

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2013-231700

(P2013-231700A)

(43) 公開日 平成25年11月14日(2013.11.14)

(51) Int.Cl.  
G01N 23/04 (2006.01)F I  
G O I N 23/04テーマコード (参考)  
2 G O O 1

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2012-104953 (P2012-104953)  
(22) 出願日 平成24年5月1日(2012.5.1)(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  
(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 梅原 康敏  
東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i  
z タワー 東京エレクトロン株式会社内  
Fターム(参考) 2G001 AA01 BA11 CA01 DA09 GA01  
GA06 GA08 GA13 HA07 HA13  
LA11

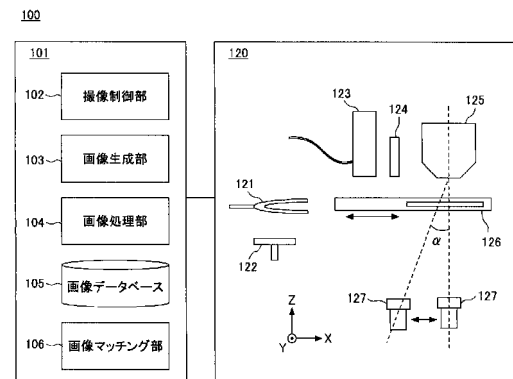
(54) 【発明の名称】 X線検査方法及びX線検査装置

## (57) 【要約】

【課題】非破壊で検査対象の形状計測を高速に行うことが可能なX線検査方法を提供すること。

【解決手段】検査対象の形状パラメータが異なる複数のシミュレーション画像を生成するシミュレーション画像生成ステップと、前記検査対象のX線画像を撮像するX線撮像ステップと、前記複数のシミュレーション画像のうち、前記X線画像との類似性を表す評価値が所定の条件を満たす前記シミュレーション画像の前記形状パラメータを、前記検査対象の形状として推定する形状推定ステップとを備えるX線検査方法。

【選択図】図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

検査対象の形状パラメータが異なる複数のシミュレーション画像を生成するシミュレーション画像生成ステップと、

前記検査対象の X 線画像を撮像する X 線撮像ステップと、

前記複数のシミュレーション画像のうち、前記 X 線画像との類似性を表す評価値が所定の条件を満たす前記シミュレーション画像の前記形状パラメータを、前記検査対象の形状として推定する形状推定ステップとを備える

ことを特徴とする X 線検査方法。

**【請求項 2】**

前記 X 線画像から、超解像処理による超解像画像及び前記超解像画像の縮小画像を生成する画像生成ステップを備え、

前記形状推定ステップは、前記縮小画像を用いて前記形状パラメータを推定した後、前記超解像画像を用いて前記形状パラメータを推定する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の X 線検査方法。

**【請求項 3】**

前記シミュレーション画像生成ステップは、

前記検査対象の前記形状パラメータに応じて形成される、X 線の透過率が異なるボクセルの集合体に、X 線を照射した時に前記透過率に基づいて前記ボクセルの集合体を透過する前記 X 線の透過量を算出することで、前記シミュレーション画像を生成する

ことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の X 線検査方法。

**【請求項 4】**

前記 X 線画像及び前記複数のシミュレーション画像にエッジ強調フィルタ処理を施すフィルタ処理ステップを備え、

前記形状推定ステップは、前記エッジ強調フィルタ処理が施された前記 X 線画像に基づいて少なくとも 1 つ以上の前記形状パラメータを推定する

ことを特徴とする請求項 1 から 3 の何れか一項に記載の X 線検査方法。

**【請求項 5】**

X 線の透過量が異なる材料を所定のパターンで配列することにより形成された試料の X 線撮像結果に基づき、前記 X 線画像又は前記シミュレーション画像の歪補正を行う歪補正ステップを備える

ことを特徴とする請求項 1 から 4 の何れか一項に記載の X 線検査方法。

**【請求項 6】**

前記評価値は、正規化相関、幾何学相関及び方向符号照会の何れかにより算出される値であることを特徴とする請求項 1 から 5 の何れか一項に記載の X 線検査方法。

**【請求項 7】**

前記形状推定ステップは、最適化アルゴリズムを用いて前記評価値が前記所定の条件を満たす前記形状パラメータを推定する

ことを特徴とする請求項 1 から 6 の何れか一項に記載の X 線検査方法。

**【請求項 8】**

検査対象の形状パラメータが異なる複数のシミュレーション画像を生成するシミュレーション画像生成手段と、

前記検査対象の X 線画像を撮像する X 線撮像手段と、

前記複数のシミュレーション画像のうち、前記 X 線画像との類似性を表す評価値が所定の条件を満たす前記シミュレーション画像の前記形状パラメータを、前記検査対象の形状として推定する形状推定手段とを備える

ことを特徴とする X 線検査装置。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

10

20

30

40

50

本発明は、X線画像に基づいて検査対象の形状計測を行うX線検査方法及びX線検査装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年の半導体プロセスの進化に伴い、シリコンウェハ等に形成される各種パターンの微細化、高密度化が進んでいる。この様に微細に形成される各種パターンの形状を計測して検査を行うために、様々な方法が提案されている。

【0003】

例えば、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて迅速且つ正確に半導体セルのカウントを行う半導体検査方法が知られている（例えば特許文献1参照）。また、例えばシリコンウェハに形成されるシリコン貫通電極（through-silicon via、以下「TSV」という）等の検査対象の形状を、SEMやX線CT装置を用いて計測及び検査する方法が知られている。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2010-171022号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、例えばSEMを用いて検査を行う場合には、FIB（Focused Ion Beam）等によりシリコンウェハを切削する必要がある、切断面と検査対象の中心位置とのずれ等により、計測する形状の寸法に誤差が生じる可能性がある。また、SEM観察時には切断面でエッジのチャージアップ効果等により輝度が誇張されることによる計測誤差が生じる虞がある。さらに、SEM像を取得するためにシリコンウェハの切削等の作業を要するため、多数の検査対象を全て計測するのは困難な場合がある。

20

【0006】

また、例えばX線CT装置を用いて検査を行う場合には、撮像可能な大きさにシリコンウェハを切断する必要がある、SEMを用いて検査する場合と同様に煩雑な作業を要し、検査対象全てを計測するのは困難な場合がある。また、CT像の再現には、高度且つ膨大な画像処理アルゴリズムを必要とし、検査対象の形状測定に多大な時間を要すると共に、アプリケーションソフトウェアや処理を行うコンピュータ等のコストが増大する虞がある。

30

【0007】

本発明は上記に鑑みてなされたものであって、非破壊で検査対象の形状計測を高速に行うことが可能なX線検査方法及びX線検査装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の一態様のX線検査方法によれば、検査対象の形状パラメータが異なる複数のシミュレーション画像を生成するシミュレーション画像生成ステップと、前記検査対象のX線画像を撮像するX線撮像ステップと、前記複数のシミュレーション画像のうち、前記X線画像との類似性を表す評価値が所定の条件を満たす前記シミュレーション画像の前記形状パラメータを、前記検査対象の形状として推定する形状推定ステップとを備える。

