

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4675480号
(P4675480)

(45) 発行日 平成23年4月20日 (2011. 4. 20)

(24) 登録日 平成23年2月4日 (2011. 2. 4)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 L 21/304 (2006. 01)

B 2 4 B 37/04 (2006. 01)

B 2 4 B 49/16 (2006. 01)

H O 1 L 21/304 6 2 2 R

B 2 4 B 37/04 D

B 2 4 B 49/16

請求項の数 28 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2000-557181 (P2000-557181)
 (86) (22) 出願日 平成10年12月18日 (1998. 12. 18)
 (65) 公表番号 特表2002-519859 (P2002-519859A)
 (43) 公表日 平成14年7月2日 (2002. 7. 2)
 (86) 国際出願番号 PCT/US1998/026957
 (87) 国際公開番号 W02000/000873
 (87) 国際公開日 平成12年1月6日 (2000. 1. 6)
 審査請求日 平成17年12月13日 (2005. 12. 13)
 (31) 優先権主張番号 09/105, 980
 (32) 優先日 平成10年6月26日 (1998. 6. 26)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 591016172
 アドバンスド・マイクロ・デバイス・
 インコーポレイテッド
 ADVANCED MICRO DEVI
 CES INCORPORATED
 アメリカ合衆国、94088-3453
 カリフォルニア州、サニペール、ピー・
 オウ・ボックス・3453、ワン・エイ・
 エム・ディ・プレイス、メイル・ストップ
 ・68 (番地なし)
 (74) 代理人 100064746
 弁理士 深見 久郎
 (74) 代理人 100085132
 弁理士 森田 俊雄

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 多数アーム研磨ツールを制御するためのシステムおよび方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

多数のアームを有する研磨ツールを制御する方法であって、
 第1のウェハ1処理分に基づき各アームごとの第1の除去率を決定するステップと、
 アームに対するプロセスモデルに基づき各アームごとの下向き力調整入力を決定するス
 テップとを含み、プロセスモデルは、第1の除去率の各々を用いて所与のアームに対する
 除去率と、各アーム上の下向き力調整とを関連付け、さらに
 各アームごとの下向き力調整入力を研磨ツールに与え後の1処理分を研磨するステップ
 を含み、

下向き力調整入力を決定するステップは、後の1処理分に対して各アームごとの下向き
 力調整入力を決定するために、プロセスモデルを最適化方程式に組み込んで当該最適化方
 程式を使用することにより、研磨アーム間の相互作用に起因する除去率のばらつきを低減
 させる、方法。

【請求項 2】

下向き力調整入力を決定するステップは、プロセスモデルと後の1処理分に対する予測
 除去率とに基づく上記最適化方程式を最小化するステップとを含む、請求項1に記載の方
 法。

【請求項 3】

最適化方程式を最小化するステップは、後の1処理分に対する予測除去率のばらつきを
 最小化するステップを含む、請求項2に記載の方法。

10

20

【請求項 4】

予測除去率のばらつきは、1つまたは2つ以上の制約を条件として最小化される、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

制約の 1 つは、各アームごとに、下界と上界の間の下向き力調整を束縛する、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

制約の 1 つは、すべてのアームに対する下向き力調整の和が 0 であることを要求する、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 7】

各 1 処理分はウェハの 1 つまたは 2 つ以上のバッチを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

各アームごとの第 1 の除去率を決定するステップは、ウェハの多数のバッチにわたって各アームごとの個々の除去率を平均するステップを含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

各アームごとの第 1 の除去率を決定するステップはさらに、
1 処理分の各ウェハの層に関連のトポロジー因子を提供するステップと、
第 1 の除去率を決定するために各トポロジー因子を用いるステップとを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 10】

プロセスモデルは
 $R_{k+1} = R_k + K \quad F_k$ であり、
式中、 R_{k+1} は $k + 1$ の処理分に対する予測除去率を表わすベクトルであり、 R_k は k の処理分での除去率を表わすベクトルであり、 F_k は k の処理分に対する下向き力調整を表わすベクトルであり、 K はアームの除去率とアームの下向き力調整とを関連付ける係数の行列である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

多数のアームを有する研磨ツールを制御するためのコントローラであって、
第 1 のウェハ 1 処理分に基づき各アームごとの第 1 の除去率を決定するための手段と、
アームに対するプロセスモデルに基づき各アームごとに下向き力調整入力を決定する手段とを含み、プロセスモデルは、第 1 の除去率の各々を用いる所与のアームに対する除去率と、各アーム上の下向き力調整とを関連付け、さらに
各アームごとの下向き力調整入力を研磨ツールに与え、後の 1 処理分を研磨する手段を含み、

下向き力調整入力を決定する手段は、研磨アーム間の相互作用に起因する除去率のばらつきを低減させ、メモリ内にプログラムを含む、コントローラ。

【請求項 12】

下向き力調整入力を決定する手段は、プロセスモデルと後の 1 処理分に対する予測除去率とに基づく最適化方程式を最小化する手段を含む、請求項 11 に記載のコントローラ。

【請求項 13】

最適化方程式を最小化する手段は、後の 1 処理分に対する予測除去率のばらつきを最小化する手段を含む、請求項 12 に記載のコントローラ。

【請求項 14】

各アームごとの第 1 の除去率を決定する手段は、ウェハの多数のバッチにわたって各アームごとの個々の除去率を平均する手段を含む、請求項 11 に記載のコントローラ。

【請求項 15】

各アームごとの第 1 の除去率を決定する手段は、1 処理分の各ウェハの層に関連のトポロジー因子を用いて、第 1 の除去率を決定する手段をさらに含む、請求項 11 に記載のコントローラ。

【請求項 16】

10

20

30

40

50

プロセスモデルは

$$R_{k+1} = R_k + K \quad F_k \text{ であり、}$$

式中、 R_{k+1} は $k+1$ の処理分に対する予測除去率を表わすベクトルであり、 R_k は k の処理分での除去率を表わすベクトルであり、 F_k は k の処理分に対する下向き力調整を表わすベクトルであり、 K はアームの除去率とアームの下向き力調整とを関連付ける係数の行列である、請求項 1 1 に記載のコントローラ。

【請求項 1 7】

多数のアームを有する研磨ツールを制御するためのコントローラであって、

アームに対するプロセスモデルに基づき各アームごとに下向き力調整入力を決定するオブティマイザを含み、プロセスモデルは、アームに対する除去率の各々を用いて所与のアームごとの除去率と各アーム上の下向き力調整とを関連付け、さらに

