

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第6219019号
(P6219019)

(45) 発行日 平成29年10月25日(2017.10.25)

(24) 登録日 平成29年10月6日(2017.10.6)

(51) Int.Cl.
H01J 37/37 (2006.01)

F I
H01J 37/37 D

請求項の数 27 外国語出願 (全 38 頁)

(21) 出願番号	特願2012-31773 (P2012-31773)	(73) 特許権者	501419107 エフ・イー・アイ・カンパニー 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
(22) 出願日	平成24年2月16日(2012.2.16)		
(65) 公開番号	特開2012-178347 (P2012-178347A)		
(43) 公開日	平成24年9月13日(2012.9.13)	(74) 代理人	100103171 弁理士 雨貝 正彦
審査請求日	平成27年2月15日(2015.2.15)		
(31) 優先権主張番号	61/446,804	(72) 発明者	トム・ミラー アメリカ合衆国 オレゴン州 97229 ポートランド エヌダブリュー ラ・カ ッセル・クレスト・レーン 10810
(32) 優先日	平成23年2月25日(2011.2.25)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)	審査官	佐藤 仁美
		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 荷電粒子ビーム・システムにおいて大電流モードと小電流モードとを高速に切り替える方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

イオン・カラムおよび複数のビーム画定絞りを備える集束イオン・ビーム・システムを使用して、1つまたは複数の基準マークを関心領域の近くに含むターゲット内の構造をミリングする方法であって、

第1の電流を有するイオン・ビームを生成するための第1のビーム画定絞りを選択するステップと、

前記第1の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップと、

前記第1の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、
前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を決定するために、前記第1の電流を有する前記イオン・ビームを前記基準マークに亘って走査するステップと、

前記第1の電流よりも大きい第2の電流を有するイオン・ビームを生成するための第2のビーム画定絞りを選択するステップと、

前記イオン・カラム内の前記電極電圧を再設定せずに、前記第2の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、

前記第2の電流を有する前記イオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、前記関心領域においてミリング工程を実行するステップであり、このビーム偏向が、前記第1の電流を有する前記イオン・ビームによって決定した前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を考慮して行われるステップと

10

20

を含む方法。

【請求項 2】

前記第 1 のビーム画定絞りは第 1 の直径を有する円形のビーム画定絞りを備え、

前記第 2 のビーム画定絞りは前記第 1 の直径より大きい第 2 の直径を有する第 2 の円形の絞りを備える、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップが、銃レンズおよび主レンズ上の電圧を設定することを含み、

前記イオン・カラム内の前記電極電圧を再設定せずに、前記第 2 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップが、前記銃レンズおよび前記主レンズ上の電圧を再設定せずに、前記第 2 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くことを含む、請求項 1 または 2 に記載の方法。

10

【請求項 4】

前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップが、前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記電極電圧を最適化することを含む、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 5】

前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップが、前記第 2 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記電極電圧を最適化することを含む、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の方法。

20

【請求項 6】

前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップが、前記第 1 のビーム画定絞りと前記第 2 のビーム画定絞りととの中間のサイズを有する絞りに対して、前記電極電圧を最適化することを含む、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7】

前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップが、前記第 1 のビーム画定絞りまたは前記第 2 のビーム画定絞りに対して前記ビームを最適化しないように、前記電極電圧を設定することを含む、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の方法。

30

【請求項 8】

前記第 2 の電流を有する前記イオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて前記関心領域においてミリング工程を実行した後に、前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを生成するための前記第 1 のビーム画定絞りを再び選択して、前記ターゲットを画像化するステップをさらに含む、請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

前記第 1 のビーム電流よりも小さい第 3 の電流を有するイオン・ビームを生成するための第 3 のビーム画定絞りを選択するステップと、

40

前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の前記電極電圧を設定するステップと、

前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、

前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を決定するために、前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームを前記基準マークに亘って走査するステップであり、前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームの前記位置決定が、前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームの前記位置決定よりも正確なステップと、

前記第 3 の電流よりも大きく、前記第 2 の電流よりも小さい第 4 の電流を有するイオン・ビームを生成するための第 4 のビーム画定絞りを選択するステップと、

50

前記イオン・カラム内の前記電極電圧を再設定せずに、前記第４の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、

前記第４の電流を有する前記イオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、前記関心領域において微細ミリング工程を実行するステップであり、このビーム偏向が、前記第３の電流を有する前記イオン・ビームによって決定した前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を考慮して行われるステップと

をさらに含む、請求項１から８のいずれか一項に記載の方法。

【請求項１０】

前記第４の電流を有する前記イオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて前記関心領域において前記微細ミリング工程を実行した後に、前記第３の電流を有する前記イオン・ビームを生成するための前記第３のビーム画定絞りを再び選択して、前記ターゲットを画像化するステップをさらに含む、請求項９に記載の方法。

10

【請求項１１】

第１のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第１の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、

第２のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第２の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含む、

請求項１から１０のいずれか一項に記載の方法。

【請求項１２】

第１のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第１の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、

20

第２のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第２の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、

第３のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第３の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、

第４のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第４の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含む、

請求項９に記載の方法。

【請求項１３】

前記複数のビーム画定絞りの上方に第１の偏向器を配置するステップと、

30

前記複数のビーム画定絞りの下方に第２の偏向器を配置するステップと

をさらに含む、請求項１から１０のいずれか一項に記載の方法。

【請求項１４】

第１のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第１の絞り上へ偏向させるように、前記第１の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第２の偏向器を作動させるステップと

を含み、

第２のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

40

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第２の絞り上へ偏向させるように、前記第１の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第２の偏向器を作動させるステップと

を含む、請求項１３に記載の方法。

【請求項１５】

前記複数のビーム画定絞りの上方に第１の偏向器を配置するステップと、

前記複数のビーム画定絞りの下方に第２の偏向器を配置するステップと

をさらに含む、請求項９に記載の方法。

【請求項１６】

50

第 1 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、
前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第 1 の絞り上へ偏向させるように、前記第 1 の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第 2 の偏向器を作動させるステップと
を含み、

第 2 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第 2 の絞り上へ偏向させるように、前記第 1 の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第 2 の偏向器を作動させるステップと
を含み、

第 3 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第 3 の絞り上へ偏向させるように、前記第 1 の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第 2 の偏向器を作動させるステップと
を含み、

第 4 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第 4 の絞り上へ偏向させるように、前記第 1 の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第 2 の偏向器を作動させるステップと
を含む、請求項 1 5 に記載の方法。

【請求項 1 7】

前記ミリング工程の後に実行されるイオン・ビーム研磨工程をさらに含む、請求項 1 から 1 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 8】

前記微細ミリング工程の後に実行されるイオン・ビーム研磨工程をさらに含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 1 9】

イオン・カラムおよび複数のビーム画定絞りを備える集束イオン・ビーム・システムを使用して、1 つまたは複数の基準マークを関心領域の近くに含むターゲット内の構造をバルク・ミリングし、微細ミリングする方法であって、

第 1 の電流を有するイオン・ビームを生成するための第 1 のビーム画定絞りを選択するステップと、

前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップと、

前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、

前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を決定するために、前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームを前記基準マークに亘って走査するステップと、

前記第 1 の電流よりも大きい第 2 の電流を有するイオン・ビームを生成するための第 2 のビーム画定絞りを選択するステップと、

前記イオン・カラム内の前記電極電圧を再設定せずに、前記第 2 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、

前記第 2 の電流を有する前記イオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、前記関心領域においてバルク・ミリング工程を実行するステップであり、このビーム偏向が、前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームによって決定した前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を考慮して行われるステップと、

前記バルク・ミリング工程が完了したかどうかを判断し、前記バルク・ミリング工程が

10

20

30

40

50

完了していない場合に、第 1 のビーム画定絞りを選択する前記ステップに戻るステップと、

前記第 1 のビーム電流よりも小さい第 3 の電流を有するイオン・ビームを生成するための第 3 のビーム画定絞りを選択するステップと、

前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ集束させるように、前記イオン・カラム内の前記電極電圧を設定するステップと、

前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、

前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を決定するために、前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームを前記基準マークに亘って走査するステップであり、前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームの前記位置決定が、前記第 1 の電流を有する前記イオン・ビームの前記位置決定よりも正確なステップと、

10

前記第 3 の電流よりも大きく、前記第 2 の電流よりも小さい第 4 の電流を有するイオン・ビームを生成するための第 4 のビーム画定絞りを選択するステップと、

前記イオン・カラム内の前記電極電圧を再設定せずに、前記第 4 の電流を有する前記イオン・ビームを前記ターゲット上へ導くステップと、

前記第 4 の電流を有する前記イオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、前記関心領域において微細ミリング工程を実行するステップであり、このビーム偏向が、前記第 3 の電流を有する前記イオン・ビームによって決定した前記イオン・カラムの軸に対する前記基準マークの位置を考慮して行われるステップと、

前記微細ミリング工程が完了したかどうかを判断し、前記微細ミリング工程が完了していない場合に、前記第 3 のビーム画定絞りを選択する前記ステップに戻るステップとを含む方法。

20

【請求項 20】

第 1 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第 1 の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、

第 2 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第 2 の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、

第 3 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第 3 の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、

第 4 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第 4 の絞りを前記イオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含む、

30

請求項 19 に記載の方法。

【請求項 21】

前記複数のビーム画定絞りの上方に第 1 の偏向器を配置するステップと、

前記複数のビーム画定絞りの下方に第 2 の偏向器を配置するステップと

をさらに含む、請求項 19 に記載の方法。

【請求項 22】

第 1 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第 1 の絞り上へ偏向させるように、前記第 1 の偏向器を作動させるステップと、

40

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第 2 の偏向器を作動させるステップとを含む、

第 2 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第 2 の絞り上へ偏向させるように、前記第 1 の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第 2 の偏向器を作動させるステップとを含む、

第 3 のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

50

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第3の絞り上へ偏向させるように、前記第1の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第2の偏向器を作動させるステップとを含む、

第4のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、

前記イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第4の絞り上へ偏向させるように、前記第1の偏向器を作動させるステップと、

前記イオン・ビームを、前記イオン・カラムの軸上へ、かつ、前記イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、前記第2の偏向器を作動させるステップと

を含む、請求項21に記載の方法。

【請求項23】

前記微細ミリング工程の後に実行されるイオン・ビーム研磨工程をさらに含む、請求項19から21のいずれか一項に記載の方法。

【請求項24】

保護層の付着ステップをさらに含む、前記付着ステップが前記ミリング工程の前に実行される、請求項1から23のいずれか一項に記載の方法。

【請求項25】

保護層の付着ステップをさらに含む、前記付着ステップが前記バルク・ミリング工程の前に実行される、請求項19に記載の方法。

【請求項26】

荷電粒子源と、複数のビーム画定絞りと、少なくとも1つの集束レンズとを有する荷電粒子ビーム・システムを動作させる方法であって、

前記荷電粒子源から荷電粒子を引き出すステップと、

前記荷電粒子を荷電粒子ビームに形成するステップと、

第1の直径を有する第1のビーム画定絞りを通過するように前記荷電粒子ビームを導くステップであり、前記第1のビーム画定絞りを有する前記荷電粒子ビームが第1の電流を有するステップと、

ターゲット表面のスポットに前記荷電粒子ビームを収束させるように、前記集束レンズを調整するステップと、

前記第1の直径とは異なる第2の直径を有する第2のビーム画定絞りを通過するように前記荷電粒子ビームを導くステップであり、前記第2のビーム画定絞りを有する前記荷電粒子ビームが第2の電流を有するステップと、

前記集束レンズの集束強度を変更せずに、前記荷電粒子ビームを、前記集束レンズを通過するように導くステップと

を含む方法。

【請求項27】

前記集束レンズの集束強度を変更せずに、前記荷電粒子を、前記集束レンズを通過するように導くステップが、前記ビームを再整列させることなく、前記荷電粒子を、前記集束レンズを通過するように導くステップを含む、請求項26に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は一般に荷電粒子ビーム・システムに関し、具体的には、異なるビーム電流を有する動作モード間の高速切替えに関する。

【背景技術】

【0002】

電子顕微鏡、集束イオン・ビーム(FIB)システムなどの荷電粒子ビーム・システムでは一般に、画像化し、かつ/または処理するターゲットの表面に荷電粒子ビームを集束させるためにカラムが使用される。FIBカラムでは、イオン源(一般に液体金属イオン

10

20

30

40

50

源すなわち L M I S) が初期イオン・ビームを発生させ、発生した初期イオン・ビームは次いで「銃」に入り、銃は一般に、これらのイオンを集束させて概ね平行なビームとし、この概ね平行なビームはカラムの本体部分に入る。このカラムでは、このビームをブランキングし(すなわちオンおよびオフにし)、偏向させ(ターゲット表面のさまざまな位置に移動させ)、ターゲットの表面に集束させることができる。いくつかのケースでは、このイオン・ビームを使用して、ターゲットの表面から、制御されたパターンに従って、材料をミリング(milling)する(スパッタリングする)。これらの用途ではミリング速度がビーム電流にほぼ比例し、したがって、工程スループットを向上させるためには一般に、ビーム電流が大きいことが好ましい。他のケースでは、このイオン・ビームを使用してターゲットを画像化する。この場合には、イオン・ビームの衝突が2次電子の放出を引き起こし、この2次電子を検出、使用して画像を形成することができる。大まかに言って、これらの用途では、ビームの直径によって画像分解能が決まる。より小さいビーム電流を有するビームは一般に、より大きな電流を有するビームよりも小さな直径に集束させることができ、より小さなビーム電流を有するビームは、ターゲットに与える損傷も小さい。全てのイオンが所望のビーム直径内に均一に分布しているのが理想的なビームであるが、実際には、ビーム電流の分布は多少なりとも釣鐘形であり、ビームの中心から離れるにつれて漸減する。集束イオン・ビームが長い「尾(tail)」を有する場合には、画像コントラストが低下することがある。

【0003】

いくつかの用途は、画像化とミリングの両方を必要とする。具体的には、ターゲット上の既存のフィーチャに対して、ミリングされたパターンが正確に配置されている必要があるときには、最初に、より小電流の F I B を用いてターゲットを画像化し、次いで、より大電流の(一般により大きな直径の) F I B に切り替えて、ミリングを実行する必要がある。このような画像化/ミリング工程の1つの重要な例が、半導体デバイス、低温凍結生体試料などのさまざまなタイプの試料の薄い「ラメラ」(lamella)の作製である。半導体デバイスの故障解析の場合には、通常は解析する欠陥のあるデバイス(以後、欠陥デバイス)を含む集積回路内の特定の関心領域(region of interest)(RoI)を、両側を F I B ミリングすることによって露出させ、欠陥デバイスを含む残りの材料の薄い切片(ラメラ)を残す。このラメラは、原則として原子分解能が利用可能な高電圧透過型電子顕微鏡(TEM)または走査透過型電子顕微鏡(STEM)で十分に使用できる薄さを有する。ラメラの厚さは数十ナノメートルでしかなく、観察している欠陥は数ナノメートル程度であるため、ラメラを作製するためのミリングは極めて正確である。

【0004】

ラメラの作製時には、高速ミリングに適した大電流の大径のビームの使用と、微細なミリングまたは画像化に適したより小電流のより小径のビームの使用とを切り替える必要がある。この切替えは一般に、ビームが通過するビーム画定絞り(beam-defining aperture)(BDA)を変更することによって実施される。BDAは一般に、金属ストリップ(strip)の穴であり、その穴を通過した荷電粒子だけがビームを形成することができる。金属ストリップには一般にいくつかのBDA、すなわち穴があり、絞りの切替えは一般に、異なる直径を有する穴がビームの経路上に配置されるようにストリップを動かすことを含む。絞りストリップの機械的な移動の正確さは一般にせいぜい数ミクロンであり、そのため、絞りを変更した後はビームを再整列させる必要があると考えられている。