40

【発明の効果】

【0009】

本発明の実施形態によれば、非破壊で検査対象の形状計測を高速に行うことが可能なX線検査方法及びX線検査装置を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】実施形態に係るX線検査装置の概略構成を例示する図である。

50

【図 2】実施形態に係る X 線撮像装置によって撮像される X 線画像を例示する図である。

【図 3】実施形態に係る画像処理装置のハードウェア構成を例示する図である。

【図 4】実施形態における T S V の形状パラメータを例示する図である。

【図 5】実施形態において形状パラメータに基づいて生成されるシミュレーション画像を例示する図である。

【図 6】実施形態におけるシミュレーション画像の生成方法を説明する図である。

【図 7】実施形態における画像生成部によるシミュレーション画像の生成処理のフローチャートを例示する図である。

【図 8】実施形態における画像処理部による画像歪補正処理のフローチャートを例示する図である。

【図 9】実施形態において画像歪補正に用いるチェッカーボードパターンを例示する図である。

【図 10】実施形態におけるシミュレーション画像の画像歪補正を例示する図である。

【図 11】実施形態における検査対象の形状推定処理のフローチャートを例示する図である。

【図 12】実施形態における X 線撮像装置による X 線画像から生成される超解像画像及び縮小画像を例示する図である。

【図 13】実施形態におけるマッチング処理のフローチャートを例示する図である。

【図 14】実施形態におけるマッチングスコアの算出結果を例示する図である。

【図 15】実施形態における縮小画像のマッチングスコアの算出結果を例示する図である。

【図 16】実施形態における超解像画像の画像切り出しを説明する図である。

【図 17】実施形態における X 線画像の s o b e l フィルタ処理例を示す図である。

【図 18】実施形態におけるシミュレーション画像の s o b e l フィルタ処理例を示す図である。

【図 19】実施形態における s o b e l フィルタ処理後の X 線画像から形状パラメータを抽出する例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、図面を参照して発明を実施するための形態について説明する。なお、本実施形態では、検査対象としてシリコンウェハに形成されている T S V の形状を計測する方法について説明するが、検査対象はこれに限るものではない。

【0012】

< X 線検査装置の構成 >

本実施形態に係る X 線検査装置 100 の構成について説明する。図 1 は、本実施形態に係る X 線検査装置 100 の概略構成を例示する図である。

【0013】

図 1 に示す様に、X 線検査装置 100 は、画像処理装置 101 と X 線撮像装置 120 とを備え、X 線撮像装置 120 が検査対象の X 線画像を撮像し、撮像された検査対象の X 線画像に基づいて、画像処理装置 101 が推定により検査対象の形状を計測する。

【0014】

画像処理装置 101 は、撮像制御部 102、画像生成部 103、画像処理部 104、画像データベース 105、画像マッチング部 106 等を備える。

【0015】

撮像制御部 102 は、検査対象の X 線画像を撮像する X 線撮像装置 120 の X 線源 125、ステージ 126、X 線カメラ 127 等を含む全体の動作を制御し、X 線撮像装置 120 が撮像する検査対象の X 線画像を取得する。

【0016】

画像生成部 103 は、シミュレーション画像生成手段の一例であり、検査対象となるシリコンウェハの T S V の形状が異なる X 線画像を、シミュレーションにより生成する。画

10

20

30

40

50

像生成部 103 は、TSV の形状を表す形状パラメータに基づいて、複数のシミュレーション画像を生成する。シミュレーション画像の生成方法については後述する。

【0017】

画像処理部 104 は、画像生成部 103 により生成されるシミュレーション画像や、X 線撮像装置 120 によって撮像される X 線画像に対して、歪補正、コントラスト補正、解像度補正等の画像処理を行う。

【0018】

画像データベース 105 は、画像生成部 103 によって生成され、画像処理部 104 によって画像処理が施された複数のシミュレーション画像がライブラリ化されて登録される。

10

【0019】

画像マッチング部 106 は、形状推定手段の一例であり、X 線撮像装置 120 によって撮像された X 線画像と、画像データベース 105 に登録されているシミュレーション画像とのマッチング処理を行うことで、TSV の形状を推定する。マッチング処理による TSV の形状推定方法については後述する。

【0020】

X 線撮像装置 120 は、X 線撮像手段の一例であり、フォーク 121、ノッチアライナ 122、光学顕微鏡 123、厚さ測定器 124、X 線源 125、ステージ 126、X 線カメラ 127 等を備え、画像処理装置 101 に接続されている。図中に示す X 方向はステージ 126 の表面に平行な図中左右方向で、Y 方向は、ステージ 126 の表面に平行且つ X 方向に垂直な方向、Z 方向はステージ 126 の表面に対する垂直方向である。

20

【0021】

X 線撮像装置 120 では、フォーク 121 が TSV を有するシリコンウェハを保持し、ノッチアライナ 122 がノッチ位置の調整を行う。光学顕微鏡 123 は、ステージ 126 上に載置されるシリコンウェハの外観観察等を行うことができる。また、厚さ測定器 124 は、例えば分光干渉式の厚さ測定器であり、シリコンウェハの厚さを測定できる。

【0022】

X 線源 125 は、ステージ 126 上に載置されるシリコンウェハに対して X 線を照射し、X 線源 125 に対してステージ 126 を挟んで反対側に設けられている X 線カメラ 127 が、シリコンウェハの X 線画像を取得する。

30

【0023】

X 線カメラ 127 は、例えばイメージインテンシファイア、CCD イメージセンサ等を備えて構成され、イメージインテンシファイアが検査対象を透過した X 線を可視光に変換し、CCD イメージセンサが入射される可視光を電気信号に変換する。X 線カメラ 127 の出力は画像処理装置 101 の撮像制御部 102 に入力され、検査対象の X 線画像として取得される。

【0024】

X 線カメラ 127 は、図中 XY 方向に移動可能に設けられており、XY 方向に移動することで、ステージ 126 に載置される検査対象の X 線画像を、例えば Z 方向に対して所定の角度  $\alpha$  傾いた傾斜像として撮像することができる。

40

【0025】

図 2 に、本実施形態に係る X 線撮像装置 120 によって撮像される X 線画像を例示する。

【0026】

図 2 は、X 線カメラ 127 によって Z 方向に対して 15 度傾斜した方向から撮像された X 線画像であり、本実施形態では、この様にシリコンウェハに形成されている TSV の全体形状を判別できる X 線画像の傾斜像を用いて、TSV の形状推定を行う。

【0027】

< 画像処理装置のハードウェア構成 >

図 3 は、実施形態に係る画像処理装置 101 のハードウェア構成を例示する図である。

50

## 【 0 0 2 8 】

図 3 に示す様に、画像処理装置 1 0 1 は、C P U 1 0 7、H D D (Hard Disk Drive) 1 0 8、R O M (Read Only Memory) 1 0 9、R A M (Read and Memory) 1 1 0、入力装置 1 1 1、表示装置 1 1 2、記録媒体 I / F 部 1 1 3、撮像装置 I / F 部 1 1 4 等を備え、それぞれがバス B で相互に接続されている。

