

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-502174  
(P2005-502174A)

(43) 公表日 平成17年1月20日(2005.1.20)

(51) Int.C1. <sup>7</sup>	F 1	テーマコード (参考)	
HO 1 J 37/317	HO 1 J 37/317	C	5 C O 3 O
HO 1 J 37/04	HO 1 J 37/04	A	5 C O 3 4
HO 1 L 21/265	HO 1 L 21/265	6 O 3 B	
// HO 1 J 37/304	HO 1 J 37/304		

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 106 頁)

(21) 出願番号	特願2003-525879 (P2003-525879)	(71) 出願人	500324750 バリアン・セミコンダクター・エクイップ 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 O, グロスター, ドリー・ロード3 5
(86) (22) 出願日	平成14年7月10日 (2002. 7. 10)	(74) 代理人	100069899 弁理士 竹内 澄夫
(85) 翻訳文提出日	平成16年3月1日 (2004. 3. 1)	(74) 代理人	100096725 弁理士 堀 明▲ひこ▼
(86) 國際出願番号	PCT/US2002/021751	(72) 発明者	サリバン、テレンス・ショーン アメリカ合衆国マサチューセッツ州O 2 4 4 5、ブルックライン、サイプレス2 6 0
(87) 國際公開番号	W02003/021630		
(87) 國際公開日	平成15年3月13日 (2003. 3. 13)		
(31) 優先権主張番号	09/943, 625		
(32) 優先日	平成13年8月30日 (2001. 8. 30)		
(33) 優先権主張國	米国 (US)		
(81) 指定国	EP (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), CN, JP, K R		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】イオン注入器を調整する方法および装置

## (57) 【要約】

【解決手段】イオン注入器のような荷電粒子ビームシステムを自動的に調整する方法および装置が提供される。一実施例では、ターゲット要素の下流に位置する制御要素の制御パラメータが変調され、ターゲット要素の下流のビーム電流が測定される。ビーム電流の測定は、調整を評価するため、そして必要であればターゲット要素を調節するために使用される情報を提供する。ターゲット要素は典型的に磁石のような応答の遅い要素である。他の実施例では、調整の評価はターゲットパラメータを変調し、ビーム電流におけるこのような変調の効果をモニターすることにより実施される。他の実施例では、荷電粒子ビームのスポットの寸法は開口の縁を横切るビームを検知し、ビームの焦点の鮮明さを評価することにより評価される。調整アルゴリズムは好適に、高速の動作に対して局所電源インターフェースで実行される。

**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

荷電粒子がターゲット要素を通過して運ばれる荷電粒子ビームシステムのターゲット要素のターゲットパラメータの調整を評価する方法であって、

(a) ターゲット要素の下流に位置する制御要素の制御パラメータであって、前記制御要素に所定の関係をもつところの制御パラメータを変化させる工程と、

(b) 前記制御パラメータが変化したとき、前記荷電粒子ビームの前記ターゲット要素の下流のビーム電流を測定する工程と、

(c) ビーム電流の測定およびターゲット要素と制御パラメータとの間の所定の関係に基づいて前記ターゲットパラメータの調整を評価する工程と、  
10  
を含む方法。

**【請求項 2】**

前記ターゲットパラメータの調整を評価する工程は、ビーム電流が、前記制御パラメータがその初期の値であるときに、観測された最大のビーム電流の、少なくとも所定の部分であるかどうかを決定することを含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 3】**

さらに、所定のボーティング基準に達するまで、全ての工程を二回以上繰り返す工程を含む、請求項 2 に記載の方法。

**【請求項 4】**

所定のボーティング基準は、少なくとも所定の数の繰り返しで、観測された最大のビーム電流の所定の部分を越えるビーム電流からなる、請求項 3 に記載の方法。  
20

**【請求項 5】**

前記ターゲットパラメータの調整の評価工程は、前記制御パラメータがその初期値の上にずれているか、またはその初期値の下にずれているのかどうかを決定することを含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 6】**

前記ターゲットパラメータの調整の評価工程は、ビーム電流の測定および前記ターゲット要素と前記制御パラメータの間の所定の関係に基づき、前記ターゲットパラメータから下流で測定されて最大のビーム電流となるよりも高い値または低い値に前記ターゲットパラメータが調整されたかどうかを決定することを含む、請求項 1 に記載の方法。  
30

**【請求項 7】**

さらに、前記ターゲットパラメータの調整の評価に基づいて前記ターゲットパラメータを調整する工程を含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 8】**

さらに、測定したビーム電流が所定の基準を満たすまで、全ての工程を二度以上繰り返しことを含む、請求項 7 に記載の方法。

**【請求項 9】**

前記制御パラメータの変化の大きさは、繰り返しの間、前の繰り返しのときよりも小さい、請求項 8 に記載の方法。

**【請求項 10】**

前記所定の基準は、前記制御パラメータがその初期の値であるとき観測された最大のビーム電流の、少なくとも所定の一部であるビーム電流からなる、請求項 8 に記載の方法。  
40

**【請求項 11】**

前記ターゲットパラメータを調節する工程は、ターゲットパラメータの調節を決定するためにビーム電流の測定値を分析する工程、および、決定されたターゲットパラメータの調節により前記ターゲットパラメータを調節する工程を含む、請求項 7 に記載の方法。

**【請求項 12】**

前記ビーム電流の測定値を分析する工程は、前記制御パラメータの必要な値に、ピークビーム電流をシフトするために、ターゲットパラメータの調節方向および大きさを決定する工程を含む、請求項 11 に記載の方法。  
50

**【請求項 1 3】**

前記ターゲット要素は、電流に応答して磁場を形成する磁石からなり、前記ターゲットパラメータは前記磁石に適用される近似的な電流からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 1 4】**

制御要素は、制御電圧に応答して電場を形成する静電要素からなり、制御パラメータを変化させる工程は制御電圧を変化させる工程からなる、請求項 1 3 に記載の方法。

**【請求項 1 5】**

前記制御パラメータは前記磁石への、荷電粒子ビームの近似的な入射角度からなる、請求項 1 3 に記載の方法。

**【請求項 1 6】**

前記制御パラメータは前記磁石への、荷電粒子ビームの近似的な入射速度からなる、請求項 1 3 に記載の方法。

**【請求項 1 7】**

前記ターゲット要素は質量分析器の曲げ磁石からなる、請求項 1 3 に記載の方法。

**【請求項 1 8】**

前記ターゲット要素は電荷状態分離磁石からなる、請求項 1 3 に記載の方法。

**【請求項 1 9】**

前記ターゲット要素は、前記ビームの軌道をほぼ平行な軌道に収束する平行化磁石からなる、請求項 1 3 に記載の方法。

**【請求項 2 0】**

前記ターゲット要素は電圧に応答して、電場を形成する静電要素からなり、前記ターゲットパラメータは前記静電要素に適用される近似的な電圧からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 2 1】**

前記制御パラメータは前記制御要素に供給される電源出力のおおよその値からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 2 2】**

さらに、前記制御パラメータの変化の間、前記電源の出力の値を測定する工程を含む、請求項 2 1 に記載の方法。

**【請求項 2 3】**

さらに、少なくとも観測されたピークビーム電流の所定の部分、少なくとも前記ビーム電流のひとつの測定とほぼ同時に記録された前記制御パラメータリードバック値の、少なくともひとつの測定からなるセットの最大の構成要素により境界をもつ値の範囲内で、前記電源の二次的な値を決定する工程を含む、請求項 2 2 に記載の方法。

**【請求項 2 4】**

さらに、前記制御パラメータの変化を開始する前に公称制御パラメータのリードバック値を読み出す工程、前記電源の第二の値と前記公称制御パラメータのリードバック値との間の符号付きの違いの所定の関数により、前記ターゲットパラメータをその初期値から調節する工程を含む、請求項 2 3 に記載の方法。

**【請求項 2 5】**

前記制御パラメータを変える工程は、周期的な波形で制御パラメータを変調する工程を含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 2 6】**

前記制御パラメータを変える工程は、個別の値の所定のパターンを通して、制御パラメータを段々と変える工程を含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 2 7】**

前記制御パラメータが前記制御要素に与えられる電源出力の近似的な値からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 2 8】**

前記制御パラメータを変える工程は、各設定に応答して前記電源出力が安定化するよりも

10

20

30

40

50

急速に個別の値の所定のパターンを通して、制御パラメータを段々と変える工程を含む、請求項 27 に記載の方法。

**【請求項 29】**

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲット要素の下流に位置するファラデービーム検知器でビーム電流を測定する工程からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 30】**

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲット要素の下流に位置するパラメトリック電流変成器でビーム電流を測定する工程からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 31】**

ビーム電流を測定する工程は、前記制御パラメータの異なる値に対して、ビーム電流のサンプルを測定する工程からなる、請求項 1 に記載の方法。 10

**【請求項 32】**

さらに、前記制御パラメータをその初期値の戻す工程を含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 33】**

前記制御パラメータは、前記ターゲット要素が調節に応じるよりも急速に調節に応答する、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 34】**

前記ターゲットパラメータを評価する工程は、測定されたビーム電流の波形について、フーリエ分析を実行する工程を含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 35】**

前記荷電粒子ビームシステムはイオン注入器からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 36】**

前記荷電粒子ビームシステムは粒子加速器からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 37】**

前記荷電粒子ビームシステムは質量分析器からなる、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 38】**

荷電粒子がターゲット要素を通過して運ばれる荷電粒子ビームシステムのターゲット要素のターゲットパラメータを調整する方法であって、

(a) 公称ターゲットパラメータ値を決定する工程と、

(b) 前記ターゲットパラメータの公称リードバック値を測定する工程と、 30

(c) 前記公称ターゲットパラメータ値について、所定のパターンで前記ターゲットパラメータを変化させる工程と、

(d) 前記荷電粒子ビームシステムの前記ターゲット要素の下流のビーム電流、および前記電源出力のターゲットパラメータリードバック値を、前記ターゲットパラメータが変化したときに、測定する工程と、

(e) 少なくとも観測されたピークビーム電流の所定の部分、少なくとも前記ビーム電流のひとつの測定とほぼ同時に記録された前記ターゲットパラメータリードバック値の、少なくともひとつの測定からなるセットの最大の構成要素により境界をもつ値の範囲内で、最適なリードバック値を決定する工程と、

(f) 前記公称リードバック値と前記最適なリードバック値との間の符号付きの違いの所定の関数により、公称ターゲットパラメータを調節する工程と、 40

(g) 前記ビーム電流の測定値が所定の基準を満たすまで、少なくとも、工程 (b) (c)

(d) および (e) の二度以上の繰り返しを行う工程と、

を含む方法。

**【請求項 39】**

前記ターゲットパラメータの変化の大きさは、繰り返しの間、前の繰り返しのときと等しいかまたはより小さい、請求項 38 に記載の方法。

**【請求項 40】**

前記所定の基準は、前記最適なリードバック値と前記公称リードバック値との間の違い絶対値の大きさが、所定の閾値よりも小さいときに、少なくとも、観測された最大のビーム 50

電流の所定の部分である、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 4 1】

前記ターゲット要素は、電圧に応答して電場を形成する静電要素からなり、前記ターゲットパラメータは前記静電要素に適用される近似的な電圧からなる、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 4 2】

前記ターゲットパラメータを変化する工程は、周期的な波形でターゲットパラメータを変調する工程を含む、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 4 3】

前記ターゲットパラメータを変える工程は、一連の個別の値を通して、ターゲットパラメータを段々と変える工程を含む、請求項 3 8 に記載の方法。 10

【請求項 4 4】

前記ターゲットパラメータが前記ターゲット要素に与えられる電源出力の近似的な値からなる、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 4 5】

前記ターゲットパラメータを変える工程は、各設定に応答して前記電源出力が安定化するよりも急速に、一連の個別の値の所定値を通して、ターゲットパラメータを段々と変える工程からなる、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 4 6】

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲット要素の下流に位置するファラデービーム検知器でビーム電流を測定する工程からなる、請求項 3 8 に記載の方法。 20

【請求項 4 7】

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲット要素の下流に位置するパラメトリック電流変成器でビーム電流を測定する工程からなる、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 4 8】

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲットパラメータの異なる値に対して、ビーム電流のサンプルを測定する工程からなる、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 4 9】

前記ターゲットパラメータを評価する工程は、測定されたビーム電流の波形について、フーリエ分析を実行する工程を含む、請求項 3 8 に記載の方法。 30

【請求項 5 0】

前記荷電粒子ビームシステムはイオン注入器からなる、請求項 3 8 記載の方法。

【請求項 5 1】

前記荷電粒子ビームシステムは粒子加速器からなる、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 5 2】

前記荷電粒子ビームシステムは質量分析器からなる、請求項 3 8 に記載の方法。

【請求項 5 3】

荷電粒子がターゲット要素を通過して運ばれ、ターゲットパラメータが前記荷電粒子ビームの下流の焦点をおおむね決定し、前記ターゲットパラメータが、前記荷電粒子ビームシステム内で前記ターゲット要素から下流に位置するビーム電流検知装置の面において、前記荷電粒子ビームの位置を近似的に決定するところの、荷電粒子ビームシステムのターゲット要素のターゲットパラメータの調整を評価する方法であって、 40

(a) 公称ターゲットパラメータ値を決定する工程と、

(b) 前記荷電粒子ビームが交互に、前記ビーム電流検知装置に入射するように、または入射しないように、前記公称制御パラメータ値について所定のパターンで前記ターゲットパラメータを変化させる工程と、

(c) 前記ターゲットパラメータが変化したとき、ビーム電流を前記ビーム電流検知装置で測定する工程と、

(d) 前記荷電粒子ビームが、前記ビーム電流検知装置に入射することと入射しないこととの間の遷移のシャープ性を決定する工程と、

(e) 少なくとも部分的に前記シャープ性に基づいて、前記ターゲットパラメータの調整を評価する工程と、  
を含む方法。

【請求項 5 4】

シャープ性を決定する工程は、前記荷電粒子ビームが前記ビーム電流検知装置の縁にわたって通過したとき、前記ターゲットパラメータの関数として、ビーム電流の導関数を決定することを含む、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 5 5】

前記ターゲットパラメータの調整を評価する工程は、少なくとも前記シャープ性および観測された最大のビーム電流を入力することで、所定の関数を評価する工程を含む、請求項 5 3 に記載の方法。  
10

【請求項 5 6】

前記ターゲット要素が所定の基準を満たすまで、少なくとも工程 (b)、(c)、(d) および (e) の二度以上の繰り返しを行う工程を含む、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 5 7】

前記制御パラメータの変化の大きさは、繰り返しの間、前の繰り返しのときと等しいかまたはより小さい、請求項 5 6 に記載の方法。

【請求項 5 8】

前記所定の基準は、前記最適なリードバック値と前記公称リードバック値との間の違いの絶対的な大きさが、所定の閾値よりも小さいときに、少なくとも、観測された最大のビーム電流の所定の部分である、請求項 5 6 に記載の方法。  
20

【請求項 5 9】

前記ターゲット要素は、電圧に応答して電場を形成する静電要素からなり、前記ターゲットパラメータは前記静電要素に適用される近似的な電圧からなる、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 6 0】

前記ターゲットパラメータを変化する工程は、周期的な波形でターゲットパラメータを変調する工程を含む、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 6 1】

前記ターゲットパラメータを変える工程は、一連の個別の値を通して、ターゲットパラメータを段々と変える工程を含む、請求項 5 3 に記載の方法。  
30

【請求項 6 2】

前記ターゲットパラメータを変える工程は、各設定に応答して前記電源出力が安定化するよりも急速に、一連の個別の値の所定値を通して、ターゲットパラメータを段々と変える工程からなる、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 6 3】

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲット要素の下流に位置するファラデービーム検出器でビーム電流を測定する工程からなる、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 6 4】

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲット要素の下流に位置するパラメトリック電流変成器でビーム電流を測定する工程からなる、請求項 5 3 に記載の方法。  
40

【請求項 6 5】

ビーム電流を測定する工程は、前記ターゲットパラメータの異なる値に対して、ビーム電流のサンプルを測定する工程からなる、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 6 6】

前記荷電粒子ビームシステムはイオン注入器からなる、請求項 5 3 記載の方法。

【請求項 6 7】

前記荷電粒子ビームシステムは粒子加速器からなる、請求項 5 3 に記載の方法。

【請求項 6 8】

荷電粒子がターゲット要素を通過して運ばれる荷電粒子ビームシステムのターゲット要素  
50

のターゲットパラメータの調整を評価する装置であって、

(a) ターゲット要素の下流に位置する制御要素の制御パラメータであって、前記制御要素に所定の関係をもつところの制御パラメータを変化させる手段と、

(b) 前記制御パラメータが変化したとき、前記荷電粒子ビームの前記ターゲット要素の下流のビーム電流を測定する手段と、

(c) ビーム電流の測定およびターゲット要素と制御パラメータとの間の所定の関係に基づいて前記ターゲットパラメータの調節を評価する手段と、  
を含む装置。

#### 【請求項 6 9】

荷電粒子ビーム装置であって、

ターゲットパラメータにより制御されるターゲット要素と、

制御パラメータにより制御され、ターゲット要素の下流に位置する制御要素と、

制御要素およびターゲット要素を通過して運ばれる荷電粒子ビームを検知するための、ターゲット要素の下流に位置するビーム検出器と、

制御パラメータを変化するため、およびターゲット要素と制御パラメータとの間の所定の関係に基づいてビーム検出器から受信したビーム電流の測定に応答してターゲットパラメータの調整を評価するための制御器と、

を含む装置。

#### 【請求項 7 0】

荷電粒子ビームシステムであって、

荷電粒子が運ばれて通過する、ひとつ以上のビームライン要素と、

該システムを制御する中央制御器と、

前記中央制御器からの調整命令に応答して、前記ひとつ以上のビームライン要素のうちの選択されたひとつを自動的に調整するための、調整アルゴリズムを含む、少なくともひとつの局所制御器と、

を含む装置。

#### 【請求項 7 1】

荷電粒子ビームの焦点を調節する方法であって、

(a) 開口の縁を横切る荷電粒子を偏向する工程と、

(b) ビームが開口の縁を横切って偏向したときに、開口の下流のビーム電流の変化割合を決定する工程と、

(c) 荷電粒子ビームの異なる焦点設定のために、工程 (a) および (b) を繰り返す工程と、

(d) ビームが開口の縁を横切って偏向したとき、開口の下流のビーム電流の変化の最も高い割合を与える焦点設定を選択する工程と、

を含む方法。

#### 【請求項 7 2】

荷電粒子ビームが運ばれて通過する複数のビームライン要素、中央制御器、および前記ビームライン要素のそれぞれを制御するひとつ以上の電源制御器を含む荷電粒子ビームシステムにおいて、

