

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6101266号
(P6101266)

(45) 発行日 平成29年3月22日 (2017.3.22)

(24) 登録日 平成29年3月3日 (2017.3.3)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 J 37/317 (2006.01)

H O 1 J 37/317

C

H O 1 L 21/265 (2006.01)

H O 1 L 21/265

F

H O 1 L 21/265

T

請求項の数 15 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2014-526176 (P2014-526176)
 (86) (22) 出願日 平成24年8月15日 (2012.8.15)
 (65) 公表番号 特表2014-529166 (P2014-529166A)
 (43) 公表日 平成26年10月30日 (2014.10.30)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2012/050967
 (87) 国際公開番号 W02013/025816
 (87) 国際公開日 平成25年2月21日 (2013.2.21)
 審査請求日 平成27年7月28日 (2015.7.28)
 (31) 優先権主張番号 13/210,959
 (32) 優先日 平成23年8月16日 (2011.8.16)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 500239188
 ヴァリアン セミコンダクター イクイッ
 プメント アソシエイツ インコーポレイ
 テッド
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
 1 9 3 0 グローチェスター ドリー ロ
 ード 3 5
 (74) 代理人 100147485
 弁理士 杉村 憲司
 (74) 代理人 100164471
 弁理士 岡野 大和
 (74) 代理人 100188307
 弁理士 太田 昌宏

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 三次元イオン処理装置及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

抽出プレートの開口部を介して抽出された第1のイオンの第1のイオン角度プロファイル
 を有する第1のイオンビームを、ワークピースの第1の領域に方向づけるステップと、
 前記第1のイオン角度プロファイルとは異なる第2のイオン角度プロファイル
 を有する、前記抽出プレートの前記開口部を介して抽出された第2のイオンの第2のイオンビーム
 を、前記ワークピースの前記第1の領域に方向づけるステップと

前記第1のイオン角度プロファイルを前記ワークピースに方向づける前に、前記第1の
 イオン角度プロファイルを最大化するステップであって、

前記第1のイオン角度プロファイルの第1の試行最大角度を測定するステップと、

前記第1の試行最大角度を第1の目標最大角度と比較するステップと、

前記第1の試行最大角度が前記第1の目標最大角度と異なるとき、制御パラメータを
 調整するステップと

を含む最適化するステップと

を含むワークピースの処理方法。

【請求項 2】

前記第1及び第2のイオン角度プロファイルを、100ミリ秒未満の継続時間を有する
 それぞれ第1及び第2の期間でそれぞれ複数回供給するステップを含む、請求項1に記載
 の方法。

【請求項 3】

10

20

前記第 1 の期間は前記第 2 の期間とは異なる、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記第 1 及び第 2 のイオン角度プロファイルを、複数回交互に供給するステップをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記第 1 のイオン角度プロファイルは一峰性の分布であり、前記第 2 のイオン角度プロファイルは二峰性の分布である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記第 2 のイオン角度プロファイルを供給する前に、前記第 2 のイオン角度プロファイルを最適化するステップであって、

前記第 2 のイオン角度プロファイルの第 2 の試行最大角度を測定するステップと、

前記第 2 の試行最大角度を第 2 の目標最大角度と比較するステップと、

前記第 2 の試行最大角度が前記第 2 の目標最大角度と異なるとき、制御パラメータを調整するステップと

を含む最大化するステップをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

抽出プレートの開口部を介して抽出された第 1 のイオンの第 1 のイオン角度プロファイルを有する第 1 のイオンビームを、ワークピースの第 1 の領域に方向づけるステップと、

前記第 1 のイオン角度プロファイルとは異なる第 2 のイオン角度プロファイルを有する、前記抽出プレートの前記開口部を介して抽出された第 2 のイオンの第 2 のイオンビームを、前記ワークピースの前記第 1 の領域に方向づけるステップと

前記第 1 のイオン角度プロファイルを前記ワークピースに方向づける前に、前記第 1 のイオン角度プロファイルを最適化するステップであって、

第 1 の目標角度における第 1 の電流を測定するステップと、

前記第 1 の電流がピーク電流を示さないとき、前記ワークピースにイオンを注入するイオン注入システムの制御パラメータに第 1 の調整を行うステップと、

第 2 の目標角度における第 2 の電流を測定するステップと、

前記第 2 の電流に対する前記第 1 の電流の比率が目標比率と一致しないとき、前記イオン注入システムの制御パラメータに第 2 の調整を行うステップと、

を含む最適化するステップと

を含むワークピースの処理方法。

【請求項 8】

前記第 2 の調整の後、

前記第 1 のイオン角度プロファイルの全体イオン電流を測定するステップと、

前記全体イオン電流が目標全体イオン電流と異なるとき、抽出パルスシーケンスのデューティサイクルを調整するステップと

をさらに含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記第 1 及び第 2 のイオン角度プロファイルを組み合わせる形成される第 3 のイオン角度プロファイルをワークピースに供給する間に、前記抽出プレートに対してワークピースを走査するステップをさらに含む、請求項 1 に記載の方法

【請求項 10】

前記第 1 及び第 2 のイオン角度プロファイルを供給するステップは、第 1 の振幅の第 1 の RF 信号と、第 2 の振幅の第 2 の RF 信号とを、RF 発生器からアンテナに送信するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

バイアス電圧パルス列を前記ワークピースに供給するステップであって、イオンが前記ワークピースに引き込まれるオン期間に、前記第 1 及び第 2 のイオン角度プロファイルが確立され、前記バイアス電圧のパルス列においてイオンが前記ワークピースに引き込まれないオフ期間に、前記第 1 の振幅及び前記第 2 の振幅の変位が実行されるステップをさら

10

20

30

40

50

に含む、請求項 1 0 に記載の方法。

【請求項 1 2】

前記ワークピースの前記第 1 の領域に、前記抽出プレートから抽出された第 1 及び第 2 のイオンの前記第 1 及び第 2 のイオン角度プロファイルとは異なる、第 4 のイオン角度プロファイルを供給するステップをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 1 3】

R F 信号を送信して、プラズマを生成するように構成された R F 発生器と、
前記プラズマに対するバイアスを受けて、プラズマシースを越えてワークピースにイオンを引き込むように構成されたワークピースホルダと、

開口部を有し、前記ワークピース上に様々な入射角の範囲にわたって分布されるイオンを有するイオンビームを供給する抽出プレートと、

イオンの第 1 及び第 2 の暴露をそれぞれ含む一連の暴露サイクルにおいて、制御信号を前記 R F 発生器に送り、第 1 の振幅と第 2 の振幅との間で異なる方法によって前記 R F 信号の振幅を変化させるように構成された制御部であって、イオンの第 1 及び第 2 の暴露は、それぞれ前記第 1 及び第 2 の振幅に対応し、前記開口部を介して抽出されるイオンの第 1 及び第 2 のイオン角度プロファイルをそれぞれ有する、制御部とを備えるプラズマ処理システム。