【0005】

絞りを変更すると、ビームを再整列させることが必要となるだけでなく、レンズの調整も必要となる。大電流の大径のビームを形成するのに必要な光学的条件と、より小電流のより小径のビームを形成するのに必要な光学的条件は同じではない。図28は、試料上のビームのスポット・サイズの対数2810を、ビーム収束角の対数2812に対して示したグラフである。収束角は、ビームを形成するイオンの、ターゲット位置における広がり

10

20

30

40

50

の角度である。ビーム収束角は、ビーム経路上の絞りによって決定される。より大きな絞りは、より広い角度から荷電粒子を受け入れる。

【 0 0 0 6 】

絞りのサイズは、ビームのいくつかの特性に影響を及ぼす。より大きな絞りは、光軸からより離れた荷電粒子を通過させ、それにより、ビーム内の球面収差（収束角の3乗に比例する）を増大させ、直線 2 8 0 2 に示されているように、ビーム・スポット・サイズ、すなわち試料位置におけるビームの直径を増大させる。より大きな絞りは、直線 2 8 0 4 によって示されているように、（収束角に比例する）色収差も増大させる。

【 0 0 0 7 】

多くの荷電粒子システムは、源の縮小された像を形成することによって試料上にスポットを形成し、スポット・サイズは、直線 2 8 0 6 によって示されているように、倍率の低下（縮小の増大）とともに小さくなる。光学システムの倍率は、収束角の増大とともに低下する。したがって、収束角の増大は、収差および源の縮小に影響を与え、収差は、収束の増大とともにスポット・サイズを増大させる傾向を有し、源の縮小は、収束角の増大とともにスポット・サイズを小さくする傾向を有する。

【 0 0 0 8 】

図 2 8 は、収束角が変化したときの、球面収差、色収差および源縮小のスポット・サイズに対する合併効果 2 8 0 8 を示す。図 2 8 のグラフのビーム設定では、曲線 2 8 0 8 の最下点における最も小さなスポット・サイズ A が、ビーム収束角 B で生成される。より大きな絞りまたはより小さな絞りを使用して、収束角を大きくし、または小さくした場合、スポット・サイズは大きくなり、曲線 2 8 0 8 の最下点から離れることを、図 2 8 は示している。より理想的なスポット・サイズに戻すために、F I B のユーザは、絞りを変更するときにレンズ電圧を変更して、倍率を変化させ、ビームのスポット・サイズを、変更後の曲線上の新たな最下点に戻すであろう。

【 0 0 0 9 】

したがって、先行技術の大電流モードと小電流モードの切替えでは、これらの2つのモードのそれぞれのモードに対してカラムのイオン光学部品を別々に最適化するために、ビーム画定絞りを切り替える必要があるだけでなく、ビームを再整列させ、多数のレンズ電圧を変更する必要もある。残念なことに、いくつかのカラム電圧は、大幅に（> 1 0 0 V）変化させる必要があることがあるため、モードを変更するとき、例えばミリングと画像化とを切り替えるときには、カラムが機能する準備が整うまでに、長い電源整定時間（power supply settling time）が必要となることがある。したがって、薄いラメラを作製する際のスループットを向上させるためには、ミリング・モードと画像化モードとを切り替える切替え時間を短縮することが望ましいであろう。

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 0 】

本発明の目的は、荷電粒子ビーム・システムにおいて大電流モードと小電流モードとをより高速に切り替えることにある。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 1 】

いくつかの実施形態において、本発明は、大電流モードと小電流モードとの切替えの際にビーム画定絞りを変更するときに、かなりの整定時間を要する十分に大きなレンズ電圧の変更を回避することによって、処理速度を向上させる。いくつかの実施形態において、本発明は、ビーム画定絞りを変更した後のビームの再配置を回避する。

【 0 0 1 2 】

例えば、電源電圧を変化させず、初期設定のビーム位置を変更することなしに、大電流集束イオン・ビーム・ミリング・モードおよび小電流集束イオン・ビーム画像化モードから変更することができる。透過型電子顕微鏡で観察するためのラメラの作製では、集束イオン・ビームの複数のビーム電流レベルを使用することができ、それぞれのラメラを作製

10

20

30

40

50

するのに要する時間を短縮することが望ましいため、本発明は、そのようなラメラを作製するのに特に有用である。

【 0 0 1 3 】

以上では、以下の本発明の詳細な説明をより十分に理解できるように、本発明の特徴および技術上の利点をかなり広く概説した。以下では、本発明の追加の特徴および利点を説明する。開示される着想および特定の実施形態を、本発明の同じ目的を達成するために他の構造を変更しまたは設計するベースとして容易に利用することができることを当業者は理解すべきである。さらに、このような等価の構造は、添付の特許請求の範囲に記載された本発明の趣旨および範囲を逸脱しないことを当業者は理解すべきである。

【 0 0 1 4 】

次に、本発明および本発明の利点のより完全な理解のため、添付図面に関して書かれた以下の説明を参照する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 5 】

【図 1】 キャッシュ・メモリおよび欠陥セルを含む集積回路の概略図である。

【図 2】 欠陥セルを含む図 1 のキャッシュ・メモリの詳細図である。

【図 3 A】 図 2 のキャッシュ・メモリの欠陥セルの詳細上面図である。

【図 3 B】 図 3 A の欠陥セルの詳細な等角投影図である。

【図 4】 先行技術の場合のように厚い保護付着を形成する、図 3 A および 3 B の欠陥セル位置における F I B 支援付着工程の等角投影概略図である。

【図 5】 図 4 に示した工程による厚い付着の上面 X 線概略図である。

【図 6】 図 4 で形成した先行技術の厚い付着に 2 つの基準マーク (f i d u c i a l m a r k) を形成する F I B ミリング工程の等角投影概略図である。

【図 7】 本発明のいくつかの実施形態の場合のように薄い保護付着を形成する、図 3 A の欠陥セル位置における F I B 支援付着工程の等角投影概略図である。

【図 8】 図 7 で形成した本発明の一実施形態のための薄い付着に 2 つの基準マークを形成する F I B ミリング工程の等角投影概略図である。

【図 9】 図 7 で形成した本発明の一実施形態のための薄い付着に F I B によってミリングした基準マークの F I B 画像化工程を示す図である。

【図 1 0】 F I B ボックス・ミリング (b o x m i l l i n g) 工程の開始を示す図である。

【図 1 1】 F I B ボックス・ミリング工程の完了を示す図である。

【図 1 2】 F I B クリーニング工程を示す図である。

【図 1 3】 本発明の一実施形態の画像化およびミリング工程を実現することができる例示的な F I B カラムの側断面図である。

【図 1 4】 本発明の一実施形態のバルク・ミリング工程 A および粗画像化工程 B のイオン軌道の側面図である。

【図 1 5】 先行技術のバルク・ミリング工程 A および微細画像化工程 D のイオン軌道の側面図である。

【図 1 6】 本発明の一実施形態の微細ミリング工程 D および微細画像化工程 E のイオン軌道の側面図である。

【図 1 7】 先行技術の微細ミリング工程 D および微細画像化工程 F のイオン軌道の側面図である。

【図 1 8】 6 つの動作モード A ~ F について、放出器先端 (t i p) におけるビーム半角を、ビーム電流に対して示したグラフである。

【図 1 9】 6 つの動作モード A ~ F について、ビーム画定絞り (B D A) の直径を、ビーム電流に対して示したグラフである。

【図 2 0】 6 つの動作モード A ~ F について、銃レンズの集束電圧を、ビーム電流に対して示したグラフである。

【図 2 1】 6 つの動作モード A ~ F について、主レンズの集束電圧を、ビーム電流に対し

10

20

30

40

50

て示したグラフである。

【図 2 2】6 つの動作モード A ~ F について、半値全幅 (F W H M) ビーム直径を、ビーム電流に対して示したグラフである。

【図 2 3】6 つの動作モード A ~ F について、全ビーム電流の 5 0 % を含むビーム直径 (d 5 0) を、ビーム電流に対して示したグラフである。

【図 2 4】6 つの動作モード A ~ F について、源 - ターゲット倍率を、ビーム電流に対して示したグラフである。

【図 2 5】6 つの動作モード A ~ F について、ビーム画定絞り (B D A) の不整列感度 (m i s a l i g n m e n t s e n s i t i v i t y) を、ビーム電流に対して示したグラフである。

10

【図 2 6】本発明の一実施形態の 2 ステップ画像化およびミリング工程の流れ図である。

【図 2 7】図 2 6 の画像化および F I B ミリング工程を実行する前に、関心領域 (R o I) を集束イオン・ビームの下に配置する、「ビット・ウォーキング工程 (b i t w a l k i n g p r o c e s s)」の流れ図である。

【図 2 8】試料上のビームのスポット・サイズの対数を、ビーム収束角の対数に対して示したグラフである。

【図 2 9】理想的なシステム内における異なる絞り位置のビーム位置に対する影響を概略的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 6 】

20

荷電粒子ビームの大電流と小電流をより高速に切り替えることによって、処理動作と画像化動作の間の交互使用を容易にすることができ、したがって、ターゲットをより高いスループットで正確に処理することを可能にすることができる。

【 0 0 1 7 】

このような工程の 1 つの用途は、T E M または S T E M での高空間分解能画像化を可能にする試料からのラメラの製造である。具体的には、ムーアの法則に従ってよりいっそう小さなデバイス・ジオメトリを求めている半導体産業における最近の進歩は、デバイス故障解析に対する走査型電子顕微鏡 (S E M) の使用から、より高分解能の T E M および S T E M の使用への切替えを必要としている。そのため、T E M または S T E M 解析用に半導体デバイスを準備する手段を改良することが必要になっている。これは、しばしばデバイス故障のために解析することとなったデバイスを含む半導体デバイスの関心領域 (R o I) の両側を下方へ切削するミリング工程により F I B を使用して製造するラメラの作製を含む。

30

【 0 0 1 8 】

集束イオン・ビーム・システムは一般に、イオン源 (通常は液体金属イオン源、すなわち L M I S) から放出されたイオンをターゲットの表面に集束させるカラムを備える。集束カラムの制御は、いくつかの電極電圧を設定し、それによってイオン・ビームを集束させ、オン / オフし、集束させたイオン・ビームを偏向させてターゲットへ導く、レンズ、ブランカおよび偏向器の強度を制御することを含む。さらに、ターゲットに到達する電流の量は一般に、ビーム画定絞り (B D A) を (機械的にまたは電氣的に) 選択することによって制御される。先行技術では、カラムが一般に、最適な B D A を選択し、さまざまな電圧を変化させ、ビームを再配置することによって、ミリング工程および画像化工程に対して別々に最適化される。ミリングまたは画像化を実行する前にレンズ電圧を安定させる必要があるため、この最適化工程にはかなりの時間がかかることがある。B D A 選択工程にかかる時間はしばしば、電源設定時間よりも短い。

40

【 0 0 1 9 】

その上、B D A の位置が少しずれても、ビーム位置が同じだけずれるわけではないことを本出願の出願人は理解した。これは、理論上、B D A の位置がずれても、レンズは依然として、同じ点に荷電粒子を集束させる傾向を有するためである。図 2 9 は、基板 2 9 1 6 上にビームを集束させている荷電粒子カラムの 3 つの図 2 9 0 0 である。図 (A) では

50

、軸 2 9 0 2 を有するカラム（図示せず）が、オンアクシス（on-axis）の荷電粒子ビーム 2 9 0 4 を生成し、このオンアクシスの荷電粒子ビーム 2 9 0 4 が、オンアクシスの（整列した）絞り 2 9 0 6 に照射し、絞りを通過したオンアクシスのビーム 2 9 0 8 を生成している。ビーム 2 9 0 8 は、集束ビーム 2 9 1 2 を形成するレンズ 2 9 1 0 によって、ターゲット 2 9 1 6 の表面の位置 2 9 1 4 に集束している。図（A）では、絞り 2 9 0 6 の中心がカラム軸 2 9 0 2 上にあるため、絞り 2 9 0 6 の照射は軸 2 9 0 2 の両側で対称である。

【0020】

図 2 9 の図（B）には、オフセット矢印 2 9 2 7 によって示されているオフアクシス（off-axis）の（整列していない）絞り 2 9 2 6 を有する図（A）のカラムと同じカラムが示されている。絞り 2 9 2 6 は、図（A）のビームと同じビーム 2 9 0 4 によって照射されて、カラム軸 2 9 0 2 の左側へずれた、絞りを通過したオフアクシスのビーム 2 9 2 8 を生成している。カラム軸 2 9 0 2 に対する絞り 2 9 2 6 のこの不整列の結果、ビーム 2 9 2 8 は、図（A）の設定と同じ設定を有するレンズ 2 9 1 0 にオフアクシスで入射している。ビーム 2 9 2 8 がオフアクシスである結果、集束ビーム 2 9 3 2 は、図示されているように、ターゲット 2 9 1 6 の表面に対して傾いている。レンズ 2 9 1 0 に収差がない場合、位置 2 9 3 4 は、図（A）の位置 2 9 1 4 と同じである。レンズ 2 9 1 0 の収差のレベルが一般的な荷電粒子カラムのそれであり、絞り 2 9 2 6 の不整列が一般的な 5 から 10 μm の範囲にあるとき、位置 2 9 1 4 に対する位置 2 9 3 4 の変位は一般に数 nm を超えない可能性があり、この値は、多くのビーム処理用途に対して許容される位置の誤差である。

【0021】

図 2 9 の図（C）は、図（B）の変位ベクトル 2 9 2 7 とは反対向きの変位ベクトル 2 9 4 7 を有する整列していない絞り 2 9 4 6 を示す。図（B）と比較すると、同じ要件が全て図（C）にもあてはまる。図（B）の集束ビーム 2 8 3 2 とは反対の方向に集束ビーム 2 9 5 2 が傾くような態様で、オフアクシスのビーム 2 9 4 8 がレンズ 2 9 1 0 を照射している。絞り 2 9 4 6 の不整列が一般的な 5 から 10 μm の範囲にあると仮定すると、位置 2 9 5 4 も、位置 2 9 1 4 から数 nm 以内にあるはずである。予測されるこれらのビームのずれは、多くの用途に対して無視できることを、本出願の出願人は確かめた。

【0022】

本発明のいくつかの実施形態は、FIB ミリングと FIB 画像化の切替えの際に BDA だけを変更し、電源電圧は一切変更せず、ビームの再整列も実施しないことによって、電源設定時間に起因する遅延を回避する。本発明のさまざまな実施形態のこの簡略化された方法の利点および欠点については後に論じる。より低速の先行技術の十分に最適化された工程と、本発明のいくつかの実施形態のより高速な最適化されていない工程の両方について、一般的な FIB カラムのイオン光学性能の特徴を詳細に説明する。ラメラ作製手順の全体的な説明とともに、2 ステップ FIB ミリング / 画像化法の流れ図を提供する。

【0023】

本発明のいくつかの実施形態は、集束イオン・ビームを使用する集束イオン・ビーム（FIB）システムを使用して、ターゲットを画像化し、ミリングする。これらのシステムは一般に、液体金属イオン源（LMIS）を使用して初期イオン・ビームを形成し、この初期イオン・ビームは次いで、レンズ、プランカ、偏向器などの FIB カラム内の静電要素によって加速され、集束し、プランキングされ、偏向される。レンズ電圧および位置は、例えば大きな絞り、小さな絞り、またはその工程で使用される実際の複数の絞りの間の任意の場所に対して最適化することができる。最後のケースでは、ビームは、実際のどの動作に対しても最適化されず、全ての動作に対して最適化されているのに近い。最適化の選択は用途に依存する。