各アームごとの下向き力調整入力を研磨ツールに与え、ウェハの 1 処理分を研磨するインターフェイスを含み、

オブティマイザは、研磨アーム間の相互作用に起因する除去率のばらつきを低減させ、メモリ内にプログラムを含む、コントローラ。

【請求項 1 8】

オブティマイザは、プロセスモデルと後の 1 処理分に対する予測除去率とに基づく最適化方程式を最小化することにより下向き力調整入力を決定する、請求項 1 7 に記載のコントローラ。

【請求項 1 9】

オブティマイザは、後の 1 処理分に対する予測除去率のばらつきを最小化することにより最適化方程式を最小化する、請求項 1 8 に記載のコントローラ。

【請求項 2 0】

オブティマイザは、ウェハの多数のバッチにわたって各アームごとの個々の除去率を平均することにより各アームごとの第 1 の除去率を決定する、請求項 1 7 に記載のコントローラ。

【請求項 2 1】

オブティマイザは、1 処理分の各ウェハの層に関連のトポロジ因子を用いて各アームごとの第 1 の除去率を決定する、請求項 1 7 に記載のコントローラ。

【請求項 2 2】

プロセスモデルは

$$R_{k+1} = R_k + K \quad F_k \text{ であり、}$$

式中、 R_{k+1} は $k+1$ の処理分に対する予測除去率を表わすベクトルであり、 R_k は k の処理分での除去率を表わすベクトルであり、 F_k は k の処理分に対する下向き力調整を表わすベクトルであり、 K はアームの除去率とアームの下向き力調整とを関連付ける係数の行列である、請求項 1 7 に記載のコントローラ。

【請求項 2 3】

研磨システムであって、

多数のアームを有する研磨ツールと、

研磨ツールに接続され、ウェハ上の層の研磨前および研磨後の厚みを測定するための 1 つまたは 2 つ以上の計測ツールと、

研磨ツールおよび 1 つまたは 2 つ以上の計測ツールに結合されるコントローラとをさらに含み、コントローラは、

第 1 のウェハ 1 処理分のウェハの測定された研磨前の厚みおよび研磨後の厚みを受取り、測定された研磨前および研磨後の厚みを用いて各アームごとの除去率を決定し、さらに

アームに対するプロセスモデルに基づき各アームごとの下向き力調整入力を決定し、プロセスモデルは、第 1 の除去率の各々を用いて所与のアームに対する除去率と各アーム上の下向き力調整とを関連付け、

研磨ツールに各アームごとの下向き力調整を与え、後の 1 処理分を研磨するために構成され、

10

20

30

40

50

コントローラは、下向き力調整入力を決定する際に研磨アーム間の相互作用に起因する除去率のばらつきを低減させる、研磨システム。

【請求項 2 4】

コントローラは、プロセスモデルと後の 1 処理分に対する予測除去率とに基づく最適化方程式を最小化することにより下向き力調整入力を決定する、請求項 2 3 に記載の研磨システム。

【請求項 2 5】

コントローラは、後の 1 処理分に対する予測除去率のばらつきを最小化することにより最適化方程式を最小化する、請求項 2 3 に記載の研磨システム。

【請求項 2 6】

コントローラは、ウェハの多数のバッチにわたって各アームごとの個々の除去率を平均することにより、各アームごとの第 1 の除去率を決定する、請求項 2 3 に記載の研磨システム。

【請求項 2 7】

コントローラは、1 つの 1 処理分の各ウェハの層に関連するトポロジー因子をさらに用いて、各アームごとの第 1 の除去率を決定する、請求項 2 3 に記載の研磨システム。

【請求項 2 8】

プロセスモデルは

$$R_{k+1} = R_k + K \cdot F_k \text{ であり、}$$

式中、 R_{k+1} は $k + 1$ の処理分に対する予測除去率を表わすベクトルであり、 R_k は k の処理分での除去率を表わすベクトルであり、 F_k は k の処理分に対する下向き力調整を表わすベクトルであり、 K はアームの除去率とアームの下向き力調整とを関連付ける係数の行列である、請求項 2 3 に記載の研磨システム。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の分野】

この発明は一般に半導体ウェハの平坦化に関し、より特定的には、多数のアームを有する研磨ツールを制御するためのシステムおよび方法に関する。

【0 0 0 2】

【発明の背景】

化学機械研磨 (CMP) は、半導体ウェハ上のシリコン酸化膜および他の種類の層の平坦化に対して広く用いられる手段である。化学機械研磨は典型的に、アルカリ性または酸性の溶剤中に与えられた研磨剤を用いて、機械的および化学的な作用の組合せを通じてウェハの表面を平坦化する。典型的な化学機械研磨ツールは、研磨パッドが取付けられた回転可能な円形のプラテンまたはテーブルを含み、研磨装置はパッドの上に位置決めされる。研磨装置は、1 つもしくは 2 つ以上の回転するキャリアヘッドを含み、ウェハは典型的には真空圧の使用によってそのヘッドに固定し得る。使用において、プラテンが回転し、研磨剤が研磨パッド上に与えられる。研磨剤が研磨パッドに塗布されると、回転するキャリアヘッドの各々に下向き力が加えられ、そのウェハが研磨パッド上に押付けられる。ウェハが研磨パッド上に押付けられることによってウェハの表面が機械的および化学的に研磨される。

【0 0 0 3】

半導体装置が微細化されるに従って、製造プロセスに対する化学機械平坦化の重要度は増大する。特に、ウェハ間の除去率のばらつきを制御することの重要度が増大している。除去率のばらつきは研磨される層の厚みに影響する。層の厚みのばらつきは、その後のリソグラフィのような製造ステップに悪影響を与え、装置性能を劣化させる。さらに事態を複雑なものにするのは、研磨ツールの複雑さも増大するということである。たとえば、化学機械研磨ツールは単一アーム研磨ツールから、たとえば 5 個のウェハを同時に研磨することができる多数アーム研磨ツールに移っている。多数研磨アームの使用はウェハ間の除去率のばらつきをさらにもたらし、増大する重要度と化学機械平坦化の複雑さの結果、半導