前記中央制御器が前記電源の制御器のうち選択された一つに調整命令を送り、

前記選択された電源制御器が調整命令に応答して調整アルゴリズムを自動的に実行すること含む、調整方法。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0 0 0 1】

本発明は、荷電粒子ビームシステムに関し、特に、イオン注入器に限定はされないがこれを含む荷電粒子ビームシステムを調整する方法および装置に関する。

#### 【背景技術】

#### 【0 0 0 2】

10

20

30

40

50

イオン注入は、半導体ウエアに電気伝導性を変える不純物を導入する標準的な技術である。従来技術のイオン注入では、所望の不純物がイオン源でイオン化され、イオンは所期のエネルギーをもつイオンビームを形成するために加速され、イオンビームはウエハの表面に向けられる。イオンビーム中のエネルギーをもつイオンは半導体材料のバルク内に侵入し、半導体材料の結晶格子内に埋め込まれ、所望の伝導性の領域を形成する。

#### 【特許文献 1】

国際公開第02/23586号パンフレット

#### 【0003】

イオン注入に関連した半導体製造プロセスには、ウエハに注入される累積的なイオンドーズ量、注入の深さ、ウエハの表面にわたるドーズ量の一様性、表面のダメージ、および不所望の汚染に関する、厳格な条件が課せられる。注入されたドーズ量および深さは、注入された領域の電気的な活性を決定するとともに、半導体ウエハ上のすべてのデバイスが特定の制限内で、動作特性をもつことを確実にするために、ドーズ量の一様性が要求される。

#### 【0004】

半導体ウエハ上にデバイスを形成するために、しばしば不純物を異なる深さに注入する必要がある。ビーム中のイオンのエネルギーは、イオンが半導体の格子に留まる前に、半導体ウエハの内で進行する深さを決定するものである。特定のデバイスのためのレシピは、異なる種類、異なるエネルギーおよび異なるドーズ量を使用して、いくつかのイオン注入を行う工程を必要としている。イオンビームのひとつ以上のパラメータが変化するごとに、たとえばイオンビームのエネルギーが変化すると、ビームを運ぶこと、ウエハに移送することを最適にするために、イオン注入器を調整することが必要となる。

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0005】

従来技術のイオン注入器を調整することは、比較的時間を消費するプロセスである。最初に、イオン注入器の動作を制御するコンピュータが、新しいビームのプロファイルと関連した一般的な調整パラメータを取り出し、これらパラメータをイオン注入器に適用するために、プログラムされる。イオン注入器の種々の要素に、特定のビームレシピに対して近似的な値に関する一般的な調整パラメータが与えられると、操作者は調整プロセスを完了するために設定を最適化する。イオン注入器がウエハにイオンを注入するために使用できるように、ビームを受け入れ可能なレベルに手動で調整するには、経験のある操作者でも50分から30分の時間を要する。大きな磁気要素のような、イオン注入器のひとつ以上の要素が比較的長い安定時間をもつこともあり、また履歴を示すこともあるという事実から、このような比較的長い調整時間が少なくとも必要となる。自動調整(autotune)技術が利用されてきた。しかし、従来技術の自動調整技術は、手動調整技術よりも遅い。従前のイオン注入器の調整は、したがって、時間を浪費する。イオン注入器が、調整されるまで、ウエハにイオンを注入するための使用ができないことから、調整プロセスはイオン注入のスループットの増加を妨げている。

#### 【0006】

さらに、従前の調整手順は、磁石により形成される磁場の強度の正確な知識を必要とする。高感度のガウスプローブを従前のイオン注入の調整プロセスに使用することができるが、残念なことに、高感度のガウスプローブは典型的には、何万ドルと非常に高価なものである。したがって、これらガウスプローブの使用に代え、安価な低感度のガウスプローブを使用できることが望ましい。

#### 【0007】

このように、イオン注入に限定はされないが、これを含む荷電粒子ビームシステムを調整する改良された方法および装置について需要がある。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0008】

10

20

30

40

50

本発明は、荷電粒子ビームシステムのひとつ以上の要素を自動的に調整する方法および装置を提供し、これによりシステムの調整時間を減少させ、調整プロセスにおいて少なくとも部分的に熟練者を必要することがなくなり、上記欠点を解消する。

#### 【0009】

本発明の第一の態様にしたがって、本方法は、荷電粒子ビームシステム（荷電粒子がターゲット要素へと運ばれる）のターゲット要素のターゲットパラメータの調整を評価する。本方法は、（a）ターゲット要素（制御パラメータがターゲット要素と所定の関係を有する）の上流に位置する制御要素の制御パラメータを変える工程、（b）制御パラメータが変わったときにターゲット要素の下流のビーム電流を測定する工程、ならびに（c）ビーム電流の測定に基づいてターゲットパラメータの調整およびターゲット要素と制御パラメータとの間の所定の関係を評価する工程を含む。評価された調整が所定の基準を満たさないときは、ターゲットパラメータは調節される。好適実施例では、荷電粒子ビームシステムはイオン注入器からなる。10

#### 【0010】

ターゲット要素は、磁石電流に応答して磁場を形成する磁石を含む。ターゲット要素を調節する工程は磁石電流を調節することを含み得る。制御要素は、制御電圧に応答して電場を形成する静電要素を含み得る。制御要素は、荷電粒子ビームのエネルギーを変化させてよく、またターゲットへの荷電粒子ビームの入力角度を変化させてもよい。制御パラメータを変化させる工程は、制御電圧を変化させることを含み得る。ターゲット要素は典型的に、応答が遅い要素である。20

#### 【0011】

ターゲットパラメータの調整を評価する工程は、ターゲットパラメータの調節を決定するために、ビーム電流測定を分析することを含み得る。ターゲットパラメータは、決定したターゲットパラメータ調節により調節してもよい。ビーム電流測定を分析する工程は、制御パラメータの必要な値へと、ピークビーム電流をシフトするために、ターゲットパラメータの調節方向および大きさを決定することを含み得る。

#### 【0012】

本方法はさらに、測定ビーム電流が所定の基準を満たすまで、ターゲットパラメータの調節が続く、工程（a）、（b）および（c）の一回以上の繰り返しを実行する工程を含み得る。30

#### 【0013】

本発明の他の態様にしたがって、荷電粒子ビームシステム（荷電粒子ビームがターゲット要素に運ばれる）のターゲット要素のターゲットパラメータを調整する方法が提供される。本方法は、（a）公称ターゲットパラメータ値（ターゲットパラメータはターゲット要素に与えられた電源出力の近似的な値を含む）を決定する工程、（b）電源出力の公称リードバック値を測定する工程、（c）公称ターゲットパラメータ値についての所定のパターンで、ターゲットパラメータを変化させる工程、（d）ターゲット要素が変化したときに、電源出力のターゲットパラメータリードバック値、および荷電粒子ビームシステムのターゲット要素の下流のビーム電流を測定する工程、（e）少なくとも観測されたピークビーム電流の所定の部分、少なくともビーム電流のひとつの測定とほぼ同時に記録されたターゲットパラメータリードバック値の、少なくともひとつの測定からなるセットの最大の構成要素により境界をもつ値の範囲内で、最適なリードバック値を決定する工程と、（f）公称リードバック値と最適なリードバック値との間の、符号付き違いの予め定められた関数により、公称ターゲットパラメータ値を調節する工程、ならびに（g）ビーム電流が所定の基準値を満たすまで、少なくとも工程（b）、（c）、（d）および（e）の二つ以上の繰り返しを実行する工程とを含む。40

#### 【0014】

さらに、本発明の他の態様にしたがって、荷電粒子ビームシステムにおいて、ターゲット要素のターゲットパラメータの調整を評価する方法が提供されるが、ここで、荷電粒子ビームはターゲット要素を通過し、ターゲットパラメータは荷電粒子ビームの下流の近似的50

な焦点を決定する。本方法は、(a)公称ターゲットパラメータ値(ここで、ターゲットパラメータはターゲット要素の下流に位置するビーム電流検知装置の面における、荷電粒子ビームの近似的な位置を決定する)を決定する工程、(b)荷電粒子ビームが交互に、電流検知装置上に入射したり、入射しないように、公称制御パラメータ値について、所定のパターンでターゲットパラメータを変化させる工程、(c)ターゲットパラメータが変化したとき、ビーム電流検知装置でビーム電流を測定する工程、(d)ビーム電流検知装置上への荷電粒子ビームの入射と、入射しないこととの間の遷移のシャープ性を決定する工程、および(e)少なくとも部分的に遷移のシャープ性に基づいてターゲットパラメータの調整を評価する工程を含む。

## 【0015】

10

本発明の他の態様にしたがって、荷電粒子ビームシステム(荷電粒子ビームがターゲット要素を通じて運ばれる)において、ターゲット要素のターゲットパラメータの調整を評価する装置が提供される。本装置は、ターゲット要素の下流に位置する制御要素の制御パラメータを変化させる手段(制御パラメータはターゲット要素と所定の関連をもつ)、制御パラメータが変化したとき、ターゲット要素の下流のビーム電流を測定する手段、およびビーム電流測定およびターゲット要素と制御パラメータとの間の所定関係に基づいてターゲットパラメータの調整を評価する手段を含む。

## 【0016】

20

本発明の他の態様にしたがって、荷電粒子ビーム装置が提供される。荷電粒子ビーム装置は、ターゲットパラメータにより制御されるターゲット要素、制御パラメータにより制御され、ターゲット要素の下流に位置する制御要素、制御要素およびターゲット要素を通じて運ばれる荷電粒子ビームを検知する、ターゲット要素の下流に位置するビーム検知器、および制御パラメータを変化させ、ターゲット要素と制御パラメータとの間の所定の関係に基づいて、ビーム検知器から受信するビーム電流測定値に応答して、ターゲットパラメータの調整を評価する制御器を含む。

## 【0017】

30

本発明の他の態様にしたがって、荷電粒子ビームシステムが提供される。荷電粒子ビームシステムは、荷電粒子ビームが運ばれて通るひとつ以上のビームライン要素、システムを制御する中央制御器、および中央制御器からの調整命令に応じて、ビームライン要素の選択されたひとつを自動的に調整する調整アルゴリズムを含む、少なくともひとつの局所制御器を含む。

## 【0018】

40

本発明の他の態様にしたがって、荷電粒子ビームの焦点を調節する方法が提供される。本方法は、(a)開口のエッジを横切って荷電粒子ビームを偏向する工程、(b)ビームが開口のエッジを横切って偏向されたとき開口の下流のビーム電流の変化の割合を決定する工程、(c)荷電粒子ビームの焦点を種々に設定するために、工程(a)および(b)を繰り返す工程、および(d)ビームが開口のエッジを横切って偏向したときに開口の下流におけるビーム電流の変化が最も高い割合となるように、焦点設定を選択する工程を含む。

## 【0019】

本発明の他の態様にしたがって、荷電粒子ビームが運ばれて通る複数のビームライン要素、集中制御器、ビームライン要素の個々を制御する、ひとつ以上の電源制御器を含む荷電粒子ビームシステムのための調整方法が提供される。本方法の工程は、中央制御器が電源インターフェースの選択されたひとつに調整命令を送ること、選択された電源の制御器が自動的に、調整命令に応じて調整アルゴリズムを実行することを含む。

## 【0020】

本発明は添付図面に関連した以下の詳細な説明に基づき理解されよう。図面は、同じまたは同様の要素には同じ符号が付されている。明確化の目的で、全ての要素に符号が付されてはいない。

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【0021】

50

本発明は、イオン注入器に限定するものではないが、荷電粒子ビームの自動調整の方法および装置を提供する。イオン種および/またはイオンエネルギーのような、イオン注入器により生成されるイオンビームのパラメータが変化するときに、調整が必要となる。さらに、ドリフトおよびイオンビームに影響を与える他の変化を補償するために、動作中、或る間隔で調整が必要となる。本発明は、従来技術の手動および自動調整技術と比較して高速で調整する方法および装置を提供する。本発明は特に、磁気要素のような応答の遅い要素（応答の遅い要素に限定されないが）に対して有用である。本発明の実施に適したイオン注入が下述される。しかし、本発明はどのイオン注入器にも適用でき、特に、荷電粒子加速器または質量スペクトロメータといった、どの荷電粒子ビームシステムにも適用できる。

10

#### 【 0 0 2 2 】

図1に示されているように、イン注入器10がイオン源12を含む。イオン源12からのイオンが、正のイオンビーム14を形成するために、抽出電圧の適用により加速される。この段階でのイオンビームはイオン化されたイオン源材料の多数の成分および多数の同位体を含む。特定の同位体が質量分析器16により選択される。そして、イオンビーム14は低エネルギー磁気四重極子18（加速器20に入射する前に、ビームの焦点が合わされ集中化される）で調整される。イオンビーム14は加速器20により所望のエネルギーへと加速される。

#### 【 0 0 2 3 】

イオンビーム14が加速器20から出た後、ビーム14を走査器24へとその入口に集束する高エネルギー磁気四重極子22により調整される。高エネルギー磁気四重極子22を通ったビーム14は、不所望の電荷状態をもつイオンを除去するための電荷状態分離磁石23を通って、走査器24に至る。走査器24はエンドステーション28にあるウエハ27の表面にわたってビームを走査する。平行化磁石26はエンドステーション28内のウエハ27上へのビームの入射前に、ビームを平行化して、ビーム14がウエハ27の表面にわたって一定の角度で入射することを確実にするためのものである。可動なファラデーカップは、イオンビーム14の調整を容易にするために、ビーム経路にそって設けられる。

20

#### 【 0 0 2 4 】

##### 制御システム

イオン注入器の各要素12、16、18、20、22、24、26を制御するために、制御システム29が与えられている。図2に示されているように、制御システム29は中央制御器30およびひとつ以上の分散した電源インターフェースを含む。中央制御器30は、動作電圧および電流のような一般的パラメータをこれらの要素に対して設定するため、そしてイオンビームを最適化すべく個々の要素を調整するために分散電源インターフェースと関連して使用される。

30

#### 【 0 0 2 5 】

一実施例では、中央制御器30は、イオン注入器の使用者からの入力を受信し、イオン注入器を調整するように構成されたコンピュータシステムのハードウェア、ファームウェアおよびソフトウェア要素の組み合わせである。コンピュータシステムは、この例では、イオン注入器が、所望のビームパラメータを入力すること以外、使用者により重大な介入なく、所望のビームプロファイルを自動的に生成できるように、構成されている。本発明は、開示の実施例に限定されず、制御システムの特定の条件、イオン注入器の要素の物理的な相互関係、および使用されるコンピュータ設備のタイプに依存して種々の形態をとることができる。たとえば、制御システムは、任意に（必須ではないが）、個々のウエハを追跡すること、注入走査の間ウエハに適用されたドーズ量のレベルを規定することといった付加的な機能、イオン注入器に関連した制御システムによって共通に達成される他の機能を実行してもよい。

40

#### 【 0 0 2 6 】

適した制御システムの例のブロック図が図2に示されている。イオン注入器制御システム29は中央制御器30、およびイオン注入器の個々の要素または要素群と関連した電源インターフェースを含む。中央制御器30は、第一の直列リンク32および第二の直接リンク33によ

50

り、質量分析電源インターフェース34、低エネルギー四重極子電源インターフェース36、高エネルギー四重極子電源インターフェース38および磁石電源インターフェース40に接続されている。直列リンク32および33は電源インターフェースにループとなって接続する。制御システム29は、直列リンク32および33の破線部分により示されたような付加的な電源インターフェースを含んでもよい。電源インターフェースに反対向きになって接続された二つの直列リンクは、冗長性のために利用される。直列リンク32および33は光ファイバー通信であってもよく、従来から知られているように、SDLC直列プロトコルを利用してよい。電源インターフェース34 - 40は下述するように、イオン注入器の個々の要素および中央制御器30と通信する。

#### 【0027】

異なる制御システムのアーキテクチャが利用できることは理解されよう。たとえば、直列リンク32および33は、光または電気信号を使用することができる。さらに、直列リンク32および33は、パラレルバスまたは他の適切な通信技術で置き換えることもできる。中央制御器30はループ構成によるほか、電源インターフェースのそれぞれと個々に直接接続されてもよい。

#### 【0028】

制御システムの機能は種々の方法で分化されてもよい。好適な実施例では、電源インターフェース34 - 40は下述するように調整アルゴリズムを実行する十分な能力をもつ。このアーキテクチャは、中央制御器30と個々の電源インターフェースとの比較的頻繁な通信の調整速度を高めるという利点をもつ。他のアーキテクチャでは、電源インターフェースの機能のほとんど、またはすべては中央制御器30に組み込まれる。このアプローチは中央制御器30を複雑にするという欠点がある。

#### 【0029】

中央制御器30はマイクロプロセッサ、RAM、ROM、ディスク・ストレージのようなメモリーデバイス、ユーザーインターフェースおよび電源インターフェース34 - 40と通信する通信ポートを含む汎用性コンピュータであってもよい。ユーザーインターフェースは従来から知られているビデオモニター、キーボード、およびポインティングデバイスを含んでもよい。コンピュータシステムはまた、特別にプログラムされた、特別なハードウェア、アプリケーション専用集積回路またはハードウェハ要素、ソフトウェア要素の組み合わせで実施されてもよい。

#### 【0030】

質量分析器の電源インターフェース34の実施例のブロック図が図3に示されている。汎用性ハードウェアの構成が利用されてもよく、電源インターフェース36 - 40は同じハードウェア構成をもってもよい。電源インターフェース34はバス156により相互接続されたプロセッサ(CPU)150、ランダム・アクセス・メモリー(RAM)152およびリード・オンリー・メモリー(ROM)154を含む。中央制御インターフェース160は、直列リンク32, 33とバス156との間のインターフェースを備える。アナログ・デジタルコンバーター162がイオン注入器の要素からのアナログ入力を受信し、対応するデジタル信号をバス156に与える。デジタル・アナログコンバータ164がバス156上のデジタル信号を受信し、イオン注入器の要素にアナログ出力を与える。バス156に接続されたデジタルI/Oインターフェース166がイオン注入器からのデジタル入力をイオン注入器に与える。電源インターフェースは種々の動作、設定および診断機能を実行し、特に下述される調整アルゴリズムを実行するようにプログラムされている。電源インターフェースは図3の実施例に限定されず、汎用性および特定の目的のプロセッサ構成が本発明の範囲内で利用することができることは理解されよう。