【0024】

ターゲット上の関心領域（ROI）の位置決定

図 1 は、キャッシュ・メモリ 106 内に欠陥セル 110 を含む集積回路（IC）100

10

20

30

40

50

の概略図である。欠陥デバイス（この例ではセル）を含むICのエリアはしばしば「関心領域」（ROI）と呼ばれる。IC100の周囲には一般に多数の接続パッド102がある。IC100の別のエリアが論理回路104または入力／出力回路を含むことがある。製造業者はしばしば、ROI内の欠陥デバイス、この例ではキャッシュ・メモリのセル110を調査することによって、ICの機能不良の原因を突き止めることが必要となる。ICデバイスは、パターニングされた複数の導体層、半導体層および絶縁層を含む3次元構造であるため、この調査工程では、デバイスをミリングして、下にある層を露出させることが必要となることがあり、このミリングではしばしば、図13に示した集束イオン・ビーム（FIB）カラムによって生み出すことができる、Ga⁺イオン・ビームなどのFIBが使用される。先行技術では、ROIの片側をFIBでミリングし、続いて、露出したデバイス構造を走査型電子顕微鏡（SEM）で調査して、コンタクトとトランジスタ・ゲートの間の汚染、相互接続メタライゼーション層間の不完全なバイア接続など、デバイスの欠陥動作の原因を決定する。ICの寸法は、ムーアの法則の進行に伴って2、3年で約40%ずつ小さくなり続けているため、欠陥デバイスを観察するのに必要な画像化分解能を、SEMを使用して達成することはますます困難になっている。そのため、IC内のROIを画像化する目的に関して、半導体業界は、SEMよりも空間分解能が高い透過型電子顕微鏡（TEM）にますます注目している。SEMは一般に、2次電子および後方散乱電子を使用して表面を画像化する。そのため、ROIの片側を1回切削することによってデバイス構造を可視化することができる。一方、TEMは、試料を透過した電子を画像化する。そのため、欠陥デバイスのTEM調査では、ROIの両側をミリングして、試料内を下方へ延びる一般に深さ5から15 μm、厚さ100 nm未満の「ラメラ」すなわち薄い切片を形成する必要がある。

【0025】

図2は、欠陥セル110を含む図1のIC100のキャッシュ・メモリ106の詳細図、ならびにメモリ106内のセルのX-Y配向に対応するX軸202およびY軸204を有する座標系を示す。本質的に全てのメモリと同様に、キャッシュ・メモリ106も多数（ $>10^5$ ）のセルを含むことがあり、セルはそれぞれ、少数（しばしば6つ）のトランジスタを含むフリップ・フロップ回路に単一のビットを格納する。この多数のメモリ・セルは通常、X-Yアレイとして配置され、IC100の上面から見たときには一般に、これらのセルは同一である（普通は、鏡像関係にある4つの向きに配列されている）。デバイス欠陥によって表面に特徴的なパターンが生じることは通常ないため、欠陥セル110を含むROIがメモリ106の中のどこかにある場合には、ROIの位置を決定することが難しいことがある。例えば、トランジスタ・ゲート用の不完全なコンタクト・プラグは、誘電絶縁層と互層をなすいくつかの相互接続金属層の下に完全に埋まっていると考えられる。そのため、デバイス欠陥の原因を突き止める際には通常、これらの埋込み層を露出させるために、下方へ垂直にミリングすることが必要となる。その結果、ミリング用のFIBの下にROIを配置する唯一の方法は、図2に示し、図27の流れ図2700に概要を示す「ビット・ウォーキング」と呼ばれる先行技術の工程を実行することである。

【0026】

ビット・ウォーキングを実行するためには最初に、IC100を画像化するように、ラメラ作製システムを設定する。これは、試料表面を高い空間分解能で画像化することを可能にするためにより小さなビーム電流およびより小さなビーム直径を有するように構成された内部SEMカラムまたはFIBカラムの使用を含むことがある。画像化信号は通常、電子ビームまたはイオン・ビームが試料表面に衝突することによって生成された2次電子または後方散乱電子を使用する。この電子ビームまたはイオン・ビームは「画像化ビーム」と呼ばれることがある。図27の流れ図2700のブロック2702で、ターゲットをラメラ作製システムに挿入し、次いでロードロック内で真空排気し、続いてブロック2704でステージに載せた後、ブロック2706で、FIBカラムの下に試料を配置する。ブロック2708で、画像化用にFIBカラムを設定する。この設定は、図13に示した電極などのFIBカラムのさまざまな電極に印加するさまざまな加速電圧、集束電圧、ブ

ランキング電圧および偏向電圧を設定することを含むことがある。放出器先端において集束イオン・ビームが形成する半角を小さな半角に制限するため、したがって全ビーム電流をより小さくするため、ブロック 2710 で、小径のビーム画定絞り (BDA) を、機械的にまたは電氣的に選択する。可動「絞りストリップ」内にいくつかの BDA が取り付けられたシステムでは、BDA を機械的に選択することができる。このストリップは、コラム軸に対して移動して、ストリップに含まれる BDA のうちの任意の 1 つの BDA を、コラム軸上に、一般に 5 から 20 μm 以内の正確さで配置することができる。あるいは、一組が BDA アレイの上、もう一組が BDA の下に配置された 2 組の絞り整列偏向器を有するシステムでは、BDA を電氣的に選択することもできる (BDA アレイは直線アレイである必要は必ずしもない。BDA は任意の配置とすることができる)。この電気式選択方式では、上偏向器によってビームを移動させてオフアクシスとして、BDA のうちの 1 つの BDA を通過させ、次いで下偏向器によってオンアクシスに戻すことができる。BDA の機械式選択は、偏向収差が回避されるため、コラム光学部品に対する影響がより小さいという利点を有する。BDA の電気式選択は、より高速であるという利点を有し、機械的故障の可能性がなく、粒子発生の可能性が相対的に低い。

【0027】

次に、ブロック 2712 で、キャッシュ・メモリ 106 の右上隅 (「起点」) 108 で、この小電流画像化ビームを図 2 の 206 においてラスト走査して、画像を形成する。事前に実施した IC100 の電氣的試験から、キャッシュ・メモリ 106 内の欠陥メモリ・セル 110 の正確な X-Y 座標は分かっていると仮定する。一般に、メモリ 106 内には非常に多くのセルがあるため、セル 110 の X 座標および Y 座標はともに非常に大きい可能性がある (ほとんどの場合に > 100)。起点 108 と ROI 110 の両方を含む単一の画像を得ることができるほど、欠陥セル 110 が、キャッシュ・メモリ座標系の起点 108 に近いことはほとんどない。したがって、最初にブロック 2714 まで進んだときに、FIB は ROI の上にはなく、そのため、経路 2716 を辿ってブロック 2718 へ進み、ステージによって IC100 を ROI の方向へ移動させる。このビット・ウォーキング手順は、先行技術において、起点 108 を画像化する最初のラスト 206 を含む、図 2 に示すようなキャッシュ・メモリ 106 上の部分的に重なり合った一連の画像を利用するために開発された。ラスト走査 207 は、ブロック 2718 から経路 2720 を辿った後のブロック 2712 におけるメモリ 106 の後続の画像化を示す。分かりやすくするためにこの例では、これらのラスト走査 207 が、最初のラスト 208 から下方へまっすぐに延びているが、必ずそうしなければならないというわけではなく、起点 108 から ROI 110 までの距離をメモリ 106 に亘って走査するのに必要なラスト走査の総数を減らすために、隣接するラスト走査 207 を、この例では下方向と右方向の両方向へ変位させることもできることに留意されたい。

【0028】

ラスト走査 208 は、ROI 110 の Y 位置にあるが、図 2 に示されているように左側へずれている。したがって、図 27 のブロック 2712 では、欠陥セル 110 を取り囲む最終的なラスト 210 に向かって右へ移動する追加の走査 209 が必要である。ラスト走査 206 ~ 210 を得たら、それぞれの画像内に含まれるメモリ・セルの数を慎重に数え、隣接する画像間の重なりを考慮して、垂直の Y 方向 (ラスト 206 ~ 208)、次いで水平の X 方向 (ラスト 208 ~ 210) のセルの総数の適正な計算が記録されるようにすることが必要である。ステージ (図示せず) によって IC100 を移動させて、FIB ラスタ 210 を欠陥セル 110 の上に配置すると、判断ブロック 2714 の判定は「イエス」となり、経路 2722 を辿って、図 26 の FIB ミリング工程 (下記参照) に対応するブロック 2724 へ進む。

【0029】

図 3A は、ラスト 210 などの画像内において見られるであろう詳細な上面図である。図 1 および 2 のキャッシュ・メモリ 106 の ROI 110 を含む IC100 のエリア 300 が示されている。表面位置 306 は欠陥セル 110 の真上にある (印「+」は図示だけ

10

20

30

40

50

が目的であり、実際のデバイス上で見られるわけではない)。見られるであろう一般的なフィーチャには、長い相互接続304、短い接続302および絶縁エリア308などがある。

【0030】

図3Bは、図3Aの上面図に示されたIC100の領域の詳細な等角投影図である。

【0031】

RoI位置における先行技術の保護構造および基準マークの形成

図2および27において、ターゲット内のRoIは、FIBカラムの下に配置されているため、ラメラ作製工程を開始することができる。図4は、先行技術の場合のように厚い保護付着408を形成する、図3Aおよび3BのRoI位置におけるFIB支援付着工程の等角投影概略図400である。ガス噴射器のノズル402を、集束イオン・ビーム(FIB)406がターゲットIC100の表面に衝突する位置の近くに配置する。ノズル402の端部から、付着前駆体ガス404の雲(cloud)が出てくる。その結果、ターゲット表面の欠陥セル110の真上の位置306および位置306の周囲のIC100の表面に、前駆体ガス404が吸着する。ターゲット表面に亘ってFIB406を走査すると、FIB406と前駆体ガス404とが相互に作用して、図5の「X線」上面図に示されているような厚い付着408を形成する。この厚い付着408は一般に、作製するラメラの計画された壁に対して平行な向きに形成される。付着408の2つの端を使用して、図6に示すような基準マークをミリングすることができる。または、その代わりに、付着408の2つの端から離隔した追加の厚い付着(図示せず)を付着させてもよい。付着408の目的は、1)ミリング(図10~12参照)に使用する集束イオン・ビームの「尾」によって生じることがある意図しないミリングからその下のデバイス層を保護すること、および2)位置基準マークをミリングすることができる材料を提供すること(図6参照)である。

【0032】

図5は、図3Aの向きと同じ向きに示した、図4に示した工程による厚い付着408の上面X線概略図500である。

【0033】

図6は、図4で形成した先行技術のための厚い付着408に2つの基準マーク606および608を形成するFIBミリング工程の等角投影概略図600である。付着408の位置604に衝突するFIB602が示されている。FIB602を、ある制御されたパターンに従って移動させて、付着408の左下の端にマーク606をミリングする。付着408の右上の端には、以前にミリングした別のマーク608がある。マーク608の切欠図は、基準マークの深さに関する2つの重要な要件を示している：1)マークは、付着408内においてできるだけ深くなければならないが、2)欠陥デバイスに損傷を与え、デバイス故障の原因を突き止めることを不可能にする(デバイスの損傷がFIBによる可能性もあるため)ことがあるため、付着の下デバイス層内へ延びてはならない。先行技術では、ラメラを形成するミリングの際にビームを再整列させるのに必要な画像化走査の最中の材料の過度の損失を防ぐため、付着408がかなり厚くなければならない。厚い付着408は、必然的に、図4における、より長い付着時間と、図6において基準マーク606および608をミリングするためのより長いミリング時間の両方を必要とする。付着を厚くする理由は、先行技術のいくつかのシステムでは、ミリングと画像化の両方に対して同じFIBが使用され、したがって、画像化ビーム電流が、本発明のいくつかの実施形態の画像化ビーム電流よりもかなり大きいためである。

【0034】

RoI位置における本発明の一実施形態の保護構造および基準マークの形成

本発明の一実施形態のための変更された付着手順およびミリング手順を図7および8に示す。後に論じるが、本発明のいくつかの実施形態は、基準マークを画像化するのに、より小ビーム電流の集束イオン・ビームを使用することができ、そのため、これに対応して、RoIの上の付着から失われる材料の量が低減すると考えられる。図7は、本発明の一

実施形態では薄い保護付着 708 を形成する、図 3 A および 3 B の R o I 位置における F I B 支援付着工程の等角投影概略図 700 である。ガス噴射器のノズル 702 を、集束イオン・ビーム (F I B) 706 がターゲット I C 100 の表面に衝突する位置の近くに配置する。ノズル 702 の端部から、付着前駆体ガス 704 の雲が出てくる。その結果、ターゲット表面の欠陥セル 110 の真上の位置 306 および位置 306 の周囲の I C 100 の表面に、前駆体ガス 704 が吸着する。ターゲット表面に亘って F I B 706 を走査すると、F I B 706 と前駆体ガス 704 とが相互に作用して、薄い付着 708 を形成する。図 5 の「X 線」上面図で見て、付着 708 は、図 4 の先行技術の付着 408 と同じ I C 100 のエリアを覆うことができる。この薄い付着 708 は一般に、作製するラメラの計画された壁に対して平行な向きに形成される。付着 708 の 2 つの端を使用して、図 8 に示すような基準マークをミリングすることができる。または、その代わりに、付着 708 の 2 つの端から離隔した追加の厚い付着 (図示せず) を付着させてもよい。付着 708 の目的は、先行技術の付着 408 に対するものと同じであり、1) ミリング (図 10 ~ 12 参照) に使用する集束イオン・ビームの「尾」によって生じることがある意図しないミリングからその下のデバイス層を保護すること、および 2) 基準マーク 806 および 808 をミリングすることができる材料を提供すること (図 8 参照) である。

【 0035 】

図 8 は、図 7 で形成した本発明の一実施形態のための薄い付着 708 に 2 つの基準マーク 806 および 808 を形成する F I B ミリング工程の等角投影概略図 800 である。付着 708 の位置 804 に衝突する F I B 802 が示されている。F I B 802 を、ある制御されたパターンに従って移動させて、付着 708 の左下の端にマーク 806 をミリングする。付着 708 の右上の端には、以前にミリングした別のマーク 808 がある。本発明の一実施形態のための基準マーク 806 および 808 の深さに関しても、先行技術のための図 6 のマーク 606 および 608 に関して説明した 2 つの重要な要件と同じ 2 つの重要な要件があてはまる：1) マークは、付着 708 内においてできるだけ深くなければならないが、2) 欠陥デバイスに損傷を与え、デバイス故障の原因を突き止めることを不可能にする (デバイスの損傷が F I B による可能性もあるため) ことがあるため、付着の下デバイス層内へ延びてはならない。本発明のいくつかの実施形態では、先行技術で基準マーク 606 および 608 を画像化する場合よりも小さい F I B 電流を使用して、基準マーク 806 および 808 を画像化することができるため、付着 708 を、付着 408 よりもかなり薄くすることができる。画像化電流がより小さいため、それに対応して、マークの画像化中に生じる意図しない F I B ミリングの速度が低下し、したがって、画像化中のミリングによって除去される材料が減る。薄い付着 708 は、図 7 における、より短い付着時間と、図 8 において基準マーク 806 および 808 をミリングするためのより短いミリング時間の両方を可能にする。