【請求項 1 4】

前記ワークピースホルダは、一連の暴露サイクルの間に前記抽出プレートの前記開口部に対してワークピースを走査するように構成され、各暴露サイクルは、前記ワークピースが前記イオンビームの幅に等しい距離を走査するために必要な継続時間の 1 0 パーセント未満である、請求項 1 3 に記載のプラズマ処理システム。

【請求項 1 5】

前記イオンの第 1 の暴露は、前記イオンの第 2 の暴露よりも長い、請求項 1 3 に記載の処理システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、被加工材（ワークピース）への注入に関し、特にイオンの複数の分布を使用した、ワークピースへの注入方法及び装置に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

イオン注入は、基板の特性を変化させる不純物を基板に添加する標準技術である。所望の不純物材料がイオン源内でイオン化され、イオンは所定のエネルギーのイオンビームを形成するように加速され、イオンビームは基板の表面に方向づけられる。ビームのエネルギーイオンは基板材料の内層面に浸透し、基板材料の結晶格子に埋め込まれて、所望の伝導率又は材料特性の領域を形成する。

【0 0 0 3】

従来のビームラインイオン注入処理では、イオンを略平行に有するビームにより、イオンが基板に供給される。イオンは、イオンビームの主軸に対する基板の所定の方向に、同一の入射角で衝突する。これにより、イオンの注入方向が基板の所定の方向に対して明確に特徴づけられ、基板へのイオン注入の制御が容易になる。しかし、複数の角度の注入が好ましいとき、基板の方向若しくはビームの方向、又はこの双方を移動することが必要となる。また、イオンビームは、通常、基板の広範囲に広がるため、所望の範囲にのみ注入するためにマスキングをする必要がある。

【0 0 0 4】

近年では、技術及び装置が発達しており、様々な角度の範囲にわたって基板にイオンを

10

20

30

40

50

供給できる。図 1 は、複数の角度でイオンを基板に供給する処理システムを示すブロック図である。処理システム 10 は、プラズマ源 12、抽出プレート 14（又はシースエンジニアリングプレート）及び処理チャンバ 16 を備える。ガス源 18 は、処理チャンバ 16 に接続される。プラズマ源 12 又は処理システム 10 の他の構成要素も、例えばターボポンプ等のポンプ（図示なし）に接続できる。図示されるように、プラズマ源 12 は、RF 発生器 20 と、整合ネットワーク 22 と、アンテナ 23 とを備える RF プラズマ源である。プラズマ源 12 は、筐体 24 と、処理チャンバ 16 を筐体 24 から分離する絶縁体 26 とにより覆われている。処理チャンバ 16、プラズマ源 12 又はワークピースホルダ 28 は、接地されている。

【0005】

バイアスがプラズマ 32 とワークピース 40 との間に印加される場合、抽出プレート 14 は、ワークピース 40 に注入するイオンビーム 30 の形成に使用される。抽出プレート 14 は冷却することができる。プラズマ源 12 にはバイアスが印加され、プラズマ 32 からイオンビーム 30 を引き込むために、連続した又はパルスのバイアスを基板に印加するバイアス電源 52 を設けてもよい。抽出プレート 14 は、少なくとも 1 つの開口部 34 を有し、開口部 34 を介して、イオンビーム 30 がワークピース 40 に供給される。処理システムに関するさらなる説明は、米国特許第 7767977 号で発行された 2009 年 4 月 3 日に出願の第 12/417929 号、2010 年 4 月 3 日に出願の第 12/418120 号、2009 年 12 月 22 日に出願の第 12/644103 号、及び 2010 年 8 月 2 日に出願の第 12/848354 号の同時係属の米国特許出願に記載され、これらの米国特許出願は、参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。

【0006】

処理システム 10 を使用してプラズマから抽出されるイオンビーム 30 は、複雑なマスキング又はリソグラフィ手法を用いることなく、必要に応じて様々な範囲の角度のプラズマ 32 を同時にワークピース 40 に供給することに使用されうる。イオンの広範な角度分布を生成するこの能力により、異なる方向から同時にイオンが供給されることが好ましい三次元形状を有する基板の処理が容易になる。さらに、ワークピース 40 に供給されるイオンビーム 30 の正確な角度分布は、処理システム 10 内における特定の組のイオンビームの光学条件（パラメータ）に従って設定される。イオンビーム 30 の角度分布に影響するパラメータは、開口部 34 の形状及び大きさ、注入電圧（プラズマ 32 とワークピース 40 との電位差）、抽出プレート 14 とワークピース 40 との間隔、及びプラズマ密度を含む。従って、特定の組のパラメータは、イオンビーム 30 の特定のイオン角度プロファイルを設定しうる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、イオンビーム 30 の角度分布は、プラズマ密度としてかかるパラメータの影響を受けやすいため、時間の経過により処理システム 10 内の動作パラメータ又は条件が変動し、角度分布が変化しがちとなる。さらに、処理システム 10 の任意の単一の組の制御パラメータによる処理システム 10 の使用によっては、イオンの所定の角度分布が得られない。

【0008】

上記の点に鑑みると、イオン注入システムにおけるイオンの角度分布における改良された制御の提供が有用であることが理解されるだろう。

【課題を解決するための手段】

【0009】

一実施形態において、ワークピースを処理する方法は、第 1 のイオンビームをワークピースの第 1 の領域に方向づけるステップを含み、第 1 のイオンビームは、抽出プレートの開口部を介して抽出された第 1 のイオンの第 1 のイオン角度プロファイルを有する。また、この方法は、第 2 のイオンビームをワークピースの第 1 の領域に方向づけるステップを

含み、第2のイオンビームは、抽出プレートの開口部を介して抽出された第2のイオンの、第1のイオン分布とは異なる第2のイオン角度プロファイルを有する。

【0010】

他の一実施形態において、処理システムは、RF信号を送信してプラズマを生成するように構成されたRF発生器と、プラズマに対するバイアスを受けて、プラズマシースを越えてワークピースにイオンを引き込むように構成されたワークピースホルダとを備える。また、この処理システムは、開口部を有し、ワークピース上に様々な入射角の範囲にわたって分布されるイオンを有するイオンビームを供給する抽出プレートを備える。この処理システムは、イオンの第1及び第2の暴露をそれぞれ含む一連の暴露サイクルにおいて、制御信号をRF発生器に送り、第1の振幅と第2の振幅との間で異なる方法によってRF信号の振幅を変化させるように構成された制御部であって、イオンの第1及び第2の暴露は、それぞれ第1及び第2の振幅に対応し、開口部を介して抽出されるイオンの第1及び第2のイオン角度プロファイルをそれぞれ有する、制御部を備える。