#### 【0031】

##### 制御プロセス

図2のイオン注入器制御システムにより実施される制御プロセスの例が図4に示されている。一実施例では、プロセス工程のひとつのサブセットが中央制御器30により実施され、プロセス工程の他のサブセットが電源インターフェース34 - 40により実施される。図示の

10

20

30

40

50

実施例では、中央制御器30と電源インターフェース34-40との間の制御プロセスをこのように分離することで、付加的なタスクを開始するために、中央制御器30が都合よく機能できるようになる。さらに、この構成により、中央制御器30は、要素の局所的なサブグループにわたっての制御を、電源インターフェースに任せることができ、これによりコンピュータに必要な多数の通信チャネルを最少にすることができる。さらにまた、電源インターフェース34-40の制御機能の一部を電源インターフェース34-40にもたせることにより、イオン注入器調整速度は、従来技術のイオン注入器アーキテクチャ（ここでは、コンピュータは、10Hzから20Hzのオーダーの割合で、電源インターフェースからの更新を受信）と比較して増加する。図4に図示の実施例では、工程200-216および220-224は中央制御器30で実行され、工程226-238はひとつ以上の電源インターフェース34-40で実行される。しかし、本発明はこの例に限定されず、中央制御器30と電源インターフェース34-40との間の制御プロセスでどのような便利な分離も使用するがことができる。実際、本発明はこのようにして制御プロセスの分離を利用するシステムに限定されず、必要であれば、中央制御器30は制御プロセスの全工程を実行するように構成してもよい。各電源インターフェースにより手順を実行するためのプロセスは、下述される。

#### 【0032】

図4に示されている実施例では、中央制御器30は最初に工程200で待機する。中央制御器30は、イオン注入器10により形成される所望のビームプロファイルに関する工程208で、ユーザーからの入力を受信したとき、中央制御器30は工程210で所望のビームプロファイルに対応するデータベースから情報を検索する。中央制御器30はつぎに、ビームを確立するために工程212で電源インターフェース34-40へと、最初のパラメータ値を出力し、工程214および216で、調整命令を電源インターフェースに送ることにより、関連した要素を調整するように、第一の電源インターフェース34に指示する。中央制御器30が、工程218で、電源インターフェース34-40のひとつからの、電源インターフェースがイオン注入10のそれぞれの要素を調整したことを示す応答を受信したとき、中央制御器30は、全電源インターフェースが工程220でそれぞれの要素を調整したかどうかを決定するために、確認する。全ての要素が工程222で調整していないならば、中央制御器30は工程214および216で、電源インターフェース34-40のつぎの一つに、調整命令を送る。全ての要素が調整したとき、中央制御器30は工程224に戻り、工程200で付加的な入力を待つ。イオン注入器が典型的にイオン源で開始し、ウエハへと下流にむかって機能しながら調整される。しかし、本発明はこのことに限定されない。

#### 【0033】

イオン注入器10の操作者は任意に、このプロセスの間、ひとつ以上の間隔で更新されてもよい。好適に、イオン注入器10の操作者は、イオン注入器が調整したときに、少なくとも工程224で知らせを受ける。

#### 【0034】

工程216で、調整命令を受けると、個々の電源インターフェースは、工程226で制御する注入器10の要素のひとつ以上に、最初の制御電圧を出力する。要素の調整を起こすことができるよう、電源インターフェースはまた、下述するように工程216で制御要素に、変調信号を出力する。変調信号は、イオンビームでのターゲット要素の影響をモニターする目的で、制御要素の動作電圧または電流のような制御パラメータを変調するために使用され、これにより、ターゲット要素に影響を与えるターゲットパラメータをどのように調節するかが決定される。

#### 【0035】

最初の制御電圧の設定後に、電源インターフェースは制御パラメータを変調し、変調の間、ビーム電流または対象の他のビームパラメータを表わすリードバック信号を工程228で受信する。電源インターフェースは、ターゲット要素が十分に調整されているかどうか、そして工程230でターゲット要素の調整を改善するために、ターゲットパラメータの交代がありそうかどうかを決定するために、リードバック信号を使用する。ターゲット要素が十分に調整されたかどうかの決定は下述する。リードバック信号はイオンビームにおける

10

20

30

40

50

変調信号の効果を反映することから、電源インターフェースは、イオン注入器10の動作を信号値の範囲にわたってモニターし、ターゲットパラメータがそこからターゲット要素の調整を達成するために調節されるべき方向を演繹する。

#### 【0036】

工程232でターゲット要素が十分に調整されないと、電源インターフェースは工程234で、新しいターゲットパラメータを出力する。新しいターゲットパラメータは、今のターゲットパラメータから、固定または可変の量を加えまたは引くといった、適切なアルゴリズムを使用して計算することができる。加え、また引く量が変化すると、特定の量は、たとえば、電源インターフェースにより、下述する効果的な方法で、ターゲットパラメータを最良の値に集束させる、内挿アルゴリズム、積分アルゴリズム、または他のアルゴリズムを使用して、決定してもよい。

10

#### 【0037】

ターゲットパラメータが工程234で出力されると、電源インターフェースは工程228でリードバック信号を受信し、再度工程230で要素が十分に調整されているかを決定する。電源インターフェースは、下述するようにターゲット要素が工程236で十分に調整されたかどうかを決定するまで、工程228, 230、232および234の調整プロセスを繰り返す。電源インターフェースは、調整手順を完了すると、工程238で変調信号を終了し、工程218で中央制御器30に調整応答を出力する。電源インターフェースがひとつ以上の要素、または対象の要素のひとつ以上のパラメータの調整を担当してもよく、この場合、電源インターフェースは、調整すべき各要素またはパラメータに対して、工程228, 230、232および234の調整プロセスを実行する。

20

#### 【0038】

##### 調整プロセス

調整プロセスの一つの目的は、イオン注入器のビームラインを通して、所望の種のイオンビーム電流を最大にすることである。質量分析器16および平行化磁石26のような磁気的な要素に対して、従来技術の調整プロセスは典型的に、数値範囲にわって磁石の電流を変化させること、ビーム電流をモニターすることに関する。磁石電流は、最大のビーム電流を生成した値に設定された。しかし、イオン注入器や荷電粒子ビームシステムに使用される磁気的要素は典型的に大きく、本質的に磁石電流の変化に対する応答が遅いものである。したがって、調整プロセスは本質的に遅い。

30

#### 【0039】

図5に示されているように、調整プロセスの速度は、本発明の態様にしたがい、制御要素300の制御パラメータを変調し、制御要素の下流のイオンビームにおける効果を測定することにより、従来技術の調整プロセスに比べ増加する。変調は、事実上、数値範囲にわたって、連続的にまたは段階的に、制御パラメータの走引を行う。変調は、たとえば、周期的な波形、または分離した値の連続であってもよい。ターゲット要素310は典型的に、制御要素300とターゲット要素310との間の特定の関係から、制御パラメータが変化し、または変調されたとき、イオンビームに可変な効果を及ぼす。

30

#### 【0040】

図5において、ターゲット要素310は調整を必要とする要素であり、制御要素300はターゲット要素310の調整を支援するために使用される。イオンビーム電流は、たとえば、ターゲット要素310の下流に位置するファラデービーム検知器のようなビーム検知器312により測定されてもよい。制御パラメータおよびターゲットパラメータは電源インターフェース314により生成され、ビーム検知器312からのビーム電流リードバックは電源インターフェース314によりモニターされる。

40

#### 【0041】

ターゲット要素310の下流のイオンビームにおける、変調された制御パラメータの効果は、ターゲット要素310のターゲットパラメータの調節の必要性を評価するために使用される。ターゲット要素310の調整の評価が誤りの調整状態を示す場合、ターゲットパラメータは、調整を改良するために調節することができる。典型的に、ターゲット要素310は磁

50

気要素のように、応答の遅い要素であり、制御パラメータ300は、静電ビーム加速器または静電ビーム偏光器のような、応答の早い要素である。調整手順は、制御要素300とターゲット要素310との間の既知の関係、およびターゲット要素310の下流のイオンビーム電流がターゲットパラメータおよび制御パラメータの両方の関数であることに基づく。

#### 【0042】

上述したように、イオンビーム電流はファラデービーム検出器によりモニターすることができる。他の実施例では、イオンビーム電流は、ピアソンコイルのような検知コイルによりモニターすることができる。ある実施例では、イオンビーム電流は、Bergozから入手可能な変調パラメトリック電流変圧器によりモニターすることができる。一般的に、イオンビーム電流を検知することができるどのデバイスも利用できる。

10

#### 【0043】

電源インターフェース314は調整アルゴリズムにしたがって、制御パラメータを調整し、ビーム電流のリードバックに応答してターゲットパラメータの調整を評価する。誤った調整状態が観測されると、ターゲットパラメータは調節される。電源インターフェース314は中央制御器から調整命令を受信し、その調整命令に応答して、自動的に、調整アルゴリズムを実行する。

#### 【0044】

図5の実施例では、「画像化」法として参照される調整方法が、ターゲット要素310およびターゲット要素310の下流に位置する制御要素300を使用する。他の実施例では、「サーチ」法として参照される調整方法が、別個の制御要素を使用せず、調整の評価が、ターゲットパラメータを変調し、ターゲット要素の下流のイオンビーム電流におけるこの変調の効果をモニターすることによりなされる。他の実施例では、イオンビームのスポットの大きさは、開口のエッジを横切ってビームを走査し、ビームの焦点の鮮明さを評価することにより、評価される。

20

#### 【0045】

ターゲット要素310のような、ビームライン要素に関し、ターゲット要素に対するターゲットパラメータをビーム電流に関連付ける関数F1がある。この関数は、X軸がターゲットパラメータで、Y軸がビーム電流のグラフで示すことができる。正しい調整が、最大のビーム電流に対応するとき（最もよいビームライン要素に対して正しい）、調整手順の目的は、このグラフに全体的なピークを位置づけ、最大のビーム電流を達成するために調節することである。

30

#### 【0046】

多くの場合、制御要素300のような、第二の要素がターゲット要素310と特別な関係をもつ。特に、システムがある状態にあるとき、ターゲット要素310のターゲットパラメータを値Aに調節し、または制御要素300の制御パラメータを値Bに調節することにより、ビームに同じ変化を生じさせることが可能となる。このことは、制御要素300の制御パラメータを調節することが、ターゲット要素310のターゲットパラメータを調節することよりも容易であるとき、同様の調整情報がどちらかのパラメータを調節することにより得られることがから、有用である。数学的には、このことは、ターゲット装置310のターゲットパラメータおよび制御要素300の制御パラメータに関連する伝達関数Tとして示され、制御要素300の制御パラメータを値Bに調節することが、ターゲット要素310のターゲットパラメータを値Aに調節することと同じ電流値をもたらす。実際に、ターゲット要素310に対する可能な設定の範囲は、制御要素300に対する可能なセットの範囲にある。このことは、ターゲット要素310のターゲットパラメータの正しい設定に関する情報が、制御要素300の制御パラメータを変えることにより得られることを意味する。

40

#### 【0047】

都合のよいことに、伝達関数Tが単調関数であるときには、伝達関数Tの正確な形を知る必要がない。特に、相関関係は、ターゲット要素310と制御要素300との間の方向性の相互関係が知られている限り、活用することができる。したがって、制御要素300の制御パラメータをそのベースライン値の上または下に調節することが最大のビーム電流を形成するか

50

どうかを決定することにより、ターゲット要素310に対するターゲットパラメータが調節されなければならない方向に関する（制御要素300の制御パラメータがそのベースライン値に戻ると仮定して）情報が与えられる。

#### 【0048】

たとえば、偏向磁石による荷電粒子ビームの偏向は、磁石により形成される磁場および荷電粒子ビーム内の荷電粒子のエネルギーの関数である。イオンビームから所望の種を選択するために使用される質量分析器16は図6に示されている。質量分析器16は、磁石332、分離マスク334および磁石電源336を含む。磁石332は、離された磁石ポールピース（イオンビーム14の経路のために間に隙間を有する）および磁石コイル（図示せず）を含む。磁石電源336は、磁石ポールピースの間の隙間に磁場Bを形成するために、磁石コイルに磁気電流を与える。分離マスク334は所望のイオン種を通過させる分離スリット338を有する。10

#### 【0049】

イオン源12はアークチェンバー340、抽出電極342および抽出電源346を含む。アークチェンバー340はイオンビームを生成し、抽出電極342はイオンビーム14を所望のエネルギーへと加速する。イオンビーム14のエネルギーは、抽出電源346で抽出電極342に適用される抽出電圧により決定される。

#### 【0050】

質量分析器16が適正に調整されたとき、イオンビーム14内の所望の種が、磁石332により既知の角度だけ偏向され、分離スリット338を通過する。望ましくないイオン種は、いろいろな角度に偏向され、分離マスク334により遮断される。磁石332による所望のイオン種の偏向は、磁石ポールピースの間の隙間の磁場Bの関数である（また、磁石電源336により供給される磁石電流の近似的な関数である）。さらに、磁石332によりイオンビーム14の偏向はイオンビームエネルギーの関数である（また、イオン源12の抽出電力342に適用される抽出電極の関数である）。

20

#### 【0051】

この例では、磁場Bは磁石電流の変化に対し遅い応答を示すのに対して、ビームエネルギーは抽出電圧の変化に対し早い応答を示す。遅い応答の磁石332を素早く調整するために、磁石はターゲット要素として指定され、イオン源12の抽出電極は制御要素として指定される。抽出電圧（制御パラメータ）は所望のベースライン値について変調され、分離スリット338の下流のビーム電流は、典型的にビーム検知器350により、モニターされる。ファラデービーム検出器350は好適に、検知されたビーム電流に応答してファラデーリードバック電圧を与える電流-電圧コンバータを含む。リードバック電圧は、したがってイオンビーム電流を表わす。30

#### 【0052】

電源インターフェースは、制御パラメータおよび対応するビーム電流の対となった値のセットを得る。制御パラメータ値は予め定めた変調値または測定値であってもよい。対となった値は同時にまたは非同時に得られる。対となった値のセットは、磁石要素の調整を評価するために使用される。

#### 【0053】

図7に示されているように、曲線360は磁石332により形成される磁場Bの関数として、分離スリット338の下流のビーム電流Iを示す。ビーム電流は磁場 $B_1$ に対してピーク値をもつ。注入プロセスの条件に基づき、磁場が初期値 $B_0$ をもち、必要なビームエネルギーが $E_1$ とする。調整プロセスの目的は、分離スリット338の下流のピークビーム電流Iが必要なエネルギー $E_1$ で生じるように、磁場を値 $B_1$ に調節することである。図8に示されているように、分離スリット338の下流のビーム電流はビームエネルギーEの関数である。曲線362は未調整状態に対するビームエネルギーの関数として、ビーム電流を示す（ここで、磁場は $B_0$ で、ピークビーム電流はエネルギー $E_1$ で生じない）。曲線364は調整状態に対するビームエネルギーの関数として、ビーム電流を示す（ここで、磁場は $B_1$ で、ピークビーム電流は $E_1$ で生じる）。

40

#### 【0054】

10

20

30

40

50

エネルギー $E_1$ のピークビーム電流を形成する磁場B1で確実に動作するように、質量分析器磁石332を素早く調整するプロセスの例が図9のフローチャートを参照して説明される。応答の遅い磁石332はターゲット要素として指定され、イオン源12の応答の早い抽出電極342は制御要素として指定される。工程370で、制御パラメータ（抽出電圧）は抽出電源346で適用された抽出制御電圧を調整することにより、所望の値について変調される。図6 - 図8の例では、抽出電圧は、図8の矢印366により示されているように、必要なビームエネルギー $E_1$ についてビームエネルギーを変調するように、抽出電圧は変調されている。

#### 【0055】

工程372で、ターゲット要素の下流のビーム電流は、制御パラメータが変調されたときに測定される。図6 - 図8の例において、分離スリット338の下流のビーム電流はファラデービーム検知器350により測定される。かくして、所望の偏向角のビーム電流が測定される。図10は、制御パラメータの変調の間、時間の関数となる、ファラデーリードバックの例を示す。図10において、曲線390は変調された制御パラメータを表わし、曲線392はサンプルファラデーリードバック電圧を表わす。制御パラメータの変調の中心は時刻 $t_1$ で生じ、ピークリードバック電圧は時刻 $t_2$ で生じる（未調整の状態を示す）。ビーム電流測定値は工程374で分析され、特にピークビーム電流は所望のビームエネルギー $E_1$ のビーム電流と比較されてもよい。エネルギー $E_1$ のビーム電流とピークビーム電流との差は、ターゲット要素の調整または未調整を示す。すなわち、エネルギー $E_1$ のビーム電流およびピークビーム電流が異なる場合は、ターゲット要素は未調整である。

#### 【0056】

工程376において、ターゲットパラメータが最適な調整を示す所望の値に十分に接近しているかどうかが決定される。ターゲットパラメータが所望の値に十分に接近しているかどうかの決定は下述される。しかし、この決定は、エネルギー $E_1$ のビーム電流がピークビーム電流の特定の範囲に内にあるという決定に基づく。

#### 【0057】

ターゲットパラメータが工程376で、所望の値に十分に接近していないと判定されたとき、ターゲットパラメータの調節が工程378で決定される。調節の方向および増加の大きさの両方が、ターゲットパラメータの調節と関連する。調節の方向は典型的に、曲線362のエネルギー $E_1$ からのずれ（図8）の方向、および制御およびターゲット要素の動作特性に基づいて知られている。調節の方向は、工程372で得られたビーム電流の測定値に応答して、制御器で再度プログラムされてもよい。ターゲットパラメータ調節の大きさはまた、制御要素およびターゲット要素の知識、ならびに $E_1$ のビーム電流とピークビーム電流との違いに基づいてもよい。しかし、調節が調整工程で一度以上の繰り返しで達成されるとから、正確な調節の大きさは要求されない。一つのアプローチとして、調節の増加は、調整の開始でより大きく、続く切り返しで減少する。工程380で、ターゲットパラメータは選択された調節の増加により、選択された方向に調節される。プロセスはつぎに、調節プロセスの他の繰り返しを実行するために工程370に戻る。ターゲットパラメータが所望の値に十分に接近しているという決定が工程376でなされると、ターゲット要素の調整プロセスは完了する。

#### 【0058】

#### 電源インターフェース

個々の電源インターフェース34 - 40および各電源インターフェース34 - 40により影響を受ける要素は、図11、図13、図15および17に示されている。イオン注入器10の要素の制御は電源インターフェース34 - 40（ここで説明した調整アルゴリズムを実行する）と関連して記述する。電源インターフェース34 - 40により実行される調整プロセスの実施例のフロー図がそれぞれ、図12、図14、図16および図18に示されている。