【 0036 】

ボックス・ミリング工程

図 9 は、薄い付着 708 に F I B によってミリングした基準マーク 806 および 808 の F I B 画像化工程 900 を示す。基準マーク 806 と基準マーク 808 の両方に亘って、画像化集束イオン・ビーム 912 を、一般に X - Y ラスタ・パターンに従って走査する (マーク 806 の走査が図示されている)。マーク 806 に亘って F I B を走査すると、2 次電子 (s e c o n d a r y e l e c t r o n) (S E) が放出され、この 2 次電子を S E 検出器によって集めて画像を形成する。次いで、画像処理を使用して、マーク 806 の正確な位置を知ることができる。マークの位置は例えば、示されている「X」パターンの中心と定義することができる。図 10 および 11 のボックス・ミリング工程では、エリア 902 をミリングによって除去する。

【 0037 】

図 10 は、F I B ボックス・ミリング工程の開始 1000 を示す図である。「ボックス」ミリングは、解析対象のデバイスを含む R o I の両側に大きな (約 5 ~ 20 μm) トレンチを切削する工程に対する用語である。より大電流の集束イオン・ビーム 1012 を、

付着 708 の片側のパターン 1016 に沿って走査して、表面の位置 1014 に当てる。図 11 に示されているように、ビーム 1012 によって、材料 1012 がミリングされて除かれる。付着 708 の片側をミリングした後、付着 708 のもう一方の側に対して、同様のボックス・ミリング・パターン 1018 を実行する。このビーム走査工程の詳細は知られている。しかしながら、必然的に、エリア 902 の付着 708 からより遠い部分よりも、エリア 902 の付着 708 により近い部分の上に、FIB 1012 がより長くとどまらなければならないことは、図 11 から明白である。この方法は、図 11 に示す三角形のトレンチを形成する。

【0038】

図 11 は、付着 708 の両側に三角形のトレンチを形成する FIB ボックス・ミリング工程の完了 1100 を示す。エリア 1108 にビーム 1012 が衝突することによって、深さが概ね 5 から 15 μm 、横断距離（幅）も同じくらいのトレンチが刻まれている。トレンチの底 1110 の上方には、ほぼ垂直な壁 1114 が露出している。壁 1114 と付着 708 の縁の間にギャップ 1130 があることに留意されたい。このギャップは、後続のより微細なミリング・ステップおよび研磨ステップを可能にし、これらのステップは、ラメラの最終的な壁を、ROI 内の解析対象のデバイスに対して高い精度（2 ~ 4 nm）で位置決めすることを可能にする。場合によっては、画像化ビームに再び切り替えて、図 9 の場合と同様に基準マーク 806 および 808 を再走査することを可能にするために、ボックス・ミリング工程を 1 回または数回、中断することができる。このことは、FIB カラムに対するターゲットのドリフトによって、ミリング・ビームが ROI に衝突し、それによって解析対象のデバイスに損傷を与えることがないことを保証する。

【0039】

クリーニング・ミリング工程

図 12 は、一般に図 10 ~ 11 のボックス・ミリング工程の後に実施される FIB クリーニング工程 1200 を示す。この工程では、より小さい電流を有するより小さな FIB 1208 を表面の位置 1206 に当てて、欠陥デバイスが露出した最終的な壁 1214 が形成されるまで、壁 1114 をミリングする。場合によっては、画像化ビームに再び切り替えて、図 10 ~ 11 のボックス・ミリング工程の場合と同様に基準マーク 806 および 808 を再走査することを可能にするために、クリーニング・ミリング工程を 1 回または数回、中断することができる。このミリング工程では、図 11 に示したボックス・ミリング工程後に残った突き出た材料 1130 上で、ビーム 1208 を前後 1210 に移動させる。

【0040】

先行技術および本発明の一実施形態の多ステップ式画像化およびミリング工程

先行技術では一般に、FIB カラムのパラメータを、画像化とミリングの両方に対して最適化する。この最適化は、カラム内のさまざまな電極電圧の設定、およびビーム画定絞り（BDA）の（機械的または電氣的（上記参照））選択を含む。表 I は、カラム設定のタイプ（最適化または非最適化）、および 6 つのシステム動作モード A から F のそれぞれのモードの用途をまとめたものである。この場合、「最適化」は、カラム電圧と BDA の両方が、ターゲットにおけるビーム直径を最小にすることによってビーム電流密度を最大にするように選択されていることを意味する。「非最適化」は、BDA だけが変更され、カラム電圧は変更されていないこと、したがって、ビーム直径が最適直径よりも大きいために、その結果として生じるビーム電流密度がより低いことを意味する。例えば、本発明のいくつかの実施形態では、粗画像化に対してモード B または C を使用することができる。モード B および C は、先行技術のモード D ほど高い空間分解能は持たないが、カラムの電圧供給が落ち着くのを待つ必要がないため、モード間切替え（A または A C）ははるかに高速であると考えられる。同様に、本発明のいくつかの実施形態では、微細ミリングに対して、最適化モード D を、微細画像化用の非最適化モード E と交互に使用することができる。このことは、最適化モード D と最適化モード F を交互に使用し、切替え（D F）時にカラム電圧と BDA の変更が必要な先行技術と対照をなす。

【 0 0 4 1 】

表ⅠⅠは、先行技術（表ⅠⅠの上）と本発明のいくつかの実施形態（表ⅠⅠの下）の両方について、デュアルモード工程ステップにおいて表Ⅰのさまざまな動作モードA～Fをどのように組み合わせることができるのかを概略的に示す。例えば、先行技術では、図11および12に示した三角形のトレンチを形成するバルク・ミリング工程に対して、最適化モードAと最適化モードDを交互に使用する。本発明のいくつかの実施形態では、バルク・ミリング工程が、最適化バルク・ミリング・モードAを、非最適化粗画像化モードBと交互に使用することを含む。モードA モードBまたはモードA モードCの切替え時間は、モードA モードDの切替え時間よりも短いため、非最適化モードBの空間分解能が、基準マーク806および808（図9参照）の位置を決定する目的に対して十分である限りにおいて、本発明のこの実施形態は先行技術よりも優れている。

10

【 0 0 4 2 】

【表1】

FIBカラムの動作モード		
モード	設定？	用途
A	最適化	バルク・ミリング
B	非最適化	粗画像化
C	非最適化	中間の画像化
D	最適化	微細ミリング／微細画像化
E	非最適化	微細画像化
F	最適化	最良画像化

20

【 0 0 4 3 】

表Ⅰ．先行技術および本発明の一実施形態に対する集束イオン・ビーム（FIB）カラムの動作モード

【 0 0 4 4 】

【表2】

30

先行技術の動作モードの組合せ		
	動作モード	
工程ステップ	ミリング	画像化
バルク・ミリング	A	D
微細ミリング	D	F
研磨	F	F

40

本発明の動作モードの組み合わせ		
	動作モード	
モード	ミリング	画像化
バルク・ミリング	A	B または C
微細ミリング	D	E
研磨	F	F

【 0 0 4 5 】

50

表 I I . 先行技術および本発明の一実施形態における 3 つのそれぞれの工程ステップ (パルク・ミリング、微細ミリング、研磨) に対する表 I の動作モードの組合せ

本発明の一実施形態を実現する集束イオン・ビーム (F I B) カラム

図 1 3 は、本発明の一実施形態の多ステップ式画像化およびミリング工程を実現することができる例示的な F I B カラム 1 3 0 0 の側断面図である。X - Y - Z 座標系が示されており、X 軸 1 3 0 4 は、カラム 1 3 0 0 の光軸を表す Z 軸 1 3 0 2 に対して垂直である。Y 軸 (図示せず) は図の平面に対して垂直である。イオン放出を誘起させるため、源 1 3 0 6 と引出し電極 1 3 0 8 の間に「引出し」電圧が印加される。源 1 3 0 6 が正イオンを放出する液体金属イオン源 (L M I S) である場合、このバイアス電圧は一般に - 7 0 0 0 から - 1 5 0 0 0 V である。源 1 3 0 6 からの初期イオン放出は一般に、半角が約 3 0 ° [すなわち立体角が $(3 0 ^{\circ} / 1 8 0 ^{\circ})^2 \cdot 0.86$ ステラジアン] の円錐形になる。イオン「銃」は、源 1 3 0 6、抽出器 1 3 0 8、銃集束電極 1 3 1 2 および銃出口電極 1 3 1 4 を備える。銃出口電極 1 3 1 4 内に取り付けられたビーム画定絞リ (B D A) 1 3 1 6 も銃の部分である。銃集束電極 1 3 1 2 に集束電圧が印加され、銃出口電極 1 3 1 4 がグランド電位 (0 V) にバイアスされる。したがって、この例では、ターゲットもグランド電位にバイアスされているため、銃を出たイオンは既に、その最終的なビーム・エネルギーを有する。抽出器 1 3 0 8、集束電極 1 3 1 2 および出口電極 1 3 1 4 上の異なる電圧は、銃内のカラム軸上およびカラム軸の近くに電界を誘導する。この電界は、図 1 4 ~ 1 7 の軌道図に示されているように、イオン・ビーム 1 3 1 0 を偏向させ、集束させる。ある場合、特に、ターゲット位置においてより小さなビームが望ましく、したがってより高い源 - ターゲット縮小が必要とされる場合には、銃内において、最小集束 (m i n i m a l f o c u s i n g) の効果がある。他の場合には、銃が、概ね平行なビームを形成し、形成されたビームは次いで、主レンズによって、より低い縮小でターゲット上に集束され、より大きな電流を有するより大きなビームを生成する。銃の下方には、電極 1 3 1 8 および 1 3 2 0 を備えるビーム・ブランカがある。ビームがオンのとき、電極 1 3 1 8 および 1 3 2 0 はともに一般に 0 V であり、したがってビーム 1 3 1 0 は、偏向されずにブランカおよびビーム・ブランキング絞リ (b e a m - b l a n k i n g a p e r t u r e) (B B A) 1 3 2 2 を通過する。ビームをオフにするためには、電極 1 3 1 8 に正電圧を、電極 1 3 2 0 に負電圧を印加し、それによって、ビーム 1 3 1 0 が偏向されて軸を外れ、B B A 1 3 2 2 に当たるようにする。一般的なブランキング電圧は 5 V から 1 0 V である。

【 0 0 4 6 】

B B A 1 3 2 2 の下方には、上偏向器 1 3 2 4 および下偏向器 1 3 2 6 がある。これらの偏向器はともに一般に 4 極子または 8 極子である (静電および / または磁気) 。全ての場合に、偏向は、回転可能な双極子場 (すなわち X - Y オフアクシス平面内の任意の方向に偏向させること) を必要とし、当業者にはよく知られているとおり、より均一な場を生成することによって偏向収差を低減させる目的には、8 極子など、より高次の電極構成が使用される。偏向器 1 3 2 4 および 1 3 2 6 は「 2 重偏向器」を構成し、この 2 重偏向器は、主レンズに入るビームの位置と傾きの両方を制御することができ、それによって画像化およびミリング中のオフアクシス収差の低減を可能にする。電極 1 3 2 8、1 3 3 0 および 1 3 3 2 は、ターゲット 1 3 3 4 の表面の位置 1 3 3 6 にビーム 1 3 1 0 を集束させる主レンズを構成する。ここに示した例では、電極 1 3 2 8 上の電圧と電極 1 3 3 2 上の電圧が同じであり、グランドに対して 0 V である。次いで、集束させるために、電極 1 3 3 0 上の電圧を 0 V とは異なる電圧にして、電極 1 3 2 8、1 3 3 0 および 1 3 3 2 間に必要な集束電界を発生させる。正イオンについて言うと、電極 1 3 3 0 上の電圧が > 0 V である場合には、主レンズは「減速レンズ」であり、電極 1 3 3 0 上の電圧が < 0 V である場合には、主レンズは「加速レンズ」である。本発明のいくつかの実施形態の多ステップ式画像化およびミリング工程とともに使用する目的には、両方の主レンズ構成が適している。

【 0 0 4 7 】

先行技術および本発明の一実施形態のさまざまな動作モードに対する集束イオン・ビームの軌道

この項において、図14～17は、本発明のいくつかの実施形態（図14および16）と先行技術（図15および17）の両方に対する集束イオン・ビームのさまざまな軌道を示す。これらの軌道は、先行技術のFIBカラム設定と本発明のいくつかの実施形態のFIBカラム設定の間の動作の違い、具体的には異なるビーム直径（半値全幅「FWHM」とビーム電流の1/2を含む直径「d50」の両方）および源-ターゲット縮小の起源、を理解する基礎を提供する。これらの図は、例示のため同じ図に並置されて示された異なる軌道を示しており、動作時には、それぞれのモードが光軸を中心に対称であることが理解される。また、軌道の線は、特定の荷電粒子数に対応しているわけではなく、そのため、より狭い間隔で描かれた線が、より高い電流密度を示しているわけではない。

10

【0048】

図14は、本発明の一実施形態のバルク・ミリング・モードAのイオン軌道1420（光軸1404の上側）および粗画像化モードBの軌道1430の側面図1400である。モードAでもモードBでも、イオンはともに、図13の源1306に対応する源1402から放出される。次いで、図13の電極1308、1312および1314に対応する銃レンズ1406が、これらのイオンを集束させる。軌道1420および1430は次いで、主レンズ1408によってターゲット上の位置1410で結像する。この構成では、モードAとモードBの間で、銃レンズ電極上の電圧および主レンズ電極上の電圧は変更されず、より大電流のバルク・ミリング・モードAとより小電流の粗画像化モードBとの間で異なるのは、ビーム画定絞り（BDA）1424とBDA1434だけである。このことは、モードAのBDA1424（軸1404の上側）の半径と、モードBのBDA1434（軸1404の下側）の半径とを比較すると分かる。BDA1424の半径およびBDA1434の半径はともに、ターゲットに到達し、位置1410においてモードAおよびモードに対する集束イオン・ビームを形成する源1402からの放出の最大半角を決定することに留意されたい。銃レンズ位置における軌道1420の最大半径1422と軌道1430の最大半径1432の比は、主レンズ位置における最大半径1426と最大半径1436の比と同じである。このことは、軸1404に沿った全ての点における軌道1420および軌道1430内の個々の粒子線の全てのオフアクシス半径が互いに同じ比で比例しており、X軸および/またはY軸に沿ったそれらの全体的な尺度だけが異なっていることを示している。軌道1420と軌道1430の間にこの比例関係が存在する理由は、本発明のいくつかの実施形態では、バルク・ミリング・モードAと粗画像化モードBの間のカラム構成の違いがBDAの選択だけであるためである。レンズ電圧の設定はどれも変更されず、したがって、モードAに対するカラムの全体的な集束特性とモードBに対するカラムの全体的な集束特性は同じである。代替実施態様では、粗画像化用のモードBの代わりに、中程度の画像化を提供するモードCを利用することができる。モードAとモードBを使用する利点は、（BDA1434の半径の方が、モードCで使用されるBDAの半径よりもBDA1424の半径に近い）BDAの不整列に対する感度がより低いことであり、モードAとモードCを使用する利点は、中程度の画像化モードCの方が、粗画像化モードBよりも小さいビーム電流を有し、そのため、付着708（図7参照）をより薄くし、基準マーク806および808（図8参照）をより浅くすることができ、その結果、付着時間およびミリング時間を節約し、ラメラ作製のスループットをより高くすることができることである。

20

30

40

【0049】

図15は、図14と同じバルク・ミリング・モードAのイオン軌道1420（光軸1504の上側）および先行技術の微細画像化モードDの軌道1530の側面図1500である。モードAでもモードDでも、イオンはともに、図13の源1306に対応する源1502から放出される。次いで、図13の電極1308、1312および1314に対応する銃レンズ1506が、これらのイオンを集束させる。軌道1420は、図14と同じく、主レンズ1508によってターゲット上の位置1410で結像する。軌道1530は、