10

20

30

40

50

体製造者は化学機械研磨ツールを制御するシステムおよび方法を求めている。

【 0 0 0 4 】

【 発 明 の 概 要 】

この発明は多数のアームを有する研磨ツールを制御するためのシステムおよび方法を提供する。1つの実施例によるとこの方法は、第1のウェハ1処理分に基づく各アームごとの第1の除去率を決定するステップと、アームに対するプロセスモデルに基づいて各アームごとの下向き力調整入力を決定するステップとを含み、そのプロセスモデルは、第1の除去率の各々を用いる所与のアームに対する除去率を、各アーム上の下向き力調整に関連付け、この方法はさらに、各アームごとの下向き力調整入力を研磨ツールに与え、後の1処理分を研磨するステップを含む。こうして、この方法は、すべてのアームに対して各アームの除去率の下向き力調整への依存を考慮する。これはアーム間およびウェハ間の除去率のばらつきを減じることが可能であり、最終的に作られる半導体装置の特徴を改良する。

10

【 0 0 0 5 】

この発明の別の実施例によると、研磨システムは、多数のアームを有する研磨ツールと、研磨ツールに接続され、研磨前および研磨後のウェハ上の層の厚みを測定するための1つまたは2つ以上の計測ツールとを含む。研磨システムはさらに、研磨ツールと、1つまたは2つ以上の計測ツールとに結合されるコントローラを含む。コントローラは、第1のウェハ1処理分の測定された研磨前および研磨後の厚みを受取り、その測定された研磨前および研磨後の厚みを用いて各アームに対して除去率を決定し、アームに対するプロセスモデルに基づいて各アームごとの下向き力調整入力を決定するように構成され、そのプロセスモデルは、第1の除去率の各々を用いて所与のアームに対する除去率を各アーム上の下向き力調整に関連付け、さらにコントローラは、各アームごとの下向き力調整入力を研磨ツールに提供し後の1処理分を研磨するように構成される。

20

【 0 0 0 6 】

上述のこの発明の概要は、この発明の例示された実施例または実現化例の各々を説明することを意図しない。以下の図面および詳細な説明がこれらの実施例をより具体的に例証する。

【 0 0 0 7 】

【 詳 細 な 説 明 】

この発明は、添付の図面とともにこの発明のさまざまな実施例についての以下の詳細な説明を考慮することによって、より完全に理解されるであろう。

30

【 0 0 0 8 】

この発明はさまざまな変更および代替形に従うが、その特定のものを例として図面中に示し、以下に詳細に説明する。しかしその意図は、説明された特定の実施例にこの発明を制限することにはないことが理解されるべきである。反対にその意図は、添付の請求項によって定められるこの発明の趣旨および範囲内にあるすべての変更、同等のものおよび代替形を包含することにある。

【 0 0 0 9 】

この発明は一般的に、多数のアームを有する研磨ツールを制御するシステムおよび方法を提供する。この発明は特に、各アームによって与えられる下向き力を考慮に入れた各々のアームの除去率を制御する技法を提供する。こうして、アーム間およびウェハ間の除去率のばらつきが減じられる。この発明を制限するものではないが、以下の詳細な説明を読むことにより、この発明がより完全に理解される。

40

【 0 0 1 0 】

例示のために、図1に例示的な多数アーム研磨ツールが示される。例示的な研磨ツール100は一般的に、プラテン112上に取付けられた研磨パッド110と研磨パッド110の上方に位置決めされたマルチヘッドキャリア120とを含む。マルチヘッドキャリア120は典型的には複数の回転可能な研磨アーム122を含み、各アームがヘッド124を含む。ウェハは真空圧などの公知の技法によってキャリアヘッド124に固定し得る。研磨流体のソース（図示せず）も設けられており、研磨流体が研磨のためにパッド110に

50

供給される。研磨ツール 100 は例示のためにのみ示されることが認識されるべきである。さらに、5 アームの研磨ツールも例示のためにのみ提供される。この発明は 1 つ以上のアームを有するあらゆる多数アーム研磨ツールの制御も包含するように拡大される。

【0011】

研磨を実行するために、プラテン 112 は典型的には一定のテーブル速度で回転され、期待される除去率に基づいて予め定められた時間、下向き力が各々の研磨アームに与えられる。従来は、除去率のばらつきを制御するために、研磨された層の研磨後の厚みが測定され目標の研磨後の厚みに対して比較された。いずれかの所与のアームに対しても、測定された厚みと目標の研磨後の厚みの差が予め定められたしきい値を超えると、研磨ツールが製造から取出されアームへの下向き力が調整される。これらの調整は、一連のモニタウェ

10

【0012】

ハをツールの上に走らせ、アームに異なった下向き力を与えて個々のアームに与えられた下向き力に基づいて個々のアームの除去率を決定することにより決定される。すると、プロセスを再センタリングする試みで各々のアームへの下向き力が独立して調整される。この従来の制御プロセスはツールを数時間にわたって取除き、製作の経費を増大させる。このプロセスはさらに、所与の研磨アームの除去率に影響する顕著な要素を斟酌しない。特に、このプロセスは研磨アーム間の相互作用によってもたらされる除去率のばらつきを斟酌しない。結果として、従来の研磨技法は顕著なアーム間の除去率のばらつきを被る。例示のために、図 2 は従来の研磨技法を用いた 5 アーム研磨ツールのアームにわたる除去率のばらつきを示す例示的な図である。特定的には、図 2 はアームの除去率の範囲と標準

20

【0013】

偏差をロット番号の関数として示す。示されるように、所与のウェハロットに対して、アーム間の除去率は約 3 オングストローム / 秒の標準偏差で約 7 オングストローム / 秒までのばらつきがあり得る。研磨時間によっては、そのような除去率のばらつきは目標の研磨後の厚みから最大 20 % までばらつく研磨後の厚みを生じさせるおそれがある。この発明は、アーム間の相互作用を斟酌し、たとえばアーム間の除去率のばらつきを減じられる研磨ツール制御技法を提供する。

30

【0014】

【数 1】

$$R_j = \frac{\Delta x}{\Delta t} j = \sum_{i=1}^N K_i \Delta F_i \quad [1]$$

【0015】

式中、j は研磨アームを表わし、 Δx はアーム j のウェハ上の除去される材料の量を示し、 Δt は研磨時間を表わし、 R_j は研磨アーム j に対する除去率を表わし、 ΔF_i は研磨アーム i に対する（公称の下向き力からの）下向き力調整を表わし、 K_i は研磨アーム i（ ΔF_i ）の下向き力調整と研磨アーム j（ R_j ）に対する除去率を関連付ける研磨アーム i に対する係数である。