#### 【0059】

図11、図13、図15および図17に示されているように、イオン注入器のそれぞれの要素の動作に必要な電源は各ブロック内に含まれ、電源インターフェースは各電源に制御信号を送る。したがって、たとえば、図11において、イオン源12は抽出電源346（図6

10

20

30

40

50

) を含み、質量分析器16は磁石電源336を含む。

【 0 0 6 0 】

図11に示されているように、質量分析器電源インターフェース(PSI)34はイオン源12、質量分析器16および低エネルギー・ファラデービーム検知器58と接続する。従来から知られているように、ファラデービーム検知器はイオンビームに応答して電流を生成する装置である。ファラデービーム検知器58は好適に、検知されたビーム電流に応答して、ファラデーリードバック電圧を生成するための電流・電圧コンバータを含む。PSI34は、イオン源12の抽出電源を制御するために、抽出制御電圧をライン72に出力し、質量分析器16の質量分析器電源を制御するために、質量分析器制御電圧をライン74に出力する。PSI34は、ライン82の制御出力信号を介して、コンピュータ32と通信する。PSI34はまた、入力として、コンピュータ32から、ライン74で制御入力信号を、ライン78で抽出リードバック電圧を、ライン80で低エネルギー・ファラデーリードバック電圧を受信する。抽出リードバック電圧は抽出電源の出力を表わし、ファラデーリードバック電圧は質量分析器16の下流のビーム電流を表わす。

【 0 0 6 1 】

動作中、図12に示されているように、中央制御器30は工程400で質量分析器の調整のためにイオン注入器をセットする。このことは低エネルギー・ファラデービーム検出器58を所定の位置に移動することを含む。工程402において、中央制御器30は質量分析器PSI34に調整命令を送る。選択されたビームプロファイルに対して制御電圧の近似的な値が、中央制御器30によりシステムデータベースでアクセスでき、質量分析器PSI34に送られる。質量分析器PSI34は、工程404で初期の制御電圧を送るために、近似的な値を使用する。特に、質量分析器PSI34は、ライン72で初期の抽出制御電圧を、ライン74で初期の質量分析器制御電圧を設定する。図5-図10に示され、上述した調整アルゴリズムが利用される。質量分析器PSI34は、イオン源12に適用される抽出制御電圧を変調し、低エネルギー・ファラデーリードバック電圧をモニターする。リードバック電圧値は、上述のように質量分析器制御電圧に対する必要な調整を決定するために分析される。調整アルゴリズムを数回繰り返すことが、所望の調整を達成するために必要となるかもしれない。質量分析器の調整が完了した後、調整した応答が工程408で中央制御器30に送られる。

【 0 0 6 2 】

ライン74での質量分析器制御電圧をモニターすることによる質量分析器16の調整は、ライン74での制御電圧が変化したとき質量分析器16の磁石が安定化するために数秒を要することから、時間の浪費となろう。

【 0 0 6 3 】

より速い同調を達成するために、質量分析器16はライン72での抽出制御電圧をモニターし、質量分析器16の下流のイオンビームを低エネルギー・ファラデービーム検知器58でモニターすることにより、調整される。イオンビームエネルギーが変化するように、ライン72での抽出制御電圧を変調することは、質量分析器16の磁石の磁場を変調することと同等であり、PSI34がイオンビーム14におけるより強いまたはより弱い効果を判定することができるようとする。

【 0 0 6 4 】

低エネルギー・磁気四重極子18の調整が、図13および図14に関連して説明される。図13に示されているように、低エネルギー・磁気四重極子電源インターフェース(PSI)36は低エネルギー・磁気四重極子18および高エネルギー・ファラデー62と接続する。特に、PSI36はライン84において低エネルギー・磁気四重極子制御電圧を出力する。この実施例の低エネルギー・磁気四重極子18は対となった数個の電極を有し、各対は電源から自らの動作電圧を受信する。したがって、ライン84での制御電圧は、左右のバランス、上下のバランス、強度およびトリム(trim)を含む、低エネルギー・磁気四重極子18の複数のパラメータを制御するために使用される。

【 0 0 6 5 】

PSI36はまた、ライン86で低エネルギー・磁気四重極子リードバック電圧を、ライン88で低

10

20

20

30

40

50

エネルギー・ファラデー・リード・バック電圧を、さらにライン90で制御器入力を受信する。低エネルギー・四重極子・リード・バック電圧は低エネルギー・四重極子電源の出力を表わし、低エネルギー・ファラデー・リード・バック電圧は電荷状態分離磁石23の下流のビーム電流を表わす。低エネルギー・磁気・四重極子18が完全に調整されたとき、PSI36はライン92において調整応答を出力する。

#### 【0066】

動作中、図14に示されているように、中央制御器は工程500で低エネルギー・四重極子の調整のためにイオン注入器を設定する。セットは、高エネルギー・ファラデービーム検知器62を所定の位置に移動することを含む。一実施例では、高エネルギー・ファラデービーム検知器62は走査器24の偏向プレートの間に配置される。他の実施例では、高エネルギー・ファラデービーム検知器62は平行化磁石26のためのビームダンプ(dump)に配置される。この実施例では、平行化磁石26は高エネルギー・ファラデービーム検知器62でビーム電流の測定を行うためにオフとなる。工程502において、中央制御器30は低エネルギー・四重極子PSI36に調整命令を送る。選択されたビームのプロファイルに対する制御電圧の近似的な値が中央制御器30によりシステムデータベースより入手され、PSI36に送られる。工程504において、PSI36は選択されたビームのプロファイルのために初期の制御電圧を設定するために近似的な値を使用する。特に、PSI36はライン84において、低エネルギー・四重極子18の電極のセットのそれぞれに対する低エネルギー・四重極子制御電圧を設定する。PSI36は、工程506で、ピークビーム電流に対して、選択された電極のセットの制御電圧を調節する。この調節は、選択された電極の制御電圧を変調し、ピークビーム電流を与える制御電圧値を観測することにより、達成される。制御電圧は、ピークビーム電流を与える値に設定される。工程508において、調節プロセスは低エネルギー・四重極子18の電極の各セットに対して繰り返される。全ての電極のセットがピークビーム電流に対して調節された後、調整応答が工程510で中央制御器30に送られる。

#### 【0067】

高エネルギー・ファラデービーム検知器62はつぎに、必要に応じてイオンビームの経路から移動してもよく、または電荷状態分離磁石23または高エネルギー・磁気・四重極子22のような、次のベースライン要素を調整する他の電源インターフェースの使用のための位置に残されてもよい。

#### 【0068】

低エネルギー・磁気・四重極子18を調整するために、PSI36は、変調された制御電圧を形成するため、AC成分を選択されたライン84のDC制御電圧に重ね合わせる。低エネルギー・磁気・四重極子18の電極に生じる実電圧はライン86において、低エネルギー・磁気・四重極子リード・バック電圧を通して、PSI36に入力される。PSI36はライン88において、高エネルギー・ファラデー・リード・バック電圧サンプルを受信し、これら電圧サンプルを、低エネルギー・磁気・四重極子18の電極の電圧に関連付け、最大のビーム電流を与える制御電圧を決定する。同じプロセスが、低エネルギー・磁気・四重極子18の電極の各セットに対して実行される。

#### 【0069】

低エネルギー・磁気・四重極子を調整するためのプロセスに似ている。同様に、電荷状態分離磁石23の調整も図11および図12と関連して上述したように、質量分析器14を調整するためのプロセスの概念と近似する。これら二つの要素を調整することが図15および図16に関連して説明される。

#### 【0070】

図15に示されているように、高エネルギー・磁気・四重極子の電源インターフェース(PSI)38は高エネルギー・磁気・四重極子22、電荷状態分離磁石23、および高エネルギー・ファラデービーム検知器62と接続する。上述したように、高エネルギー・ファラデービーム検知器62は検知器24内に配置されてもよく、あるいは平行化磁石26の下流に位置してもよい。PSI38はライン94において高エネルギー・磁気・四重極子の制御電圧を出力し、ライン96において電荷状態分離磁石の制御電圧を出力する。低エネルギー・磁気・四重極子18のように、この実施例の高エネルギー・磁気・四重極子は複数個の、対となった電極をもち、各対は、電源か

10

20

30

40

50

らそれ自身の動作電圧を受信する。この場合の高エネルギー磁気四重極子の電極は、たとえば、左右の均衡および上下の均衡といったいくつかのビームパラメータのひとつを制御する。高エネルギー磁気四重極子22は、必要であれば、強度やトリムのような付加的なビームパラメータを制御することができる。

#### 【0071】

PSI38は入力として、ライン98で、高エネルギー磁気四重極子リードバック電圧を、ライン100で高エネルギーファラデーリードバック電圧を、さらにライン102で制御入力を受信する。高エネルギー四重極子リードバック電圧は、高エネルギー四重極子電源の出力を表わし、高エネルギーファラデーリードバック電圧は電荷状態分離磁石23の下流のビーム電流を示す。高エネルギー磁気四重極子22および電荷状態分離磁石23が調整された後、PSI3 10 8はライン104において調整応答を出力する。

#### 【0072】

動作において、図16に示されているように、中央制御器30は工程600で、高エネルギー四重極子の調整および電荷状態分離磁石の調整に対して、イオン注入器を設定する。この設定はビームの検知のための位置に、高エネルギーファラデービーム検知器62を移動することを含む。工程602において、中央制御器30は高エネルギー四重極子PSI38に、調整命令を送る。選択されたビームのプロファイルに対する制御電圧の近似的な値がシステムのデータベースにおいて入手され、PSI38に送られる。工程604において、PSI38は中央制御器3 20 0から送信された近似的な値にしたがって、初期の制御電圧を設定する。特に、PSI38はライン94において高エネルギー四重極子の制御電圧を設定し、ライン96において電荷状態分離磁石の制御電圧を設定する。工程606において、PSI38はピークビーム電流に対し、高エネルギー四重極子22の選択された電極のセットの制御電圧を調節する。低エネルギー四重極子18に関連して上述したように、PSI38は変調された制御電圧を与えるために、選択された電極のセットのDC制御電圧に、AC要素を重ね合わせる。高エネルギーファラデーリードバック電圧は、四重極子の制御電圧が変調されるときにモニターされ、制御電圧がピークビーム電流を与える値に調節される。工程608において、調節は、高エネルギー四重極子22の電極の各セットに対して繰り返される。

#### 【0073】

工程610において、電荷状態分離磁石の調整アルゴリズムが実行される。電荷状態分離磁石23は、電荷状態にしたがいイオンをいろいろに偏向させることにより、いろいろな電荷状態をもつイオンを分離する。電荷状態分離磁石23に対する調整アルゴリズムは図5および図9に関連して上述した調整アルゴリズムに対応する。このアルゴリズムにおいて、ターゲット要素は電荷状態分離磁石23であり、ターゲットパラメータは電荷状態分離磁石制御電圧であり、制御要素は高エネルギー四重極子22の、選択された電極のセットであり、制御パラメータは高エネルギー四重極子の、選択された電極のセットの制御電圧である。高エネルギー四重極子22は、選択された電極のセットが制御電圧に応答してイオンビームの偏向を行うように設計される。偏向により、イオンビームは、ビームの偏向の関数である入射角で、電荷状態分離磁石23に入射する。イオンがいろいろな角度で電荷状態磁石23に入射することにより、イオンビームは、異なる位置で電荷状態分離磁石23から出て行くことになる。ビーム電流は入射角度の関数で変化する。ピークビーム電流が所望の入射角度と異なる入射角度で生じるとき、電荷状態分離磁石の制御電圧についての調節が決定される。決定された調節は電荷状態分離磁石に適用され、測定が繰り返される。調整プロセスは、ピークビーム電流が所望のビーム入射角度で生じまで続けられる。この調整アルゴリズムにおいて、電荷状態分離磁石23へのイオンビームの入射角度は変調された制御パラメータである。

#### 【0074】

ライン96での制御電圧の変調により電荷状態分離磁石23を調整することは、磁石23が比較的長い応答時間をもち、ライン96における制御電圧に変化が生じると、安定化のために実質的に長い時間を要することから、比較的時間の浪費となろう。

#### 【0075】

10

20

30

40

50

電荷状態分離磁石23を素早く調整するために、高エネルギー四重極子に適用される制御電圧のひとつが、電荷状態分離磁石の制御電圧の変調をシミュレートするために変調される。高エネルギー四重極子の制御電圧の変調により、イオンビームが偏向し、電荷状態磁石23への、イオンビームの入射角が変化する。高エネルギー磁気四重極子22の制御電圧の変調は、PSI38が変調のコースの間イオンビームを画像化し、上述したように電荷状態分離磁石23を調整するためのその画像を使用することできるようになる。さらに、ライン94において、高エネルギー四重極子の制御電圧を変調することは、電荷状態分離磁石23の磁場を変調することと等価であると扱うことができる。どちらの変調によっても、PSI38が、より強いまたはより弱い磁場がイオンビーム14にどのように影響を及ぼすかを決定することができるようになるからである。PSI38は、電荷状態分離磁石が調整されていないことを決定すると、ライン96において制御電圧が調節される方向を決定し、適切な調節を行う。

10

#### 【0076】

工程612において、高エネルギー四重極子22の焦点を合わせる焦点合わせアルゴリズムが実行される。焦点合わせアルゴリズムは、高エネルギー四重極子22の、選択された電極のセットに、変調された制御電圧を適用することに関する。その変調は、イオンビームを、走査器入口プレート108の間の開口106を横切るようにゆっくりと走引させる。

20

#### 【0077】

高エネルギーファラデービーム検知器62は開口106の背後に位置し、したがって、ビームが走査器入口プレート108により阻止されたときにのみ、ビーム14を検出する。ファラデーリードバック電圧の変化の割合を、開口106でのイオンビーム14のスポットサイズに関連付けることが可能であることが分かった。特に、より小さな直径をもつイオンビームが、一定の走引とすると、より大きな直径をもつイオンビームよりも速く開口106の縁にわたって遷移することが分かった。したがって、ファラデービーム検知器62にわたってビームが走引されると、リードバック電圧の最も大きな、一次導関数を検索することにより、高エネルギー磁気四重極子22の制御電圧を調整し、スポットサイズを最小にし、したがってビームを走査器24に入口に焦点合わせを行うことが可能になる。

20

#### 【0078】

異なるスポットサイズに対し、イオンビームが開口106を横切って走引されるときに、時間の関数となるファラデーリードバック電圧の例が図19に示されている。曲線630、632および634はそれぞれ、大、中および小の直径を表わす。図示されているように、曲線634（小さなビーム直径を表わす）は開口のエッジを横切って素早く遷移し、リードバック電圧の、最も大きい、一次導関数をもつ。

30

#### 【0079】

焦点合わせのアルゴリズムが工程612で実行された後、PSI38は工程614で中央制御器30に調整された応答を送る。

30

#### 【0080】

平行化磁石26の調節および高エネルギー四重極子22の、任意で最後の調節が、図17および図18に記述されている。図17に示されているように、平行化磁石電源インターフェース40は、ライン110において制御入力を受信し、ライン112において制御電圧を高エネルギー磁気四重極子22に、ライン114において制御電圧を走査器24に、そしてライン116において制御電圧を平行化磁石26に出力する。PSI40はまた、ライン118において、高エネルギー磁気四重極子リードバック電圧を受信し、ライン120においてプロファイリング・ファラデーリードバック電圧を受信する。高エネルギー四重極子のリードバック電圧は、高エネルギー四重極子の電源の出力を表わし、プロファイリング・ファラデーリードバック電圧は平行化磁石26の下流のビーム電流を表わす。プロファイリング・ファラデービーム検知器68はエンドステーション28に位置し、好適には進行路の中心に位置する。

40

#### 【0081】

PSI40は、走査器24でイオンビームを偏向し、プロファイル・ファラデーリードバック電圧への偏向の効果をモニターする。特に、平行化磁石26は、走査器24の応答時間に比べ、

50

ライン116における制御電圧の変化に比較的ゆっくりと応答する。したがって、平行化磁石の制御電圧の変調をシミュレートするために、イオンビーム14を走査器24で偏向することがより速くなる。PSI40は、平行化磁石の制御電圧が調節されるべき方向を決定するために、プロファイリング・ファラデービーム検知器68からのリードバック電圧を使用する。

#### 【 0 0 8 2 】

動作において、図18に示されているように、中央制御器30は、工程700において、平行化磁石26を調整するためにイオン注入器を設定する。このことは、プロファイリング・ファラデービーム検知器68をその進行路の中心に移動することを含む。工程702において、中央制御器30は、選択されたビームプロファイルに対する制御電圧の適切な値とともに、平行化磁石PSI40に、調整命令を送る。工程704において、PSI40は中央制御器30から送信された適切な値に対応する初期の制御電圧を設定する。特に、PSI40はライン112において、初期の高エネルギー四重極子の制御電圧を、ライン114において走査器の制御電圧を、ライン116において平行化磁石の制御電圧を設定する。つぎに、PSI40は、工程706において、平行化調整アルゴリズムを実行する。特に、ライン114において、走査器の制御電圧はビーム14の偏向を行うために変調される。このことにより、平行化磁石26へのイオンビームの入射角度が偏向にしたがって変化する。入射角度の変化は、平行化磁石26の出力において、イオンビームの位置に変化をもたらす。プロファイリング・ファラデービーム検知器68はビームを検知し、ビームが走査器24により偏向されると、ファラデーリードバック電圧をPSI40に与える。ピークビーム電流を生成する入射角度は、平行化磁石の制御電圧116への必要な調節を決定するために使用される。このプロセスは、ピークビーム電流が走査器24によるイオンビームの所望の偏向に対して得られるまで繰り返される。

#### 【 0 0 8 3 】

平行化磁石の調節アルゴリズムは、上述したように、電荷状態分離磁石23を調整するために使用されたアルゴリズムと似たものである。特に、磁石はターゲット要素であり、磁石の制御電圧は磁石パラメータである。制御要素は走査器（走査器の制御電圧の変調に応答してイオンビームの偏向を行うもの）である。このアルゴリズムでは、平行化磁石26へのイオンビームの入射角度の変化は、平行化磁石26の磁場を変化させることと等価である。しかし、入射角度は、磁場よりもより素早く変化でき、したがってより素早い調整が可能となる。平行化磁石の調整アルゴリズムを工程706で完了し後、PSI40は工程708において、中央制御器30に調整された応答を送る。

#### 【 0 0 8 4 】

前述の説明は、イオン注入器ならびにイオン注入器の調整のための方法および装置によっている。本発明はこれに限定されるものではなく、本発明はどの荷電粒子ビームシステムも調整すべく、広く適用できるものである。