50

やはり主レンズ1508によって、ターゲット上の位置1510で結像する。位置1510は、位置1410と同じ位置であることもあり、または位置1410の近傍の別の位置であることもある。この先行技術の構成では、モードAとモードDの間で、銃レンズ電極上の電圧、主レンズ電極上の電圧およびビーム画定絞り(BDA)の全てが変更されることがある。このことは、モードAのBDA1424(軸1504の上側)の半径と、モードDのBDA1534(軸1504の下側)の半径とを比較すると分かる。BDA1424の半径およびBDA1534の半径はともに、ターゲットに到達し、それぞれ位置1410および位置1510において集束イオン・ビームを形成する源1502からの放出の最大半角を決定することに留意されたい。銃レンズ位置における軌道1420の最大半径1422と軌道1530の最大半径1532の比は、主レンズ位置における最大半径1426と最大半径1536の比とは異なる。このことは、2つのモードAとモードDが、表IIIに示されている銃レンズ電極の異なる電圧設定および主レンズ電極の異なる電圧設定に起因する異なる源-ターゲット倍率に対応していることを示している。電圧およびBDAがこのように変更される理由は、先行技術では、パルク・ミリング・モードAと微細画像化モードDの両方に対して光学設定を最適化しようとするためである。表IIIは、モードAからDのさまざまな動作パラメータについて、先行技術(図15)と本発明の一実施形態(図14)の比較を示している。

10

【0050】

図16は、本発明の一実施形態の微細ミリング・モードDのイオン軌道1530(光軸1604上側)および微細画像化モードEの軌道1630の側面図1600である。モードDでもモードEでも、イオンはともに源1602から放出される。源1602は、図14の源1402に対応することがある。次いで、銃レンズ1606がこれらのイオンを集束させる。銃レンズ1606は、図6の銃レンズ1406に対応することがある。軌道1530および1630は次いで、主レンズ1608によって、それぞれターゲット上の位置1510および1610で結像する。主レンズ1608は、図14の主レンズ1408に対応することがある。この構成では、モードDとモードEの間で、銃レンズ電極上の電圧および主レンズ電極上の電圧は変更されず、より大電流の微細ミリング・モードDとより小電流の微細画像化モードEの間で異なるのは、ビーム画定絞り(BDA)だけである。このことは、モードDのBDA1534(軸1604の上側)の半径と、モードEのBDA1634(軸1604の下側)の半径とを比較すると分かる。BDA1534の半径およびBDA1634の半径はともに、ターゲットに到達し、位置1510および1610において集束イオン・ビームを形成する源1602からの放出の最大半角を決定することに留意されたい。銃レンズ位置における軌道1530の最大半径1532と軌道1630の最大半径1632の比は、主レンズ位置における最大半径1536と最大半径1636の比と同じである。このことは、軸1604に沿った全ての点における軌道1530および軌道1630内の個々の粒子線の全てのオフアクシス半径が互いに同じ比で比例しており、X軸およびY軸に沿ったそれらの全体的な尺度だけが異なっていることを示している。軌道1530と軌道1630の間にこの比例関係が存在する理由は、本発明のこの実施形態では、微細ミリング・モードDと微細画像化モードEの間のカラム構成の違いがBDAの選択だけであるためである。レンズ電圧の設定はどれも変更されず、したがって、モードDに対するカラムの全体的な集束特性とモードEに対するカラムの全体的な集束特性は同じである。モードDおよびEの軌道とモードAおよびBの軌道とは質的に異なるが、この違いは、表IIIに示されているように、銃レンズの集束電圧の設定および主レンズの集束電圧の設定が、これらの2対の動作モードで異なることに起因することに留意されたい。モードAおよびBでは、より大きな電流を有するより大きなビームが望ましいため、源-ターゲット縮小がより小さい。しかしながら、モードDおよびEについては、より小さな電流を有するより小さなビームが必要である。倍率およびBDAの直径の比較が表IIIに示されている。

20

30

40

【0051】

図17は、図16と同じ微細ミリング・モードDのイオン軌道1530(光軸1704

50

の上側)および先行技術の最良画像化モードFの軌道1730の側面図1700である。モードDでもモードFでも、イオンはともに、図13の源1306に対応する源1702から放出される。次いで、図13の電極1308、1312および1314に対応する銃レンズ1706が、これらのイオンを集束させる。軌道1530は、図15および16と全く同じに、主レンズ1708によってターゲット上の位置1510で結像する。軌道1730は、やはり主レンズ1708によって、ターゲット上の位置1710で結像する。位置1710は、位置1510と同じ位置であることもあり、または位置1510の近傍の別の位置であることもある。この先行技術の構成では、モードDとモードFの間で、銃レンズ電極上の電圧、主レンズ電極上の電圧およびビーム画定絞り(BDA)の全てが変更されることがある。このことは、モードDのBDA1534(軸1704の上側)の半径と、モードFのBDA1734(軸1704の下側)の半径とを比較すると分かる。BDA1534の半径およびBDA1734の半径はともに、ターゲットに到達し、それぞれ位置1510および位置1710において集束イオン・ビームを形成する源1702からの放出の最大半角を決定することに留意されたい。銃レンズ位置における軌道1530の最大半径1532と軌道1730の最大半径1732の比は、主レンズ位置における最大半径1536と最大半径1736の比とは異なる。このことは、2つのモードDとモードFが、表IIIに示されている銃レンズ電極の異なる電圧設定および主レンズ電極の異なる電圧設定に起因する異なる源-ターゲット倍率に対応していることを示している。電圧およびBDAがこのように変更される理由は、先行技術では、微細ミリング・モードDおよび微細画像化モードFの両方に対して光学設定を最適化しようとするためである。表IIIは、モードD、EおよびFのさまざまな動作パラメータについて、先行技術(図17)と本発明の一実施形態(図16)の比較を示している。

【0052】

本発明の実施形態および先行技術の6つの動作モードの動作パラメータおよびビーム特性の比較

この項において、図18~25は、表Iに概要を示した6つのモードA~Fのさまざまなシステム動作パラメータを示す。動作パラメータの詳細は表IIIに示されている。表IIには、先行技術と本発明の一実施形態の両方において使用されるモードの組合せの概要が示されている。図14に示すように、本発明のいくつかの実施形態では、バルク・ミリング工程および粗画像化工程に対して、モードAとモードBが交互に使用される。あるいは、本発明のいくつかの実施形態では、バルク・ミリングおよび改良された画像化のために、モードAとモードCが使用される。先行技術では、バルク・ミリング工程に対して、モードAとモードDが交互に使用される(図15)が、モード間でより多くのパラメータ(電極電圧)を変更する必要があるため、ミリング・モード(モードA)と画像化モード(モードD)の間の切替え時間はより長くなる。図16に示すように、本発明の一実施形態では、微細ミリングおよび微細画像化においてモードDとモードEが交互に使用される。先行技術では、微細ミリング工程および最良画像化工程に対して、モードDとモードFが交互に使用される(図17)が、この場合もやはり、切替え時間がより長くなる。図18~25の全ての図において、グラフ上の点にはモードA~Fの符号が付けられている。

【0053】

【表 3】

先端に対する電圧

動作モード		A	B	C	D	E	F
ビーム電流	(pA)	13780.6	1345.76	121.118	1345.76	121.118	121.118
FWHMビーム直径	(nm)	75	65	60	30	29	12
d50	(nm)	105	66	60	44	25	25
倍率		1.40	1.40	1.40	0.52	0.52	0.19
ビーム制限絞りの直径	(μm)	118	36	11	45	14	20
引出し電圧	(V)	9500	9500	9500	9500	9500	9500
銃レンズ電圧	(V)	2280	2280	2280	3335	3335	10500
カラム内のビーム・エネルギー	(eV)	30000	30000	30000	30000	30000	30000
主レンズ電圧	(V)	9810	9810	9810	9460	9460	9327
ターゲットにおけるビーム・エネルギー	(eV)	30000	30000	30000	30000	30000	30000

10

グラウンドに対する電圧

動作モード		A	B	C	D	E	F
先端バイアス電圧	(V)	30000	30000	30000	30000	30000	30000
引出し電圧	(V)	20500	20500	20500	20500	20500	20500
銃レンズ電圧	(V)	27720	27720	27720	26665	26665	19500
カラム電圧	(V)	0	0	0	0	0	0
主レンズ電圧	(V)	20191	20191	20191	20540	20540	20674
ターゲット電圧	(V)	0	0	0	0	0	0

20

【0054】

表ⅡⅡ．モードA～FのFIBカラム動作パラメータ。先端に対する電圧とグラウンド電位に対する電圧の両方が示されている。

【0055】

図18は、6つの動作モードA～Fについて、放出器先端におけるビーム半角1804を、ビーム電流1802に対して示したグラフ1800である。モードAは、バルク・ミリング速度を最大にするため、最も大きなビーム電流を有する(13.7 nA。表ⅡⅡ参照)。源の角強度が22.5 $\mu\text{A}/\text{sr}$ であると仮定すると、モードAでは、先端におけるビーム半角が0.8°である必要がある。

30

【0056】

【数1】

ビーム電流=(角強度)(BDAを通過する放出の立体角)

$$=(22.5 \mu\text{A}/\text{sr}) [\pi (0.8^\circ / 180^\circ)]^2 = (22.5 \mu\text{A}/\text{sr}) [\pi (0.014 \text{ rad})]^2$$

$$=(22.5 \mu\text{A}/\text{sr}) (0.000612 \text{ sr}) = 0.0137 \mu\text{A} = 13.7 \text{ nA}$$

【0057】

モードBとモードDは、先端におけるビーム半角が同じ(0.25°)であり(ただしBDAの直径は同じではない。図19参照)、したがって同じビーム電流を有し、上に示したとおりに計算した同じビーム電流は1.34 nAである。モードC、モードEおよびモードFも同じビーム半角(0.075°)を有し(ただしBDAの直径は同じではない。図19参照)、したがって同じビーム電流121 pAを有する。モードA、モードB、D、およびモードC、E、Fのビーム電流は、BDAの直径を適切に選択する(直径比をおよそ1/10にする)ことによって、差が大体1/10になるように設定されていることに留意されたい。表ⅡⅡ参照。

40

【0058】

図19は、6つの動作モードA～Fについて、ビーム画定絞り(BDA)の直径190

50

4を、ビーム電流1902に対して示したグラフ1900である。モードBとモードDは、源先端における同じ放出半角に対応する（それによって同じビーム電流を与える）が、モードBとモードDは異なるBDA直径を必要とすることに留意されたい。これは、モードBとモードDが異なるレンズ設定を有し（表II参照）、したがって、先端における半角とBDAが位置する銃の出口におけるビーム直径との間の相関が異なるためである。なぜそうなるのかを見るために、図14の軌道1430（モードB）と図15の軌道1530（モードD）とを比較する。銃レンズ1406と主レンズ1408の間の軌道1430と銃レンズ1506と主レンズ1508の間の軌道1530とでは、軌道1430の方が明らかにより平行である。これは、モードBの方がモードDよりも小さい源・ターゲット縮小を有することに対応する。一般に、大きな縮小は、より小さなビーム直径およびより小さなビーム電流を可能にする。グラフ1900から、本発明の一実施形態では、バルク・ミリングおよび画像化（モードAおよびB。表II参照）を実現するに2つのBDAが必要であり、微細ミリングおよび画像化（モードDおよびE。表II参照）のためにもう一組のBDAが必要であることが分かる。先行技術では、必要なBDAが、バルク・ミリングおよび画像化（モードAおよびD。表II参照）を実現するための2つのBDAと、微細ミリングおよび画像化（モードDおよびF。表II参照）のための追加の1つのBDAの3つだけである。これは、これらの2つのミリング工程間でモードDが共通であるためである。

【0059】

図20は、6つの動作モードA～Fについて、銃レンズの集束電圧2004を、ビーム電流2002に対して示したグラフ2000である。本発明について言えば、モードA、BおよびCは全て、曲線2006に沿って、同じ銃集束電圧値2008、2010および2012を有する。これは、本発明のいくつかの実施形態は、バルク・ミリング工程（モードA　モードBまたはモードA　モードCを使用）の間、全てのFIBカラム電圧設定を変えないためである。同様に、本発明に関して、モードDとモードEは、微細ミリング工程ステップ（モードD　モードEを使用）の間、曲線2014に沿って、同じ銃集束電圧値2016および2018を有する。曲線2020は先行技術に対応し、バルク・ミリング工程に対してはモードAおよびモードDが使用され、微細ミリング工程に対してはモードDおよびモードFが使用される。

【0060】

図21は、6つの動作モードA～Fについて、主レンズの集束電圧2104を、ビーム電流2102に対して示したグラフ2100である。本発明について言えば、モードA、BおよびCは全て、曲線2106に沿って、同じ主レンズ集束電圧値2108、2110および2112を有する。これは、本発明のこの実施形態が、バルク・ミリング工程ステップ（モードA　モードBまたはモードA　モードCを使用）の間、全てのFIBカラム電圧設定を変えないためである。同様に、本発明に関して、モードDとモードEは、微細ミリング工程ステップ（モードD　モードEを使用）の間、曲線2114に沿って、同じ主レンズ集束電圧値2116および2118を有する。曲線2120は先行技術に対応し、バルク・ミリング工程に対してはモードAおよびモードDが使用され、微細ミリング工程に対してはモードDおよびモードFが使用される。

【0061】

図22は、6つの動作モードA～Fについて、半値全幅（FWHM）ビーム直径2204を、ビーム電流2202に対して示したグラフ2200である。本発明のこの実施形態の曲線2206は、モードAのFWHMビーム直径2208、モードBのFWHMビーム直径2210およびモードCのFWHMビーム直径2212を結んでいる。モードAからモードBへビーム電流2202が小さくなると、FWHMビーム直径も75nmから65nmまで小さくなり、モードCではさらに60nmまで小さくなることに留意されたい。先行技術に関しては、曲線2220が、モードAのFWHMビーム直径2208、モードDのFWHMビーム直径2216およびモードFのFWHMビーム直径2222を結んでいる。このグラフから、本発明のこの実施形態が先行技術よりも不利な点がある。すな

わち、モードBのFWHMビーム直径2210は、モードDのFWHMビーム直径2216の2倍よりも大きい。この欠点は、本発明のこの実施形態が先行技術よりも有利な点、すなわち、BDA直径の機械的な変更だけを使用することによって、BDAの機械的変更だけではなく、（固有の設定時間を有する）FIBカラム電圧の切替えが必要な先行技術と比較して、FIBバルク・ミリング（モードA）と粗画像化（モードB）の間の切替えがより高速である点とバランスがとれていなければならない。先行技術の代わりに本発明の一実施形態を使用できるかどうかは、モードDに比べて画像化分解能に劣るモードBが、モードAのFIBミリング・ビームの配置精度に大きな影響を与えないかどうかにかかっている。同様に、モードDおよびモードEを含む本発明のこの実施形態の微細ミリング工程を、先行技術のモードDおよびFと比較すると、モードEのFWHMビーム直径は、モードFのFWHMビーム直径に比べて2倍以上大きい。モードDで正確な微細なミリングを達成するのに、29nmのFWHMビーム直径が許容される場合、モードFのより小さなFWHMビーム直径は不要である。時間に関してモードEがモードFよりも有利なことは、モードBとモードDの関係と同様である。モードCは、上の図14で論じたように、FIBミリング用のモードAおよび中程度の画像化用のモードCを使用してバルク・ミリング工程を実現する場合に備えて示されている。

