアに組み込まれたSlice-and-View (商標) 技術を用いることである。Slice-and-View技術では、欠陥の全般的領域は検査装置からの欠陥ファイル内の座標からまず発見される。薄い、好ましくは伝導性の保護層が、例えば前駆ガスからの荷電粒子ビーム誘起堆積法を用いることによって、欠陥場所周りの領域に堆積される。例えば、タングステンヘキサカルボニルなどの前駆ガスを分解するためにイオンまたは電子ビームを用いてタングステン層を堆積させてもよい。欠陥領域が発見された後、基準点および配向を欠陥場所近傍に提供するために、基準マーク (例えば「X」) が集束イオン・ビームを用いてミリングされる。

20

## 【 0 0 0 7 】

想定された欠陥場所の前方の断面を露出させるために、傾斜したトレンチが次いでミリングされる。次いで、この断面の画像が電子ビームを用いて形成される。次いで、第1の表面から新しい断面を典型的には約0.03乃至0.04マイクロメートル露出させるために、追加の材料が断面からミリングされるが、第2のカットは欠陥のサイズに応じて断面からマイクロメートル以上まで行ってもよい。次いで、このカットの後に第2の電子ビーム画像が形成される。断面から少量の材料を除去し、画像を形成するこのプロセスは、典型的には15回または20回繰り返される。断面壁が想定された欠陥場所を進むにつれて、カット部の1つまたは複数欠陥の有用な画像を提供するものと考えられる。1つには、欠陥の位置が、ビームを直接位置決めして欠陥の断面をカットおよび観察するのに十分な精度でわからないので、Slice-and-View技術が必要となる。Slice-and-View技術は幾つかの欠陥の3次元情報も提供する。

30

## 【 0 0 0 8 】

欠陥の画像が捕捉されたとしても、荷電粒子ビーム画像においては類似する材料間のコントラストが全く無いか、制限されることがあるので、欠陥または欠陥周囲の加工中の別個の層を識別することは難しいと考えられる。電子またはイオン顕微鏡は、電子またはイオンの一次ビームがサンプル表面に衝突するときに放出される二次電子を検出することによって画像を提供する。一次ビーム粒子を各々衝突させるために放出および検出される二次電子の数は、サンプルの組成ならびに形状(topography)に左右される。この電子ビーム画像は形状およびある種の材料間の界面(例えば、金属層と酸化物層との間の界面)を明確に示す。しかし、この電子ビーム画像は、類似する二次電子放出特性を有する異なる材料間の界面を非常に明確には示さない。例えば、電子ビーム画像は、異なる誘電体層間(例えば、酸化物層と窒化物層との間)の境界を明確に示さないこともある。そのような層間の界面を観察するために、「デコレーション」として知られたプロセスが用いられる。断面をデコレーションすることには、2種の材料を異なる速度でエッチングするエッチング剤を用いて断面を僅かにエッチングすることを伴う。この異なるエッチング速度は2層の界面に形状的特徴部分を残し、次いで、この形状的特徴部分(例えば段差(step))が電子ビーム画像中で容易に観察可能になる。

40

## 【 0 0 0 9 】

コントラストを改善するための別の方法は、異なる材料に優先的に結合する材料を付加

50

することであり、これによってそれら材料の二次電子放出特性が変えられる。例えば、異なるポリマー間および幾つかの生物材料間のコントラストは、重金属塩の染色を用いて改善することが可能である。本発明の譲受人に与えられ、本願に援用される「Method of Obtaining Images from Slices of a Specimen」のための米国特許出願第11/893,022号は、例えば四酸化オスmium (OSO<sub>4</sub>)を用いる染色を利用するSlice-and-View技術の使用を記載している。この染色はサンプル表面上の材料に優先的に結合し、その基板から材料を全く除去しない。

#### 【0010】

染色とは異なり、デコレーション・プロセスは材料をエッチング除去する。Slice-and-View技術と一緒にデコレーションを用いることは、両方のプロセスが材料を除去するので使用することが不可能であったが、観察のために極めて小さな欠陥を断面において捕捉し、複数回の観察の間にスライスによって完全には除去されないことを保証するためには、各スライスは依然として十分に薄いものでなければならない。

#### 【0011】

別の複雑な要因は、スライスが薄くなるに従って、表面上に堆積されたタングステン保護層がミリング中に断面の壁上に再堆積し易く、これにより、人為的産物(アーチファクト(artifact))が生じ、断面の詳細が曖昧になることである。薄いスライスはまた、断面壁に「穴を開け」、壁の下をミリングする傾向がある。

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0012】

【特許文献1】米国特許出願第11/893,022号

【特許文献2】米国特許第5,851,413号

【特許文献3】米国特許第5,435,850号

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0013】

本発明の目的は荷電粒子ビーム・システムを用いて欠陥を観察するための方法および装置を提供することにある。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0014】

本発明は断面壁の表面に進行する多数のカット部をミリングするための方法および装置を含む。電子ビーム画像における材料界面を強調するために、カット部の多数の上にデコレーション・エッチングが行われる。本発明の実施形態は、画像中のコントラストを増強しながら小さな欠陥の画像を捕捉することを可能にする。