## 【 0 0 2 9 】

C P U 1 0 7 は、H D D 1 0 8 や R O M 1 0 9 等の記憶装置からプログラムやデータを R A M 1 1 0 上に読み出し、処理を実行することで、X 線撮像装置 1 2 0 の制御や、画像処理装置 1 0 1 が備える各機能を実現する演算装置である。C P U 1 0 7 は、撮像制御部 1 0 2、画像生成部 1 0 3、画像処理部 1 0 4、画像マッチング部 1 0 6 等として機能する。

10

## 【 0 0 3 0 】

H D D 1 0 8 は、プログラムやデータを格納している不揮発性の記憶装置である。格納されるプログラムやデータには、画像処理装置 1 0 1 全体を制御する基本ソフトウェアである O S (Operating System)、及び O S 上において各種機能を提供するアプリケーションソフトウェアなどがある。また、H D D 1 0 8 は、画像生成部 1 0 3 にて生成される複数のシミュレーション画像が登録される画像データベース 1 0 5 として機能する。

## 【 0 0 3 1 】

R O M 1 0 9 は、電源を切ってもプログラムやデータを保持することができる不揮発性の半導体メモリ (記憶装置) である。R O M 1 0 9 には、画像処理装置 1 0 1 の起動時に実行される B I O S (Basic Input/Output System)、O S 設定、及びネットワーク設定などのプログラムやデータが格納されている。R A M 1 1 0 は、プログラムやデータを一時保持する揮発性の半導体メモリ (記憶装置) である。

20

## 【 0 0 3 2 】

入力装置 1 1 1 は、例えばキーボードやマウスなどを含み、画像処理装置 1 0 1 に各操作信号を入力するのに用いられる。表示装置 1 1 2 は、例えばディスプレイ等を含み、X 線撮像装置 1 2 0 により撮像された検査対象の X 線画像や、シミュレーション画像、形状計測結果等を表示する。

## 【 0 0 3 3 】

記録媒体 I / F 部 1 1 3 は、記録媒体とのインタフェースである。画像処理装置 1 0 1 は記録媒体 I / F 1 1 3 を介して、記録媒体 1 1 5 の読み取り及び / 又は書き込みを行うことができる。記録媒体 1 1 5 にはフレキシブルディスク、C D、D V D (Digital Versatile Disk)、S D メモリカード (SD Memory card)、U S B メモリ (Universal Serial Bus memory) 等がある。

30

## 【 0 0 3 4 】

撮像装置 I / F 部 1 1 4 は、X 線撮像装置 1 2 0 に接続するインタフェースである。画像処理装置 1 0 1 は、撮像装置 I / F 部 1 1 4 を介して X 線撮像装置 1 2 0 との間でデータの通信を行うことができる。

## 【 0 0 3 5 】

また、画像処理装置 1 0 1 にネットワークに接続するインタフェースとして通信 I / F 等を設け、他の機器とデータ通信を行う様に構成しても良い。

40

## 【 0 0 3 6 】

< シミュレーション画像の生成 >

次に、画像処理装置 1 0 1 の画像生成部 1 0 3 によるシミュレーション画像の生成方法について説明する。

## 【 0 0 3 7 】

画像処理装置 1 0 1 の画像生成部 1 0 3 は、検査対象となる T S V の形状パラメータに基づいて、X 線撮像装置 1 2 0 によって撮像される X 線画像に対応する複数のシミュレーション画像を生成する。

## 【 0 0 3 8 】

50

図4は、本実施形態におけるTSVの形状パラメータを例示する図である。

【0039】

本実施形態では、シリコンウェハに形成されているTSVの形状を表す形状パラメータとして、図4(a)に例示する6種類のパラメータを用い、さらにX線画像の傾斜角度 $\alpha$ を決定するためのX線カメラ127のX方向位置及びY方向位置をパラメータとして用いる。本実施形態におけるTSVの形状パラメータは、図4に示す様に、開口部半径 $r_1$ 、ホール中間部最大半径 $r_2$ 、底部半径 $r_3$ 、底部に半球状にエッチングされた部分の半径 $r_4$ 、最大半径部分までの深さ $h_1$ 、最大半径部から底部までの深さ $h_2$ である。なお、シミュレーション画像の生成に用いるパラメータの種類、数等は上記例に限るものではなく、例えば図4(b)に示す様なTSVの形状に対応させてパラメータを設定しても良く、検査対象の形状、X線撮像装置120の構成等に応じて適宜設定することが可能である。

10

【0040】

図5は、異なる形状パラメータに基づいて生成されるシミュレーション画像を例示する図である。

【0041】

図5(a)は、形状パラメータを $r_1 = 20 \mu\text{m}$ 、 $r_2 = 24 \mu\text{m}$ 、 $r_3 = 18 \mu\text{m}$ 、 $r_4 = 20 \mu\text{m}$ 、 $h_1 = 40 \mu\text{m}$ 、 $h_2 = 72 \mu\text{m}$ とした時に画像生成部103によって生成されたシミュレーション画像である。また、図5(b)は、形状パラメータを $r_1 = 10 \mu\text{m}$ 、 $r_2 = 20 \mu\text{m}$ 、 $r_3 = 6 \mu\text{m}$ 、 $r_4 = 5 \mu\text{m}$ 、 $h_1 = 20 \mu\text{m}$ 、 $h_2 = 85 \mu\text{m}$ とした時に画像生成部103によって生成されたシミュレーション画像である。

20

【0042】

図5(a)、(b)に示す様に、画像生成部103は、異なる形状パラメータに基づいて、X線撮像装置120で撮像されるX線画像に対応するシミュレーション画像を生成することができる。

【0043】

図6は、本実施形態におけるシミュレーション画像の生成方法を説明する図である。

【0044】

画像生成部103は、シミュレーション画像を生成する際に、まず入力される形状パラメータに応じてX線の透過率が異なるボクセル(Voxel)51の集合体を生成する。次に、ボクセル51の集合体に、点光源として定義されるX線源50からX線を照射した時に、各ボクセル51の透過率に基づいてX線の透過量を算出し、検出器52に到達する量を画像として再現することにより、シミュレーション画像を生成する。

30

【0045】

ボクセル51としては、図5に示す様に、例えばAir、Cu、Si等の材料を定義し、それぞれの材料について個別に測定される透過率を用いて各ボクセル51を透過して検出器52に到達するX線量を算出する。ボクセル51は、例えば $0.1 \mu\text{m}$ の立方体とし、各ボクセル51の透過率を、例えばAir: 1、Cu:  $0.981 / 1 \mu\text{m}$ 、Si:  $0.999 / 1 \mu\text{m}$ と設定することでシミュレーション画像を生成できる。なお、ボクセルの種類、大きさ、透過率等の各値はこれらに限るものではなく、適宜設定することができる。

40

【0046】

画像生成部103は、上記の設定においてX線源50に近い方から順に、各ボクセル51の下面でのX線の透過量を算出し、検出器52に到達するX線量を求めることで、図5に示す様に、形状パラメータに対応するシミュレーション画像を生成する。