【0062】

図23は、6つの動作モードA～Fについて、ビーム直径(d50)2304を、ビーム電流2302に対して示したグラフ2300である。モードA 2308、モードB 2310およびモードC 2312を結ぶ曲線2306の比較は、d50ビーム直径に関しては、モードAからモードBおよびモードCへ向かうにつれての分解能の向上が、ビーム直径を特徴づけるのにFWHMを使用した図22の場合よりもかなり大きいことを示している。この違いの理由は、d50直径が、モードAのビーム直径などのより大きなビーム直径に対して生じるより大きなビームの「尾」を考慮に入れているためである。したがって、モードBおよびモードCの場合のようなより小さなビーム電流に関しては、これらの尾が、FWHM直径に反映される中心のビームの直径よりも急速に低下する。モードBのd50値(65nm)とモードDのd50値(44nm)とを比較すると、図22のFWHM値では50%超であるのに対して、違いは約30%だけである。曲線2314は、本発明のこの実施形態のモードD 2316とモードE 2318を結んでいる。モードF 2322はモードE 2318と同じd50値を有し、したがって、本発明のこの実施形態における微細ミリング工程(D E)および先行技術における微細ミリング工程(D F)に関して、d50ビーム直径の差はない(ただし、図22によれば、モードEとモードFのFWHM直径の差はかなりある)。画像化中のビームの尾の影響は主に、得られる画像コントラストを低下させることであり、一方、FWHMビーム直径は中心のビームの寸法である。より低いコントラストが許容される場合には、コントラストは高いが低速である先行技術の微細ミリング工程よりも、モードE(ミリング 画像化切替え時間がより短い)の方が好ましいことがある。反対に、基準マーク(例えば図8の806および808等)を正確に画像化するために最も高い画像コントラストが必要な場合には、スループットについては不利であるにもかかわらず、先行技術の微細ミリング工程が必要になることがある。

【0063】

図24は、6つの動作モードA～Fについて、源・ターゲット倍率2404を、ビーム電流2402に対して示したグラフ2400である。モードA、BおよびCは全て、曲線2406に沿って、同じ倍率値2408、2410および2412を有する。これは、本発明のこの実施形態が、バルク・ミリング工程ステップ(モードA モードBまたはモードA モードCを使用)の間、全てのFIBカラム電圧設定を変えず、レンズ電圧が倍率を決定するためである。同様に、モードDとモードEは、微細ミリング工程ステップ(モードD モードEを使用)の間、曲線2414に沿って、同じ倍率値2416および2418を有する。曲線2420は先行技術に対応し、バルク・ミリング工程に対してはモードAおよびモードDが使用され、微細ミリング工程に対してはモードDおよびモー

10

20

30

40

50

ド F が使用される。

【 0 0 6 4 】

図 2 5 は、6 つの動作モード A ~ F について、ビーム画定絞り (B D A) の不整列感度 2 5 0 4 を、ビーム電流 2 5 0 2 に対して示したグラフ 2 5 0 0 である。B D A 不整列感度は、B D A 不整列 1 μm 当たりのターゲット位置における F I B カラムの光軸に対するビームの移動量ないし変位量 (n m) に対応する。モード A、B および C は全て、曲線 2 5 0 6 に沿って、同じ不整列感度値 2 5 0 8、2 5 1 0 および 2 5 1 2 を有する。これは、本発明のこの実施形態が、バルク・ミリング工程ステップ (モード A モード B またはモード A モード C を使用) の間、全ての F I B カラム電圧設定を変えず、レンズ電圧が B D A 不整列感度を決定するためである。同様に、モード D とモード E は、微細ミリング工程ステップ (モード D モード E を使用) の間、曲線 2 5 1 4 に沿って、同じ B D A 不整列感度値 2 5 1 6 および 2 5 1 8 を有する。曲線 2 5 2 0 は先行技術に対応し、バルク・ミリング工程に対してはモード A およびモード D が使用され、微細ミリング工程に対してはモード D およびモード F が使用される。グラフ 2 5 0 0 は、本発明のこの実施形態が先行技術よりも不利な別の点を示している。すなわち、B D A 不整列感度がより大きい場合、B D A の機械的移動の精度が約 3 0 % 高くなければならない。B D A 不整列感度がより大きいのは、図 2 4 のグラフ 2 4 0 0 に示されているように源 - ターゲット倍率がより大きい (縮小がより小さい) ことによる。これは、グラフ 2 4 0 0 の曲線の形状とグラフ 2 5 0 0 の曲線の形状が非常によく似ていることによって示されているように、B D A 不整列感度が、倍率に密接に関連しているためである。

10

20

【 0 0 6 5 】

本発明の一実施形態の 2 ステップ・ミリング工程の工程流れ図

図 2 6 は、本発明の一実施形態に対して使用可能な 2 ステップ画像化およびミリング工程の流れ図である。最初のステップは、バルク・ミリング工程を構成する粗画像化モードとバルク・ミリング・モードの一連の交互使用を含む。このステップに続いて、微細ミリング工程を構成する微細画像化モードと微細ミリング・モードの一連の交互使用を含む第 2 のステップを実行する。本発明のこの実施形態のこれらの 2 つの工程の完了後、後続の研磨ステップを使用して、加工ムラ (c u r t a i n i n g) および完了した画像化モードおよびミリング・モード中に傷ついた層を最終的に除去することができる。

【 0 0 6 6 】

最初に、ブロック 2 6 0 2 で、集束イオン・ビーム (F I B) カラムの軸上に、関心領域 (R o I) を、ステージによって機械的に配置する。ブロック 2 6 0 2 は、図 2 7 で概説した工程 2 7 0 0 の使用を表すことがある。いくつかの場合には、R o I が例えば、図 1 ~ 図 3 B に示したマイクロプロセッサ・チップ 1 0 0 上の S R A M キャッシュ・メモリ 1 0 6 内の (単一のビットを記憶する) 欠陥メモリ・セル 1 1 0 を表すことがある。次に、ブロック 2 6 0 4 で、保護層 7 0 8 を付着させる。ブロック 2 6 0 4 は、図 7 に示した F I B 支援付着工程に対応する。続くブロック 2 6 0 6 は、図 8 に示した基準マーク 8 0 6 および 8 0 8 の F I B ミリングに対応する。これらのマークは、ステージの移動、カラム制御電子回路内の電圧の変更、ターゲットの熱膨張などのさまざまなドリフトの原因を補償する、R o I に対する集束イオン・ビームの正確な再位置決めを可能にするために、後続のブロックで使用される。次いで、バルク・ミリング・モードで使用するよう F I B カラムを構成するブロック 2 6 0 8 から、バルク・ミリング工程が始まる。ブロック 2 6 0 8 は、モード A ~ C に対応する F I B カラム内の全ての電極 (図 1 3 に示したレンズ、プランカおよび偏向器) 上の必要な電圧を設定することからなる。次いで、ブロック 2 6 1 0 で、小径のビーム画定絞り (B D A) を選択することによって、これらの 3 つの可能なモードの中から選択する特定のモードを決定する。ブロック 2 6 1 0 では、バルク・ミリング・モード A が提供するビーム直径よりも小さなビーム直径をターゲット位置に与えるモード B または C を使用するよう、カラムを設定する。

30

40

【 0 0 6 7 】

ブロック 2 6 0 8 および 2 6 1 0 で、カラムは、ターゲット 9 0 2 において粗画像化ビ

50

ーム 9 1 2 を形成するように構成されているので、次に、ブロック 2 6 1 2 で、図 9 に示した画像化工程 9 1 0 を開始する。画像化工程 9 1 0 は、図 8 で保護層 7 0 8 にミリングした基準マーク 8 0 6 および 8 0 8 の正確な位置決め（および経路 2 6 2 0 の後の再位置決め）を可能にする。ブロック 2 6 1 2 で、基準マーク 8 0 6 および 8 0 8 を画像化しておけば、画像処理を使用して、基準マーク 8 0 6 および 8 0 8 の中心の位置（例えば図 9 に示された「X」パターンの中心と定義される）を正確に決定することができる。これらの位置は、図 1 0 に示したパターン 1 0 1 6 および 1 0 1 8 をミリングする（ブロック 2 6 1 6（後述））ためにバルク・ミリング・ビーム 1 0 1 2 を適切に配置することを可能にする情報を、F I B カラム・コントローラに提供する。ブロック 2 6 1 2 で基準マークの位置を決定した後、ブロック 2 6 1 4 で大径の B D A を選択し、続くブロック 2 6 1 6 で、大電流ビームを使用して、制御された量のバルク・ミリングを実行する。次に、判断ブロック 2 6 1 8 へ進み、バルク・ミリングが完了したかどうかを判断する。この判断は、予め決められたバルク・ミリング速度と累積ミリング時間とに基づく。バルク・ミリングがまだ完了していない場合には、経路 2 6 2 0 を辿ってブロック 2 6 1 0 へ戻り、バルク・ミリングが完了したと判断ブロック 2 6 1 8 が判定するまで、ブロック 2 6 1 0 ~ 2 6 1 6 の画像化 / ミリング・シーケンスを繰り返す。次いで、経路 2 6 2 2 を辿ってブロック 2 6 2 4 へ進む。このバルク・ミリング工程は、全体として、図 1 0 ~ 1 1 に示したボックス・ミリング手順に対応することがある。

【 0 0 6 8 】

次いで、微細ミリングを実施するように F I B カラムを構成するブロック 2 6 2 4 から、微細ミリング工程が始まる。このステップは、動作モード D および E に対応する F I B カラム内の全ての電極（図 1 3 に示したレンズ、プランカおよび偏向器）上の必要な電圧を設定することからなる。次いで、ブロック 2 6 1 0 で、小径のビーム画定絞り（B D A）を選択することによって、これらの 2 つの可能な動作モードの中から選択する特定の動作モードを決定する。これにより、微細ミリング・モード D が提供するビーム直径よりも小さなビーム直径をターゲット位置に与える微細画像化モード E を使用するように、カラムが設定される。

【 0 0 6 9 】

ブロック 2 6 2 4 および 2 6 2 6 で、カラムは、ターゲット 9 0 2 において微細画像化ビーム 9 1 2 を形成するように構成されているので、次に、ブロック 2 6 1 2 で、図 9 に示したような画像化工程 9 1 0 を開始する。画像化工程 9 1 0 は、図 8 で保護層 7 0 8 にミリングした基準マーク 8 0 6 および 8 0 8 の正確な位置決め（および経路 2 6 3 6 の後の再位置決め）を可能にする。ブロック 2 6 2 8 で、基準マーク 8 0 6 および 8 0 8 を画像化しておけば、画像処理を使用して、基準マーク 8 0 6 および 8 0 8 の中心の位置（例えば図 9 に示された「X」パターンの中心と定義される）を正確に決定することができる。これらの位置は、図 1 2 に示したクリーニング・ミリング（ブロック 2 6 3 2（後述））のために微細ミリング・ビーム 1 2 0 8 を適切に配置することを可能にする情報を、F I B カラム・コントローラに提供する。ブロック 2 6 2 8 で基準マークの位置を決定した後、ブロック 2 6 3 0 で中間の直径の B D A を選択し、続くブロック 2 6 3 2 で、中間の電流のビームを使用して、制御された期間の微細ミリングを実行する。次に、判断ブロック 2 6 3 4 へ進み、微細ミリングが完了したかどうかを判断する。この判断は、予め決められた微細ミリング速度に基づく。微細ミリングがまだ完了していない場合には、経路 2 6 3 6 を辿ってブロック 2 6 2 6 へ戻り、微細ミリングが完了したと判断ブロック 2 6 3 4 が判定するまで、ブロック 2 6 2 6 ~ 2 6 3 2 の画像化 / ミリング・シーケンスを繰り返す。この微細ミリング工程は、全体的として、図 1 2 に示したクリーニング・ミリング手順に対応することがある。次いで、経路 2 6 3 8 を辿ってブロック 2 6 4 0 へ進む。ブロック 2 6 4 0 は、ラメラ作製を完了するのに必要な残りの全ての F I B 研磨ステップを含み、それらの F I B 研磨ステップは、潜在的により低電圧の F I B および / または加工ムラの除去を助けるさまざまな角度の F I B を含む。

【 0 0 7 0 】

本発明のいくつかの実施形態によれば、イオン・カラムおよび複数のビーム画定絞りを備える集束イオン・ビーム・システムを使用して、1つまたは複数の基準マークを関心領域の近くを含むターゲット内の構造をミリングする方法は、第1の電流を有するイオン・ビームを生成するための第1のビーム画定絞りを選択するステップと、第1の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ集束させるように、イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップと、第1の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、第1の電流を有するイオン・ビームを基準マークに亘って走査して、イオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を決定するステップと、第1の電流よりも大きい第2の電流を有するイオン・ビームを生成するための第2のビーム画定絞りを選択するステップと、イオン・カラム内の電極電圧を再設定せずに、第2の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、第2の電流を有するイオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、関心領域においてミリング工程を実行するステップであり、そのビーム偏向が、第1の電流を有するイオン・ビームによって決定したイオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を考慮して行われるステップとを含む。

10

【0071】

いくつかの実施形態では、構造をミリングする前記方法がさらに、第2の電流を有するイオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて関心領域においてミリング工程を実行した後に、第1の電流を有するイオン・ビームを生成するための第1のビーム画定絞りを再び選択して、ターゲットを画像化するステップを含む。

【0072】

20

いくつかの実施形態では、構造をミリングする前記方法がさらに、第1のビーム電流よりも小さい第3の電流を有するイオン・ビームを生成するための第3のビーム画定絞りを選択するステップと、第3の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ集束させるように、イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップと、第3の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、第3の電流を有するイオン・ビームを基準マークに亘って走査して、イオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を決定するステップであり、第3の電流を有するイオン・ビームの前記位置決定が、第1の電流を有するイオン・ビームの前記位置決定よりも正確なステップと、第3の電流よりも大きく、第1の電流よりも小さい第4の電流を有するイオン・ビームを生成するための第4のビーム画定絞りを選択するステップと、イオン・カラム内の電極電圧を再設定せずに、第4の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、第4の電流を有するイオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、関心領域において微細ミリング工程を実行するステップであり、前記ビーム偏向が、第3の電流を有するイオン・ビームによって決定したイオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を考慮して行われるステップとを含む。

30

【0073】

いくつかの実施形態では、構造をミリングする前記方法がさらに、第4の電流を有するイオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて関心領域において微細ミリング工程を実行した後に、第3の電流を有するイオン・ビームを生成するための第3のビーム画定絞りを再び選択して、ターゲットを画像化するステップを含む。

【0074】

40

いくつかの実施形態では、第1のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第1の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、第2のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第2の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含む。

【0075】

いくつかの実施形態では、第1のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第1の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、第2のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第2の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、第3のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第3の絞りをイオン・カラムの軸上に

50

機械的に移動させるステップを含み、第4のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第4の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含む。

【0076】

いくつかの実施形態では、構造をミリングする前記方法がさらに、前記複数のビーム画定絞りの上方に第1の偏向器を配置するステップと、前記複数のビーム画定絞りの下方に第2の偏向器を配置するステップとを含む。

【0077】

いくつかの実施形態では、第1のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第1の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含み、第2のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第2の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含む。

10

【0078】

いくつかの実施形態では、構造をミリングする前記方法がさらに、前記複数のビーム画定絞りの上方に第1の偏向器を配置するステップと、前記複数のビーム画定絞りの下方に第2の偏向器を配置するステップとを含む。

20

【0079】

いくつかの実施形態では、第1のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第1の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含み、第2のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第2の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含み、第3のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第3の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含み、第4のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第4の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含む。

30

【0080】

いくつかの実施形態では、構造をミリングする前記方法が、前記ミリング工程の後に実行されるイオン・ビーム研磨工程をさらに含む。いくつかの実施形態では、構造をミリングする前記方法が、前記微細ミリング工程の後に実行されるイオン・ビーム研磨工程をさらに含む。