40

【0016】

上述の、各アーム除去率の各アームの下向き力への依存をモデルした関係は、1 つ以上のアームを有する研磨ツールの制御を支配するために用いられてもよい。多数アーム研磨ツールに対するプロセスモデルは次の偏差式で書換えられてもよい。

【0017】

50

$$R_{k+1} = R_k + K \quad F_k \quad [2]$$

式中、 R_{k+1} は $k+1$ の処理分に対する各アームでの除去率を表わすベクトルであり、ベクトル R_k は k の処理分での各アームに占める除去率を表わし、 F_k はアームに対する下向き力調整を表わし、係数行列 K は除去率変化($R_{k+1} - R_k$)と下向き力調整 F_k の関係性を定義する。下向き力調整ベクトル F_k が k の処理分で研磨ツールに入力され、 $k+1$ の処理分で加えられ、除去率ベクトル R_{k+1} を達成することは注目されるべきである。ここで用いられるように、1処理分とは、同じ下向き力調整を用いて研磨されたウェハの1つまたは2つ以上のバッチの群のことを示す。ウェハバッチという用語は研磨アームの上に積載されたウェハの1つの群を指す。ウェハバッチは製造ウェハまたは非製造ウェハを含んでもよい。上述のプロセスモデルは、すべてのアームへの下向き力調整を有利に考慮に入れて各アームに対する除去率の変化を決定し、こうして研磨アーム間の相互作用を説明する。

【0018】

図3は多数のアームを有する研磨ツールを制御するための例示的なシステムを示す。例示的なシステム300は、2つの計測ツール310および312を含み、これらはそれぞれウェハ層(例、絶縁層)の研磨前の厚みと研磨後の厚みとをそれぞれ測定する。ここには2つの計測ツールが例示されているが、単一の計測ツールを用いて研磨前および後の厚みの計測両方を行なってもよいことを認識すべきである。2つの計測ツール310および312は、研磨ツール320に結合される。多くの適用に対する好適な計測ツールは、サーマウェーブ社(Therma-Wave, Inc.)のオプティプローブ(Optiprobe)計測ツールである。このシステムはさらに、研磨ツール320に結合され、研磨ツールを制御するコントローラ330を含む。コントローラ330は一般的に、計測ツール310および312から研磨前および研磨後の厚み測定値を受取り、その厚み測定値を用いて研磨ツール320を制御する。例示的なコントローラ330は研磨ツール320への下向き力調整がいつ必要なのかを判断するための「制御不能」モジュール(00Cモジュール)332と、ツールが制御不能に動いたとき非製造ウェハ厚みのデータを用いて研磨ツール320への新しい下向き力調整を決定するオプティマイザモジュール334とを含む。コントローラは、たとえばマツラブ最適化ツールボックス(MatLab Optimization Toolbox)(登録商標)ルーチンを用いて実現されるモデル予測コントローラであってもよい。コントローラ330は、たとえばアドバンスプロセス制御骨格(Advance Process Control Framework)インターフェイスを用いて研磨ツール320とインターフェイスされてもよい。

【0019】

システム300に対する例示的なプロセスの流れを図4に示す。例示のために、この例示的なプロセスは5アーム研磨ツール320を用いて示される。ブロック402では、第1のウェハバッチ(たとえば、5アーム研磨ツールに対して5個のウェハ)が計測ツール310に与えられ、研磨されるウェハ層の研磨前の厚みが測定される。研磨前の厚みはコントローラ330に与えられ、典型的にはそこに記憶される。次いでウェハのバッチはツールの研磨アームのキャリアヘッドの上に積載され、ブロック404に示すように、ウェハバッチは各アームごとに予め定められた下向き力調整を用いて研磨される。下向き力調整はブロック412のオプティマイザモジュール334によって計算されてもよいし(後述)、はじめの1処理分については、オペレータが予め規定してもよい。研磨は典型的には、予め定められたテーブル速度と、選択された時間とによって行なわれ、その時間は、期待される除去率に基づく材料の予め定められた量の除去を規定するものである。期待される除去率はオプティマイザモジュール334によって計算されるアームに対する平均の予測除去率(例、ブロック412において)であって、研磨ツール320へ入力されてもよい。ブロック406では、ウェハバッチの研磨後の厚みが決定されコントローラ320に与えられる。

【0020】

ブロック408とブロック410では、00Cモジュール332が研磨プロセスが制御不能であるか否かを判断する。示される実施例では、これは各アームごとにアームのウェハの

10

20

30

40

50

研磨後の厚みと目標の厚みとの差を判断し、ブロック 408 に示されるように、アームに対する累積和 (CUSUM) をその差で更新することによりなされる。次いで O C C モジュール 332 は、ブロック 410 に示されるように、いずれかのアームに対する CUSUM が予め定められたしきい値を超えるか否かを判断するためにチェックする。超えていなければ、制御はブロック 402 に移り別のウェハバッチが同じ下向き力調整を用いて処理される。いずれかのアームに対する CUSUM データが予め定められたしきい値を超えれば、制御はブロック 412 に移り、オプティマイザモジュール 334 が非製造テストウェハを用いてアームに対する新しい下向き力調整 (後の製造ウェハ 1 処理分に与えられる) を決定する。各アームごとの CUSUM もまたリセットされる。後のウェハ 1 処理分に対する平均の予測除去率も新しい下向き力調整を用いて決定される。ブロック 410 の詳細は図 5 に示される。制御は次いでブロック 414 に移り、新しい下向き力調整が研磨ツール 320 に与えられる。平均の予測除去率もまた研磨ツール 320 に与えられてもよく、それによりツールは研磨時間を計算してもよい。次いでブロック 412 でオプティマイザモジュール 334 によって決定される下向き力調整によって調整される下向き力を用いて、別のウェハバッチが処理される。