#### 【0015】

上記は以下の本発明の詳細な説明をより良く理解されるために、本発明の特徴および技術的利点をむしろ大まかに概説したものである。本発明の追加の特徴および利点を以下で説明する。開示された概念と特定の実施形態が本発明と同様の目的を実行するための他の構造を改変したり、設計するための根拠として容易に利用され得ることは、当業者によって認められるべきである。そのような同等の構成が添付の特許請求の範囲に記載された本発明の精神と範囲を逸脱しないことも、当業者によって理解されるべきである。

#### 【0016】

本発明ならびにその利点をより完全に理解するために、添付の図面と関連して取り入れられる以下の説明をここで参照する。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0017】

【図1】本発明を実施するために用いられる典型的なデュアル・ビーム・システムを示す図である。

10

20

30

40

50

【図2】本発明の好適な実施形態のステップを示すフロー・チャートである。

【図3】本発明の一実施形態に係る処理中のウエハを示す図である。

【図4】トレンチが欠陥場所の前にミリングされた図3のウエハの拡大部分を示す図である。

【図5】本発明の好適な実施形態の追加ステップを示すフロー・チャートである。

【図6】図2に示したウエハにミリングされた一続きのスライスを示す略図である。

【図7】本発明の一実施形態に従ってミリングされたスライスの厚さを示すグラフである。

【図8】デコレーションを用いた場合および用いない場合の平均スライス厚を示すグラフである。

10

【図9】デコレーションのない断面を示す図である。

【図10】図9の断面に類似する断面を示す図であるが、コントラストを増大させるためのデコレーションを用いていない図である。

【図11】デコレーション・ステップにおけるエッチングの範囲を示す断面図である。

【図12】画質に影響を及ぼすタングステン<sup>TM</sup>の再堆積を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

本発明の実施形態は、マイクロ製造プロセスおよびナノ製造プロセスにおける欠陥分析の際に有用なツールを提供する。特に、実施形態はウエハ製造設備におけるインライン不良解析に有用である。本発明は、欠陥の増強されたコントラスト画像を捕捉する一連の断面画像を提供するための一連の薄いスライスを用いて、基板の影響を受けた領域を「ステップ・スルー (steps through)」する。したがって、本発明は、予めビームを欠陥に位置合わせし、その中央を通る断面をミリングするのに十分な精度で欠陥の位置がわからない場合に有用である。スライス間のデコレーション・ステップが、層間ならびに欠陥とその周囲の材料との間のコントラストを増強する。小さな欠陥の画像を捕捉するためおよび好ましくは詳細な3次元情報を提供するためには、スライスは十分に薄いものでなければならない。しかし、スライスが薄くなるに従って、使用可能な画像を生成するためにはデコレーション・エッチングの薄層化効果および再堆積の効果を考慮しなければならない。各スライスが有用な厚さを有するように、スライスのミリングは正確に行われなければならない。

20

30

【0019】

本システムは電子ビーム・カラムとイオン・ビーム・カラムとを備えるデュアル・ビーム・システムを用いることが好ましい。イオン・ビーム・カラムは典型的には、ウエハ表面に対してほぼ直角に、すなわち直角から約5°未満に配向される。電子ビームは典型的には52°に配向される。スライスは典型的には、イオン・ビームを用いてミリングされ、次いで、デコレーションおよび画像化が電子ビームを用いて行われる。両ビームの位置決めは各スライスに対して正確でなければならない。イオン・ビームが断面壁のずっと奥に位置決めされると、薄いラメラ (lamella) が残ることになり、新たに露出された壁が不明瞭になる。ビームが壁からかなり離れて位置決めされると、材料が壁から不十分に除去されるか、全く除去されないことになる。イオン・ビームは壁に穴を開け、下側のトレンチをミリングする可能性もある。ウエハがその上に載せられるステージは典型的には、サンプル位置を経時的に僅かにずらさせる幾らかのドリフトを有する。荷電粒子ビーム・カラムも幾らかのドリフトを有し、これがビームにステージに対しておよび相互に対して位置を変えさせる。レーザ調整ステージがこのステージのドリフトを補償することができる。しかし、多くの装置はレーザ調整ステージを備えていない。幾つかの装置は、先のカット部から正確にエッジを発見し、このエッジに関連してビームを位置合わせする画像認識ソフトウェアを有する。しかし、多くのデュアル・ビーム・システムはエッジ認識能力を有していない。

40

【0020】

ビームを正確に配置するのに用いられる別の方法は、断面化されるべき領域近傍に基準

50

マークをミリングし、次いで、その基準マークを頻繁に再画像化し、ビームが基準マーク上に位置決めされたときに基準マーク座標が正確になるようなオフセットを用いて位置決め用の座標を数学的に調節することである。スライス厚およびビーム位置進行はナノメートル単位で測定されるので、進行するカット方向のビーム配置精度は最も重要である。薄いスライスは典型的には、矩形をミリングする「バルク・ミル (bulk mill)」ではなく、「ライン・ミル (line mill)」、すなわち実質的には一次元の線をミリングすることによって生成される。各スライスは典型的には、視野のサイズに応じて、ある画像中で1または2のピクセル厚である。スライス厚は、約30nm乃至約60nmであることが好ましく、約35nm乃至約45nmであることがより好ましく、約35nm乃至約40nmであることが最も好ましい。一実施形態では、出願人らは約38nm