【0047】

図7に、本実施形態における画像生成部103によるシミュレーション画像の生成処理のフローチャートの一例を示す。

【0048】

画像生成部103では、まずステップS1にて、TSVの設計値を中心として、各形状パラメータ $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 及び検査対象を撮像する傾斜角度(X線

50

カメラ 127 の位置) 等のシミュレーション画像生成条件を複数設定する。例えば、形状パラメータ  $r_1$  を、設計値である  $20\ \mu\text{m}$  を中心に  $19\ \mu\text{m}$  から  $21\ \mu\text{m}$  まで、 $0.1\ \mu\text{m}$  間隔で画像生成条件を設定し、各形状パラメータ等が異なる多数の画像生成条件を設定する。

【0049】

次に、ステップ S2 にて、画像生成部 103 が、設定された複数の画像生成条件に基づいて、上記した方法により複数のシミュレーション画像を生成する。

【0050】

ステップ S3 では、生成されたシミュレーション画像に対して、画像処理部 104 が X 線撮像装置 120 によって撮像される X 線画像に合わせるために、後述する歪補正等の画像補正処理を行う。

【0051】

続いて、ステップ S4 にて、生成した複数のシミュレーション画像と、形状パラメータ及び検査対象を撮像する傾斜角度等とをライブラリ化し、ステップ S5 にて、画像データベース 105 にライブラリ化したデータを登録してシミュレーション画像の生成処理を終了する。

【0052】

画像処理装置 101 の画像生成部 103 は、上記した処理によって、形状パラメータが異なる多数のシミュレーション画像を予め生成し、画像データベース 105 に登録する。

【0053】

< 画像歪補正 >

ここで、画像処理部 104 が行うシミュレーション画像に対する画像歪補正について説明する。

【0054】

X 線検査装置 100 の X 線撮像装置 120 によって撮像される X 線画像は、例えば X 線カメラ 127 が備えるイメージインテンシファイアに起因して、周辺部に歪みを有する場合がある。そこで、予め生成するシミュレーション画像に対して、X 線撮像装置 120 により撮像される X 線画像に合わせるために、画像処理部 104 が画像歪補正を行う。

【0055】

図 8 は、本実施形態における画像処理部 104 による画像歪補正処理のフローチャートを例示する図である。

【0056】

図 8 に示す様に、まずステップ S11 にて、X 線撮像装置 120 によって撮像されるチェッカーボードパターン (Checker Board Pattern、以下「CBP」という) の X 線画像を取得する。CBP は、例えば図 9 に示す様に、X 線の透過量が異なる材料を所定のパターンで配列することにより形成される試料である。次に、ステップ S12 にて、CBP の X 線画像から X 線の透過量が異なる材料の交差点の X Y 座標を抽出する。

【0057】

続いて、ステップ S13 にて、抽出された交差点の X Y 座標から、例えば 2 次多項式の近似式を求め、ステップ S14 にて、求められた 2 次多項式に基づき、CBP の実際の交差点の座標と X 線画像における交差点の座標との差異から、画像歪量を変換するためのデータを生成する。

【0058】

最後に、ステップ S15 にて、生成した画像歪量変換データに基づいて、画像生成部 103 にて生成されたシミュレーション画像に対して画像歪補正を行い、処理を終了する。

【0059】

図 10 は、実施形態におけるシミュレーション画像の画像歪補正を例示する図であり、図 10 (a) は画像生成部 103 にて生成されたシミュレーション画像であり、図 10 (b) は画像歪補正が施されたシミュレーション画像の例である。

【0060】

10

20

30

40

50

図 10 に示す様に、シミュレーション画像に画像補正処理を施した後、X 線撮像装置 120 により撮像される X 線画像とのマッチング処理を行うことにより、検査対象となる TSV の形状を高精度に推定することが可能になる。

【0061】

なお、X 線撮像装置 120 による X 線画像の歪量を得るための CBP は、X 線画像の歪量を把握できれば良く、図 9 に示す例に限るものではない。また、本実施形態では、画像生成部 103 にて生成されるシミュレーション画像に対して画像歪補正を行っているが、X 線撮像装置 120 によって撮像される X 線画像に対して画像歪補正を行っても良い。

【0062】

< 検査対象の形状推定 >

10

次に、X 線撮像装置 120 により撮像される X 線画像と、画像生成部 103 により生成されるシミュレーション画像とに基づいて、シリコンウェハに形成されている TSV の形状を推定する方法について説明する。

【0063】

図 11 は、本実施形態における検査対象の形状推定処理のフローチャートを例示する図である。

【0064】

図 11 に示す様に、まずステップ S21 にて、X 線撮像装置 120 がシリコンウェハに形成されている TSV の X 線画像を撮像する。次に、ステップ S22 にて、画像処理装置 101 の画像処理部 104 が、撮像された X 線画像に対して、例えばコントラスト補正、

20

画像歪補正等の画像補正を施す。

【0065】

続いて画像処理部 104 が、ステップ S23 にて、X 線画像に超解像処理を施すことにより超解像画像を生成し、ステップ S24 では、超解像画像の縮小画像を生成する。

【0066】

図 12 に、X 線撮像装置 120 による X 線画像から生成される超解像画像と縮小画像の例を示す。図 12 (a) は超解像画像であり、図 12 (b) は縮小画像の例である。

【0067】

超解像画像は、例えば  $3770 \times 2830$  ピクセルの画像を X 線画像から作成し、縮小画像としては、超解像画像の  $1/10$  である  $377 \times 283$  ピクセルの画像を作成する。

30

【0068】

次に、ステップ S25 にて、画像処理装置 101 の画像マッチング部 106 が、生成された縮小画像と、画像データベース 105 に登録されているシミュレーション画像とのマッチングを行うことによって、TSV の形状パラメータの推定を行う。

【0069】

図 13 に、本実施形態におけるマッチング処理のフローチャートの例を示す。

【0070】

画像マッチング部 106 におけるマッチング処理では、まずステップ S31 にて、TSV の形状パラメータの推定を行うための初期形状パラメータを入力する。縮小画像を用いてマッチング処理を行う場合の初期形状パラメータとしては、例えば TSV の設計値等を用いることができる。

40

【0071】

次にステップ S32 にて、画像データベース 105 から入力された形状パラメータのシミュレーション画像を取得する。続いて、ステップ S33 にて、X 線画像の縮小画像とシミュレーション画像との間の類似性を表す評価値としてのマッチングスコアの算出を行う。マッチングスコアの算出には、本実施形態では正規化相関を用いたが、例えば幾何学相関、方向符号照会 (OCM: Orientation Code Matching) 等を用いても良い。

【0072】

50

次に、ステップ S 3 4 にて、算出されたマッチングスコアと基準値（例えば 0.95）とを比較する。マッチングスコアが基準値以下の場合には、ステップ S 3 5 にて形状パラメータの最適化を行い、再びステップ S 3 2 にて最適化された形状パラメータのシミュレーション画像を画像データベース 105 から取得した後、ステップ S 3 3 にてマッチングスコアを算出する。

【0073】

図 1 4 に、マッチングスコアの算出結果の例を示す。図 1 4 に示す様に、入力した形状パラメータのシミュレーション画像を用いてマッチングスコアの算出を行い、マッチングスコアが基準値以下の場合には、形状パラメータが異なるシミュレーション画像を用いて再度マッチングスコアの算出を行う。