10

【0011】

本開示の理解のために添付の図面が参照され、これらの図面は参照により本明細書に組み込まれる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】単一の開口部を使用した処理システムのブロック図である。

【図2】本開示の一実施形態に関する処理システムの図である。

20

【図3】抽出プレートの一実施形態におけるイオンビームの配置の詳細を示す図である。

【図4A】図2のシステムにより生成される例示的なイオン角度プロファイルを示す図である。

【図4B】図2のシステムにより生成される例示的なイオン角度プロファイルを示す図である。

【図4C】図2のシステムにより生成される例示的なイオン角度プロファイルを示す図である。

【図5】本開示の実施形態におけるある手順を示す図である。

【図6】本開示の実施形態における他の手順を示す図である。

【図7A】図2のシステムにより生成される例示的なイオン角度プロファイルを同一座標上に重ね合わせた図である。

30

【図7B】図7Aのイオン角度プロファイルの総和を示す例示的なイオン角度プロファイルを示す図である。

【図8】図7Aのイオン角度プロファイルを供給するシーケンスを示す図8Aと、図8Aのイオン角度プロファイルに対応するプラズマの出力レベルを含む出力曲線を示す図8Bと、図8Bの出力曲線とともに適用される例示的なバイアス電圧パルス列を示す図8Cとを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

本明細書において、ワークピース（基板）への注入に関するシステム及び方法を説明する。様々な実施形態において、本システムは、例えば、半導体基板、ビットパターン媒体、固体電池又はフラットパネルに使用される。従って、本発明は、以下説明する特定の実施形態に限定されない。

40

【0014】

様々な実施形態において、イオン注入システムは、プラズマ源と、様々な入射角の範囲にわたって分布されるイオンを有するイオンビームを基板に方向づける抽出プレートと、イオン角の角度分布を調整して組み合わせる制御システムとを備える。様々な実施形態において、制御部は、イオンの角度分布（以下「イオン角度プロファイル」という）を取得又は維持するためにイオン注入システムの特定のパラメータを調整するように動作する。いくつかの実施形態において、制御部は、複数のイオン角度プロファイルの間でミリ秒時

50

間又はマイクロ秒時間にわたってイオン角度プロファイルが変化するように、イオン注入システムのプラズマ出力を急激に変化させるように動作する。この方法により、いかなる単一イオン角度プロファイルにおいても達成できない分布を示す、複合イオン角度プロファイルが基板に供給される。

【0015】

図2は、本開示の実施形態に関する処理システム200を示す。処理システム200は、処理チャンバ16内でプラズマ32を生成するプラズマ源201を備える。プラズマ源201は、RFプラズマ源、誘電結合プラズマ(ICP)源、間接加熱陰極(IHC)、ヘリコン、グロー荷電源、又は当業者に周知の他のプラズマ源とすることができる。抽出プレート14には、プラズマ32の周縁に沿って、イオンビーム204が抽出される一以上の開口部34が配置されうる。バイアス電圧源212を使用して、ワークピースホルダ28とプラズマ32との間にバイアス電圧が印加され、開口部34を介して抽出されてワークピース40に作用するイオンのイオンエネルギー及び投射量を決定する。いくつかの実施形態において、ワークピース40は半導体基板である。ワークピースホルダ28は、ワークピースホルダ28をプラズマ32に対して異なる方法でバイアスする電位を受信する。一実施形態において、ワークピースホルダ28は接地電位を受信し、正の電位がプラズマ(源)に印加される。他の一実施形態において、ワークピースは負の電位を受信し、プラズマ(源)が、接地電位又はワークピースホルダよりも高い電圧に設定される。処理システム200は、制御部202も備え、プラズマ出力と、ワークピースホルダ28に印加されるバイアスとを、後述するように制御する。

【0016】

処理システム200は、ワークピース40を支持するワークピースホルダ28を含むワークピースチャンバ206も備える。処理システム200は、ワークピースホルダ28を抽出プレート14に対して方向210に沿って移動させる走査デバイス208も備える。いくつかの実施形態において、抽出プレート14が固定され、ワークピースホルダ28が(例えば走査デバイス208を使用して)可動であってもよい。また、他の実施形態において、ワークピースホルダ28が固定され、抽出プレート14が可動であってもよい。さらに他の実施形態において、ワークピースホルダ28と抽出プレート14の双方が可動であってもよい。

【0017】

図3は、様々な実施形態において、抽出プレート14を使用して処理システム200により生成されたイオンビームのイオンビーム配置の詳細を示す。抽出プレート14は、プラズマシース302内の電場を修正し、プラズマ32とプラズマシース302との間の開口部34に近接するプラズマシース境界304の形状を制御するように構成される。この例においては、プラズマシース境界304は、ワークピース40の面に対して凸形状を有する。プラズマシース302を越えてプラズマ32から引き込まれるイオンビーム204のイオンは、広範囲にわたる入射角でワークピース40に衝突する。図では、プラズマシース境界304から加速されたイオンのいくつかの異なる軌道が示される。イオンビーム204のイオンは、種々の方法で、プラズマシース302を越えてプラズマ32から引き込まれる。一例において、ワークピース40がバイアスされ、プラズマシース302を越えてプラズマ32からイオンビーム204を引き込む。イオンビーム204のイオンは、P型のドーパント、N型のドーパント、水素、希ガス、又は当業者に知られた他の種とすることができる。

【0018】

ワークピース40がバイアスされたとき、開口部34を介して、プラズマシースを越えてイオンが引き込まれる。例えば、軌道経路306に沿ったイオンは、平面320cに対して+°の角度でワークピース40に衝突する。軌道経路308に沿ったイオンは、同じ平面320cに対して約0°の角度でワークピース40に衝突する。軌道経路310に沿ったイオンは、平面320cに対して-°の角度でワークピース40に衝突する。従って、入射角の範囲は、広範囲にわたって変化し、いくつかの実施形態において、役0°

を中心にして $+60^\circ$ と -60° との間の範囲で変化する。加えて、経路 306 及び 310 のようないくつかのイオン軌道は、互いに交差する。開口部 34 の横方向の幅 W 、ワークピース 40 上の抽出プレート 14 の垂直方向の空間 (Z)、抽出プレート 14 の誘電率、又はプラズマ 32 の他の処理パラメータを含む要素の数によって、入射角の範囲 (θ) は変化するが、要素は上述の例に限られない。