10

#### 【0021】

図1は本発明を実施するのに適した典型的なデュアル・ビーム・システム110を示しており、垂直に設置されたSEMカラムと、垂直から約52°の角度で設置された集束イオン・ビーム(FIB)カラムとを備えている。このようなデュアル・ビーム・システムは例えば、本発明の譲受人であるオレゴン州ヒルズボロ所在のFEI社から市販されている。適したハードウェアの一例を以下に示すが、本発明はどのような特定の種類のハードウェアにおいても実施されることに限定されるものではない。

#### 【0022】

電源および制御ユニット145と共に、走査型電子顕微鏡141がデュアル・ビーム・システム110に備わっている。カソード152とアノード154との間に電圧を印加することによって、電子ビーム143がカソード152から出射される。集光レンズ156および対物レンズ158を用いて、電子ビーム143が微細なスポットに集束される。電子ビーム143は偏向コイル160を用いて試料上を二次元的に走査される。集光レンズ156、対物レンズ158、および偏向コイル160の動作は電源および制御ユニット145によって制御される。

#### 【0023】

電子ビーム143は、下部チャンバ126内の可動X-Yステージ125上にある基板122上に集束され得る。電子ビーム中の電子が基板122に衝突すると、二次電子が放出される。これらの二次電子は以下で議論する二次電子検出器140によって検出される。TEMサンプル・ホルダ124およびステージ125の真下に位置決めされたSTEM検出器162は、上記TEMサンプル・ホルダ上に載置されたサンプルを通過した電子を収集することができる。

#### 【0024】

デュアル・ビーム・システム110はまた、集束イオン・ビーム(FIB)システム111も備える。この集束イオン・ビーム・システムは、上部首部112を有する真空チャンバを含む。この上部首部内には、イオン源114と、抽出電極および静電光学系を含んだ集束カラム116とが配置されている。集束カラム116の軸線は電子カラムの軸線から52°に傾斜されている。イオン・カラム112は、イオン源114、抽出電極115、集束要素117、偏向要素120、および集束イオン・ビーム118を備える。イオン・ビーム118はイオン源114からカラム116を抜けて、120で略示した静電偏向手段の間を通過して、基板122に向かう。基板122は、例えば下部チャンバ126内の可動X-Yステージ125上に位置決めされた半導体デバイスを含む。

#### 【0025】

ステージ125は、サンプルを半導体デバイスから抽出し、TEMサンプル・ホルダまで移動できるように1つまたは複数のTEMサンプル・ホルダ124を支持してもよい。ステージ125は好ましくは、水平面(XおよびY軸線)および垂直(Z軸線)に動くことができる。ステージ125は約60°に傾き、Z軸の周りで回転することもできる。幾つかの実施形態では、別個のTEMサンプル・ステージ(図示せず)を使用することがで

10

20

30

40

50

きる。このようなTEMサンプル・ステージもX、Y、およびZ軸線において可動になることも好ましい。基板122をX-Yステージ125上に挿入するためおよび内部ガス供給貯蔵容器(使用される場合)を使用可能にするためにも、扉161が開放される。この扉はシステムが真空下の場合に開けられないようにインターロックされる。

#### 【0026】

首部112を排気するために、イオン・ポンプ128が用いられる。チャンバ126は、真空コントローラ132の制御下でターボ分子および機械式ポンプ・システム130を用いて排気される。この真空システムはチャンバ126内に約 $1 \times 10^{-7}$ トル $\sim 5 \times 10^{-4}$ トルの真空を提供する。エッチング補助ガス、エッチング遅延ガス、および堆積前駆ガスが使用される場合、チャンバのバックグラウンド圧は典型的には、約 $1 \times 10^{-5}$ トルまで上昇することがある。

10

#### 【0027】

高電圧電源は、イオン・ビーム118を付勢し、集束させるために、イオン・ビーム集束カラム116内の電極に、適した加速電圧を提供する。このイオン・ビームが基板122に衝突すると、サンプルから材料がスパッタリング、すなわち物理的に取り出される。あるいは、イオン・ビーム118は前駆ガスを分解して材料を堆積することができる。

#### 【0028】

約1keV乃至60keVのイオン・ビーム118を形成し、これをサンプルの方に誘導するために、高電圧電源134がイオン・ビーム集束カラム116内の液体金属イオン源114および適した電極に接続されている。パターン生成器138によって提供される所定のパターンに従って動作する偏向コントローラおよび増幅器136が偏向板120に結合されており、この偏向板によって、イオン・ビーム118が基板112の上面に相当するパターンを描画するために手動または自動で制御され得る。当技術分野において周知のように、幾つかのシステムでは、この偏向板は最終レンズの前に設けられる。イオン・ビーム集束カラム116内のビーム・ブランキング電極(図示せず)が、ブランキング・コントローラ(図示せず)がブランキング電圧をブランキング電極に印加するとき、基板122の代わりにブランキング開口部(図示せず)にイオン・ビーム118を衝突させる。

20

#### 【0029】

液体金属イオン源114は典型的には、ガリウムの金属イオン・ビームを提供する。この液体金属イオン源は典型的には、イオン・ミリング、強化エッチング、材料堆積によって基板122を修正するため、あるいは基板122を画像化するために、 $1/10$ マイクロメートル以下の幅のビームを基板122に集束させることができる。