10

【0074】

図 1 3 に示すマッチング処理のフローチャートにおいて、マッチングスコアの値が基準値を超えるまで、ステップ S 3 2 からステップ S 3 5 の処理を繰り返し行い、形状パラメータの最適化を行う。ステップ S 3 5 における形状パラメータの最適化には、例えば遺伝的アルゴリズム、勾配法等の最適化アルゴリズムを用いることができる。

【0075】

ステップ S 3 4 にてマッチングスコアが基準値を超えた場合には、ステップ S 3 6 にて、その形状パラメータを取得して、処理を終了する。

【0076】

図 1 1 に示す形状推定処理のフローチャートに戻り、次に、ステップ S 2 6 にて、縮小画像のマッチングスコア算出結果において、最もマッチングスコアが高い T S V の座標データを抽出し、超解像画像から抽出した座標データに対応する位置の画像を切り出す。

20

【0077】

図 1 5 は、X 線画像の縮小画像とシミュレーション画像との間のマッチングスコア算出結果を例示する図である。図 1 5 に示す様な縮小画像のマッチングスコア算出結果から、最もマッチングスコアが高い T S V の座標データを抽出する。次に、図 1 6 に示す様に、超解像画像から、抽出した座標データに対応する位置の画像データを切り出す。

【0078】

図 1 1 に示す形状推定処理のフローチャートに戻り、ステップ S 2 6 にて超解像画像の切り出しを行った後、ステップ S 2 7 にて、超解像画像から切り出した画像を用いてマッ

30

【0079】

ステップ S 2 7 における超解像画像から切り出した画像を用いるマッチング処理では、初期形状パラメータとして、縮小画像を用いて推定した形状パラメータを入力する。縮小画像を用いて推定した形状パラメータを初期条件として入力することにより、より高速に形状パラメータの推定を行うことができる。

【0080】

最後に、ステップ S 2 8 にて、超解像画像を用いてマッチング処理を行って取得された形状パラメータを出力して処理を終了する。

【0081】

40

この様に、本実施形態では、X 線画像の超解像画像及び縮小画像を生成し、まず縮小画像に基づいて形状パラメータの推定を行った後、縮小画像から推定された形状パラメータを用いて超解像画像に基づいて形状パラメータの推定を行っている。

【0082】

縮小画像は、超解像画像に比べて画像データが小さく、マッチング処理を高速に行うことが可能であり、超解像画像のみを用いて形状パラメータの推定を行う場合に比べて短時間で形状パラメータを推定することが可能となる。

【0083】

また、縮小画像のマッチングスコア算出結果に基づいて、超解像画像から部分的に切り出した画像を用いて形状パラメータを推定することで、超解像画像全体に対して処理を行

50

う場合に比べてより高速に形状パラメータの推定が可能となる。

【0084】

さらに、本実施形態によれば、X線撮像装置120によって取得されるX線画像の分解能 $1.0\mu\text{m}$ に対して、約10分の1の $0.1\mu\text{m}$ の分解能で形状を推定することが可能である。この様に、X線撮像装置120の分解能以上で検査対象の形状を推定することが可能となる。

【0085】

<フィルタ処理を用いた形状パラメータの推定>

次に、X線画像及びシミュレーション画像にフィルタ処理を施し、フィルタ処理が施されたX線画像及びシミュレーション画像に基づいて検査対象の形状パラメータを推定する方法を説明する。

10

【0086】

X線画像及びシミュレーション画像に、例えばエッジ強調フィルタの一例としてsobelフィルタ処理を施すことにより、画像のエッジを強調することができる。

【0087】

図17は、本実施形態におけるX線画像のsobelフィルタ処理例を示す図である。図17は、X線画像におけるTSVの深さ方向に対してsobelフィルタ処理を行った例であり、図17(a)はフィルタ処理前、図17(b)はフィルタ処理後のX線画像である。

【0088】

20

図17(b)に示す様に、TSVの深さ方向にsobelフィルタ処理を施したことにより、TSVの開口部と底部の形状が明確に画像中に表れていることが分かる。

【0089】

また、図18に、シミュレーション画像にsobelフィルタ処理を施した例を示す。図18は、図17と同様にTSVの深さ方向に対してsobelフィルタ処理を施した例であり、図18(a)はフィルタ処理前、図18(b)はフィルタ処理後を示している。

【0090】

図17に示す様に、図17と同様にTSVの開口部及び底部の形状が明確に表れていることが分かる。

【0091】

30

この様に、X線画像及びシミュレーション画像にsobelフィルタ処理を施し、sobelフィルタ処理が施された画像を用いてマッチング処理を行い、例えば、図4に示す形状パラメータのうち、開口部半径 $r_1$ 及び底部半径 $r_3$ の推定を行う。

【0092】

sobelフィルタ処理により、TSVの開口部及び底部が強調されたX線画像及びシミュレーション画像を用いることで、形状パラメータのうち開口部半径 $r_1$ 及び底部半径 $r_3$ を高精度に推定できる。

【0093】

この様に、フィルタ処理後の画像を用いて開口部半径 $r_1$ 及び底部半径 $r_3$ を予め求めた後、フィルタ処理前の画像を用いたマッチング処理により、他の形状パラメータの推定を行う。他の形状パラメータの推定は、マッチング処理により全ての形状パラメータを一度に推定する場合に比べて、より高速に行うことが可能である。したがって、エッジ強調された画像を用いることで高精度な形状パラメータの推定が可能になると共に、形状パラメータを推定する全体の処理時間を短縮できる。

40

【0094】

図19は、実施形態におけるX線画像から形状パラメータを抽出する例を示す図である。図19(a)は、TSVの幅方向にsobelフィルタ処理を施したX線画像であり、図19(b)は、図19(a)に示すフィルタ処理を施したX線画像のA-A'におけるプロファイルである。

【0095】

50

図19(a)に示す様に、X線画像に対してTSVの幅方向にsobelフィルタ処理を施すことで、例えば図4に示す形状パラメータのうち、TSVのホール中間部最大半径 $r_2$ が強調された画像を得ることができる。

【0096】

そこで、シミュレーション画像に対して、図19(a)に示すX線画像と同様にTSVの幅方向にsobelフィルタ処理を施してマッチング処理を行うことで、例えばTSVのホール中間部最大半径 $r_2$ の推定を高精度に行うことが可能になる。

【0097】

また、図19(b)に示す様に、X線画像からTSVのホール中間部最大半径 $r_2$ を計測することによって形状パラメータを求めることもできる。

10

【0098】

この様に、フィルタ処理を施すことで、TSVの複数の形状パラメータのうち、ホール中間部最大半径 $r_2$ を予め高精度に求めることが可能になり、マッチング処理により推定する形状パラメータの数を減らし、TSVの形状推定を短時間で行うことが可能になる。