【0019】

図 3 にさらに記載されているように、種々の実施形態において、抽出プレート 14 は、ワークピース 40 及び抽出プレート 14 の間において、ワークピース 40 の前面 (上面) により規定される平面 320c に垂直な方向 312 に沿った異なる垂直方向の空間 (Z) に配置される。間隔 Z により、イオンビーム 204 の形状及び幅が変化する。例えば、平面 320c に対応する間隔 $Z3$ の場合、イオンビーム 204 は、まず点 P において焦点を形成し、その後発散して、ワークピース 40 に衝突したときに幅 G を有する発散ビームを形成する。一方、間隔が平面 320b すなわち焦点の平面において構成される場合、イオンビーム 204 は、ワークピース 40 に衝突したときに狭いビーム幅を形成する。平面 320a に対応する間隔 $Z1$ においては、図示するように、収束イオンビーム 204 は、点 P よりも広い領域でワークピース 40 に衝突する。

【0020】

Z の変化に加え、さらなる実施形態において、他のパラメータが変化し、イオンビーム 204 のビーム形状及び大きさが変化する。これらのパラメータは、特に、開口幅 (又は円形開口の場合には開口径) W 及びプラズマ 32 のプラズマ密度を含む。

【0021】

ワークピース 40 の上面におけるイオンビーム 204 のイオン分布は、種々の観点により特徴付けられる。一例において、イオン電流密度は、イオンビーム電流のプロファイルを生成する位置関数として算出される。他の方法において、イオンビーム 204 は、イオンの入射角の関数としてイオンの相対数をプロットした曲線で示されるイオン角度プロファイルを決めることにより特徴付けられる。

【0022】

図 4A - 4C は、本開示の実施形態における処理システム 200 のようなシステムにより生成される、例示的なイオン角度プロファイル 402、412 及び 422 を示す。いくつかの実施形態において、3つのイオン角度プロファイルが、処理システム 200 の単一のパラメータ (例えばプラズマ 32 に印加されるプラズマ出力) を変化させることにより生成される。一般に、出力レベルが高いほど、プラズマ 32 内のイオン密度及び電子密度が増加するので、プラズマ出力は、プラズマ密度に直接的に関係しうる。プラズマ出力を変化させ、その結果としてプラズマ密度を変化させることにより、プラズマシース 302 の厚さが変化する。とりわけ、プラズマ密度の増加は、プラズマシース 302 の厚さを減少させうる。シースの厚さが増加すると、イオン角度プロファイルが、より平行な分布 (422) から、より幅広いイオン角度プロファイル (402、412) に変化し、又は、所与の開口部の幅 W によっては、その反対の傾向を示す。加えて、所定のシースの厚さにおいて、幅 W が増加すると、イオンの平行分布が増加する。従って、ある開口幅 W において、プラズマ密度を単調に増加させることにより (プラズマシース 302 の厚さが減少し)、一連のイオン角度プロファイル 402、412 及び 422 が生成され、一方、他の開口幅 W において、プラズマ密度を単調に減少させることにより (プラズマシース 302 の厚が増加し)、一連のイオン角度プロファイル 402、412 及び 422 が生成される。

【0023】

特に、イオン角度プロファイル 402 は、 $-X^\circ$ から $+X^\circ$ までの広範な入射角を示し、垂直入射角 (0°) から両側に 2つのピーク 404 及び 406 が分布する二峰性分布を形成する。このことは、より多くのイオンが、実質的に垂直入射と異なる角度でワークピース 40 に作用することを示す。垂直入射において、イオン角度プロファイル 402 は最小値を示し、他の角度で入射するイオンよりも少ない垂直入射イオンがワークピース 40

に作用することを示す。イオン角度プロファイル 4 1 2 は、イオン角度プロファイル 4 0 2 の生成に使用された出力レベルと異なる出力レベルで生成されたイオンビームに対応し、分布が 2 つのピーク 4 1 4 及び 4 1 6 を有するという点において、定性的にイオン角度プロファイル 4 0 2 に類似した形状を示す。この場合、ピークの間隔は、イオン角度プロファイル 4 0 2 よりも小さく、ピーク 4 1 4 及び 4 1 6 に対応するピークの入射角が、ピーク 4 0 4 及び 4 0 6 よりも垂直に近いことを示す。一方、イオン角度プロファイル 4 2 2 は、垂直入射に集中した単峰性分布（単一のピーク）4 2 4 を示し、上述したようなより平行なイオンビームを示す比較的狭いイオン角度プロファイルを示している。

【 0 0 2 4 】

再び図 2 を参照すると、様々な実施形態において、処理システム 2 0 0 のパラメータが変化し、ワークピースを処理するための所望のイオン角度プロファイルが確立される。いくつかの実施形態において、イオン注入のようなイオンビーム処理での目標イオン角度プロファイルが設定される。この目標イオン角度プロファイルは、所望の処理でウエハーに確実に均一な処理を行うために、定期的に再設定される。特に、図 5 及び 6 に関して下記に説明されるように、イオンビーム 2 0 4 が算出され、処理システム 2 0 0 の動作パラメータが、イオンビーム 2 0 4 における一以上の目標イオン角度プロファイルが確立されるまで調整される。この調整を注入プロセスの開始前に実行し、所望の間隔で実行して、注入プロセス開始後であればイオンビーム 2 0 4 を変化させるような想定されうるシステムのパラメータに変動又はシステム内における変化を把握する。

【 0 0 2 5 】

一度、一以上の目標イオン角度プロファイルが確立されると、目標イオン角度プロファイルの確立に使用された関連するパラメータの試行値を処理システム 2 0 0 に適用することにより、ワークピースへのイオン注入が開始される。様々な実施形態において、図 7 A 及び 7 B に関連して後述するように、複数のイオン角度プロファイルが組み合され、複合イオン角度プロファイルが生成される。後者の方法によれば、別の方法では処理システム 2 0 0 のような所与の処理システムにおいてなしえない、新規なイオン角度プロファイルが生成される。