40

【0081】

本発明のいくつかの実施形態によれば、イオン・カラムおよび複数のビーム画定絞りを備える集束イオン・ビーム・システムを使用して、1つまたは複数の基準マークを関心領域の近くを含むターゲット内の構造をバルク・ミリングし、微細ミリングする方法は、第1の電流を有するイオン・ビームを生成するための第1のビーム画定絞りを選択するステップと、第1の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ集束させるように、イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップと、第1の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、イオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を決定するた

50

めに、第1の電流を有するイオン・ビームを基準マークに亘って走査するステップと、第1の電流よりも大きい第2の電流を有するイオン・ビームを生成するための第2のビーム画定絞りを選択するステップと、イオン・カラム内の電極電圧を再設定せずに、第2の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、第2の電流を有するイオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、関心領域においてバルク・ミリング工程を実行するステップであり、前記ビーム偏向が、第1の電流を有するイオン・ビームによって決定したイオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を考慮して行われるステップと、前記バルク・ミリング工程が完了したかどうかを判断し、前記バルク・ミリング工程が完了していない場合に、第1のビーム画定絞りを選択する前記ステップに戻るステップと、第1のビーム電流よりも小さい第3の電流を有するイオン・ビームを生成するための第3のビーム画定絞りを選択するステップと、第3の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ集束させるように、イオン・カラム内の電極電圧を設定するステップと、第3の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、イオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を決定するために、第3の電流を有するイオン・ビームを基準マークに亘って走査するステップであり、第3の電流を有するイオン・ビームの前記位置決定が、第1の電流を有するイオン・ビームの前記位置決定よりも正確なステップと、第3の電流よりも大きく、第1の電流よりも小さい第4の電流を有するイオン・ビームを生成するための第4のビーム画定絞りを選択するステップと、イオン・カラム内の電極電圧を再設定せずに、第4の電流を有するイオン・ビームをターゲット上へ導くステップと、第4の電流を有するイオン・ビームを所定のパターンに従って偏向させて、関心領域において微細ミリング工程を実行するステップであり、前記ビーム偏向が、第3の電流を有するイオン・ビームによって決定したイオン・カラムの軸に対する基準マークの位置を考慮して行われるステップと、前記微細ミリング工程が完了したかどうかを判断し、前記微細ミリング工程が完了していない場合に、第3のビーム画定絞りを選択する前記ステップに戻るステップとを含む。

10

20

【0082】

いくつかの実施形態では、第1のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第1の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、第2のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第2の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、第3のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第3の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含み、第4のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、前記複数の絞りのうちの第4の絞りをイオン・カラムの軸上に機械的に移動させるステップを含む。

30

【0083】

いくつかの実施形態では、前記方法がさらに、前記複数のビーム画定絞りの上方に第1の偏向器を配置するステップと、前記複数のビーム画定絞りの下方に第2の偏向器を配置するステップとを含む。

【0084】

いくつかの実施形態では、第1のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第1の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含み、第2のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第2の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含み、第3のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第3の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏

40

50

向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含み、第4のビーム画定絞りを選択する前記ステップが、イオン・ビームを、前記複数のビーム画定絞りのうちの第4の絞り上へ偏向させるように、第1の偏向器を作動させるステップと、イオン・ビームを、イオン・カラムの軸上へ、かつ、イオン・カラムの軸に対して平行に偏向させるように、第2の偏向器を作動させるステップとを含む。

【0085】

いくつかの実施形態では、前記方法が、前記微細ミリング工程の後に実行されるイオン・ビーム研磨工程をさらに含む。

【0086】

いくつかの実施形態では、前記方法が、保護層の付着ステップをさらに含み、この付着ステップが前記ミリング工程の前に実行される。いくつかの実施形態では、前記方法が、保護層の付着ステップをさらに含み、この付着ステップが前記バルク・ミリング工程の前に実行される。

【0087】

本発明のいくつかの実施形態によれば、粒子源と、複数のビーム画定絞りと、少なくとも1つの集束レンズとを有する荷電粒子ビーム・システムを動作させる方法は、荷電粒子源から荷電粒子を引き出すステップと、荷電粒子をビームに形成するステップと、第1の直径を有する第1のビーム画定絞りを通過するように荷電粒子ビームを導くステップであり、第1のビーム画定絞りをした荷電粒子ビームが第1の電流を有するステップと、ターゲット表面のスポットに荷電粒子を収束させるように、集束レンズを調整するステップと、第1の直径とは異なる第2の直径を有する第2のビーム画定絞りを通過するように荷電粒子ビームを導くステップであり、第2のビーム画定絞りをした荷電粒子ビームが第2の電流を有するステップと、集束レンズの集束強度を変更せずに、荷電粒子を、集束レンズを通過するように導くステップとを含む。

【0088】

いくつかの実施形態では、集束レンズの集束強度を変更せずに、荷電粒子を、集束レンズを通過するように導くステップが、ビームを再整列させることなく、荷電粒子を、集束レンズを通過するように導くステップを含む。

【0089】

本発明のいくつかの実施形態およびそれらの実施形態の利点を詳細に説明したが、添付の特許請求の範囲によって定義された本発明の趣旨および範囲から逸脱することなく、本明細書に記載された実施形態に、さまざまな変更、置換および改変を加えることができることを理解すべきである。上記の電極に対する電圧源は、単一の電源に由来するものとし、分圧器を使用することができるが、それぞれの電極に対して別個の電源を使用することもでき、または分圧器と電源の何らかの組合せを使用することもできる。上記の例は、2次粒子の軌道を変化させるのに電界を提供するが、磁界を使用することもできる。ただし、その場合には、1次ビームに対する磁場の影響を考慮しなければならない。さらに、本出願の範囲が、本明細書に記載された工程、機械、製造、組成物、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は意図されていない。当業者なら本発明の開示から容易に理解するように、本明細書に記載された対応する実施形態と実質的に同じ機能を実行し、または実質的に同じ結果を達成する既存のまたは今後開発される工程、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを、本発明に従って利用することができる。したがって、添付の特許請求の範囲は、その範囲内に、このような工程、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを含むことが意図されている。