【0021】

図 5 はテストウェハを用いて下向き力調整を決定するための例示的なプロセスの流れを示す。テストウェハは、たとえば、上面に比較的厚い (例、20,000 オングストローム) 酸化物のブランケット層を備えたペアシリコンウェハであってもよい。ブロック 502 では、テストウェハの 1 つまたは 2 つ以上のバッチが研磨される。ブロック 504 に示すように、各アームごとの除去率が次に決定される。これはテストウェハバッチに対する研磨前および研磨後の厚み測定値と各ウェハバッチに対する研磨時間とを用いてなされる。たとえば、所与のアームの除去率は、単にアームによって研磨されたウェハの研磨後および研磨前の厚みの差を研磨時間によって除したものであってもよい。研磨時間は研磨ツール 320 からコントローラ 320 へ与えられてもよい。多数のバッチが研磨されるとき、各アームの平均の除去率が決定される。オプティマイザモジュール 334 を用いて、ブロック 506 に示すようにアームに対する新しい下向き力調整が決定される。典型的には、オプティマイザモジュール 334 はブロック 504 で決定された除去率と、アームの除去率とアームの下向き力調整との関係とを用いて最適化方程式を解く。例示的な最適化方程式の詳細は以下に説明される。所望であれば、新しい下向き力調整はここで製造ウェハバッチを研磨するために用いられてもよい。示される実施例では、テストウェハの確認バッチが新しい下向き力調整を用いて研磨され、「制御下」状態に戻ったことを確認する。この確認は、あらゆる確認バッチウェハ層の研磨後の厚みと期待される厚みとの差が、予め定められたしきい値以下になるか否かを判断することにより行われてもよい。もしそうでなければ、制御はブロック 414 に移り、新しい下向き力調整が研磨ツール 320 に与えられ後の製造ウェハ 1 処理分を研磨する。そうでない場合は、制御はブロック 502 に戻り新しい下向き力調整を再計算する。

【0022】

上述のように、新しい下向き力調整は最適化方程式を解くことにより決定される。最適化方程式は典型的には下向き力調整と除去率とに依存する。後の 1 処理分に対する予測除去率の分散を最小化する 1 つの好適な最適化方程式は次のとおりである。

【0023】

【数 2】

$$\min J(\Delta F_k) = [R_{k+1} - \bar{R}_{k+1}]^T [R_{k+1} - R_{k+1}] \quad [3]$$

【0024】

式中、 \bar{R}_{k+1} (/ は式中文字上のバー記号を示す) は予測除去率の平均である。上述の最適化方程式 [3] は、k の処理分での除去率の平均を k + 1 の処理分に対する望ましい

10

20

30

40

50

平均除去率として用いて、研磨アームにわたる $k + 1$ の処理分に対する予測除去率のばらつきを最小化するために解かれてもよい。この発明の 1 つの実施例によると、下向き力調整はプロセスモデル [2] と動作上の制約 (Operational Constraints) を条件として最適化方程式 [3] を用いて決定される。動作上の制約は、たとえば、下向き力調整の和が 0 ($F_{k,i} = 0$) に等しく、および / または各下向き力 ($F_k = F_{nominal} + F_k$) が上界および下界 ($B_L \leq F_k \leq B_U$) によって束縛されることを要求するであろう。

【 0 0 2 5 】

プロセスモデル

$$R_{k+1} = R_k + K \cdot F_k \quad [4]$$

およびプロセス制約

$$F_{k,i} = 0$$

$$B_L \leq F_k \leq B_U \quad [5]$$

の最適化方程式 [3] への組入れと、最適化方程式 [3] の下向き力調整の意味においての特徴付けとにより、次の最適化方程式が生じる。

【 0 0 2 6 】

【 数 3 】

$$\min J(\Delta F_k) = \Delta F_k^T K^T Q K \Delta F_k + 2 \Delta F_k^T B^T Q R_k \quad [6]$$

20

【 0 0 2 7 】

以下を条件として

【 0 0 2 8 】

【 数 4 】

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \Delta F_k \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_U - F_A \\ B_U - F_B \\ B_U - F_C \\ B_U - F_D \\ B_U - F_E \\ -B_L + F_A \\ -B_L + F_B \\ -B_L + F_C \\ -B_L + F_D \\ B_L + F_E \end{bmatrix}$$

30

40

【 0 0 2 9 】

ここで

【 0 0 3 0 】

【 数 5 】

$$\Delta F_K = [\Delta F_A \ \Delta F_B \ \Delta F_C \ \Delta F_D \ \Delta F_E]^T_K$$

$$R_K = [R_A \ R_B \ R_C \ R_D \ R_E]^T_K$$

$$Q = \begin{bmatrix} .8 & -.2 & -.2 & -.2 & -.2 \\ -.2 & .8 & -.2 & -.2 & -.2 \\ -.2 & -.2 & .8 & -.2 & -.2 \\ -.2 & -.2 & -.2 & .8 & -.2 \\ -.2 & -.2 & -.2 & -.2 & .8 \end{bmatrix}$$

10

【 0 0 3 1 】

最適化方程式は次いで、予め定められた係数行列 K と k の処理分に対する除去率ベクトル (R_k) とを用いて、後の 1 処理分 ($k + 1$) に対する下向き力調整 (F_k) に対して解かれてもよい。

【 0 0 3 2 】

係数行列 K は研磨ツールと研磨される層とによって変動し得る。所与の研磨ツールに対して、テストウェハを用いて係数行列 K が決定されてもよい。たとえば、テストウェハ（たとえば、約 20, 000 オングストロームの蒸着された酸化膜を備えるベアシリコンウェハ）を用いて、研磨ツールに対する係数行列 K が試験的に決定されてもよい。これは、各研磨アームへの多様な下向き力調整によっていくつかのテストウェハバッチを研磨し、公知の技法を用いて下向き力調整の関数としてアームの除去率を決定することによりなされてもよい。1つの好適な技法は、マットラブ (MatLab) (登録商標) システム識別ツールボックスに提供される、外生入力による自己回帰モデリング関数 (arx) を用いることを含む。

20

【 0 0 3 3 】

図 6 は、従来のコントローラ技法と比較した、図 3 から図 5 に示される制御システムおよび制御プロセスの性能利益を示す例示的なグラフを示す。特定的には、図 6 は、図 3 から図 5 に示される制御システムおよび制御プロセスを用いるときに、従来のコントローラ技法と比較して、除去率のばらつきの範囲と標準偏差が減少することを示す。見られるように、上述の制御システムおよび制御プロセスは、各試行ごとに除去率の範囲と標準偏差の両方を減じる。結果はプロセス中の大きな自然のばらつきにより変動したが、各試行において改良が見られた。13回の試行を通して、範囲と標準偏差の両方に 42% の平均減少が見られたものもある。