【0099】

以上で説明した様に、本実施形態によれば、シリコンウェハを切削等することなく非破壊で、検査対象となるTSVの形状計測を高分解能で、且つ高速に行うことが可能となる。

【0100】

本実施形態に係るX線検査方法及びX線検査装置100は、検査対象の形状計測を高速に行い、切削等することなく検査することが可能であるため、例えば半導体製造プロセスにおけるインライン検査に用いることができる。

20

【0101】

なお、半導体製造プロセス等においてインライン検査を行う場合には、複数のX線検査装置100の画像処理装置101にネットワーク等を介して接続するサーバ装置を設け、サーバ装置においてマッチング処理等を行う様に構成することも可能である。この場合には、例えばサーバ装置に画像データベース105、画像マッチング部106等を設け、サーバ装置において検査を一括して行い、検査結果等を集約して管理することが可能になる。

【0102】

30

以上、本発明の実施形態について説明したが、上記実施形態に挙げた構成等に、その他の要素との組み合わせなど、ここで示した構成に本発明が限定されるものではない。これらの点に関しては、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で変更することが可能であり、その応用形態に応じて適切に定めることができる。

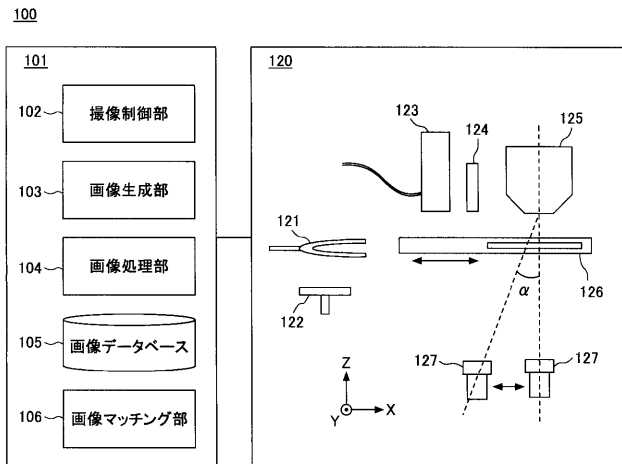
【符号の説明】

【0103】

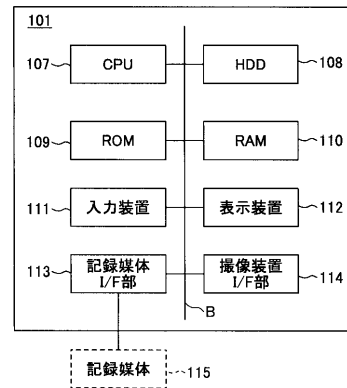
- 100 X線検査装置
- 101 画像処理装置
- 111 画像生成部(シミュレーション画像生成手段)
- 113 画像マッチング部(形状推定手段)
- 116 画像処理部
- 120 X線撮像装置(X線撮像手段)