#### 【 0 0 8 5 】

##### 調整手順

調整の一実施例が以下で詳細に説明される。図2に示された制御システムは、調整される要素のタイプに依存する特定の手順を実施する。しかし、制御システムにより実行される調整手順は、三つの方法、画像化、検索およびスポットの寸法の調整にグループ分けすることができる。

#### 【 0 0 8 6 】

画像化方法は、磁石のような応答の遅い要素を調整するために使用される。この方法において、ビームが連続して効果的に画像化されるように静電要素が変調されるとともに、磁石または他の応答の遅い要素は修正の設定（図12を参照）に調節されている。

#### 【 0 0 8 7 】

例示の画像化の一実施例が図10に示されている。図10において、画像化の調整方法では、静電要素のような制御要素に適用される制御電圧は変化し、ファラデービーム検知器により典型的に取得されるリードバック電圧により表わされる応答は変調の間、記録される。このことは、磁気要素に与えられるビームの空間分布の「画像」を形成する。磁気要

10

20

30

40

50

素の制御電圧は、ビームの最も強い部分が磁気要素から離れた整合の補正をなすように調節される。

#### 【0088】

検索方法は、応答が速い静電要素について使用することができる。この方法では、調整される要素は、今の値を取り囲む領域を効率的に画像化するために変調され、変調の中心はピークに向けて調節される。このことは、ビームの変動に対し堅牢さを与え、画像化方法と同じ調整アルゴリズムで実行することができる。

#### 【0089】

スポット寸法の調整は、高エネルギー磁気四重極子22および高エネルギービームの焦点合わせに影響を与える他の要素を調整するために使用することができる。検索および画像化法はビーム電流を最大にしようとするものであるが、この工程はビームのスポット寸法をモニターもする。このパラメータの調整は、ビームの位置の関数となる、ビーム電流の一次導関数により示される、ビームの焦点合わせの鮮明を評価するために実行される。

#### 【0090】

この一般化された枠組みで、制御システム特定の想定値をもたらし、これら測定値からビーム14を調整するための最適なパラメータに関する結論を引き出さなければならない。制御システムがその結論に達する方法についていくつかの対応が下述される。

#### 【0091】

##### 入口条件

制御システムは、ある初期の条件を確立することにより調節プロセスを開始する。たとえば、ビームがないとき、またはビームが温度の上昇のため、または種の変化のために安定しないとき、調整は実行することができない。一般に、イオン注入器が安定したビームをもたらし、制御システムが、影響が与えられる注入プロセスに対してほぼ正しい値に、ベースライン制御パラメータを初期化したことが前提となる。

#### 【0092】

もちろん、制御システムがベースラインを完全に調整された値に初期化することができるというのではない。この場合、調整は不要であろう。用語「近似的正しい」は、調整される各要素に対し、ある補足範囲があること（初期値と調整された値との間の違いがこの範囲にあるとき、調整は達成することができる）を意味する。一般に、制御システムは、適切な補足範囲を形成するために調節されるパラメータを受け入れる。

#### 【0093】

##### ファームウェア・パラメータ

ここで開示された変調調整手順は繰り返しプロセスで、ここで中心的なアルゴリズムは調整が完了するまで繰り返される。各繰り返しは、基本的には、独立したプロセスである。各繰り返しの間、プロセスはデータを収集し、そのデータを分析し、調整を調節する。特に、制御パラメータは、一連の工程を通して変化し（公称値の上下両方）、ビーム電流はモニターされ、妥当な値が記憶される。サイクルの終端で、記憶されたデータは、ターゲットパラメータがどのように調節されるべきかを決定するために分析される。最後に、ターゲットパラメータは調整された値へと調節される。

#### 【0094】

各繰り返しにおいて、種々の条件が明らかにされなければならない。たとえば、ハードウェアにおいて、特に電源において、位相のずれがある。これら位相のずれは、ひとつのサイクルからの制御パラメータの変調が実際に、次のサイクルの期間でなされるときには、アルゴリズムの純粹度を乱す。このことは一般的に、全てのサイクルがこのような変調に関することから些細な問題であり、アルゴリズムは、電源が実際どのように機能するのかを決定するためにリードバック（命令ではない）に依存する。

#### 【0095】

同様に、ひとつのサイクルからのデータは、装置が最適に調整されていると言えるには不十分である。したがって、多数のサイクルからのデータが、暫定的な成功を確認するために、収集され、前のサイクルまたは直前のサイクルと関連付けられ得る。

10

20

30

40

50

## 【0096】

最後に、調整プロセスが進行すると、ターゲット要素は、調整された条件に接近する調節される。一実施例では、サイクルレベルのパラメータは、この段階で変えられる。この実施例の初期のサイクルは、偽ピークを選別できるように、広い取得範囲をもち、試験される領域が減少するように、単にピークを中央領域に入れるようにする。この実施例の後のサイクルは、ターゲット要素がほぼ調整される入力条件に依存するより狭い取得範囲をもち、最適な調整を示す最終条件に特別な注意を払う。

## 【0097】

## データ収集

データ収集の位相に影響を与える主要な要因は、制御パラメータの変調の形状および速度を含む。ビーム電流のリードバックおよび制御パラメータが、ファームウェアの制限内で、可能か限り頻繁に達成されることを前提とし、リードバック周波数パラメータを必要であれば含めることができるが、中央制御器30から電源インターフェースへとリードバックパラメータが送信される必要はない。

10

## 【0098】

一般に、制御パラメータの変調と関連して、どの所望の波形も使用することができる。しかし、どのパラメータにおいても急速な変化を生成することは一般的に望ましくないので、公称値について徐々に行きつ戻りつする変化が望ましい。これは、サイン波、三角波、または同様の波形であってもよい。三角波は、制御パラメータの変化の最大速度を最少にすることから、いまのところ最適なものと考えられる。

20

## 【0099】

特定の波形に対する特別な需要はないが、一実施例として、所望の振幅の制御パラメータの変調があると、ソフトウェアが、それ自身の連続した制御パラメータ電圧を生成するために構成される。他の実施例では、たくさんのパラメータを導入することなく、柔軟性を最大にするために、付加的なパラメータが、列挙して、所定のセットのオプション（サイン、三角、ランプ・ドロップ（ramp-then-drop）など）からどの一般的なタイプの曲線波形が望ましいかを特定するために使用される。

## 【0100】

しかし、波形とちがって、制御パラメータの変調速度は一般的に重要である。変調が振幅に関してあまりにも速いと、電源を駆動する制御パラメータは維持することができなくなる。変調が、制御電圧の変化がどの程度急速に命令され得るかについてのファームウェアの限界に関連して、あまりにも速いと、命令パラメータの曲線がギザギザになる。変調が、ビーム電流のリードバックがどの程度急速にサンプル化されるかについてあまりにも速いと、生じたビームの画像に間隙があり、その結果真のピークを見逃したデータ収集となる。逆に、変調があまりにも遅いと、全体の調整プロセスは許容できない遅さとなる。

30

## 【0101】

速度の変化にはふたつのタイプがある。ひとつの変化は全サイクルの間であり、他はパラメータの命令の間の間隔である。命令がファームウェアの命令限界で送られるとすると、アルゴリズムは、所望のサイクル期間では、適切な細分性の工程手順を自動的に形成する。この場合、唯一の速度パラメータはサイクル期間である。許容値を拘束する要因は、ファームウェアの動作速度（たとえば、リードバック割合）に依存するが、他は物理的な時間（たとえば、電源）に依存する。

40

## 【0102】

## データ分析

データ分析相では、PSIは、ターゲットパラメータがあまりにも高いか、あまりにも低いか、または許容範囲内かを決定する。最適化のような、データ分析相のいろいろな態様、ターゲットパラメータが十分に接近しているどうかを決定すること、エラーの方向性が下述される。

## 【0103】

## 最適化

50

最初に、PSIは最適な制御パラメータの設定のための値を決定しなければならない。ひとつのアプローチは、観測された最も高いビーム電流に対応する制御パラメータのリードバックを記録することである。

#### 【0104】

このアプローチについての潜在的な問題は、エンドケース区別が許されないことである。ピークはひとつの定義された制御パラメータの設定にないかもしれない。範囲にわたって最適なビーム電流の平坦期があり、調整手順はその範囲の中心を見つけ出すことが望ましいものにする。単に、観測されたビーム電流の選択することは、各サイクルにおいて、プロセスをこの平坦期のランダム点に引き寄せるからである。アルゴリズムが、平坦期が観測される精度レベルで調整を行うことが求められるときに、これらファンтомプル (phantom pull) により、アルゴリズムは、平坦期において常に動く「最良の」点について、絶え間なく精密な調整を行うことになる

10

#### 【0105】

一実施例では、この問題を解決するために、最適に近いビーム電流を示す全ての読み取りからの制御パラメータのリードバックは平均化される。この方法は平坦期の中心を目指している。このことは、サイクルの間、ピークを観測したビーム電流の一部として何が最適に近いものになることを示すパラメータを必要とする。概念的には、このパラメータは平坦期の高さに関連した閾値であると考えられる。ひとつの最適なビーム電流の観測を行う単純な場合では、このパラメータは100%にセットすることができ、ピーク読み出しのみが使用される。

20

#### 【0106】

平坦期の一部（全部ではなく）が可視的であると（制御パラメータの変調が平坦期に一端（他ではない）からビームをなくすことによる）、平均化技術は依然として、ターゲットパラメータに対して最適な設定の方向に正しく結果をもたらす。特に、平坦期の一端のみが視覚的であると、ターゲットは、制御パラメータの対称的な変化が平坦期の一端のみに及ぶことから、ピークの中心に調整されない。この場合、中心点は常に、平坦期の可視的な端部から離れている。

20

#### 【0107】

最適な制御パラメータの設定が決定されると、ターゲットパラメータが余りにも高いか、または余りにも低いかを決定する必要がある。このことは、制御パラメータの変化と、ビームへの対応する効果との間の符号関係を示す極性に依存する。

30

#### 【0108】

「十分な接近」の決定

最適な制御パラメータの決定に関連して、パラメータが正しい調整に十分に接近しているかどうかを決定する必要がある。制御パラメータとビーム電流との間に直接的および信頼性のある関係があると、十分な接近がどの程度の接近かを示すことについて、ひとつのパラメータで十分である。これは、たとえば制御パラメータの変化の単位のカウントとして、または全制御パラメータの変調範囲の分画 (fraction) として与えられる。

#### 【0109】

しかし、複雑な要因がある。第一に、ビーム電流はノイズを含み、「十分な接近」の条件が変化のないターゲットパラメータとともに数サイクルにわたって信頼性のあることを示すことが必要となることである。第二に、上述したように、範囲にわたって、最適なビーム電流となる平坦期があることである。第三に、あるパラメータでは、ピークの中心にあることが本当に理想的ではなく、ピークの端部にシフトすることが好適であることである。これらの問題の第一のものは、統計的に導かれたパラメータを示す一方、第二、第三のものは現れるであろう可能な曲線形状について仮説を必要とする。

40

#### 【0110】

統計的な問題への、最も単純なアプローチは、「十分な接近」を全て示す一連の連続した読み出しを必要とすることである。さらに、より慎重な方法が、この窓の外に読み出しがときおりある（4の3ボーティングルールのように）ことを許す。しかし、サイクルから境

50

界外の結果を可能にする複雑な方法がある。特に、サイクルが十分な接近を示めないと、このアルゴリズムの正規な応答はターゲットパラメータに調節を命じることである。ターゲット要素は今や別に調整されることから、前の読み出しへは、今の調整の精度の統計的な決定に直接に、妥当なものでなくなっている。したがって、「十分な接近」の範囲の外の読み出しを考慮する統計的なアプローチは調整動作を妨げるにちがいないが、ボーティングは進行する。

#### 【0111】

連続した読み出しアプローチは、3の3ルールといったもののような、このボーティング方法の基礎的なもののように見ることができる。このアプローチでは、この区域外のサイクルは調整を再開させる。したがって、最大の柔軟性を可能にするために、ボーティング方法をファームウェアに組み込むことに利点がある。10

#### 【0112】

##### エラーの検出

いくつかのタイプのエラーがトラッピングのために考慮され得る。たとえば、ある場合には、偽りのピークがリードバック電圧に現れる。偽りのピークが、荷電粒子ビームシステムが不所望の同位体または要素に調整されるために、ビーム電流のピークを表わす。真のピークが、偽のピークより（偽のピークが平坦期の高さ閾値以下という十分なマージン分）高いと、偽りのピークは単に無視される。真のピークが偽りのピークより低いと、偽りのピークを除去するための何かが必要となる。任意であるが、パラメータの賢明な選択および開始条件は、偽りのピークがPSIにより検出されることを妨げることができる。しかし、他の場合、より慎重な手順が偽りのピークを除去するために必要とされる。20

#### 【0113】

一実施例では、偽りのピークは悪い区域外の結果があるサイクルで、ボーティングの早期の終了を引き起こすことにより除去できる。このことは、上述し、各サイクルからの結果の大きさを無視はするが、その結果が区域内か、区域外かを単に決定する基本的な方法の拡張である。この方法を実施するために、パラメータ（「十分な接近」閾値パラメータと似た単位で）は与えられ、サイクルが特定の範囲の外にあるとき、ボーティングが終了し、プロセスが調整に戻ることを特定する。

#### 【0114】

他の実施例では、曲線の形状（ビーム電流対制御パラメータ）に付加的な定義が、遭遇するであろう曲線のタイプに関し、さらにイオン注入器を有効かつ正確に調整するために、アルゴリズムがどのようにこれら条件に対応するかについて、与えられる。特に、このような場合、正確な調整が最適なビーム電流に向けられず、または平坦期の中心でなく、この位置からずれている。30

#### 【0115】

##### 調整の調節

データ分析の相が、ターゲットパラメータがどのように調節されるか（調節されるのかどうか）を決定したことから、最終の工程は実際に、正しい調整に向けたターゲットパラメータを調節することである。ひとつの問題が、命令されるべき変化の大きさである。

#### 【0116】

必要な調整の変化の大きさを、利用できるデータから計算することは可能ではあるが容易ではない。しかし、最適な値に近づくようにターゲットパラメータを調節する方向を決定するとは、一般的に速くかつ可能である。40

#### 【0117】

調整プロセスにある時点（たとえば、あるサイクル）で、一般的に、制御パラメータで走引される範囲と、ターゲットパラメータに対して予想される調節の補償的なスケールとの間に関係がある。この知識は外部に記憶でき、一般的にファームウェアに伝達される必要がない。したがって、一実施例では、ファームウェアに、ターゲットパラメータの所望の増加が与えられる。調整がデータ分析により示されると、ターゲットパラメータは示された方向に増加だけ調節される。50

## 【0118】

本発明はセットした増加の使用に限定されず、より程度の高いインテリジェンスが採用されてもよい。たとえば、データ分析が、ターゲットが「十分に接近」の範囲外であることを示すときには、ターゲットパラメータの変化がより小さいことが望ましい。この評価には二つの基本的なアプローチがある。一つは、ターゲットパラメータを調節する大きさに對して異なる値をもついくつかの「 bin 」をもつことであり、他のものは、大きさを計算する線形または多項関数をもつことである。必要であれば、両方法を利用してもよい。これらの方法のいずれも、正および負の変化の大きさは対称である必要はない。

## 【0119】

## ターゲットパラメータの低レート

10

上記説明は、ターゲットパラメータの変化の大きさに、これらの変化が支配されるレートに関連することなく、焦点を合わせてきた。制御パラメータのように、ターゲットパラメータが調節される速度に對して上限がある。

## 【0120】

電源における遅延のように、時間とともに変化する効果を最少にするために、調整プロセスの間中、サイクルを続けることは制御パラメータにとって望ましい。また、不意に開始し、停止する変調波形は、位相シフトがあると、使用が不適切となろう。さらに、電源は、このような入力に満足のいくようには応答しないかもしれない。

## 【0121】

アルゴリズムが、ターゲットパラメータがどのように調節されなければならないかを知るために、ひとつのサイクルからの情報を利用することから、ターゲットパラメータがひとつのサイクルに一度調節されるとする。そのことがあまりにも速いと、一つの解決策は、サイクルがより長くなるように、単にサイクルを遅くすることである。遅いサイクルのひとつの不利な結果は、調整が遅くなることである。しかし、こうしたことを、速度が制限されるという理由が、ターゲットパラメータの調節速度に対する制限であるならば、採用しないとすべきではない。したがって、好適実施例では、ターゲットパラメータの調節速度に對し、独立したパラメータを含める必要はない。

20

## 【0122】

## 多サイクル

30

上記考察は、個々の調整サイクルのレベルに限定したものである。しかし、全調整は、多くのサイクルにわたる繰り返しプロセスである。サイクルレベルのパラメータは、さらに細かい細分性が使用されるとき、連續した調整の間に変化しもよい。上述したように、中央制御器30により調整命令は、PSIのファームウェアが基本的に自立している間、他サイクル調整プロセスを開始する。したがって、ファームウェアは調整の各相に對して、適切なサイクルレベルパラメータを決定する必要がある。

## 【0123】

好適実施例では、調整は一連の、個別の相であり、各相は入口条件、出口条件、および調整計画法に基づく。入口条件は、必要とされる「取得範囲」（ターゲット要素はある相の開始点で、どの程度悪く調整されたか）に関する。出口条件は、ある相での必要な調整精度に関する（初期の位相は次の位相の取得名範囲内にあることのみ必要とするが、最終調整は動作を満足するものでなければならない）。計画法は、入口状態から出口状態に進行するために選択されたパラメータの範囲で表現される。

40

## 【0124】

一実施例では、位相の数が少ないと予想される場合（すなわち、一つから十程度）、ファームウェアは一連のパラメータ（各相に對して一つの要素）であってもよい。

## 【0125】

## 失敗応答

時にうまくいかない調整が試みられる。システムは、失敗を検出し、第二の調整に適宜応答し、ビームが最適でないときに、失敗を中央制御器30に報告することができる。

## 【0126】

50

ビームが見出されても、調整がいくつかの理由で失敗となることがある。

1) 電源が容易に安定しない。その結果、調整されたビームが、「うまいいいた」調整に続いて、調整からドリフトしていく。この場合、調整プロセスは、サイクル時間を延ばすことなどによいゆっくりとなり、または変化が極端でなくなり、すなわち制御パラメータの変調の振幅は減少し、またはターゲットパラメータ調節の振幅が減少する。

2) アルゴリズムが、ある理由でビームからそれてしまうかもしれない。アルゴリズムは、細分性の今のレベルに対して「取得範囲」内にあると、一般的にビームを再度取得することが可能である。しかし、ビームが取得範囲から出て行ってしまうと、システムは、ビームが見出されないかのように反応する。