30

【 0 0 3 4 】

図 7 は、多数のアームを有する研磨ツールを制御するための別の例示的なシステムを示す。例示的なシステム 700 は、テストウェハデータよりも製造ウェハデータを有利に用いて、研磨ツールの各アームへの下向き力調整を制御する。システム 700 は、研磨ツール 720 に結合される 2 つの計測ツール 710 と 712 とを含み、それぞれ研磨前の厚みと研磨後の厚みを測定する。システム 700 はさらにコントローラ 730 を含み、コントローラ 730 は研磨ツール 720 に結合され、製造ウェハの厚みのデータに基づき研磨ツールを制御する。コントローラ 730 は一般的に、計測ツール 710 および 712 から製造ウェハの研磨前および研磨後の厚みの測定値を受取り、これらの厚みの測定値を用いて研磨ツール 720 を制御する。例示的なコントローラ 730 は、ツール 720 の上の研磨アームの下向き力をいつ調整するのか決定するためのゲーティングモジュール 732 と、オプティマイザモジュール 734 とを含んでもよく、オプティマイザモジュール 734 はゲーティングモジュールから許可されたとき、製造ウェハの厚みのデータに基づき処理ツール 720 に対する下向き力調整を決定する。コントローラ 720 は、たとえば、マットラ

40

50

最適化ツールボックス (MatLab Optimization Toolbox) (登録商標) ルーチンおよびアドバンスプロセス制御骨格 (Advance Process Control Framework) インターフェイスを用いて実現される、たとえばモデル予測コントローラであってもよい。

【0035】

システム700に対する例示的なプロセスの流れを図8に示す。例示のためにのみ、このプロセスの流れもまた5アーム研磨ツール720を参照して説明される。ブロック802では、第1のウェハバッチ（たとえば、5アーム研磨ツールに対して5個のウェハ）の各ウェハ層に対するトポロジ因子がコントローラ730に与えられる。トポロジ因子は、以下に説明されるように、ウェハの各層に関連の予め定められた因子であり、テストウェハと比較して各ウェハ層に対する異なる係数行列Kを考慮したものである。ブロック802では、第1のウェハバッチが計測ツール610に与えられ、磨かれるべきウェハ層の研磨前の厚みを測定する。研磨前の厚みはコントローラ730に与えられる。ウェハのバッチは次いでツールの研磨アームのキャリアヘッドの上に積載され、ブロック806に示すように、ウェハは各アームへの下向き力調整を用いて研磨される。下向き力調整はブロック814でオプティマイザモジュール734によって計算されてもよいし（後述）、またははじめの1処理分については、たとえばオペレータが予め規定してもよい。研磨は典型的には、予め定められたテーブル速度と、選択された時間とによって行なわれ、時間は、期待される除去率に基づき材料の予め定められた量の除去を規定する。期待される除去率はオプティマイザモジュール734（例、ブロック814において）によって計算される平均の予測除去率であって、研磨ツール720へ入力されてもよい。

【0036】

ブロック808で、ウェハバッチの研磨後の厚みが判断されコントローラ720に与えられる。研磨前および研磨後の厚みのデータを用いて、ゲーティングモジュール722は、ブロック810に示されるように、各アームに対する累積和 (CUSUM) チャートを更新する。CUSUMチャートは各アームごとにアームによって磨かれたウェハの研磨後の厚みと目標の厚みの差を判断し、この差をアームに対するCUSUMチャートに加することにより更新される。次いでゲーティングモジュールは、ブロック812に示されるように、いずれかのアームに対するCUSUMチャートが、予め定められたしきい値を超えるか否か判断するためにチェックする。超えていなければ、制御はブロック802に移り別のウェハバッチが同じ下向き力調整入力を用いて処理される。いずれかのアームに対するCUSUMチャートが予め定められたしきい値を超えれば、制御はブロック814に移り、オプティマイザモジュール734が製造ウェハのトポロジ因子と、研磨前および研磨後の製造ウェハの厚みのデータとを用いて、アームに対する新しい下向き力調整を決定する。各アームごとのCUSUMチャートもまたリセットされる。典型的には、オプティマイザモジュール734は最適化方程式（製造ウェハに対するプロセスモデルに基づく）を、アームの除去率および、アームの除去率と下向き力調整との関係を用いて解く。アームの除去率は、たとえば上述のように、製造ウェハに対する研磨前および研磨後の厚みのデータと研磨時間とを用いて決定されてもよい。1処理分の間多数のバッチが研磨される場合、アームに対する平均の除去率が用いられてもよい。例示的な最適化方程式の詳細は以下に説明される。制御は次いでブロック816に移り、下向き力調整入力は研磨ツール720に与えられる。次の1処理分に対する平均予測除去率は、研磨ツールが研磨時間を計算できるよう提供されてもよい。次いで別の1処理分が新しい下向き力調整入力によって調整される下向き力を用いて処理される。

【0037】

製造ウェハデータを用いて研磨ツールを制御するためのプロセスモデルは、磨かれる各ウェハ層が独自の係数行列Kに関連するという事実により、複雑である。製造中に発見される異なった係数行列に対処するために、製造ウェハの除去率とテストまたはブランケットウェハ（たとえば酸化物のブランケット層を備えるペアシリコンウェハ）の除去率との関係は次の関係によりモデルされる。

【0038】

$$R_{product} = T_f^* R_{blanket} \quad [7]$$

式中、 T_f は所与のウェハ層とウェハに関連のトポロジ因子である。各ウェハの各層に対するトポロジ因子 T_f は、制御システムを実現化する前に実験的に決定されてもよい。上述のトポロジモデル[7]を用いて、制御システムに好適なプロセスモデルは以下であってよい。

【0039】

$$R_{blanket,k+1} = R_{blanket,k} + K F_k \quad [8]$$

$$R_{product} = T_f^* R_{blanket}$$

このプロセスモデルを用いて、下向き力調整と除去率とに依存する最適化方程式が決定されてもよい。1つの好適な方程式は、コントローラによって用いられてもよく、ロット $k+1$ での予測除去率の分散を最小化し、次のように表わされる。

【0040】

【数6】

$$\min J(\Delta F_k) = [R_{blanket,k+1} - \bar{R}_{blanket,k+1}]^T [R_{blanket,k+1} - \bar{R}_{blanket,k+1}] \quad [9]$$

【0041】

式中、 $\bar{R}_{blanket,k+1}$ は $k+1$ の処理分での予測されるブランケット除去率の平均である。上述の最適化方程式[9]は k の処理分での除去率の平均を $k+1$ の処理分に対する望ましい平均除去率として用いて、研磨アームにわたる $k+1$ の処理分に対する予測除去率のばらつきを最小化するために解かれてもよい。この発明の1つの実施例によると、下向き力調整はプロセスモデル[8]と、($F_{k,i} = 0$)および($B_L F_k B_U$)のような動作上の制約とを条件として最適化方程式[9]を用いて決定される。