【 0 0 2 6 】

次に、図 5 を参照すると、本開示のいくつかの実施形態におけるイオン角度プロファイルを調整する方法 5 0 0 が開示される。図 5 及びそれに続く図 6 の説明において、例として、図 4 A のイオン角度プロファイル 4 0 2 を参照する。ブロック 5 0 2 で、イオン角度プロファイルの目標最大角度が入力される。例えば、この値は、入力されて、イオン注入システムのメモリに格納される。ブロック 5 0 4 で、イオンビームのイオン角度プロファイルの最大値が測定される。図 4 A に示されるように、最大角度 4 0 8 a 及び 4 0 8 b は、軌道が（基板に垂直な）ゼロ度の入射に対して最大の角度を形成するようなイオンの角度を示す。従って、最大角度は、視射角においてワークピースに入射するイオンに対応する。ブロック 5 0 6 で、測定された最大角度が目標最大角度と一致する場合、この方法は、ブロック 5 0 8 に進み、ウエハーが処理される。測定された最大角度が目標最大角度と一致しない場合この方法はブロック 5 1 0 に進み、関連する制御パラメータが調整される。例えば、イオン角度プロファイルにおいて測定された最大角度が、目標最大角度未満の場合、システムにおいて印加されるプラズマ出力が調整される。再び図 3 を参照すると、プラズマ 3 2 におけるプラズマ出力の調整により、プラズマシース境界 3 0 4 の形状が変化し、これによってプラズマから出るイオンの角度分布が変化し、イオン角度プロファイルにおける最大角度を目標値の方へ移動させる。この方法は、次に、ブロック 5 0 4 に進み、その後さらに、目標最大角度が得られるまで、イオンビームの測定とパラメータの調整とが繰り返し実行される。

【 0 0 2 7 】

図 6 は、さらなる実施形態におけるイオン角度プロファイルを調整する方法 6 0 0 のステップの例を示す。この方法では、異なる角度におけるイオン電流の所望の比率が得られるまで、2 以上のパラメータが、反復処理により調整される。これは、高い入射角である

10

20

30

40

50

第1の角度においてイオンの所定比率を注入し、ゼロ度のような低い入射角においてイオンの別の所定比率を注入することが好ましい場合に有用である。図4Aも参照すると、イオン角度プロファイル402は目標曲線であり、角度の関数として所望の相対イオン電流を示す。一態様において、イオン角度プロファイルは、部分的には、2つの異なる角度410及び411におけるイオン電流の比率によって規定されうる。角度410は、ゼロ度の入射、すなわち垂直入射に対応し、この角度において、相対イオン電流は低い。換言すれば、イオン角度プロファイル402は、垂直入射におけるワークピースへの注入が最小化されるイオン注入処理において使用される。角度411は、最大イオン電流における所望の角度に対応し、これは、イオン注入に好ましい角度を示す。前述のように、イオン角度プロファイル402は、ピーク404及び406が存在する二峰性の分布であり、垂直入射に対して同一の絶対値の角度を形成するような軌道を示す。

10

【0028】

ブロック602において、第1の角度及び第2の角度における目標電流が、目標全体イオンビーム電流とともに入力される。これらの値は、角度411及び410における目標イオン電流を示す。ブロック604において、電流が第1の角度で測定される。この方法は、続いてブロック606に進む。第1の角度における電流が最大の電流を示さない場合、つまり角度411がピーク406と一致しない場合、この方法は、ブロック608に進み、処理システムの第1のパラメータが調整される。第1のパラメータは、例えば、プラズマ出力である。この方法は、次にブロック604に進み、第1の角度における電流が再び測定される。第1の角度がピーク406と一致すると、この方法はブロック610に進む。

20

【0029】

第1の角度における電流が最大値に対応するとき、ブロック610において、電流が、角度410である第2の角度において測定される。この方法は次にブロック612に進み、第2の角度において電流が測定されると、第1及び第2の電流の比率が決定される。この比率が目標比率に対応すると、この方法は次にブロック614に進む。例えば、角度410よりも角度411におけるイオン電流は10倍であることが好ましい。角度1及び角度2において測定された電流の比率が目標値と一致しない場合、この方法はブロック616に進み、イオン注入システムの第2のパラメータが調整される。第2のパラメータは、例えば、ワークピース40と抽出プレート14との間隔Zである。間隔Zを調整することにより、図3に関連して上述の通り説明したように、ワークピースの表面における厳密なイオン分布が変化する。この方法は続いてブロック610に戻り、第2の角度における電流が再測定される。

30

【0030】

第1及び第2の角度におけるイオン電流の比率が目標値に一致したとき、この方法は、ブロック614に進む。ブロック614において、何らかの調整が行われた場合、第1の角度における電流がイオン電流のピークに対応するかが新たに決定される。第1の角度における電流がイオン電流のピークに対応しない場合、この方法はブロック602に進む。第1の角度における電流がピークの位置を構成する場合、この方法は、ブロック618に進む。

40

【0031】

ブロック618において、イオンビームにおける全体イオン電流が決定される。全体イオンビーム電流は、検流器を設け、所定の期間においてワークピースに入射した全範囲にわたるイオンを検出することにより決定される。この方法は、次にブロック620に進み、測定された電流が目標全体イオンビーム電流と一致しないとき、この方法はブロック622に進む。ブロック622において、ワークピースに供給されるイオンのデューティサイクルが調整される。これは、ワークピースホルダに印加されるバイアス電圧パルスのパルス幅を変えることにより実現される。イオンをプラズマから引き込むためにワークピースホルダにバイアス電圧が印加される「オン」期間には、イオンビームは、抽出プレートの開口部を通して加速され、ワークピースに作用する。ワークピースにバイアス電圧が印

50

加されない「オフ」期間には、プラズマチャンバ内のイオンは、ワークピースに向かって加速されない。従って、「オン」期間の相対的な継続時間と、全期間にわたる平均のイオン束の相対的な量は、パルスサイクルの期間（「オン」及び「オフ」期間の合計）を一定に保つ一方でバイアス電圧パルスを変更することにより調整される。

【0032】

ブロック622の後、この方法はブロック18に戻り、全体イオンビーム電流が再度測定される。ブロック620において、測定されたイオン電流の合計が目標値に一致する場合、この方法は、ブロック624に進み、この時点までに処理システムにおいて確立されたパラメータに従って、ウェハー（ワークピース）が処理される。パラメータにより、処理システムは、目標イオン角度プロファイル及び合計ビーム電流を有するイオンビームをワークピースに方向づける。いくつかの実施形態において、方法600は、全体イオン角度プロファイルが生成されるまで、角度の追加が繰り返される。

10

【0033】

方法600において、イオン角度プロファイルとワークピースに方向づけられるイオン線量との双方は、イオン線量及びイオン角度プロファイルの一貫性を維持するために、定期的に確認及び調整される。様々な実施形態において、方法500及び600における動作パラメータの調整は、数ミリ秒又は数秒にわたって実行される。従って、いくつかの実施形態において、調整は、イオン注入処理の開始時又は連続するウェハーの注入の間又はウェハーのバッチ間に実行される。