【符号の説明】

【0090】

- 2902 軸
- 2904 荷電粒子ビーム
- 2906 絞り
- 2910 レンズ

10

20

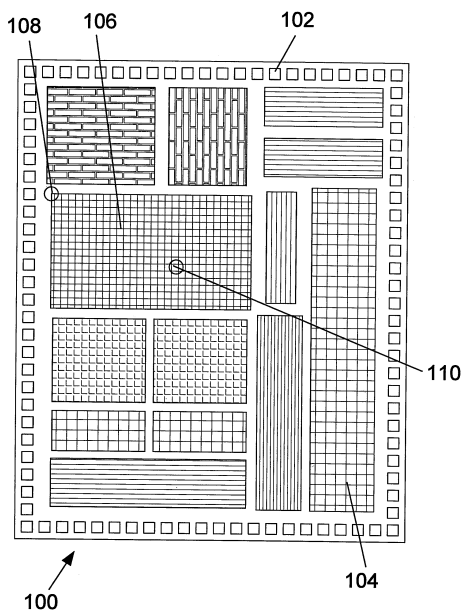
30

40

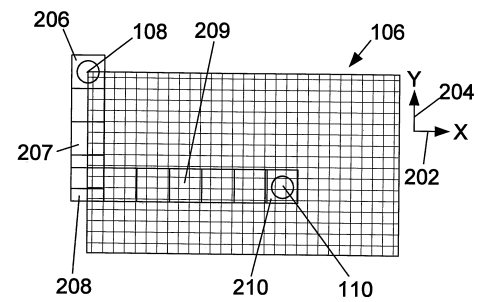
50

- 2 9 1 2 集束ビーム
 2 9 1 6 ターゲット（基板）
 2 9 2 6 絞り
 2 9 3 2 集束ビーム
 2 9 4 6 絞り

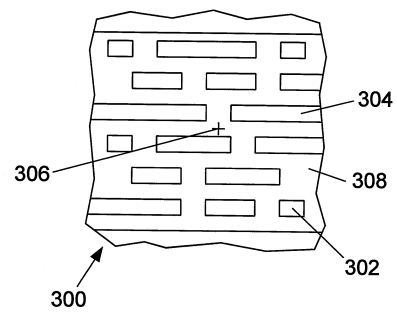
【図 1】



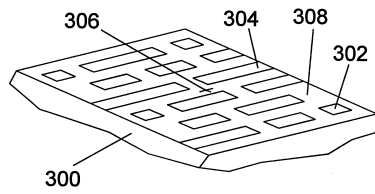
【図 2】



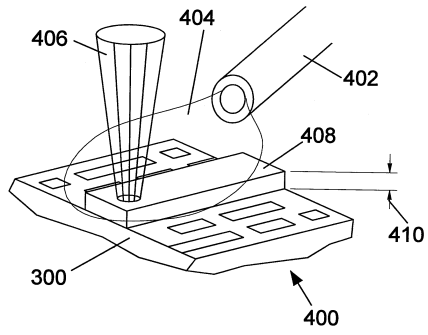
【図 3 A】



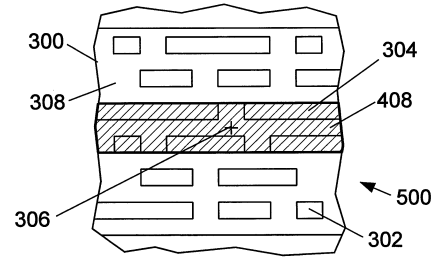
【図 3 B】



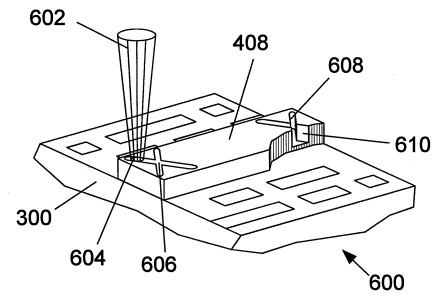
【図 4】



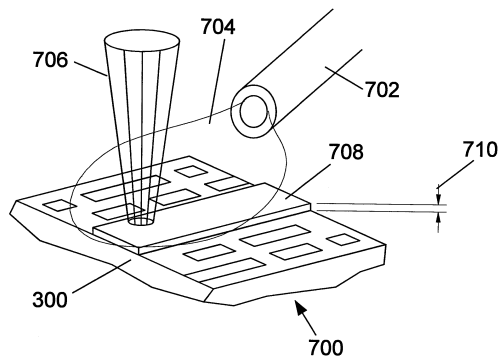
【図 5】



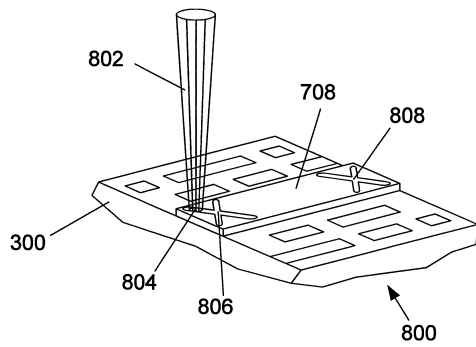
【図 6】



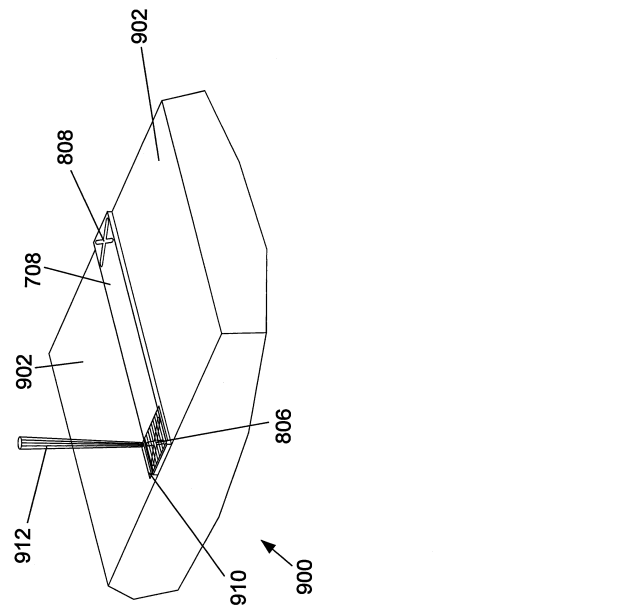
【図 7】



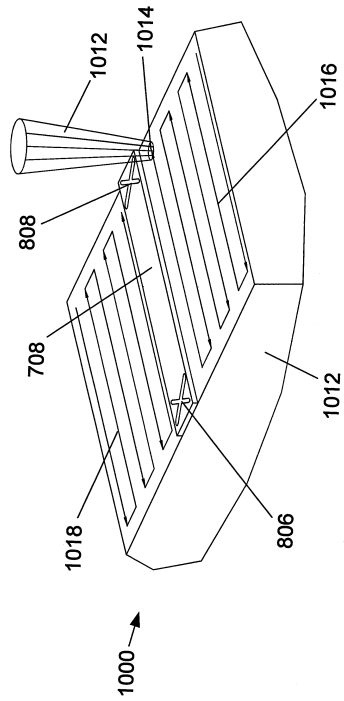
【図 8】



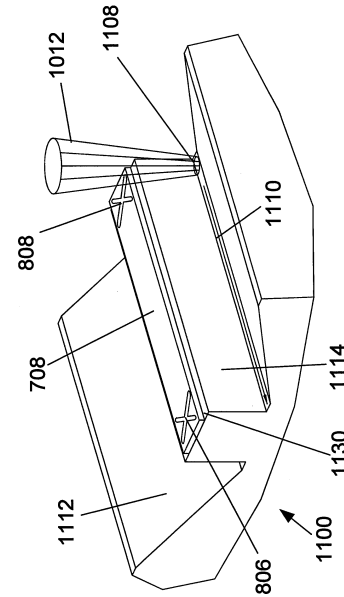
【図 9】



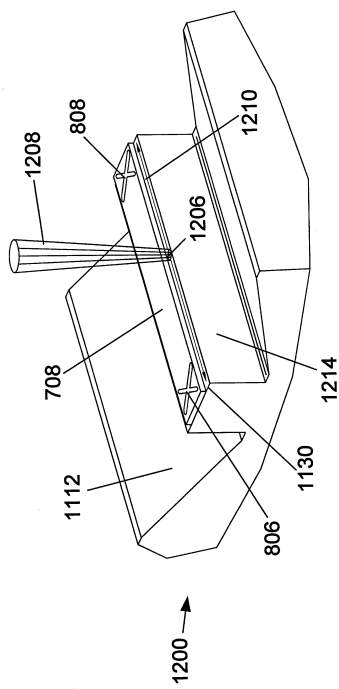
【図 10】



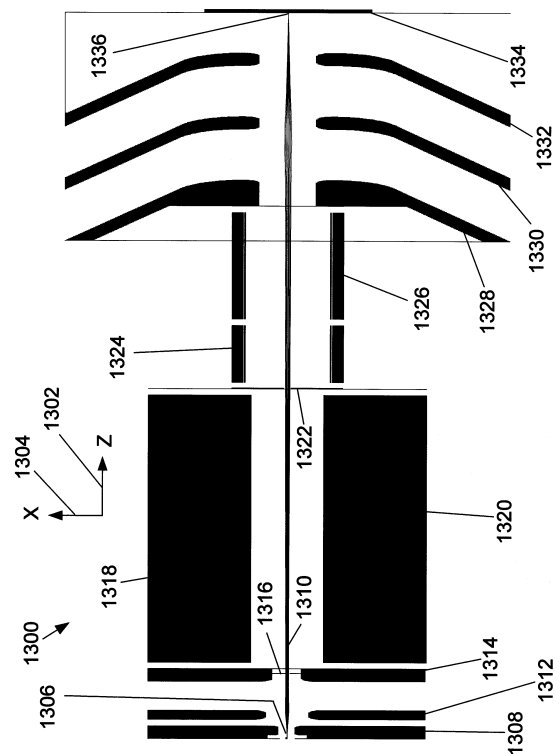
【図 11】



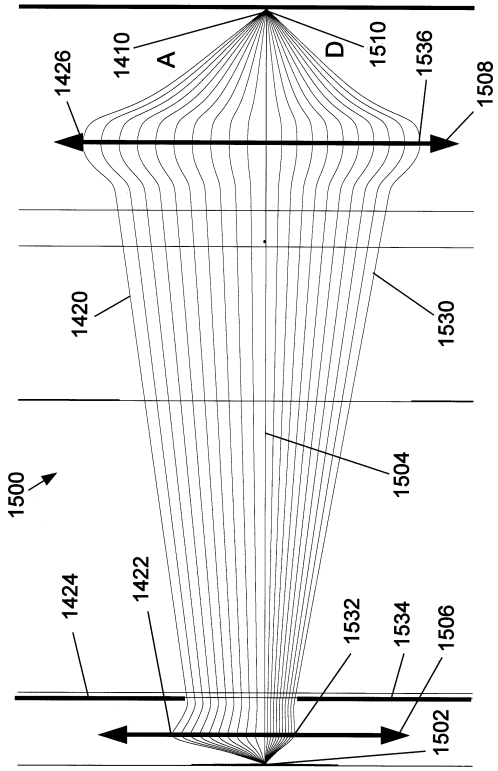
【図 12】



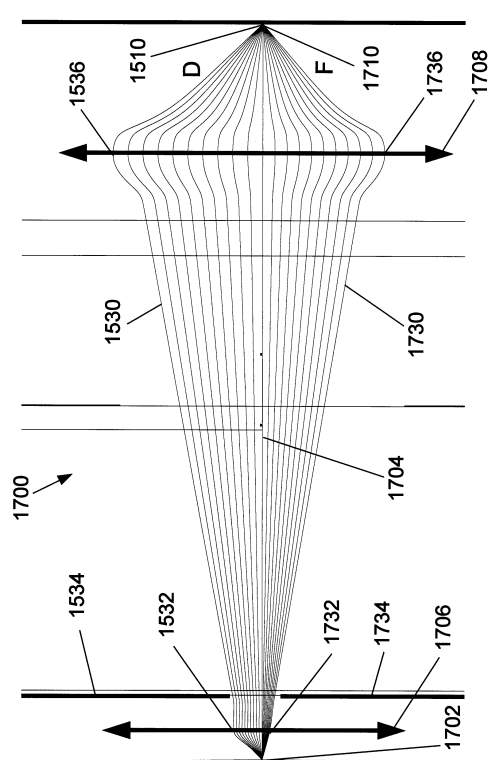
【図 13】



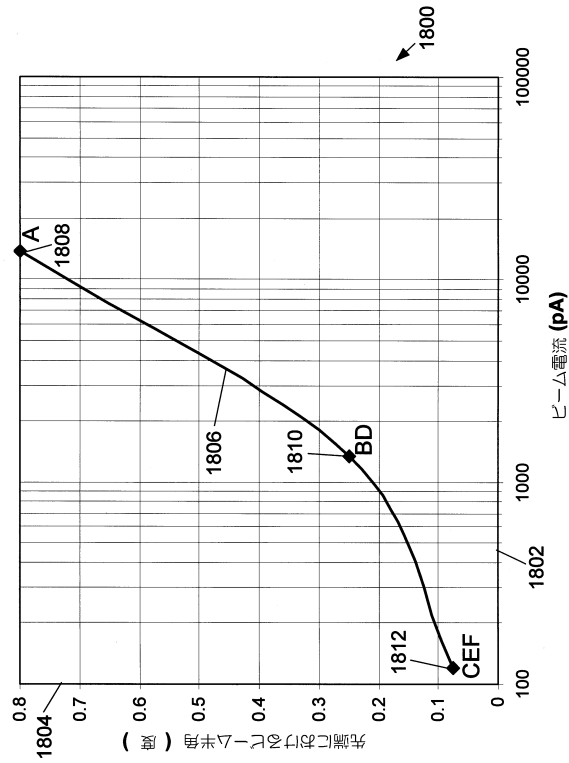
【 図 1 5 】



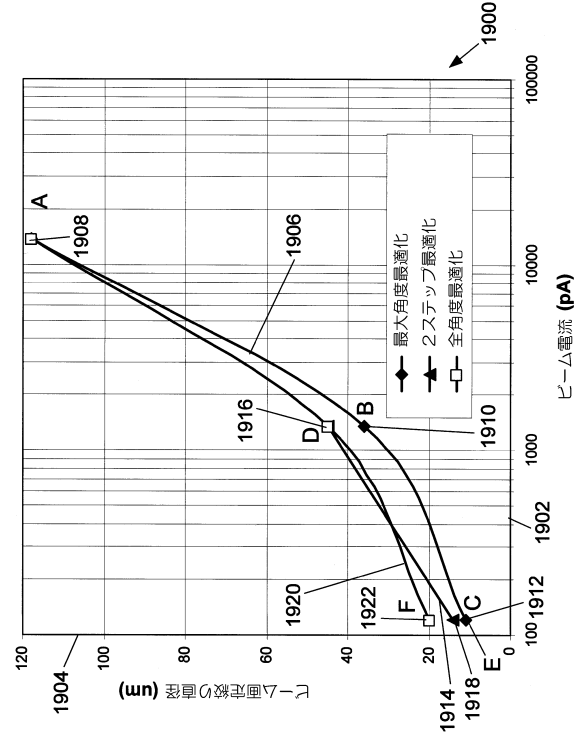
【 図 1 7 】



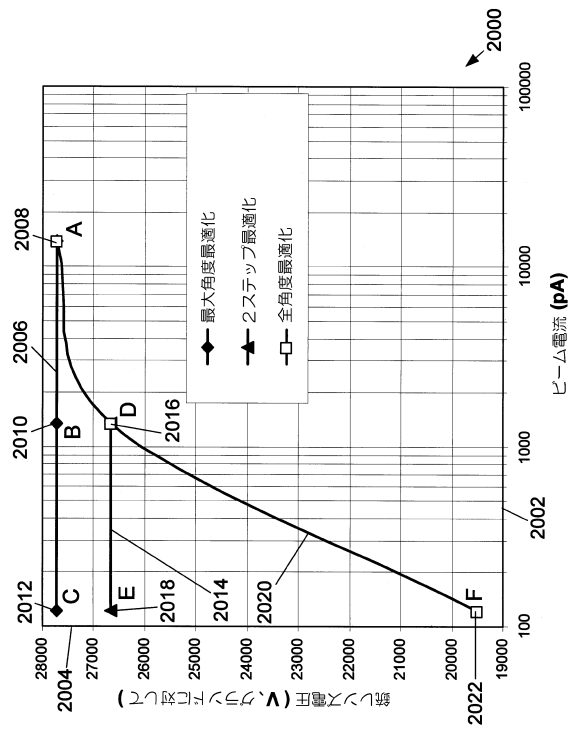
【図 18】



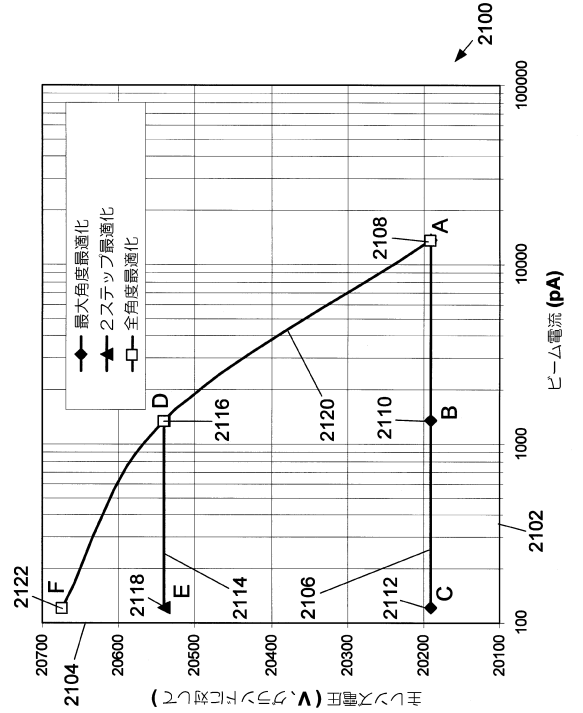
【図 19】



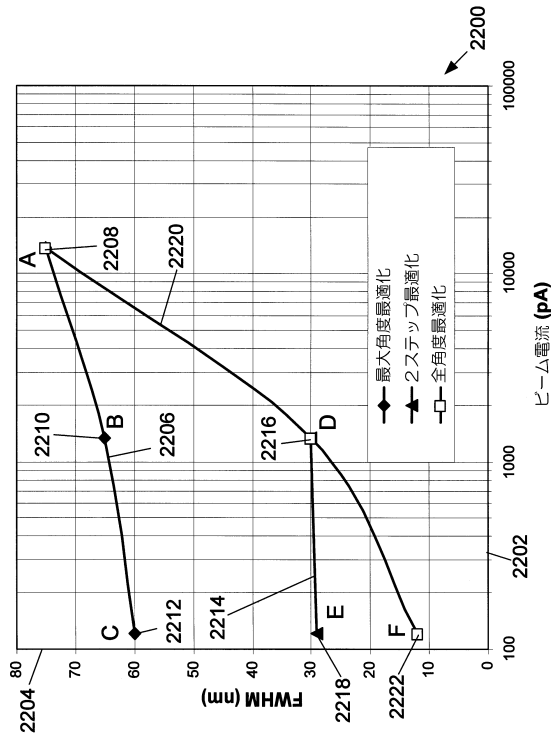
【図 20】



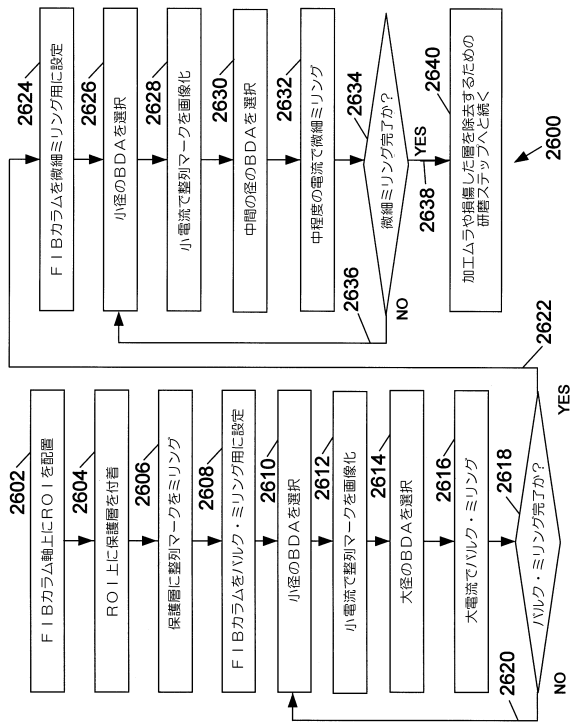
【図 21】



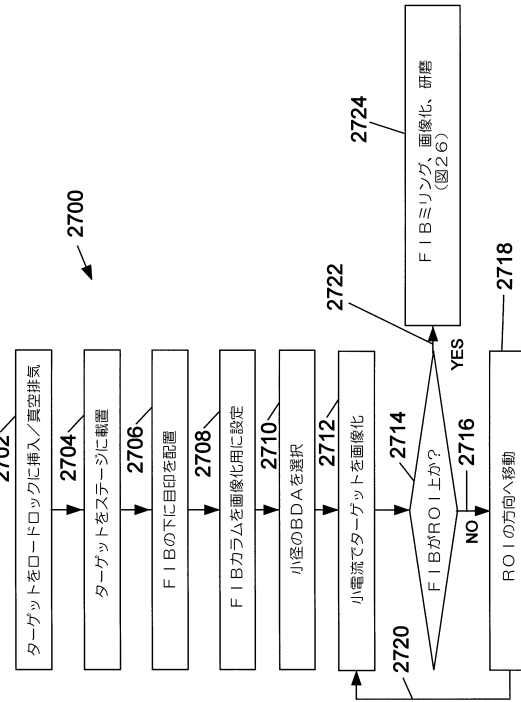
【図 2 2】



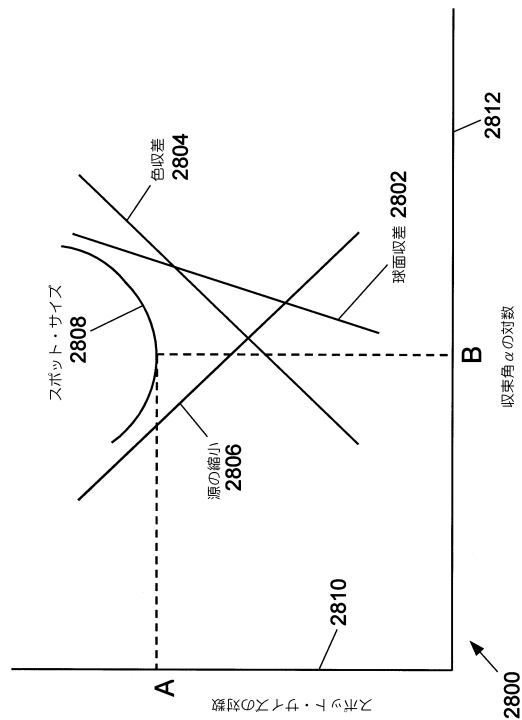
【 図 2 6 】



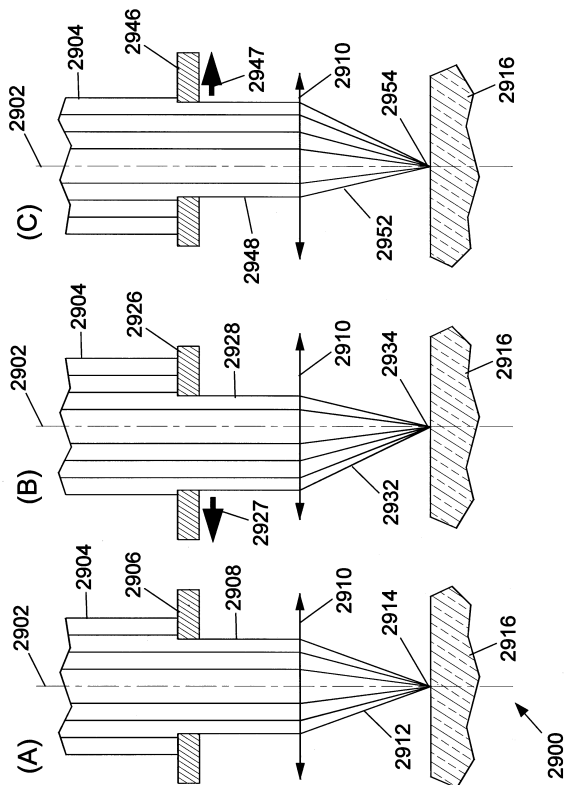
【 図 2 7 】



【 図 2 8 】



【 図 2 9 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開昭61-080744(JP,A)
特開2006-128068(JP,A)
特開2007-093458(JP,A)
特開平05-015981(JP,A)
特開昭63-086235(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01J 37/00 - 37/02、37/05、37/09 - 37/18、
37/21、37/24 - 37/244、
37/252 - 37/36