【0042】

プロセスモデル

$$R_{blanket,k+1} = R_{blanket,k} + K F_k$$

$$R_{product} = T_f^* R_{blanket} \quad [10]$$

およびプロセス制約

$$F_{k,i} = 0 \quad [11]$$

$$B_L F_k B_U \quad [12]$$

の組入れ、および下向き力調整の意味においての最適化方程式[9]の特徴付けにより、次の最適化方程式が生じる。

【0043】

【数7】

$$\min J(\Delta F_k) = \Delta F_k^T K^T Q K \Delta F_{k+2} + \Delta F_k^T B^T Q R_{blanket,k}$$

【0044】

以下を条件として

【0045】

【数8】

10

20

30

40

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \Delta F_k \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_U - F_A \\ B_U - F_B \\ B_U - F_C \\ B_U - F_D \\ B_U - F_E \\ -B_L + F_A \\ -B_L + F_B \\ -B_L + F_C \\ -B_L + F_D \\ B_L + F_E \end{bmatrix} \quad 10$$

【 0 0 4 6 】

ここで

【 0 0 4 7 】

【 数 9 】

$$\Delta F_K = [\Delta F_A \ \Delta F_B \ \Delta F_C \ \Delta F_D \ \Delta F_E]_K^T$$

$$R_K = [R_A \ R_B \ R_C \ R_D \ R_E]_K^T$$

$$Q = \begin{bmatrix} .8 & -.2 & -.2 & -.2 & -.2 \\ -.2 & .8 & -.2 & -.2 & -.2 \\ -.2 & -.2 & .8 & -.2 & -.2 \\ -.2 & -.2 & -.2 & .8 & -.2 \\ -.2 & -.2 & -.2 & -.2 & .8 \end{bmatrix} \quad 30$$

【 0 0 4 8 】

最適化関数は、予め定められた係数行列 K （例、ブランケットテストウェハに対する）と k の処理分（ R_k ）でのブランケット除去率とを用いて後の 1 処理分（ $k + 1$ ）に対する下向き力調整（ F_k ）に対するオプティマイザモジュール 7 3 4 によって解かれてもよい。

【 0 0 4 9 】

他の実施例では、コントローラ 7 3 0 はフィルタを用いてノイズの影響を減じる。フィルタを組入れた例示的なプロセスモデルは以下であってもよい。

【 0 0 5 0 】

【 数 1 0 】

$$\hat{R}_{\text{blanket}, k+1} = \hat{R}_{\text{blanket}, k} + K \Delta F_k + \lambda [R_{\text{product}} - T_f^* \hat{R}_{\text{blanket}, k}]$$

$$R_{\text{product}} = T_f^* R_{\text{blanket}} \quad [14]$$

【0051】

式中 α はシステムの中のノイズを拒絶するフィルタパラメータである。パラメータ α は0から1の幅があり、プロセスの分散を考慮して典型的に選択される。モデル剰余に高い相関のあるシステムのためには、 α のより大きな値（例、0.7から1.0）が典型的に用いられる。自然分散が剰余間の相関を支配するシステムでは、 α のより小さな値（例、0.1から0.3）が典型的に用いられる。上述のプロセスモデルを用いて、適切な最適化方程式が決定され、研磨アームの下向き力調整を制御するために適用されてもよい。

【0052】

上述の制御システムを用いて、多数アーム研磨ツールの研磨アーム間の相互作用が考慮され、従来の研磨ツール制御技法に比較して、アーム間の除去率のばらつきが減じられる。さらに、研磨を制御するために製造ウェハデータに依拠することにより、上述のシステムはより効果的な研磨プロセスを提供し、ウェハのスループットを改良する。ゲーティングモジュールの使用は制御システムにデットバンドを加え、研磨ツールの制御をさらに強化する。しかしながら、所望であれば、ゲーティングモジュールは省かれてもよい。

10

【0053】

上述のとおり、この発明は複数のアームを有するあらゆる研磨ツールの制御にも適用可能である。したがってこの発明は上述の特定の例に制限されるものと考えられるべきではなく、むしろ添付の請求項に正確に述べられるとおり、この発明のすべての局面に当てはまるものと理解されるべきである。この発明を適用可能なさまざまな変更形、同等のプロセス、および多くの構造はこの明細書の概説によって当業者に明らかとなるであろう。請求項はこうした変更形および装置にあてはまることが意図される。

20

【図面の簡単な説明】

【図1】 従来の多数の研磨アームを有する研磨ツールの図である。

【図2】 従来の研磨技法を用いるアーム間の除去率のばらつきを示すグラフ図である。

【図3】 この発明の1つの実施例に従った例示的な研磨システムを示す図である。

【図4】 この発明の1つの実施例に従った研磨ツールを制御するための例示的なプロセスのフローチャートである。

【図5】 この発明の他の実施例に従った研磨ツールを制御するための例示的なプロセスを示すフローチャートである。

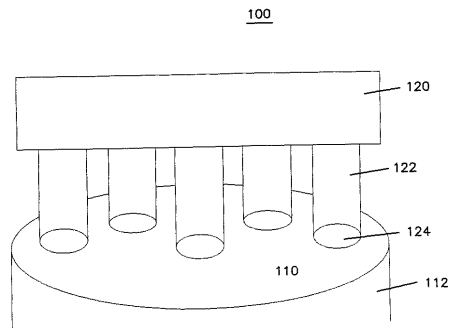
【図6】 例示的な制御システムの性能利益を示す図である。

30

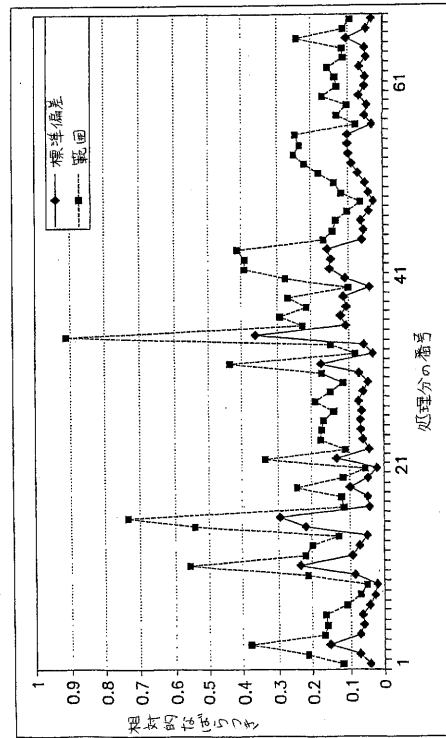
【図7】 この発明のさらに他の実施例に従った例示的な研磨システムを示す図である。