30

#### 【0030】

二次イオンまたは電子放出を検出するために用いられる荷電粒子検出器140(例えば、Everhart Thornley型またはマルチ・チャンネル型のプレート)が、駆動信号をビデオ・モニタ144に供給し、システム・コントローラ119から偏向信号を受信するビデオ回路142に接続されている。異なる実施形態では、下部チャンバ126内の荷電粒子検出器140の場所は変わってもよい。例えば、荷電粒子検出器140はイオン・ビームと同軸線にあってもよく、イオン・ビームを通過させることのできる穴を含んでもよい。他の実施形態では、二次粒子を最終レンズを通して収集し、次いで、収集のために軸線から逸らされる。

40

#### 【0031】

マイクロマニピュレータ247(例えば、テキサス州ダラス所在のOmni probe社のAuto Probe(商標)またはドイツ国ロイトリングン所在のKleindiek Nanotechnik社のModel MM3A)が、真空チャンバ内で物体を正確に移動することができる。真空チャンバ内に位置決めされた部分249のX、Y、Zおよびシータ制御を提供するために、マイクロマニピュレータ247は真空チャンバ外部に位置決めされた精密電気モータ248を備えてもよい。マイクロマニピュレータ247は、小さな物体を操作する異なるエンド・エフェクタを備えてもよい。本明細書に記載の実

50

施形態では、このエンド・エフェクタは薄いプローブ650である。

【0032】

基板122の方に向けて蒸気を導入して誘導するために、ガス供給システム146が下部チャンバ126内へ延在している。本発明の譲受人に与えられた「Gas Delivery Systems for Particle Beam Processing」のためのCasellaへの米国特許第5,851,413号は、適したガス供給システム146を記載している。また、本発明の譲受人に与えられた「Gas Injection System」のためのRamussenへの米国特許第5,435,850号には、別のガス供給システムが記載されている。例えば、エッチングを強化するためにヨウ素を供給してもよいし、金属を堆積させるために金属有機化合物を供給してもよい。

10

【0033】

システム・コントローラ119がデュアル・ビーム・システム110の種々のパーツの動作を制御する。システム・コントローラ119を用いて、ユーザは従来のユーザ・インタフェース(図示せず)に入力された命令を介してイオン・ビーム118または電子ビーム143を所望の手法で走査させることができる。あるいは、システム・コントローラ119はメモリ121に格納されたプログラムされた命令に従ってデュアル・ビーム・システム110を制御することもできる。幾つかの実施形態では、デュアル・ビーム・システム110は、対象の領域を自動的に識別するために、画像認識ソフトウェア(例えば、マサチューセッツ州ナティック所在のCognex社から市販されているソフトウェア)を組み込み、次いで、このシステムは本発明に従ってサンプルを手動または自動で抽出することができる。例えば、このシステムは多数のデバイスを含んでいる半導体ウエハ上の類似する特徴部分を自動的に発見し、異なる(または同じ)デバイス上のそれらの特徴部分のサンプルを取得することも可能である。

20

【0034】

図2は本発明に係る方法の幾つかのステップを示すフロー・チャートである。図3および4は図2に示したステップの幾つかを受けているウエハを示している。ステップ202では、ウエハが検査ツール(例えば、KLA-Tencor 2800 Series Inspection System)を用いて走査され、表面上で検出された異常を列挙する欠陥ファイル(例えば、KLARFファイル)が生成される。この欠陥ファイルは検査ツールによって発見された欠陥の座標を含む。ウエハが検査システムから撮像システムに移される前に、1回の走査で検出された欠陥が次に加えられる層によって被覆されるように、ウエハは異なる製造段階中に走査されてもよい。

30

【0035】

ステップ204では、ウエハは撮像システム110(例えばFEI社のDA300 Defect Analyzer)に装填される。この撮像システム内のステージは典型的には、イオン・ビームがウエハ表面に対して直角に衝突し、電子ビームがウエハ表面に52°で衝突するように、水平から52°に傾斜されている。幾つかの実施形態では、ビーム断面がガウス形状であることから、ウエハ表面に対してより直角に近い断面壁が、イオン・ビームを直角から僅かな角度で表面に衝突させることによって達成される。53または54°のステージ傾斜角が、52°のステージ傾斜角よりも垂直な断面壁を提供する。ステップ206では、欠陥ファイルからのデータは検査システムからデュアル・ビーム・システムへ転送される。ステップ210では、撮像システムは欠陥302(図3)の全般的領域が視野内に発見されるように探査する。欠陥302は図3の点線で示すように表面の下にあることもあり、電子ビーム画像では見えないこともある。幾つかの場合では、欠陥302は表面の上にあって見えることもあり、この欠陥の徴候は表面で見えることもある。

40

【0036】

ステップ212では、欠陥302の真上の領域に保護パッド304を提供しかつ欠陥302近傍の領域に保護パッド306を設けるために、タングステン層がイオン・ビーム誘起堆積法を用いて基板表面の上に堆積される。ステップ214では、ビームの正確な位置