3) アルゴリズムが早めに調整が完了したと宣言してしまうかもしれない。この場合、最後の調整の繰り返しを終了するための「終了条件パラメータ」は不十分である。 10

4) システムは失敗ピークを見い出し、そのピークを最適することができる。

#### 【0127】

一実施例では、予想された最少のビーム電流パラメータが、失敗のピークを見い出すこと、またはノイズ内の調整のリスクを減少させるために使用される。最少の電流パラメータは、アルゴリズムに、その種類の信号が期待されるかを示す。最少のビーム電流が検出されないと、何かが調整を妨げるように十分に悪くなっている。装置の初期状態が、調整のアルゴリズムの「取得範囲」の外であるかも知れず、あるいはビームは単に存在していないかも知れない。

#### 【0128】

ビーム電流がないことに応答できるように、一実施例では、調整アルゴリズムは、この場合、広い調整走引を試みる。というのは、このタイプのエラーは一般的に、電流調整相の範囲の外にビームがあることを示すからである。このエラーがどの相でも遭遇することから、第一の調整相に単に戻ることは最も妥当なことである（ただし、非常に速い相で、これが不可能であるときを除く）。このことにより、システムは、広い範囲を捉えることができ、広い検索の間、システムの動作が適切に支配される。任意であるが、このエラーが第一の相で生じると、際だって広い範囲について、通常スキップされる「ゼロ相」が試みられる。 20

#### 【0129】

他の実施例では、今のイオンビームの調整を評価する工程（図4の工程230）は、ビーム電流のリードバックのフーリエ分析からなる。制御パラメータの変調は、制御パラメータから下流のビーム電流の変調を含む。ビームラインが正しく調整されると、ビーム電流波形は、制御パラメータの変調の周波数の、規則的なピークをもつ。しかし、ビームラインが正しく調整されていないと、ビーム電流波形は、ビーム電流のリードバックの周波数スペクトル（これらピークの間の間隔により生成される高周波数成分を含む）に、不純なもの導入する「ダブルバンプ（double bump）」をもつ。これら周波数の不純なものは、ターゲットパラメータの正しくない調整を示す。これら不純なものの周波数分析は、使用される特定の波形の知識と組み合わされて、ターゲットパラメータが調整を改良するために増減すべきかどうかを決定するために使用することができる。 30

#### 【0130】

##### 調整命令

調整プロセスは、上述したように、PSIがビームを調節できるようにする、ひとつの命令を含むパラメータにより開始する。例示の調整命令において、第一のデータ構成は送信されるが、つぎのような数サイクルに対し独立したパラメータを含む。

- 1) 最小ビーム電流
- 2) ターゲットパラメータ - 最小値
- 3) ターゲットパラメータ - 最大値
- 4) 制御パラメータ - 最小値
- 5) 制御パラメータ - 最大値

#### 【0131】

10

20

30

40

50

さらに、六番目のパラメータとして、第一のデータ構成は各調整相に対して一つの列をもつ、一連の第二のデータ構成を含むことができる。この第二のデータ構成は、つぎのようなパラメータを含むことができる。

- 1) 制御パラメータの変調の振幅
- 2) 制御パラメータの変調波形のタイプ
- 3) 制御パラメータの変調サイクル期間
- 4) 必要な調整の符号を決定するために使用される関係の極性
- 5) 平均したピークの中心を見出すべく、データを選択するための、平坦期の高さ閾値
- 6) 相を終了するために、十分な調整を決定するための「十分な接近」閾値
- 7) 極端に正のオフピーク条件に対するターゲット調節の大きさ
- 8) 近中心条件のためのターゲット調節の大きさ
- 9) 極端に負のオフピーク条件に対するターゲット調節の大きさ
- 10) うまくいったことを宣言するために、信頼性のないデータの検出のためのボーティング終了閾値
- 11) うまくいったことを宣言するために、「十分な接近」でなければならない試みの数
- 12) 先の値が達成されなければならない範囲内の試みの数

10

【0132】  
パラメータのこれらリストは全部というわけではなく、制御システムのプロトコルまたは構成、および使用された特定のハードウェアまたはファームウェアに依存して、ほかのパラメータが望まれてもよく、また必要とされてもよい。たとえば、他のパラメータが、1/0ラインを特定するために、またはハードウェアとファームウェアとの間の相互関係を柔軟にするために必要とされてもよい。

20

### 【0133】

#### 調整確認

イオン注入に対する標準的適用例では、シリコンウェハが、イオン注入プロセスのために、ウェハ27(図1)として、ビームラインに連続して配置される。延長した時間にわたって、ビームライン要素におけるドリフトにより、正しく調整されたビームの調整が僅かに崩れる。質を確実に適正とするために、ビームの調整を周期的に評価し、他のウェハを処理する前に崩れた調整を検出することが望ましい。

30

【0134】  
標準的なプロセスを開始することなく、ビーム調整を評価することが望ましい。ビームの評価は、ビームの調整よりも非常に素早く達成することができ、このような評価は、ウェハのスループットに影響を与えることなく、ウェハの処理の間、頻繁に達成することができる。ビームの調整が完全に崩れるときは、操作者に警告を発し、ウェハの処理を中断し、全ビーム調整手順を任意に開始することが望ましい。

30

### 【0135】

この目的のために、ビームを評価するために、完全な調整法の一部が使用できる。特に、ターゲットパラメータは、初期の値について変調され、その値を記憶するとともに、ビーム電流は制御パラメータの下流でサンプル化される。ビームが正しく調整されたことを確認するために、調整プロセスの終わりで使用される、標準ビーム評価手順は、ビームの質を評価するために使用することができる。

40

### 【0136】

図面に示され、明細書で説明された実施例の変更、修正は本発明の思想および範囲内でなし得ることは理解されよう。したがって、上記説明に含まれ、図面に示された全ての事項は説明のためであり、制限のためではない。本発明は特許請求の範囲およびその均等物によってのみ制限される。

### 【図面の簡単な説明】

### 【0137】

【図1】図1は、本発明の実施に適したイオン注入器の実施例のブロック図である。

【図2】図2は、図1のイオン注入器の制御システムの実施例のブロック図である。

50

【図3】図3は、図2の電源インターフェースの実施例のブロック図である。

【図4】図4は、図2の中央制御器および電源インターフェースで実行される制御プログラムの実施例の状態ブロック図である。

【図5】図5は、本発明にしたがった調整手順に関連したビームライン要素のブロック図である。

【図6】図6は、図5に示されたターゲットおよび制御要素の例の略示ブロック図である。

【図7】図7は、図6の構成における、磁場Bの関数となる、分離スリットの下流のビーム電流のグラフである。

【図8】図8は、図6の構成における、ビーム電流Eの関数となる、分離スリットの下流のビーム電流のグラフである。 10

【図9】図9は、本発明にしたがってターゲット要素を調整するための調整手順の例のフローチャートである。

【図10】図10は、制御パラメータが変調したときに、測定されたリードバック電圧の例を示す、時間の関数となる電圧のグラフである。

【図11】図11は、図1のイオン注入器における、第一の電源インターフェースおよび要素の第一のサブセットの実施例のブロック図である。

【図12】図12は、図11の電源インターフェースにより実行されるプログラムの実施例のフローチャートである。 20

【図13】図13は、図1のイオン注入器の第二の電源インターフェースおよび要素の第二のサブセットの実施例のブロック図である。

【図14】図14は、図13の電源インターフェースにより実行されるプログラムの実施例のフローチャートである。

【図15】図15は、図1のイオン注入器の第三の電源インターフェースおよび要素の第三のサブセットの実施例のブロック図である。

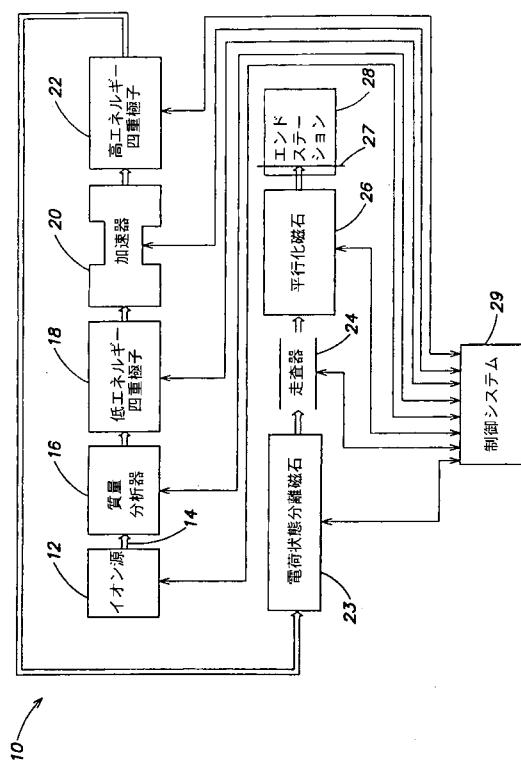
【図16】図16は、図15の電源インターフェースにより実行されるプログラムの実施例のフローチャートである。 30

【図17】図17は、図1のイオン注入器の第四の電源インターフェースおよび要素の第四のサブセットの実施例のブロック図である。

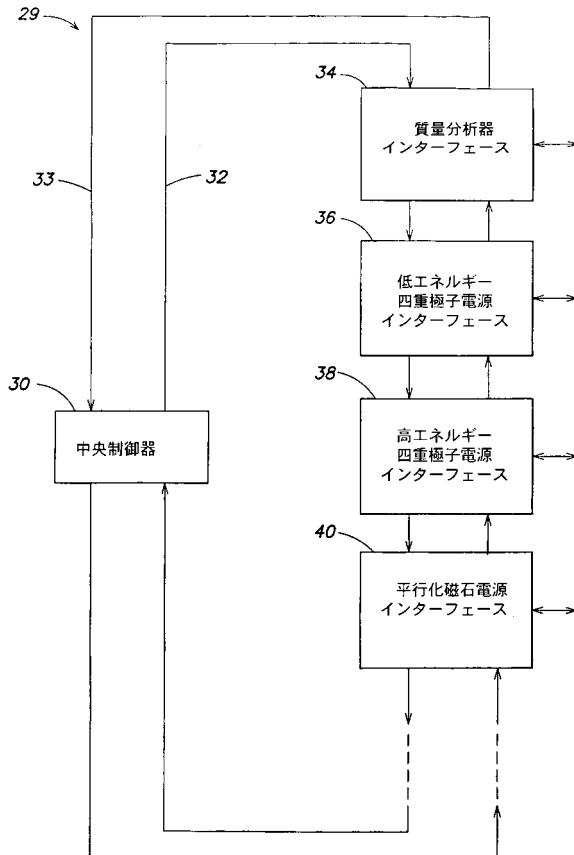
【図18】図18は、図17の電源インターフェースにより実行されるプログラムの実施例のフローチャートである。