【0034】

20

いくつかの実施形態において、複数のイオン角度プロファイルが組み合され、ワークピースに方向づけられるイオンの複合イオン角度プロファイルが形成される。例えば、いくつかの実施形態において、第1及び第2のイオン角度プロファイルが組み合わされ、第3のイオン角度プロファイルが形成される。他の実施形態において、図7A及び7Bに示すように、第1、第2及び第3のイオン角度プロファイルが組み合され、第4のイオン角度プロファイルが形成される。図7Aは、3つのイオン角度プロファイルを示し、それぞれ個別イオン角度プロファイル702、712及び722は、処理システム200において異なるプラズマ密度で得られた分布を示す。例えば、イオン角度プロファイル402、412及び422と同様に、3つのイオン角度プロファイル702、712及び722は、処理システム200における3つの異なるプラズマ出力レベルで得られた分布に対応する。

30

【0035】

しかしながら、イオン角度プロファイル740のような平坦なイオン角度プロファイルが好ましい場合、イオン角度プロファイル702、712及び722に対応するプラズマ出力レベルのいずれも所望のイオン角度プロファイル740に近くないことが明らかである。

【0036】

しかしながら、図7Bを参照すると、3つの個別のイオンのイオン角度プロファイル702、712及び722の総和を示す複合イオン角度プロファイル730は、所望のイオン角度プロファイル740に近い。特定の実施形態において、複合イオン角度プロファイル730は、処理システム200の運転条件を、第1、第2及び第3のプラズマ出力間で切り替えることにより、ワークピースに供給される。

40

【0037】

複合イオン角度プロファイル730が、如何なる瞬間においてもワークピースに供給されないことは明確である。換言すれば、複合イオン角度プロファイル730は、3つの異なるイオン角度プロファイルを有するイオンに対して、それぞれ3つの分離した期間に行われる、3つの異なる暴露を示す。しかしながら、イオン角度プロファイルを制御する選択パラメータを急速に調整することにより、3つの異なるイオン角度プロファイルは、高速に連続してワークピースに供給される。ワークピースは、複合イオン角度プロファイル730の形状を有する単一イオン角度プロファイルが瞬時に基板に供給されるのと同様の

50

効果を有するように、実質的に複合イオン角度プロファイル 7 3 0 に暴露される。

【 0 0 3 8 】

複数のイオン角度プロファイルを供給して複合イオン角度プロファイルを生成することの利点は、複合イオン角度プロファイルが、単一イオン角度プロファイルでは得られない分布を示すことである。特に、単一イオン角度プロファイルとして得られるイオン角度プロファイルの種類は、システムのイオンビーム光学により提供される所定の形状に限定される。一方、本実施形態は、ワークピースを異なる個別イオン角度プロファイルに急速に暴露することによって、所望のイオン角度プロファイルを生成する手段を供給する。例えば、個別イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 の形状は、低プラズマ出力では垂直入射（ゼロ度）でイオン束がほとんど照射されず、一方で、高プラズマ出力ではイオン束が垂直入射で最大となるものの極めて狭い分布を形成することを示す。広範な角度範囲に広がる平坦なプロファイルは、いずれの場合にも生じない。しかし、個別イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 を互いに加えることにより、複合イオン角度プロファイル 7 3 0 は、イオン角度プロファイル 7 4 0 の幅で平坦なプロファイルに適度に近似する。

10

【 0 0 3 9 】

より一般化すれば、本発明の実施形態は、任意の所望の個数の個別イオン角度プロファイルを組み合わせて所望の形状の複合イオン角度プロファイルの形成を行うことができる。例えば、異なる実施形態 5、1 0 又は 2 0 の個別イオン角度プロファイルは、それぞれの分布に対応するプラズマ出力の設定値の間で、プラズマ出力を急速に変化させることにより、例えば、プラズマ出力の設定値を数マイクロ秒から約数百ミリ秒の時間スケールで変化させることにより、組み合わされる。

20

【 0 0 4 0 】

図 8 A - 8 C は、ワークピースを複数のイオン角度プロファイルに暴露する方法に係る実施形態を示す。図 7 A 及び 7 B において説明したように、イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 は、複合イオン角度プロファイルを供給するように組み合わせられる。図 8 A は、イオン角度プロファイルを供給するシーケンスを示す。図示されるシーケンスにおいて、それぞれのイオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 が、一連の 2 つの暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b として、連続して供給される。単一暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b のそれぞれは、イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 として分布するイオンそれぞれへの 1 回の暴露を含む。様々な実施形態において、暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b は、ワークピースを処理する間に複数回繰り返される。従って、各暴露サイクルは、複合イオン角度プロファイル 7 3 0 へのワークピースの暴露を含む。図 8 A - 8 C の実施形態において、暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b は、それぞれ同じ期間実行される。

30

【 0 0 4 1 】

図 8 B 及び 8 C は、それぞれ、プラズマのプラズマ出力曲線と、暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b の生成に相互に利用可能なワークピースのバイアス曲線を示す。特に、図 8 B は、異なる R F 出力レベルを含むプラズマ出力曲線 8 1 0 を示す。異なるプラズマ出力レベルは、R F 発生器により確立される。R F 発生器は、アンテナ（図 2 のアンテナ 2 3 を参照）に送信される R F 信号の振幅を変化させてプラズマ出力を変化させ、それによってプラズマ密度を変化させる。図 8 A に示されるように、各イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 は、イオンが抽出されるプラズマの異なる R F 出力レベルに対応する。従って、プラズマ出力曲線 8 1 0 の部分 8 1 2 a において、R F 出力は中間出力レベルに設定され、これは、ゼロ度周辺の入射角において比較的狭い二峰性の分布により特徴付けられるイオン角度プロファイル 7 1 2 a を生成する。部分 8 1 4 a は、単一モードのイオン角度プロファイル 7 2 2 a を生成する高 R F 出力レベルに対応する。部分 8 1 6 a は、二峰性の分布の入射角が比較的幅広いイオン角度プロファイル 7 0 2 a を生成する、低 R F 出力レベルに対応する。部分 8 1 2 b、8 1 4 b 及び 8 1 6 b において、一連の中間 - 高 - 低出力レベルが繰り返される。図 8 B にさらに図示されるように、イオン暴露の