40

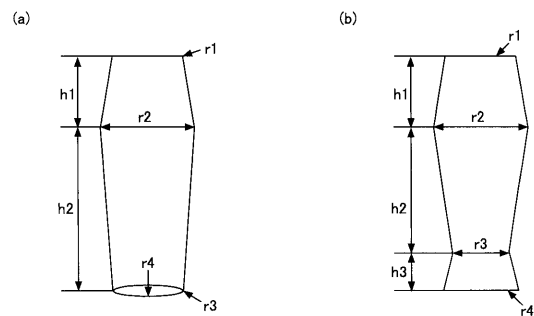
【図 1】



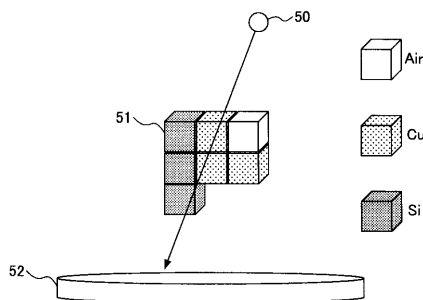
【図 3】



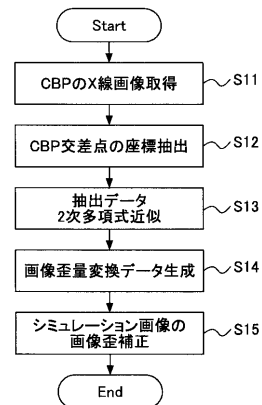
【図 4】



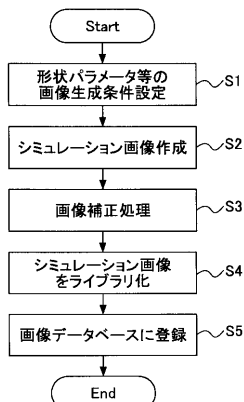
【図 6】



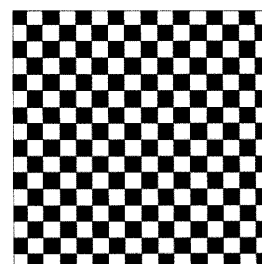
【図 8】



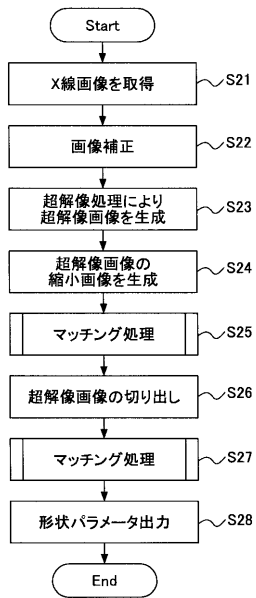
【図 7】



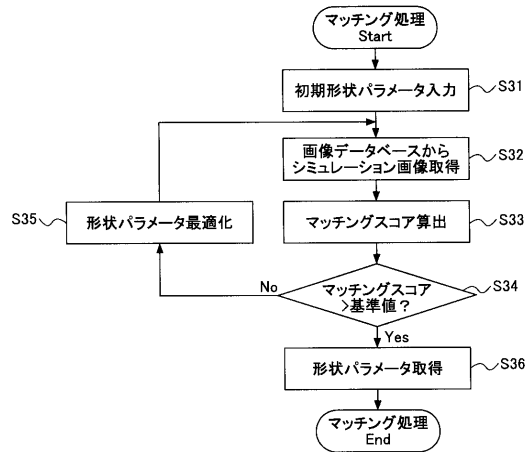
【図 9】



【図 1 1】



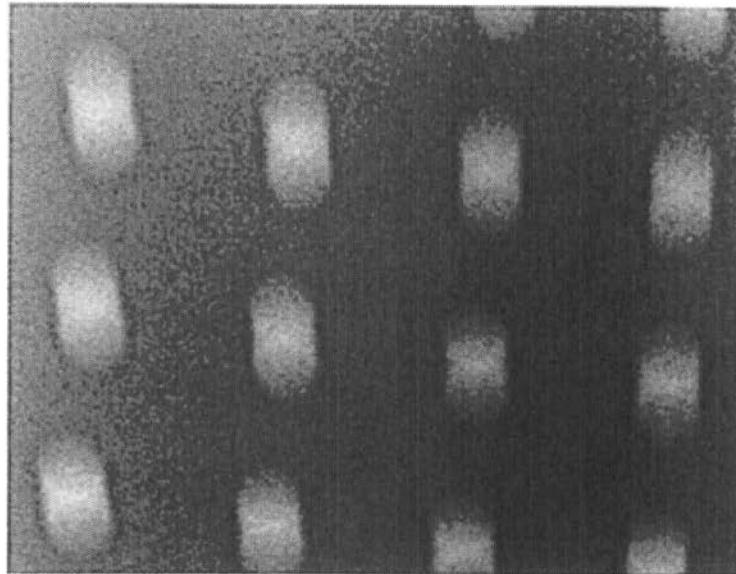
【図 1 3】



【図 1 4】

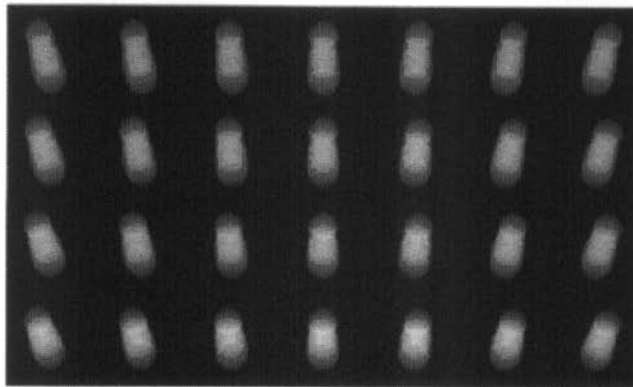
| No | 形状パラメータ              | マッチングスコア |
|----|----------------------|----------|
| 1  | temp20.2 x 85 tilt15 | 0.9512   |
| 2  | temp20 x 85 tilt15   | 0.952    |
| 3  | temp19.8 x 85 tilt15 | 0.9507   |
| 1  | temp20 x 85.2 tilt15 | 0.9518   |
| 2  | temp20 x 85 tilt15   | 0.952    |
| 3  | temp20 x 84.8 tilt15 | 0.9507   |

【図 2】



【 図 5 】

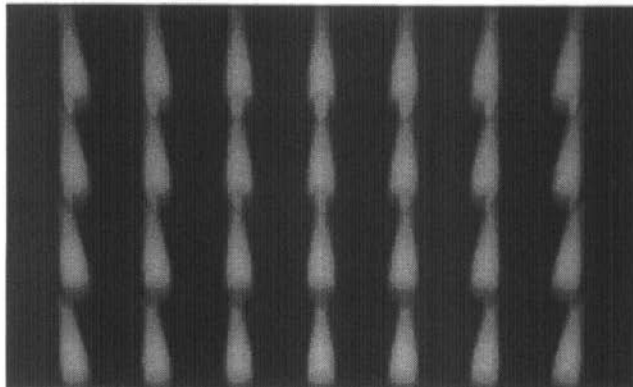
(a)



形状パラメータ

r1: 20  $\mu\text{m}$ r2: 24  $\mu\text{m}$ r3: 18  $\mu\text{m}$ r4: 20  $\mu\text{m}$ h1: 40  $\mu\text{m}$ h2: 72  $\mu\text{m}$ 

(b)

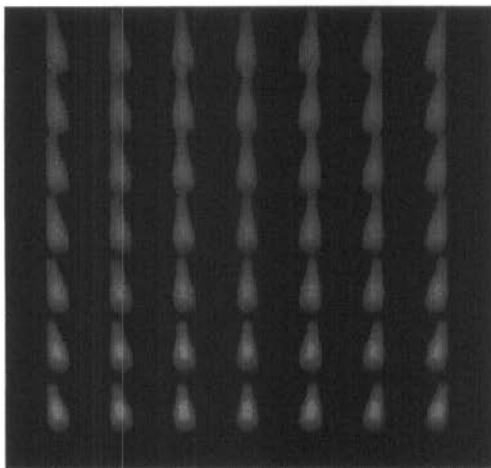


形状パラメータ

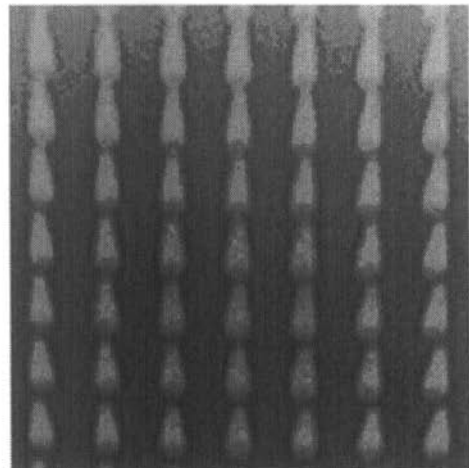
r1: 10  $\mu\text{m}$ r2: 20  $\mu\text{m}$ r3: 6  $\mu\text{m}$ r4: 5  $\mu\text{m}$ h1: 20  $\mu\text{m}$ h2: 85  $\mu\text{m}$ 

【 図 10 】

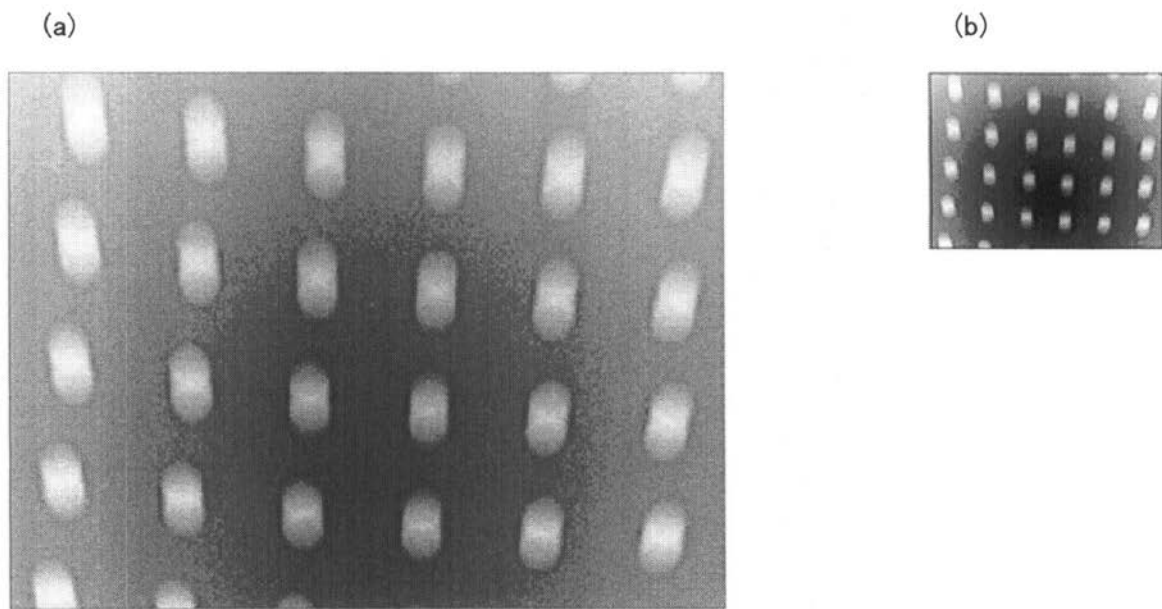
(a)