【図19】図19は、いろいろなビームサイズのための開口に対してビームが偏向されたときに、ファラデーリードバック値を示す、時間の関数となる電圧のグラフである。

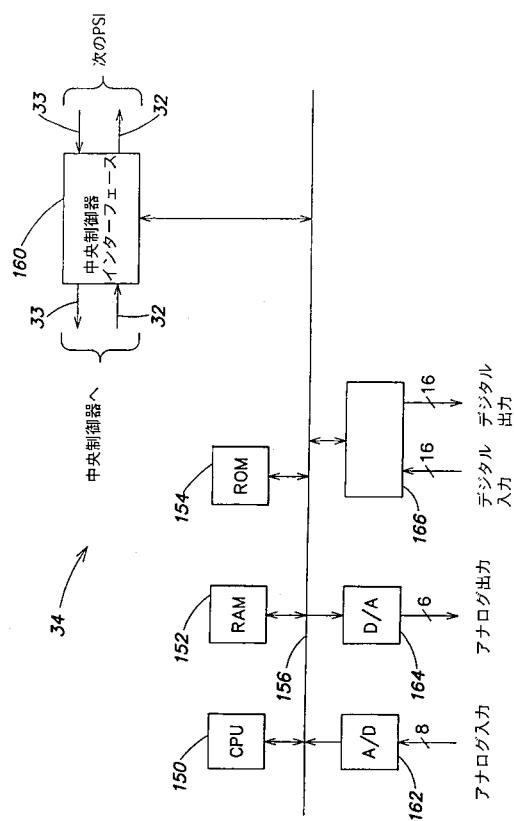
【図1】



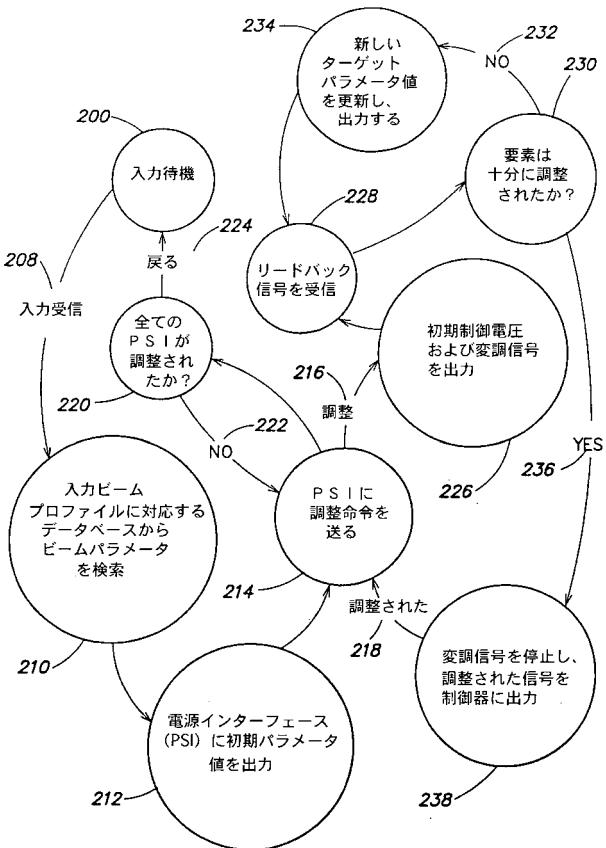
【図2】



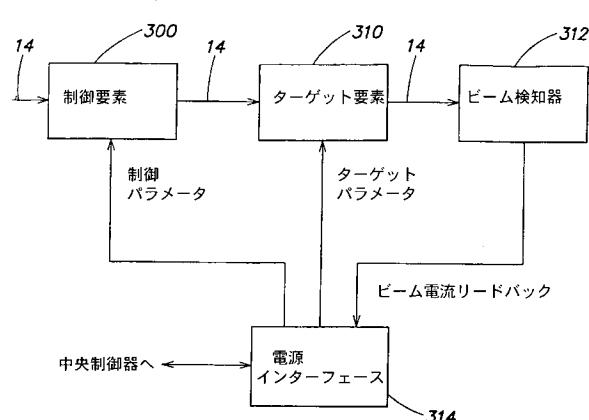
【図3】



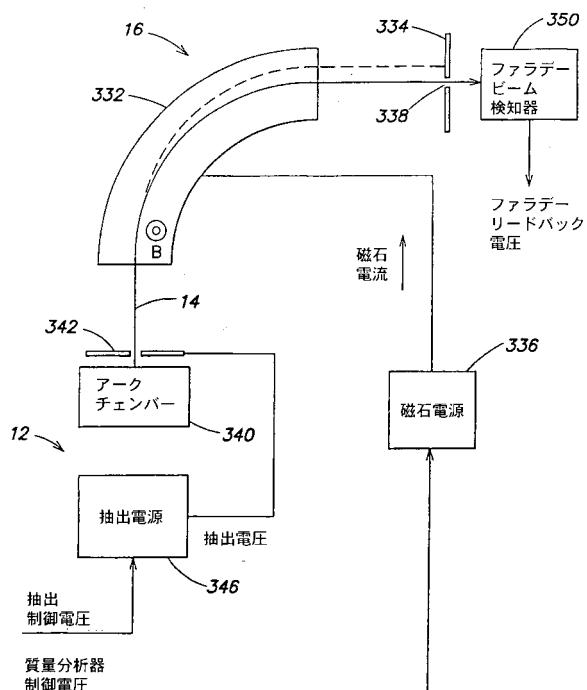
【図4】



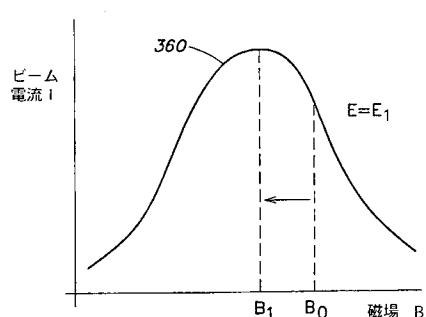
【図5】



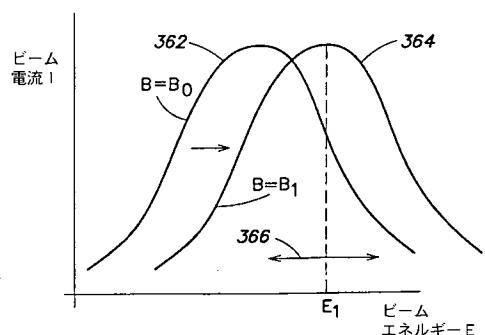
【図6】



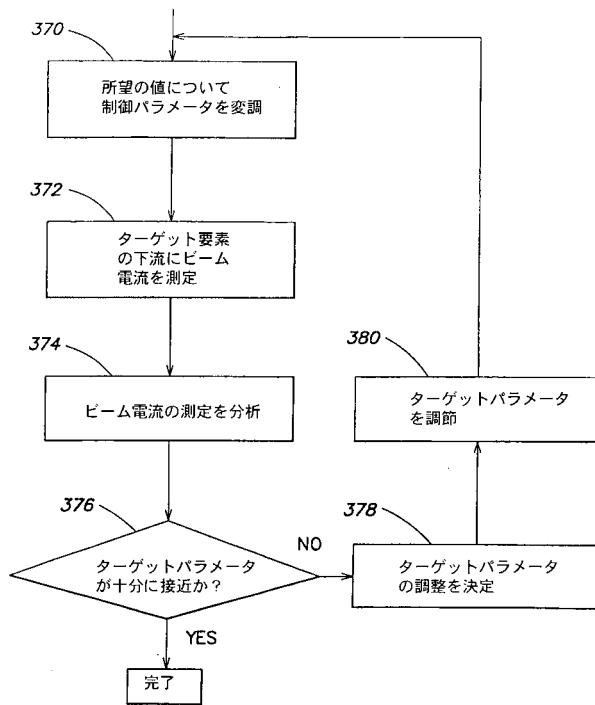
【図7】



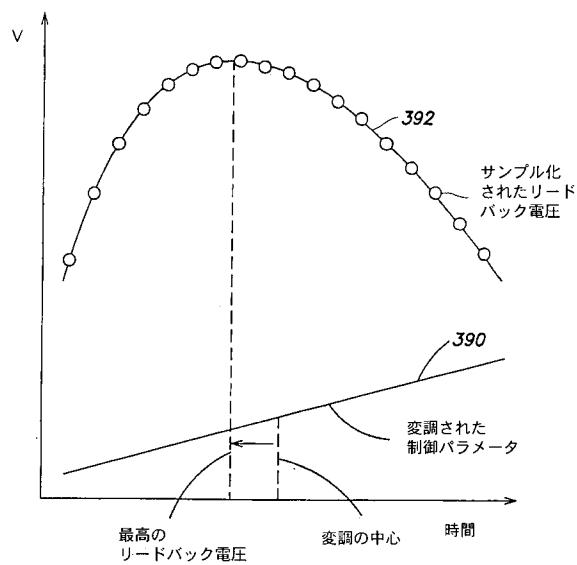
【図8】



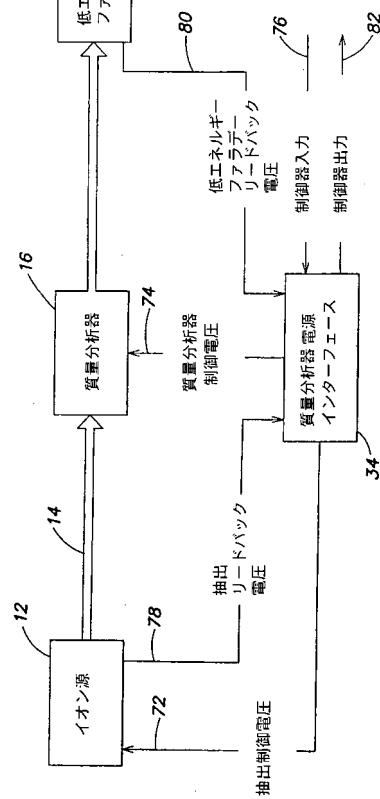
【図9】



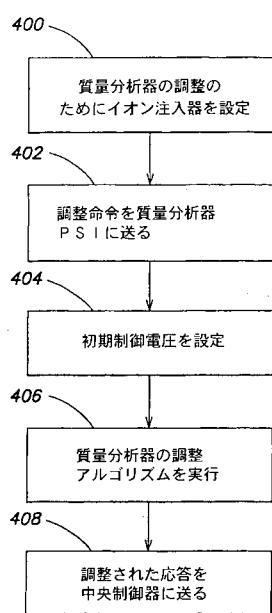
【図 10】



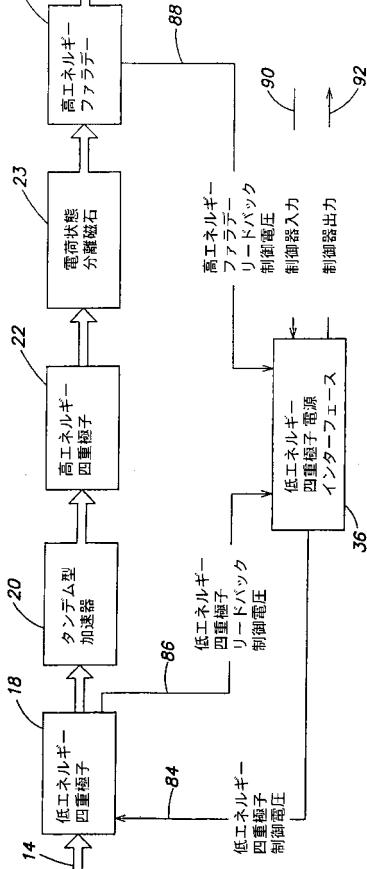
【図 11】



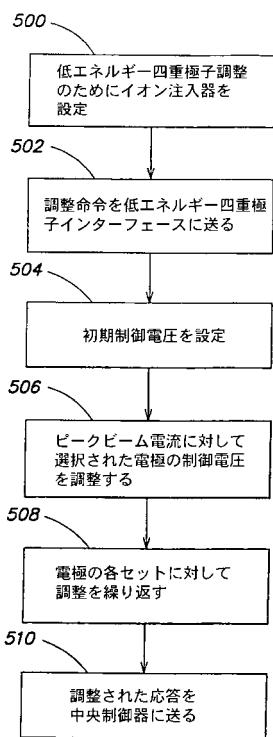
【図 12】



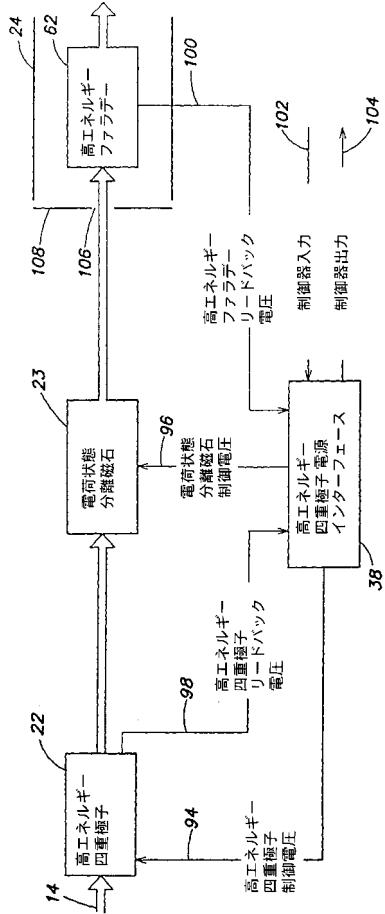
【図 13】



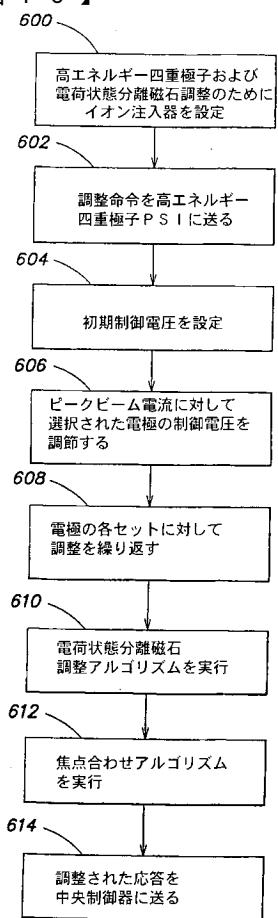
【図14】



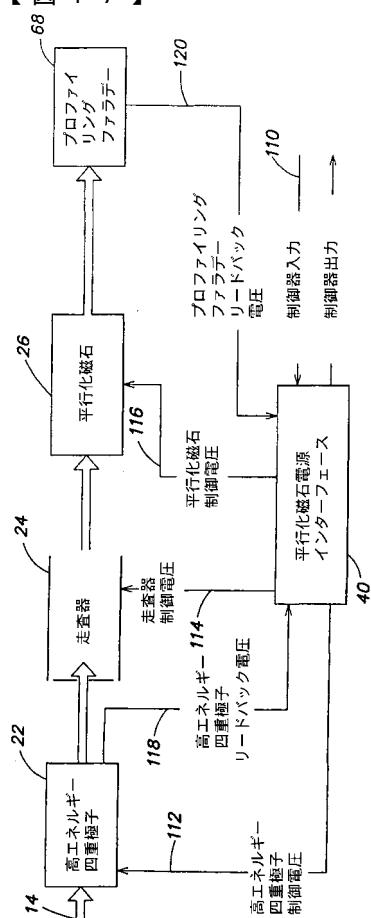
【図15】



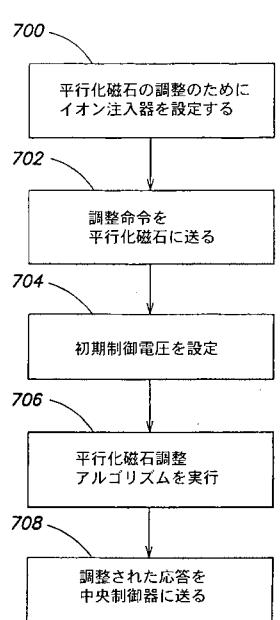
【図16】



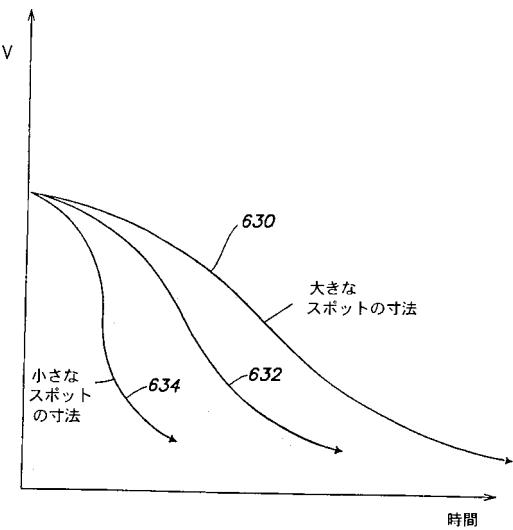
【図17】



【図18】



【図19】



## 【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
13 March 2003 (13.03.2003)

PCT

(10) International Publication Number  
**WO 03/021630 A1**(51) International Patent Classification<sup>5</sup>: H01J 37/304,  
37/317Clifford, A.; 406 West Seneca Street, Ithaca, NY 14850  
(US).

(21) International Application Number: PCT/US02/21751

(74) Agent: McCLELLAN, William, R.; Wolf, Greenfield &  
Sacks, P.C., 600 Atlantic Avenue, Boston, MA 02210 (US).

(22) International Filing Date: 10 July 2002 (10.07.2002)

(81) Designated States (national): CN, JP, KR.

(25) Filing Language:

English

(84) Designated States (regional): European patent (AT, BE,  
BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,  
LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR).(30) Priority Data:  
09/943,625 30 August 2001 (30.08.2001) US

Published:

*with international search report  
before the expiration of the time limit for amending the  
claims and to be republished in the event of receipt of  
amendments*

(71) Applicant: VARIAN SEMICONDUCTOR EQUIPMENT ASSOCIATES, INC. [US/US]; 35 Dery Road, Gloucester, MA 01930 (US).

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

(72) Inventors: SULLIVAN, Terence, Sean; 260 Cypress Street, Brookline, MA 02445 (US); HOLBROOK, David, S.; 262 East Street, Lexington, MA 02173 (US); LARDIN,



A1

**WO 03/021630 A1**

(54) Title: METHOD AND APPARATUS FOR TUNING ION IMPLANTERS

(57) Abstract: Methods and apparatus are provided for automatically tuning a charged particle beam system, such as an ion implanter. In one embodiment, a control parameter of a control component located upstream of a target component is modulated, and the beam current downstream of the target component is measured. The beam current measurements provide information that is used to evaluate tuning and, if necessary, to adjust the target component. The target component is typically a slow response component, such as a magnet. In another embodiment, evaluation of tuning is performed by modulating the target parameter and monitoring the effect of such modulation on the beam current. In a further embodiment, the spot size of the charged particle beam is evaluated by scanning the beam across the edge of an aperture and evaluating the sharpness of the beam focus. The tuning algorithms are preferably implemented in localized power supply interfaces for high speed operation.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 1 -

**METHOD AND APPARATUS FOR TUNING  
ION IMPLANTERS**

5                   **Field of the Invention**

The present invention relates to charged particle beam systems and, more particularly, to methods and apparatus for tuning charged particle beam systems, including but not limited to ion implanters.

10                  **Background of the Invention**

Ion implantation is a standard, commercially-accepted technique for introducing conductivity-altering impurities into semiconductor wafers. In a conventional ion implanter, a desired impurity material is ionized in an ion source, the ions are accelerated to form an ion beam of prescribed energy, and the ion beam is directed at the surface of the wafer. The energetic ions in the beam penetrate into the bulk of the semiconductor material and are embedded into the crystalline lattice of the semiconductor material to form a region of desired conductivity.

Exacting requirements are placed on semiconductor fabrication processes involving ion implantation with respect to the cumulative ion dose implanted into the wafer, implant depth, dose uniformity across the wafer surface, surface damage and undesirable contamination. The implanted dose and depth determine the electrical activity of the implanted region, while dose uniformity is required to ensure that all devices on the semiconductor wafer have operating characteristics within specified limits.

To form devices on the semiconductor wafer, it is often necessary to implant impurities at different depths. The energy of the ions in the beam is determinative of the depth to which the ions travel within the semiconductor wafer before lodging in the semiconductor lattice. A given recipe for a particular electronic device may require several ion implantation steps using different ion species, different energies and different doses. Each time one or more parameters of the ion beam are changed, for example when the energy of the ion beam is changed, it is necessary to tune the ion implanter to optimize beam transport and delivery to the wafer.

Tuning a conventional ion implanter is a relatively time consuming process.

Initially, a computer controlling the operation of the ion implanter is programmed to

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 2 -

retrieve general tuning parameters associated with a new beam profile and to apply those parameters to the ion implanter. Once the various components of the ion implanter are provided with the general tuning parameters regarding the approximate values for the particular beam recipe, an operator optimizes the settings to complete the tuning process.

- 5 It may take an experienced operator five to thirty minutes or more to manually tune the beam to an acceptable level so that the ion implanter may be used to implant ions in wafers. This relatively long tuning time is necessitated, at least in part, by the fact that one or more components of the ion implanter, such as large magnetic components, may have a relatively long stabilization time and may exhibit hysteresis. Automatic tuning (autotune) 10 techniques have also been utilized. However, prior art autotune techniques have been no faster than manual tuning techniques. Tuning a conventional ion implanter is thus a time consuming task. Since an ion implanter cannot be used to implant ions in wafers until it is tuned, the tuning process represents an obstacle to increasing the throughput of the ion implanter.
- 15 Additionally, conventional tuning procedures may require precise knowledge of the strength of the magnetic fields produced by the magnets. Thus, high sensitivity Gauss probes may be used in the tuning process for conventional ion implanters. Unfortunately, high sensitivity Gauss probes are typically very expensive, on the order of tens of thousands of dollars. Accordingly, it would be desirable to eliminate these Gauss probes 20 or to replace them with less expensive, low sensitivity Gauss probes.

Accordingly, there is a need for improved methods and apparatus for tuning charged particle beam systems, including but not limited to ion implanters.

#### Summary of the Invention

25 The present invention overcomes these and other drawbacks by providing methods and apparatus for automatically tuning one or more components of a charged particle beam system, thereby reducing the time required to tune the system and at least partially eliminating the need for human expertise in the tuning process.

According to a first aspect of the invention, a method is provided for evaluating 30 the tuning of a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherein a charged particle beam is transported through the target component. The method comprises the steps of (a) varying a control parameter of a control component located

upstream of the target component, wherein the control parameter has a predetermined relation to the target component, (b) measuring beam current downstream of the target component as the control parameter is varied, and (c) evaluating the tuning of the target parameter based on the beam current measurements and the predetermined relation  
5 between the target component and the control parameter. If the evaluated tuning does not meet a predetermined criteria, the target parameter may be adjusted. In a preferred embodiment, the charged particle beam system comprises an ion implanter.

The target component may comprise a magnet which generates a magnetic field in response to a magnet current. The step of adjusting the target parameter may comprise  
10 adjusting the magnet current. The control component may comprise an electrostatic component which generates an electric field in response to a control voltage. The control component may vary the energy of the charged particle beam or may vary an entry angle of the charged particle beam into the magnet. The step of varying the control parameter may comprise varying the control voltage. The target component is typically a slow  
15 response component.

The step of evaluating the tuning of the target parameter may comprise analyzing the beam current measurements to determine a target parameter adjustment. The target parameter may be adjusted by the determined target parameter adjustment. The step of analyzing the beam current measurements may comprise determining a target parameter  
20 adjustment direction and magnitude to shift a peak beam current toward a required value of the control parameter.

The method may further comprise the step of performing two or more iterations of steps (a), (b) and (c) followed by adjustment of the target parameter, until the measured beam current meets a predetermined criteria.

25 According to another aspect of the invention, a method is provided for tuning a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherein a charged particle beam is transported through the target component. The method comprises the steps of (a) determining a nominal target parameter value, wherein the target parameter comprises the approximate value of a power supply output feeding the  
30 target component, (b) measuring a nominal readback value of the power supply output, (c) varying the target parameter in a predetermined pattern about the nominal target parameter value, (d) measuring the beam current downstream of the target component in

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 4 -

- the charged particle beam system, and the target parameter readback value of the power supply output, as the target component is varied, (e) determining an optimal readback value, within the range of values bounded by the extreme members of a set comprising at least one measurement of the target parameter readback value recorded nearly
- 5 simultaneously with at least one measurement of the beam current at least a predetermined fraction of the peak observed beam current, (f) adjusting the nominal target parameter value by a predetermined function of the signed difference between the nominal readback value and the optimal readback value, and (g) performing two or more iterations of at least steps (b), (c), (d) and (e) until the beam current measurements meet a predetermined
- 10 criteria.

According to a further aspect of the invention, a method is provided for evaluating the tuning of a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherein a charged particle beam is transported through the target component and the target parameter determines the approximate downstream focus of the charged particle beam. The method comprises the steps of (a) determining a nominal target parameter value, wherein the target parameter determines the approximate position of the charged particle beam at the plane of a beam current sensing device located downstream of the target component, (b) varying the target parameter in a predetermined pattern about the nominal control parameter value, such that the charged particle beam is alternately

15 incident on and not incident on the beam current sensing device, (c) measuring the beam current with the beam current sensing device as the target parameter is varied, (d) determining the sharpness of the transition between the charged particle beam being incident on and not incident on the beam current sensing device, and (e) evaluating the tuning of the target parameter based at least in part on the sharpness of the transition.

20

According to another aspect of the invention, apparatus is provided for evaluating the tuning of a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherein a charged particle beam is transported through the target component. The apparatus comprises means for varying a control parameter of a control component located upstream of the target component, wherein the control parameter has a

25 predetermined relation to the target component, means for measuring the beam current downstream of the target component as the control parameter is varied, and means for

30

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 5 -

evaluating the tuning of the target parameter based on the beam current measurements and the predetermined relation between the target component and the control parameter.

- According to a further aspect of the invention, charged particle beam apparatus is provided. The charged particle beam apparatus comprises a target component controlled by a target parameter, a control component controlled by a control parameter and located upstream of the target component, a beam sensor located downstream of the target component for sensing a charged particle beam transported through the control component and the target component, and a controller for varying the control parameter and evaluating the tuning of the target parameter in response to beam current measurements received from the beam sensor, based on a predetermined relation between the target component and the control parameter.