40

50

継続時間は、異なる出力レベルによって変化しうる。異なる出力レベルにおいて、相対的な暴露時間を変化させることにより、複合イオン角度プロファイルの形状がさらに調整される。換言すれば、複合イオン分布 7 3 0 は、個別イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 において重み付けされた時間平均と考えることができる。異なるイオン角度プロファイルの相対的な暴露の継続時間を変化することにより、複合分布は、より長い継続時間を有する、1 以上の個別の分布に重みづけられたものとなる。

【 0 0 4 2 】

図 8 C は、プラズマ出力曲線 8 1 0 により出力が規定されるプラズマへの暴露中に、ワークピースとプラズマとの間に印加される例示的なバイアス電圧のパルス列 8 2 0 を示す。「オン」期間 8 2 4 において、負の電圧パルス (- V) が印加され、プラズマからのイオンは、抽出プレートを通してプラズマから抽出され、バイアス電圧により規定されるエネルギーでワークピースに引き込まれる。「オフ」期間 8 2 2 において、パルス電圧はゼロであり、イオンは、ワークピースに引き込まれず、ワークピースに作用しない。その結果、イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 は、「オン」期間 8 2 4 で生成され、「オフ」期間では生成されない。

【 0 0 4 3 】

いくつかの実施形態において、異なるプラズマ出力レベル間の変位は、ワークピースへのバイアスパルスの印加と同期され、変位はパルス「オフ」期間 8 2 2 に生じる。例えば、「オフ」期間 8 2 2 の中間に対応する時間 t_1 において、中間出力レベル (部分 8 1 2 a) と高出力レベル (部分 8 1 4 a) との間で、変位が発生する。同様に、異なる RF 出力レベル間の変位に対応する時間 t_2 、 t_3 及び t_4 が示される。いくつかの実施形態において、「オン」及び「オフ」の継続期間 8 2 4 及び 8 2 2 は、それぞれ約 $10 \mu s$ から $1 ms$ である。RF 出力レベルが 1 つのレベルから他のレベルに変化したとき、約 $10 \mu s$ 程度の間で、プラズマにおける異なるプラズマ密度間の変位が実行される。従って、プラズマ出力曲線 8 1 0 とバイアス電圧パルス列 8 2 0 とを適切に同期することにより、異なるプラズマ密度 (すなわち異なるイオン角度プロファイル) 間の変位が、「オフ」期間の間に完全に実行される。この方法により、バイアス電圧パルス列 8 2 0 の「オン」期間 8 2 4 が開始される前に、各イオン角度プロファイル 7 0 2、7 1 2 及び 7 2 2 を生成する適切な出力レベルが、完全に確立され、そのため、結果として得られる複合イオン角度プロファイルの制御が容易になる。

【 0 0 4 4 】

様々な実施形態において、所定の RF 出力レベルにおける暴露の継続期間は、約数 μs から数 ms である。従って、例えば、部分 8 1 2 a、8 1 4 a 及び 8 1 6 a は、それぞれ時間間隔 3 0 0、1 0 0 及び 2 0 0 μs に対応し、8 0 2 a のような単一暴露サイクルが 6 0 0 μs 継続する。上述したように、様々な実施形態において、暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b は複数回繰り返されうる。例えば、再び図 2 を参照すると、暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b の間にワークピース 4 0 は、開口部 3 4 を介して走査され、ワークピース全体又はワークピースの大部分が、複合イオン角度プロファイル 7 3 0 に暴露される。ワークピース 4 0 が走査されている間、制御部 2 0 2 は RF 電源 2 0 に信号を送信し、出力のセットポイント (レベル) を定期的に変化させ、さらに、制御信号がバイアス電圧源 2 1 2 に送信されて、暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b を生成するプラズマ出力曲線 8 1 0 とバイアス電圧パルス列 8 2 0 とが生成される。

【 0 0 4 5 】

各暴露サイクル 8 0 2 a 及び 8 0 2 b は、数マイクロ秒又は最大約 1 0 0 ミリ秒の継続時間であるため、ワークピース 4 0 が開口部 3 4 の下で、何秒もかかる走査が行われる間に、何百又は何千回もの暴露サイクルが実行される。これにより、複合イオン角度プロファイル 7 3 0 のような複合イオン角度プロファイルに代表される効果的なイオン角度プロファイルを、ワークピースが「調査する」結果となる。例えば、ワークピースの走査速度が $1 mm/s$ であり、ワークピース 4 0 におけるイオンビームの幅が $5 mm$ であると仮定すると、ワークピース上の任意の点 R は、5 秒以内にイオンビーム 2 0 4 により走査され

る。暴露サイクル802a及び802bにおける600 μ sの継続時間の例を用いると、任意の点Rがイオンビーム204の下を横切る間に、全体で約8300回の暴露サイクル802a及び802bが、ワークピース40に供給される。従って、ワークピース40は、イオンビームの幅で、暴露サイクル802a及び802bの継続時間内（この例では1/8300）というわずかな時間で進行するため、複合イオン角度プロファイル730は、走査中にワークピース40の各部分に効率的に供給される。これは、暴露サイクル802a及び802bの暴露中にワークピースが固定される、ワークピースの固定暴露についても同様である。

【0046】

イオン注入におけるイオン角度プロファイルを処理する方法及びシステムの提供に加え、本開示の実施形態は、他の目的でワークピースを処理するために使用されるイオンビームのイオン角度プロファイルの供給、調整及び維持を行う方法及びシステムを包含する。いくつかの実施形態において、イオン角度プロファイルは、三次元表面形状を処理するように、ワークピースに供給されうる。例えば、複合イオン角度プロファイルは、他の実施形態において、基板表面上のフォトレジストレリーフ形状を処理、又は三次元レリーフ形状を部分的にアモルファス化するように供給されうる。

【0047】

本明細書に記載の方法は、例えば、命令を実行可能な機械によって読取り可能であるコンピュータ読取り可能記憶媒体に、命令のプログラムとして具体化することにより自動化できることは明らかである。かかる機械の一例は、汎用コンピュータである。本技術分野において周知の適切な記憶媒体には、読取り可能又は書込可能なCD、フラッシュメモリチップ（例えばサムドライブ）、様々な磁気記憶媒体等が含まれるが、これらに限定されない。

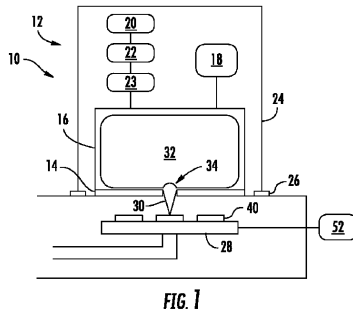
【0048】

特に、DC抽出電圧及び/又はワークピース走査速度を変化させるステップは、電子プロセッサ、コンピュータ可読メモリ、及び/又はコンピュータ可読プログラムの組合せにより、少なくとも部分的に実行されうる。コンピュータのメモリは、さらに、例えば記憶された電圧値のように、処理の履歴情報をプラズマシステムの動作と関連付けて受信し、表示し、記憶するように構成される。