50

決めを促進するために、基準マーク308がパッド306にミリングされる。この基準マーク308は、基準マークの中心線がイオン・ビームによる走査が繰り返された後であっても容易に認識可能であるように、頑強な形状であることが好ましい。走査の繰り返しは基準マークを腐食させる。ビーム位置を基準マークからミリング中の領域にシフトするためにステージを移動しなくてもいいように、基準マークは断面の場所の十分に近くでミリングされることが好ましい。すなわち、基準マークを画像化するためまたはステージを移動させなくても断面をミリングするために、ビームはビーム偏向電極を用いて十分にシフトすることができる。新しい座標オフセットを取得してビームおよびステージのドリフトのためにシステムを調節するために基準マークを再画像化することによって、ビーム位置が得られる。基準マークの座標は知られているので、知られた基準マーク座標と測定された基準マーク座標とが一致していなくても、測定された座標に適用することのできるオフセットが得られる。エッジ認識能力を有さない機械では、参照としてこの基準マークを用いて局所ビーム配置が行われるだけである。

10

## 【0037】

基準マーク308がミリングされた後、ステップ216では傾斜したトレンチ402(図4)が推定された欠陥場所から約 $1\mu\text{m}$ の所にミリングされる。トレンチは典型的には約4マイクロメートルの幅を有し、深さが約 $1.0\mu\text{m}$ 乃至 $1.5\mu\text{m}$ であることが好ましい。このトレンチの深さは表面下の推定された欠陥の位置に応じて決まり得る。トレンチの角度はイオン・ビームおよび電子ビームの両方がトレンチ402の端部の断面404を走査するように十分なものである。断面404は基板表面に対して直角である。ステップ218では、ビームが比較的多量の材料を除去してトレンチ402をミリングするとき

20

## 【0038】

この好適なプロセスは図5に示すように続く。ステップ502では、露出された断面404の画像が電子ビームを用いて形成され、格納される。この電子ビームは典型的には5kVで操作され、スルー・ザ・レンズ検出器(through-the-lens detector)を用いる。ステップ504では、イオン・ビームが基準マークに誘導され、そのビームの位置を再校正するためにイオン・ビーム画像が撮られる。電子ビームを調整するために、基準マークの電子ビーム画像も捕捉される。再校正後、ステップ506では次いでイオン・ビームが断面404からスライス

30

## 【0039】

図6はイオン・ビームが基準マーク308の中心線602から固定距離A1で調整されていることを示している。壁404から中心線602までの距離A1は、先のミリング操作からわかる。ステップ508では、イオン・ビームはミリングを開始し、スライスS1の所望の厚さに等しい量A2-A1だけ壁内に進む。薄い欠陥の断面を取得する確率が大きくなるように、スライスS1は十分に薄いものでなければならない。スライスが薄くなるほど、欠陥を見る確率は大きくなる。しかし、スライスが薄過ぎると、タングステン保護層の再堆積によって画質は悪影響を受ける。

40

## 【0040】

ステップ512では、露出された断面壁404は類似する材料の層間のコントラストを示すために、デコレーション、すなわち僅かに優先的にエッチングされる。電子ビームが断面の方に誘導される一方で、エッチング強化ガス(例えば、二フッ化キセノン)が断面の露出した壁の方に誘導される。電子ビームおよびガスが露出した断面上に存在する材料の一部を優先的にエッチングするので、材料間の界面が次の画像化において目立つ。例えば、二フッ化キセノンは窒化珪素をエッチングするよりも速く酸化珪素をエッチングする

50

ので、小さな階段状のエッジを酸化物 / 窒化物の境界に残す。界面を可視化するために、典型的には約 30 nm 未満の材料、より好ましくは 20 nm 未満の材料が除去される。ステップ 514 では、電子ビーム画像を形成するために、電子ビームがデコレーションされた面の方に誘導され、この画像は格納される。電子ビームは典型的には露出した断面に対して 52° に配向される。任意選択のステップ 516 では、実際のスライス厚をより正確に決定するためにイオン・ビームの基板上面の画像が用いられる。ミリングされるべき別のスライスが存在する場合、次のスライスをミリングする前に別のステージ調整を実行するためにプロセスがステップ 504 に戻ることを、決定ブロック 518 が示している。プロセス・ステップ 506 ~ 516 が繰り返される。図 6 はスライス S2 ~ S4 をカットするために中心線 602 から距離 A2 ~ A5 まで進行中のイオン・ビームを示している。説明のために 4 枚のスライスが示されているが、ユーザはより典型的には、より多のスライス、例えば 15 枚のスライスをミリングおよびデコレーションする。

10

#### 【0041】

15 枚のスライスをカットする好適な実施形態では、ビーム位置の設定はスライス 1 からスライス 5 の各々について 60 nm 進められる。最初の 5 枚の後のスライスは、ビーム位置の設定を各スライスについて 50 nm だけ進行させることによってミリングされる。このビーム再位置決めの変化は、すべてのスライス間に均一なスライス厚を提供するように見える。このビーム位置の設定は 50 nm 乃至 60 nm 進行するが、出願人らは各スライス後のスライス厚を基板上面のイオン・ビーム画像を用いて測定し、平均スライス厚が 38.2 nm であることを見出した。出願人らは、測定されたスライス厚とスライス間

に進行するビームの距離との間の差はビーム設定と実際のビーム位置との間の較正オフセットおよびビームは開放された領域ではなく絶壁のエッジの上でミリングしているという事実に関連するエッジ効果に起因する可能性があると考えている。このカットは幾分「浅いもの (shallow)」になる傾向がある。38.2 nm のスライス厚では、良好な画像を再堆積が非常に少ない状態で提供しながら欠陥を画像化する確率が高かった。出願人らはビーム径が各スライス厚よりも著しく大きく、ビーム径は 1 マイクロメートルもの大きさを有することに注目しているが、スライスは 100 nm 未満であることが好ましく、50 nm 未満であることがより好ましく、約 40 nm 未満であることが最も好ましい。「スライス厚」とは、イオン・ビームの位置の移動によって制御されるような、電子ビーム支援デコレーション・ステップとイオン・ビーム・ステップとの組合せによって除去される材料の量を意味する。