【図8】 この発明のさらに他の実施例に従った研磨ツールを制御するための例示的なプロセスを示すフローチャートである。

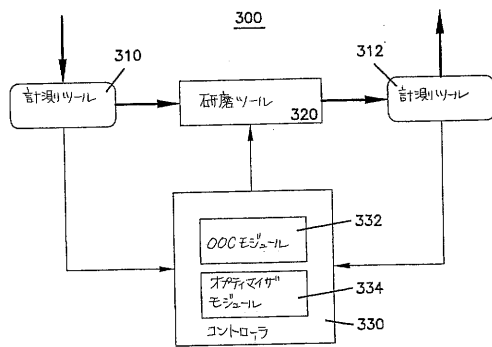
【図 1】
FIG. 1



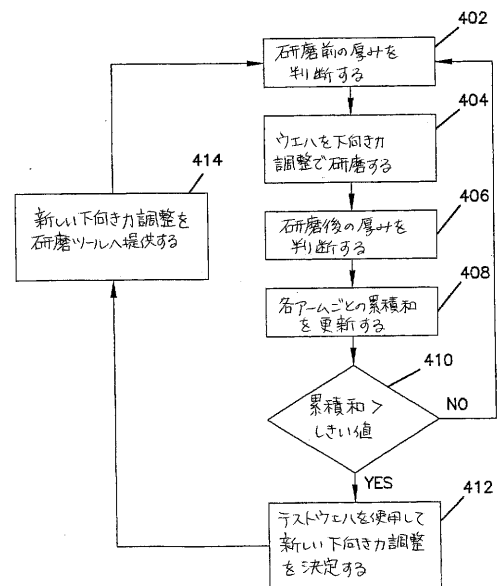
【図 2】



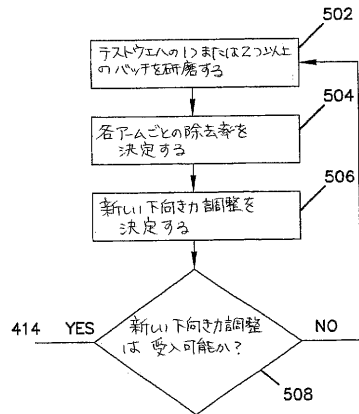
【図 3】



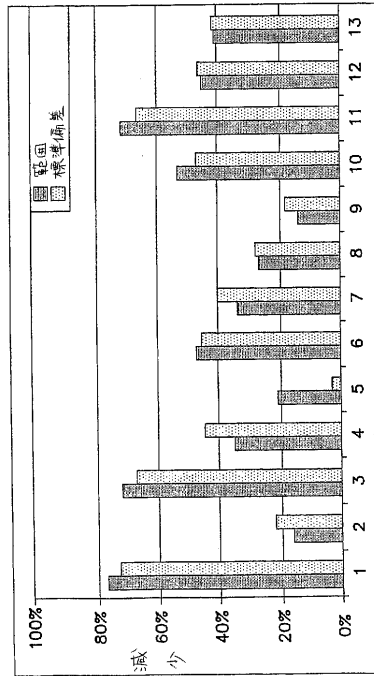
【図 4】



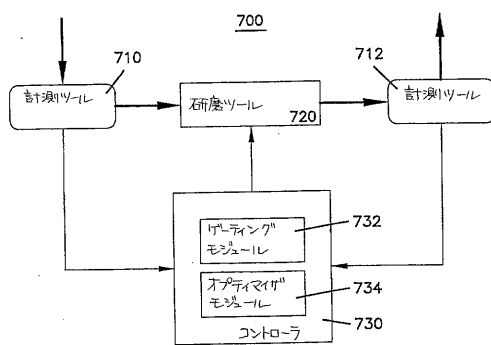
【図 5】



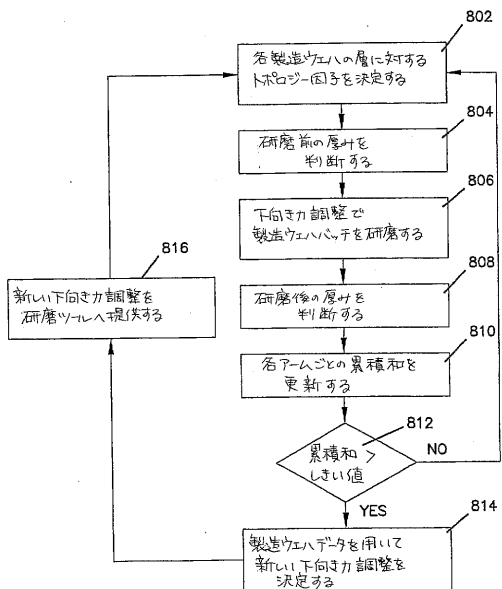
【図 6】



【図 7】



【図 8】



フロントページの続き

- (74)代理人 100083703
弁理士 仲村 義平
- (74)代理人 100091409
弁理士 伊藤 英彦
- (74)代理人 100096781
弁理士 堀井 豊
- (74)代理人 100096792
弁理士 森下 八郎
- (72)発明者 キャンベル, ウィリアム・ジェイ
アメリカ合衆国、 7 8 7 2 9 テキサス州、 オースティン、 ベアトラップ・レーン、 1 2 4 0 7
- (72)発明者 レダー, クリストファー・エイチ
アメリカ合衆国、 7 8 7 3 5 テキサス州、 オースティン、 イーグル・フェザー・ドライブ、 4 6
0 4
- (72)発明者 ミラー, マイケル・エル
アメリカ合衆国、 7 8 6 1 3 テキサス州、 セダー・パーク、 リトル・エルム・トレイル、 2 6 1
4

審査官 松本 公一

- (56)参考文献 特開平 0 6 - 2 5 2 1 1 3 (J P , A)
特開平 0 8 - 0 3 9 4 2 2 (J P , A)
特開平 0 9 - 0 3 6 0 7 0 (J P , A)
特開平 0 9 - 1 7 4 4 3 0 (J P , A)
特開平 0 9 - 3 2 3 2 6 1 (J P , A)
特開平 1 0 - 0 4 4 0 2 8 (J P , A)
特開平 1 0 - 0 7 1 5 6 2 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H01L 21/304

B24B 37/00 - 37/04