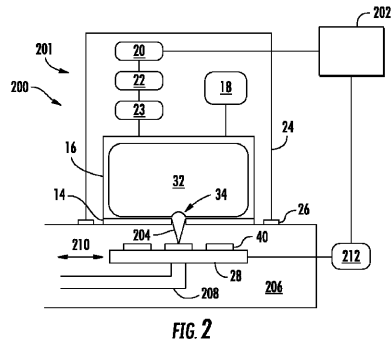
【0049】

本開示は、本明細書に記載された特定の実施形態の範囲に限定されない。実際、本技術分野の通常の知識を有するものにとって、上述の説明及び添付図面から、本明細書の記載に加えて、本開示の他の様々な実施形態及び変形形態が明らかだろう。従って、このような他の実施形態及び変形形態は、本開示の範囲内に含まれることが意図される。さらに、本開示は、本明細書において、特定の実施形態で、特定の環境下で、特定の目的のために記載されているが、本技術分野における通常の知識を有する者は、その実用性がこれらに限定されず、本開示が如何なる環境下で如何なる目的においても有益に実施できることを理解できるであろう。従って、本開示の主題は、本明細書に記載された本開示の全ての範囲及び精神を考慮して解釈されるべきである。

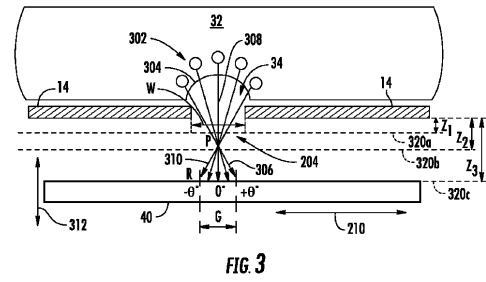
【図 1】



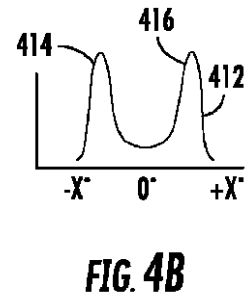
【図 2】



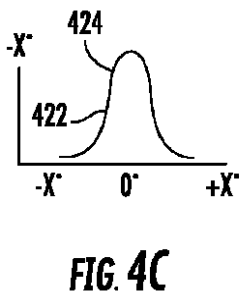
【図 3】



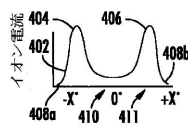
【図 4 B】



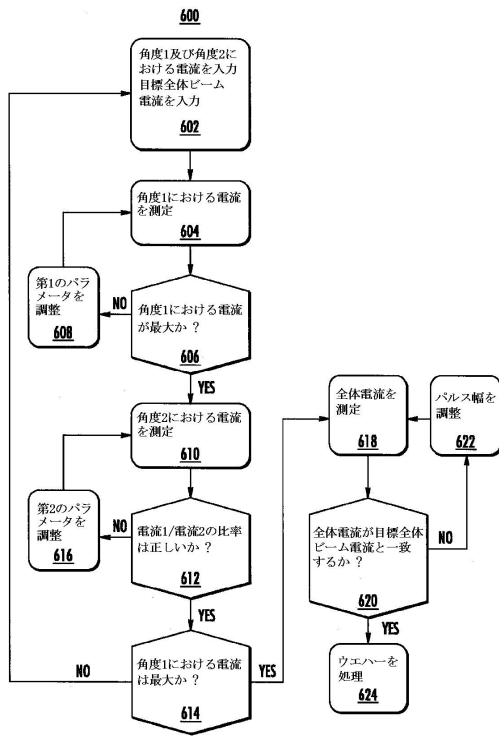
【図 4 C】



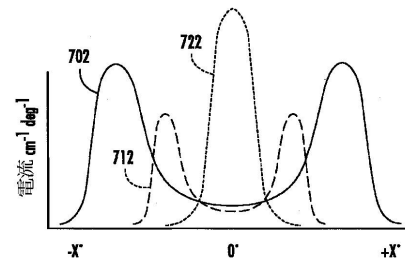
【図 4 A】



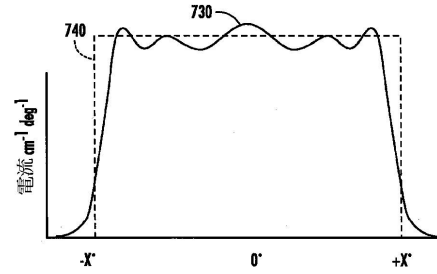
【図 6】



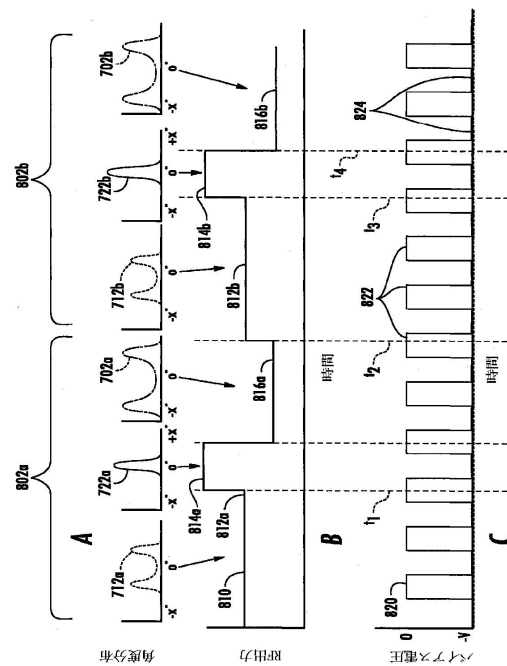
【図 7 A】



【図 7 B】



【図 8】



フロントページの続き

- (72)発明者 ティモシー ジェイ ミラー
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01930 グローチェスター ドリー ロード 35内
- (72)発明者 ルドヴィック ゴデ
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01930 グローチェスター ドリー ロード 35内

審査官 佐藤 仁美

- (56)参考文献 米国特許出願公開第2010/0252531(US, A1)
特開2006-278006(JP, A)
特表2008-539595(JP, A)
米国特許出願公開第2011/0186749(US, A1)
米国特許出願公開第2008/0132046(US, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01J 37/30 - 37/36、
H01L 21/26 - 21/268、21/322 - 21/326、
21/42 - 21/428、21/477 - 21/479