20

30

#### 【0042】

図 7 はウエハ上の 10 カ所において測定された各位置 15 スライスのスライス厚のグラフを示している。この厚さは、コントラストを改善するために各スライスがデコレーションされたイオン・ビームからの基板上面の画像を用いて測定した。図 8 はデコレーションを用いた場合および用いない場合の平均スライス厚を示している。図 8 はデコレーションされたスライスがデコレーションされていないスライスと実質的に同じ厚さであったことを示している。図 9 はデコレーションしていない断面の 50,000 倍の電子ビーム顕微鏡写真である。図 10 はデコレーションのある同様の電子ビーム顕微鏡写真であり、コントラストが著しく向上している。

40

#### 【0043】

デコレーション・ステップからのダメージを決定するために、出願者らはウエハを回転させ、欠陥を見るために作られた断面に対して直角に断面をカットした。図 11 はある断面壁のそういった断面図を示している。すなわち、図 11 は壁 404 に対して直角にカットされた断面を示す。図 11 はデコレーション・ステップによって生じたエッチングが約 17 nm であることを示す。

#### 【0044】

図 12 は非常に薄いスライスがミリングされた後の断面の回転された図である。図 12 はスライス厚が 30 nm 未満まで低減されたときに電子ビーム画像が保護層からのタンゲステンの再堆積によって影響を受けていることを示している。断面の明るい領域がタンゲ

50

ステンが再堆積した領域である。この再堆積が調査されるべき実際の表面を不明瞭にしており、したがって再堆積は好ましくない。出願者らは僅かに厚いスライスを用いればこの再堆積の問題が軽減されることを見出した。

【 0 0 4 5 】

スライス厚は十分に制御されなければならない。スライスが厚過ぎると、欠陥が断面化されない可能性があり、したがって、可能な限り小さな欠陥を検出するためには可能な限り薄いスライスを生成することが好ましい。しかし、スライスが薄過ぎると、保護層からのタングステンが断面上に再堆積して、表面が変えられ、特徴部分がぼやける。したがって、ビーム配置は非常に正確でなければならない。ステージ配置およびビーム位置決めにはドリフトがあるので、システムは典型的には、基準マークを画像化することによって頻 10  
 繁に座標変換調整することを必要とするか、または画像認識を用いて、スライスが既存のエッジに対して作製されるように既存のエッジを発見することを必要とする。基準マークを頻繁に画像化することで基準マークが腐食し易くすくなり、基準マークの中心線を正確に識別し、それに整列させることがより困難になる。他方、非常に安定したシステムでは、ユーザは各スライス間でステージを再調整しなくてもよく、そういった再調整が次のスライスをミリングするためのビームの配置精度を改善する。

【 0 0 4 6 】

本発明の実施形態およびその利点が詳細に記載してきた、添付の特許請求の範囲によって定義される本発明の精神および範囲から逸脱せずに、様々な修正、代替、および変更を行うことができることを理解されたい。例えば、上記実施例は集積回路製造の際に使用される半 20  
 導体ウエハに関連して本発明の使用を示しているが、本発明は任意のタイプの基板と一緒に、どのようなタイプのナノ製造およびマイクロ製造プロセスにおいても使用することができる。さらに、本出願の範囲は、本明細書において記載されたプロセス、機械、製造、物質の組成、手段、方法、およびステップの特定の実施形態に限定されることを意図するものではない。当業者であれば、本発明の開示から、本明細書において記載された対応する実施形態とほぼ同じ機能を実施するか、またはそれとほぼ同じ結果を達成する現在存在しているか、または後に開発されるプロセス、機械、製造、物質の組成、手段、方法、またはステップが、本発明に従って利用され得ることを容易に理解するであろう。したがって、添付の特許請求の範囲は、その範囲内にそのようなプロセス、機械、製造、物質の組成、手段、方法、またはステップを含むことを意図するものである。 30