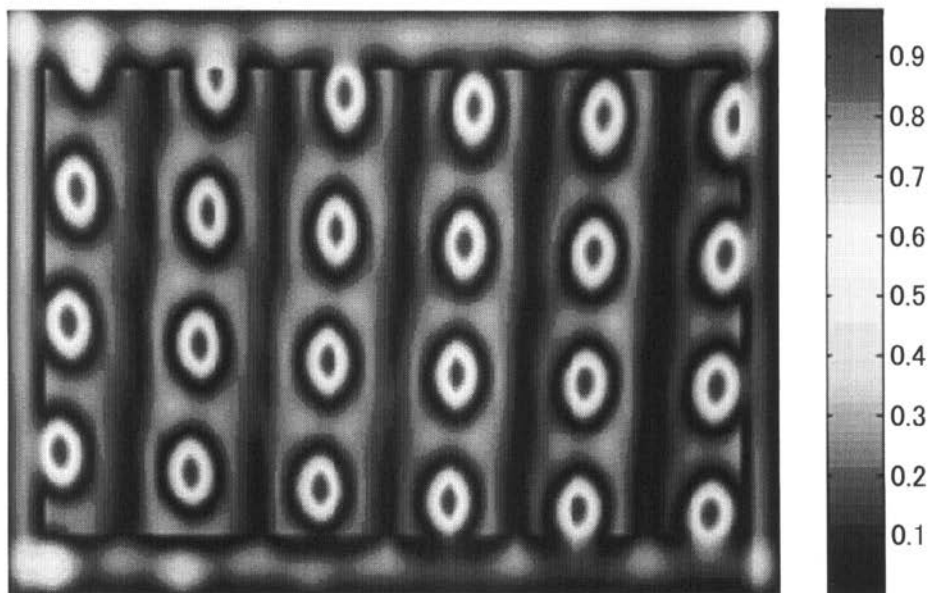
(b)



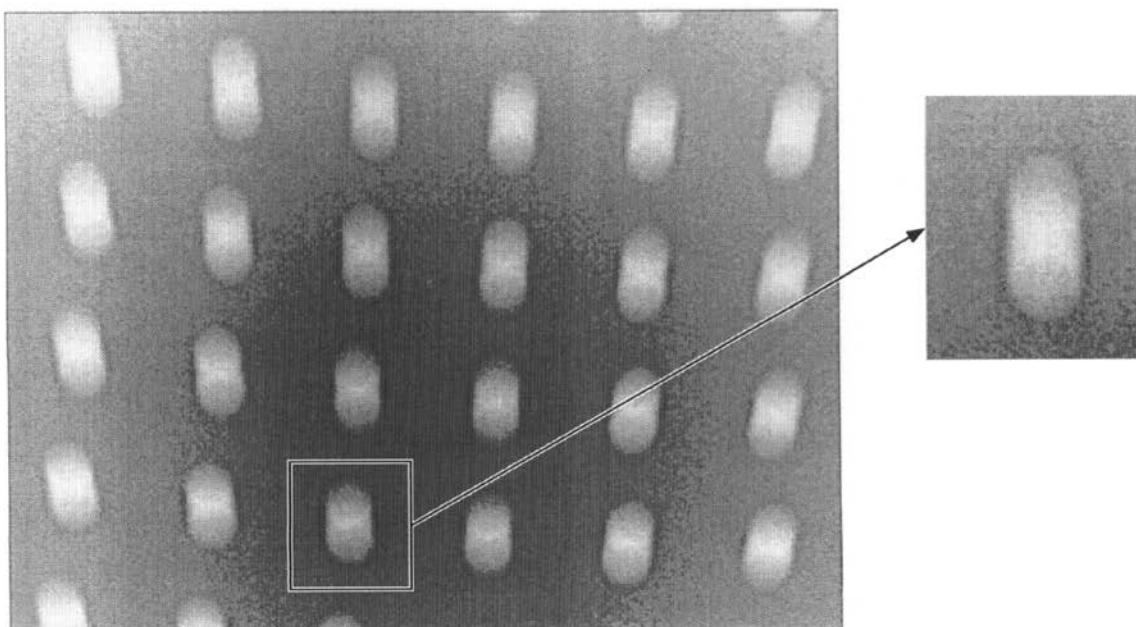
【図 12】



【図 15】

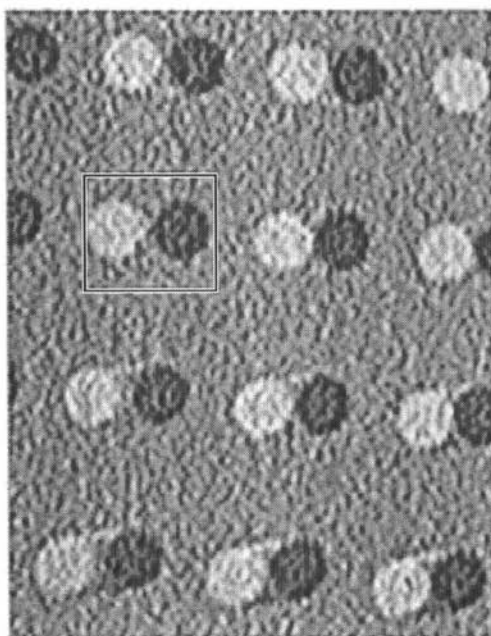


【図 16】

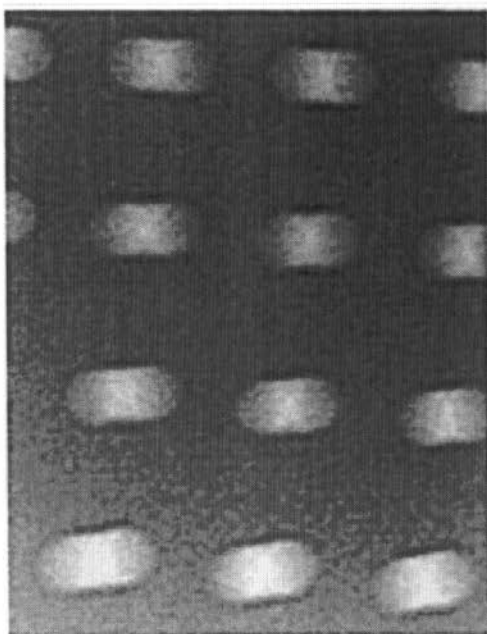


【図 17】

(b)

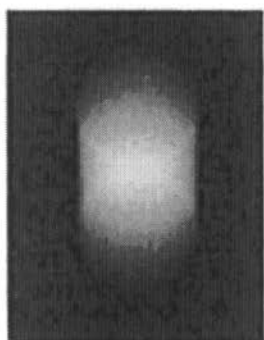


(a)

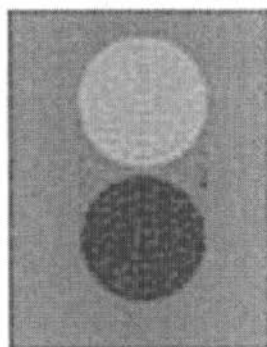


【図 18】

(a)



(b)



【図 19】