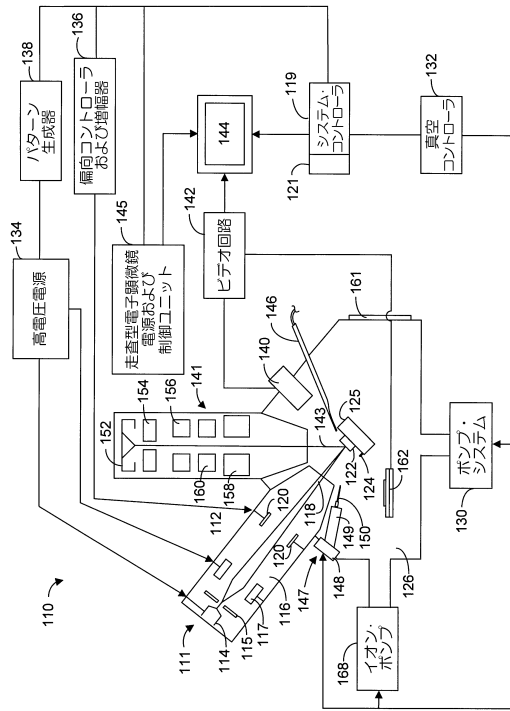
【 符号の説明 】

【 0 0 4 7 】

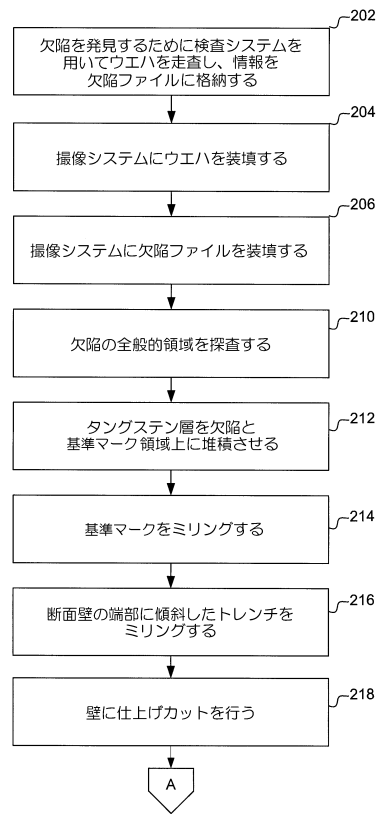
- 1 1 0 デュアル・ビーム・システム
- 1 1 1 集束イオン・ビーム・システム
- 1 1 2 上部首部
- 1 1 4 イオン源
- 1 1 5 引き出し電極
- 1 1 6 カラム
- 1 1 7 集束要素
- 1 1 8 イオン・ビーム 40
- 1 1 9 システム・コントローラ
- 1 2 0 偏向要素
- 1 2 1 メモリ
- 1 2 2 基板
- 1 2 4 TEMサンプル・ホルダ
- 1 2 5 可動X-Yステージ
- 1 2 6 下部チャンバ
- 1 2 8 イオン・ポンプ
- 1 3 0 ポンプ・システム
- 1 3 2 真空コントローラ 50

1 3 4	高電圧電源	
1 3 6	増幅器	
1 3 8	パターン生成器	
1 4 0	荷電粒子検出器	
1 4 1	走査型電子顕微鏡	
1 4 2	ビデオ回路	
1 4 3	電子ビーム	
1 4 4	ビデオ・モニタ	
1 4 5	走査型電子顕微鏡電源および制御ユニット	
1 4 6	ガス供給システム	10
1 5 2	カソード	
1 5 4	アノード	
1 5 6	集光レンズ	
1 5 8	対物レンズ	
1 6 0	偏向コイル	
1 6 1	扇	
1 6 2	S T E M検出器	
2 4 7	マイクロマニピュレータ	
2 4 8	精密電気モータ	
2 4 9	位置決めされた部分	20
3 0 2	欠陥	
3 0 4	保護パッド	
3 0 6	保護パッド	
3 0 8	<u>基準マーク</u>	
4 0 2	トレンチ	
4 0 4	断面 / 垂直壁	
6 0 2	中心線	
6 5 0	プローブ	

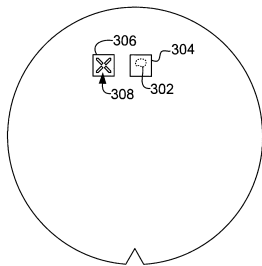
【図1】



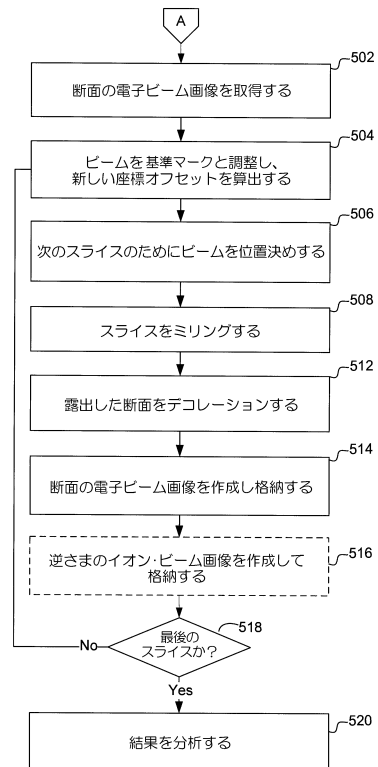
【図2】



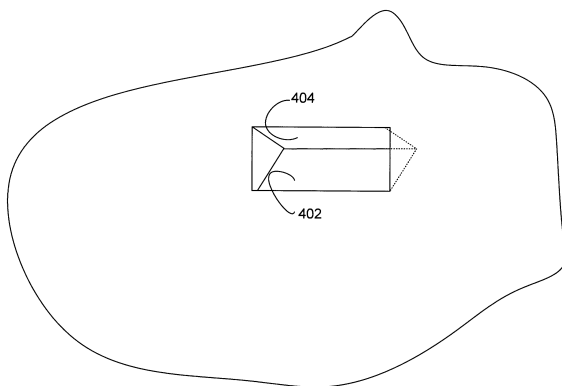
【図3】



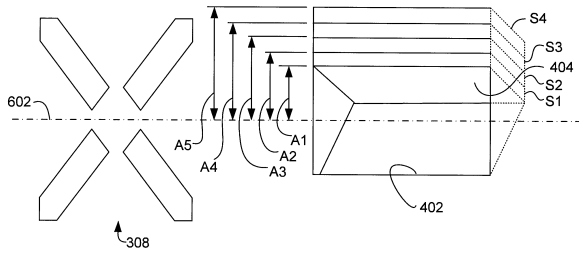
【図5】



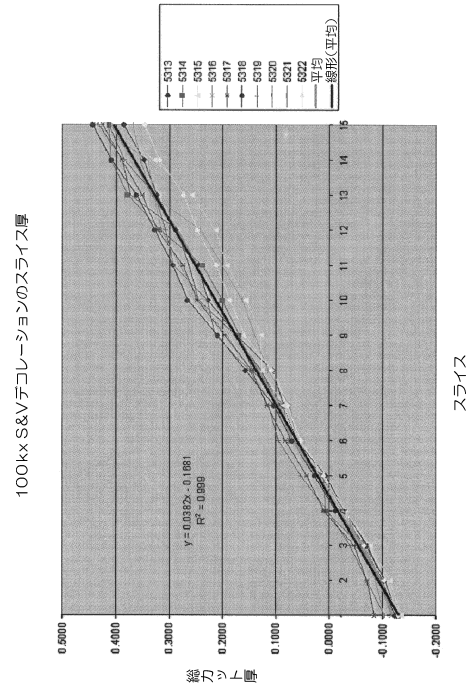
【図4】



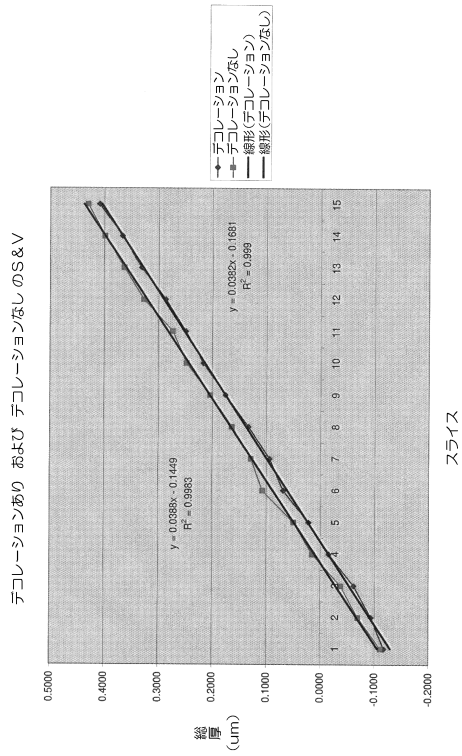
【図6】



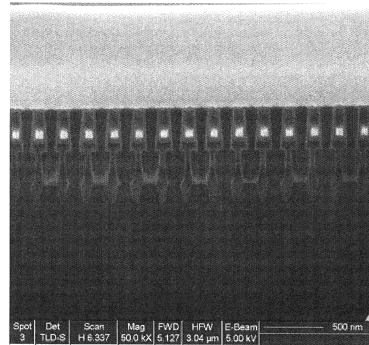
【図7】



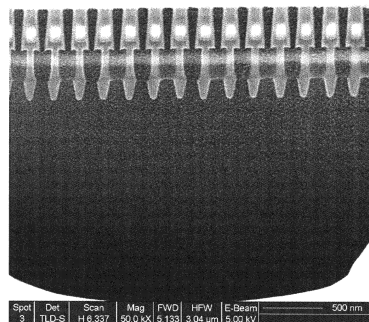
【図8】



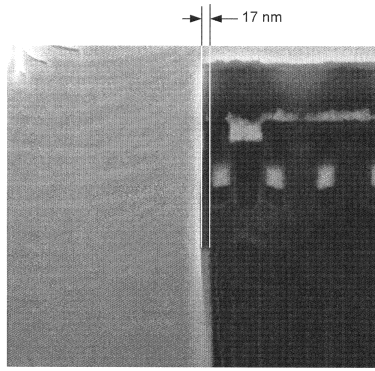
【図9】



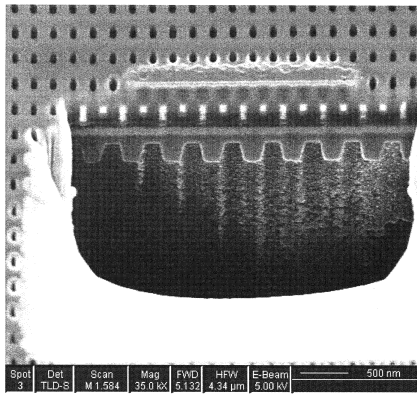
【図10】



【 1 1 】



【 1 2 】



## フロントページの続き

(72)発明者 マーク・カスターニャ  
アメリカ合衆国 97204 オレゴン州 ポートランド エスタブリュー フォーティーンズ・  
アヴェニュー 1429 ナンバー501

## 合議体

審判長 郡山 順

審判官 高 見 重雄

審判官 麻生 哲朗

(56)参考文献 特開2006-329844(JP,A)  
特開2005-17298(JP,A)  
特開平11-213935(JP,A)  
特開2007-250529(JP,A)  
特開2007-24896(JP,A)  
特開2006-343283(JP,A)  
特開2008-177154(JP,A)  
特開2004-226079(JP,A)  
特開平8-329876(JP,A)

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N1/00-1/44

H01J37/00-37/36

G01N23/00-23/227

H01L21/66