- According to a further aspect of the invention, a charged particle beam system is provided. The charged particle beam system comprises one or more beamline components through which a charged particle beam is transported, a centralized controller for controlling the system, and at least one localized controller containing a tuning algorithm for automatically tuning a selected one of the beamline components in response to a tune command from the centralized controller.

- According to a further aspect of the invention, a method is provided for adjusting the focus of a charged particle beam. The method comprises the steps of (a) deflecting the charged particle beam across an edge of an aperture, (b) determining the rate of change of beam current downstream of the aperture as the beam is deflected across the edge of the aperture, (c) repeating steps (a) and (b) for different focus settings of the charged particle beam, and (d) selecting the focus setting which gives the highest rate of change of beam current downstream of the aperture as the beam is deflected across the edge of the aperture.

- According to a further aspect of the invention, a tuning method is provided for a charged particle beam system comprising a plurality of beamline components through which a charged particle beam system is transported, a centralized controller and one or more power supply controllers for controlling individual ones of the beamline components. The method comprises the steps of the centralized controller sending a tune command to a selected one of the power supply interfaces, and the selected power supply controller automatically executing a tuning algorithm in response to the tune command.

**Brief Description of the Drawings**

The invention may be better understood by referring to the following detailed description when taken in conjunction with the accompanying figures. In the drawings, 5 each identical or nearly identical component that is illustrated in various figures is represented by a like numeral. For purposes of clarity, not every component may be labeled in every figure. In the drawings:

- FIG. 1 is a block diagram of an embodiment of an ion implanter suitable for implementation of the present invention;
- 10 FIG. 2 is a block diagram of an embodiment of the control system in the ion implanter of FIG. 1;
- FIG. 3 is a block diagram of an embodiment of the power supply interfaces of FIG. 2;
- 15 FIG. 4 is a state diagram of an embodiment of a control program that may be implemented in the central controller and the power supply interfaces of FIG. 2;
- FIG. 5 is a block diagram of the beamline components associated with a tuning procedure in accordance with a feature of the invention;
- 20 FIG. 6 is a schematic block diagram of an example of the target and control components shown in FIG. 5;
- FIG. 7 is a graph of beam current downstream of the resolving slit as a function of magnetic field B in the configuration of FIG. 6;
- FIG. 8 is a graph of beam current downstream of the resolving slit as a function of beam energy E in the configuration of FIG. 6;
- 25 FIG. 9 is a flow chart of an example of a tuning procedure for tuning a target component in accordance with a feature of the invention;
- FIG. 10 is a graph of voltage as a function of time, showing an example of measured readback voltage as the control parameter is modulated;
- FIG. 11 is a block diagram of an embodiment of a first power supply interface and a first subset of components in the ion implanter of FIG. 1;
- 30 FIG. 12 is a flow chart of an embodiment of a program for execution by the power supply interface of FIG. 11;

FIG. 13 is a block diagram of an embodiment of a second power supply interface and a second subset of components in the ion implanter of FIG. 1;

FIG. 14 is a flow chart of an embodiment of a program for execution by the power supply interface of FIG. 13;

5 FIG. 15 is a block diagram of an embodiment of a third power supply interface and a third subset of components in the ion implanter of FIG. 1;

FIG. 16 is a flow chart of an embodiment of a program for execution by the power supply interface of FIG. 15;

10 FIG. 17 is a block diagram of an embodiment a fourth power supply interface and a fourth subset of components in the ion implanter of FIG. 1;

FIG. 18 is a flow chart of an embodiment of a program for execution by the power supply interface of FIG. 17; and

FIG. 19 is a graph of voltage as a function of time, illustrating Faraday readback voltage as the beam is deflected relative to an aperture for different beam sizes.

15

#### Detailed Description

The present invention provides methods and apparatus for automated tuning of charged particle beam systems, including but not limited to ion implanters. Tuning is required when the parameters of the ion beam being generated by the ion implanter, such 20 as ion species and/or ion energy, are changed. In addition, tuning may be required at intervals during operation to compensate for drift and other changes which may affect the ion beam. The present invention provides methods and apparatus for tuning with increased speed in comparison with prior art manual and automated tuning techniques. The invention is particularly useful for tuning of slow response components, such as 25 magnetic components, but is not limited to slow response components. An ion implanter suitable for implementing the present invention is described below. However, the invention is applicable to any ion implanter and, more generally, to any charged particle beam system, such as a charged particle accelerator or a mass spectrometer.

As shown in FIG. 1, an ion implanter 10 includes an ion source 12. Ions from the 30 source 12 are accelerated by application of an extraction voltage to form a positive ion beam 14. The ion beam at this stage includes multiple elements and multiple isotopes of the ionized source material. A particular isotope is selected by a mass analyzer 16. The

ion beam 14 is then conditioned in a low energy magnetic quadrupole 18, which focuses the beam and centers it prior to entering an accelerator 20. The ion beam 14 is accelerated to a desired energy by accelerator 20.

After the ion beam 14 leaves the accelerator 20, it is again conditioned by a high 5 energy magnetic quadrupole 22 which focuses the beam 14 on the entrance to a scanner 24. The beam 14 passes from high energy quadrupole 22 to scanner 24 through a charge state resolving magnet 23 which removes ions having undesired charge states. The scanner 24 scans the beam across the surface of a wafer 27 in an end station 28. A parallelizing magnet 26 is provided to parallelize the beam prior to incidence of the beam 10 14 on the wafer 27 in end station 28, to ensure that the beam 14 is incident on the wafer 27 at a constant angle across its surface. Movable Faraday cups are provided along the beam path to facilitate tuning of the ion beam 14.

#### Control System

15 A control system 29 is provided to control each of the components 12, 16, 18, 20, 22, 23, 24, 26 of the ion implanter. As shown in FIG. 2, the control system 29 may include a central controller 30 and one or more decentralized power supply interfaces. The central controller 30 may be used in conjunction with the decentralized power supply 20 interfaces to set generalized parameters, such as operating voltages and currents, for these components and to tune the individual components to optimize the ion beam.

In one embodiment, the central controller 30 is a combination of hardware, 25 firmware and software components of a computer system configured to receive input from the user of the ion implanter and to use that input to control and tune the ion implanter. The computer system, in this instance, may be configured to run autonomously to enable the ion implanter to generate a desired beam profile without significant intervention by the user, other than initially inputting the desired beam parameters. The invention is not limited to the disclosed embodiments, and may take many different forms depending on the particular requirements of the control system, the physical interrelationship of the components of the ion implanter, and the type of computer equipment employed. For 30 example, the control system may optionally, but need not necessarily, perform additional functions such as tracking individual wafers, regulating dose levels applied to the wafers

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 9 -

during implanting operations, and any other functions commonly performed by a control system associated with the ion implanter.

A block diagram of an example of a suitable control system is shown in FIG. 2. The ion implanter control system 29 includes the central controller 30 and power supply 5 interfaces associated with individual components or groups of components of the ion implanter. Central controller 30 is coupled by a first serial link 32 and a second serial link 33 to a mass analyzer power supply interface 34, a low energy quadrupole power supply interface 36, a high energy quadrupole power supply interface 38 and a parallelizing magnet power supply interface 40. Each of the serial links 32 and 33 connects the power 10 supply interfaces in a loop. The control system 29 may include additional power supply interfaces, as indicated by the dashed portions of serial links 32 and 33. Two serial links connected in opposite directions to the power supply interfaces are utilized for redundancy. The serial links 32 and 33 may utilize optical fiber communication and may 15 utilize the SDLC serial protocol, as known in the art. The power supply interfaces 34-40 communicate with the respective components of the ion implanter and with central controller 30 as described below.

It will be understood that different control system architectures may be utilized. For example, the serial links 32 and 33 may utilize optical or electrical signaling. Furthermore, the serial links 32 and 33 may be replaced by parallel busses or any other 20 suitable communication technique. The central controller 30 may be directly connected to each of the power supply interfaces rather than through a loop configuration.

The functionality of the control system may be partitioned in different ways. In a preferred embodiment, the power supply interfaces 34-40 have sufficient intelligence to perform tuning algorithms as described below. This architecture has the advantage of 25 increased tuning speed where the central controller 30 communicates with the individual power supply interfaces relatively infrequently. In another architecture, most or all of the functionality of the power supply interfaces is incorporated into the central controller 30. This approach has the disadvantage of increased complexity in the central controller 30.

The central controller 30 may be a general purpose computer including a 30 microprocessor, memory devices such as RAM, ROM and disk storage, a user interface and a communication port for communicating with power supply interfaces 34-40. The user interface may include a video monitor, a keyboard and a pointing device, as known in

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 10 -

the art. The computer system may also be implemented in specially programmed, special purpose hardware, application-specific integrated circuits, or any other combination of hardware and software components.

A block diagram of an embodiment of mass analyzer power supply interface 34 is shown in FIG. 3. A general purpose hardware configuration may be utilized, and power supply interfaces 36-40 may have the same hardware configuration. Power supply interface 34 includes a processor (CPU) 150, a random access memory (RAM) 152 and a read only memory (ROM) 154 interconnected by a bus 156. A central controller interface 160 provides an interface between serial links 32, 33 and bus 156. An analog-to-digital converter 162 receives analog inputs from components of the ion implanter and provides corresponding digital signals to bus 156. A digital-to-analog converter 164 receives digital signals on bus 156 and provides analog outputs to components of the ion implanter. A digital I/O interface 166 coupled to bus 156 receives digital inputs from the ion implanter and supplies digital outputs to the ion implanter. The power supply interface is programmed for performing a variety of operating, setup and diagnostic functions and, in particular, for executing tuning algorithms as described below. It will be understood that the power supply interface is not limited to the embodiment of FIG. 3 and that a variety of general purpose and special purpose processor configurations may be utilized within the scope of the invention.

20

#### Control Process

An example of a control process implemented by the ion implanter control system of FIG. 2 is illustrated in FIG. 4. In one embodiment, one subset of the process steps is implemented by central controller 30, and other subsets of the process steps are implemented by power supply interfaces 34-40. In the illustrated embodiment, this split of the control process between the central controller 30 and the power supply interfaces 34-40 advantageously frees the central controller 30 to undertake additional tasks. Additionally, this configuration enables the central controller 30 to delegate control over localized subgroups of components to the power supply interfaces to thereby minimize the number of communication channels required of the computer. Furthermore, by placing part of the control functionality in the power supply interfaces 34-40, ion implanter tuning speed can be increased in comparison with prior art ion implanter architectures wherein

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 11 -

the computer received updates from the power supply interfaces at a rate on the order of 10 Hz to 20 Hz. In the embodiment illustrated in FIG. 4, steps 200-216 and 220-224 are executed by the central controller 30, and steps 218 and 226-238 are executed by one or more of the power supply interfaces 34-40. The invention is not limited in this regard, however, as any convenient split of the control process between central controller 30 and power supply interfaces 34-40 may be utilized. Indeed, the invention is not limited to a system that utilizes a split of the control process in this manner, as the central controller 30 may be configured to execute all steps of the control process, if desired. The processes undertaken to implement the procedures by each power supply interface are discussed in detail below.

In the embodiment shown in FIG. 4, the central controller 30 initially waits for input in step 200. When the central controller 30 receives input from the user in step 208 regarding a desired beam profile to be produced by the ion implanter 10, the central controller 30 retrieves information from a database corresponding to the desired beam profile in step 210. The central controller 30 then outputs initial parameter values to the power supply interfaces 34-40 in step 212 to establish a beam, and instructs the first power supply interface 34 to tune an associated component by sending a tune command to the power supply interface in steps 214 and 216. When the central controller 30 receives a response from one of the power supply interfaces 34-40 in step 218 indicating that the power supply interface has tuned its respective component of the ion implanter 10, the central controller 30 checks to determine if all the power supply interfaces have tuned their respective components in step 220. If not all components have been tuned in step 222, the central controller 30 sends a tune command to the next one of the power supply interfaces 34-40 in steps 214 and 216. When all components have been tuned, the central controller 30 returns in step 224 to wait for additional input in step 200. An ion implanter is typically tuned starting at the ion source and working downstream toward the wafer. However, the invention is not limited in this regard.

The operator of the ion implanter 10 optionally may be updated at one or more intervals during this process. Preferably, the operator of the ion implanter 10 is notified at least in step 224 when the ion implanter has been tuned.

Upon receipt of a tune command in step 216, the respective power supply interface outputs initial control voltages to one or more of the components of the ion implanter 10

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 12 -

over which it has control in step 226. To enable tuning of the components to take place, the power supply interface also outputs a modulation signal to a control component in step 226, as discussed in detail below. The modulation signal is used to modulate a control parameter, such as an operating voltage or current of a control component, for the purpose 5 of monitoring the effect of a target component on the ion beam and thereby determining how to adjust a target parameter that affects the target component.

After setting the initial control voltages, the power supply interface modulates the control parameter and, during the modulation, receives a readback signal in step 228 that is representative of beam current or another beam parameter of interest. The power supply 10 interface uses the readback signal to determine whether the target component is sufficiently tuned and whether alteration of the target parameter is likely to improve the tuning of the target component in step 230. The determination of whether the target component is sufficiently tuned is described below. Since the readback signal reflects the effect of the modulation signal on the ion beam, the power supply interface monitors 15 operation of the ion implanter 10 over a range of values and infers therefrom the direction in which the target parameter should be adjusted to achieve tuning of the target component.

If the target component is not sufficiently tuned in step 232, the power supply interface outputs a new target parameter in step 234. The new target parameter may be 20 calculated using any appropriate algorithm, such as by adding or subtracting a fixed or variable amount from the current target parameter. If the amount to be added or subtracted varies, the particular amount may be determined, for example, by the power supply interface using an interpolation algorithm, integration algorithm, or other algorithm likely to cause the target parameter to converge to the optimal value in an efficient 25 manner, as discussed below.

Once the target parameter has been output in step 234, the power supply interface receives the readback signal in step 228 and again determines if the component is sufficiently tuned in step 230. The power supply interface iterates the tuning process of steps 228, 230, 232 and 234 until it determines that the target component is sufficiently 30 tuned in step 236, as discussed below. Once the power supply interface has completed the tuning procedure, it terminates the modulation signal in step 238 and outputs a tuned response to the central controller 30 in step 218. A power supply interface may be

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 13 -

responsible for tuning one or more components, or one or more parameters of a given component, in which case the power supply interface executes the tuning process of steps 228, 230, 232 and 234 for each component or parameter to be tuned.

5

Tuning Process

One goal of the tuning process is to achieve maximum ion beam current of the desired ion species through the ion implanter beamline. For magnetic components, such as mass analyzer 16 and parallelizing magnet 26, the prior art tuning process typically involved varying the magnet current over a range of values and monitoring the beam current. The magnet current was set at the value which produced maximum beam current. However, the magnetic components used in ion implanters and other charged particle beam systems are typically large and have inherently slow responses to changes in magnet current. Accordingly, the tuning process was inherently slow.

Referring to FIG. 5, the speed of the tuning process is increased, according to an aspect of the invention, relative to prior art tuning processes by modulating a control parameter of a control component 300 and observing the effect on the ion beam downstream of the target component. The modulation, in effect, produces a sweep of the control parameter, either continuously or in steps, over a range of values. The modulation may be a periodic waveform or a series of discrete values, for example. The target component 310 typically has a variable effect on the ion beam as the control parameter is varied, or modulated, because of a special relationship between control component 300 and target component 310.

In FIG. 5, target component 310 is the component that requires tuning and control component 300 is a component that is used to assist in the tuning of target component 310. The ion beam current may be observed, for example, by a beam sensor 312, such as a Faraday beam sensor, located downstream of target component 310. The control parameter and the target parameter are generated by a power supply interface 314, and a beam current readback from beam sensor 312 is monitored by power supply interface 314.

The effect of the modulated control parameter on the ion beam downstream of target component 310 is used to evaluate the need for adjustment of a target parameter of the target component 310. In cases where the evaluation of the tuning of the target component 310 indicates a mistuned condition, the target parameter may be adjusted to

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 14 -

improve tuning. Typically, the target component 310 is a slow response component, such as a magnetic component, and the control component 300 is a fast response component, such as an electrostatic beam accelerator or an electrostatic beam deflector. The tuning procedure relies upon the known relationship between control component 300 and target component 310 and upon the fact that the ion beam current downstream of target component 310 is a function of both the target parameter and the control parameter.

As noted above, the ion beam current may be monitored by a Faraday beam sensor. In other embodiments, the ion beam current may be monitored by a sensing coil, such as a Pearson coil. In one specific embodiment, the ion beam current may be monitored by a modular parametric current transformer available from Bergoz. In general, any device capable of sensing ion beam current may be utilized.

Power supply interface 314, in accordance with a tuning algorithm, modulates the control parameter and evaluates the tuning of the target parameter in response to the beam current readback. If a mistuned condition is observed, the target parameter may be adjusted. The power supply interface 314 receives tuning commands from a central controller and may execute the tuning algorithm autonomously in response to the tuning command.

In the embodiment of FIG. 5, a tuning method referred to herein as the "image" method employs target component 310 and control component 300 located upstream of target component 310. In another embodiment, a tuning method referred to herein as the "search" method does not employ a separate control component, and evaluation of tuning is performed by modulating the target parameter and monitoring the effect of such modulation on the ion beam current downstream of the target component. In a further embodiment, the spot size of the ion beam is evaluated by scanning the beam across the edge of an aperture and evaluating the sharpness of the beam focus.

For any beamline component, such as target component 310, there is a function  $F_1$  relating a target parameter for that component to the beam current. This function may be expressed as a graph, with the target parameter on the X axis and the beam current on the Y axis. When correct tuning corresponds to maximum beam current, which is true for most beamline components, a goal of the tuning procedure is to locate a global peak on this graph and to adjust the target parameter to achieve maximum beam current.

In many cases, a second component, such as control component 300, has a special relationship to target component 310. Specifically, when the system is in a given state, it may be possible to cause the same change to the beam by adjusting the target parameter of target component 310 to a value A or by adjusting the control parameter of control component 300 to a value B. This is useful if it is easier to adjust the control parameter of control component 300 than to adjust the target parameter of target component 310, since similar tuning information may be obtained by adjusting either parameter.

Mathematically, this is expressed as a transfer function T relating the target parameter of target component 310 and the control parameter of control component 300, such that adjusting the control parameter of control component 300 to the value B will result in the same beam current as adjusting the target parameter of target component 310 to value A. In effect, the range of possible settings for target component 310 maps to a range of possible settings for control component 300. This means that information regarding the correct setting of the target parameter of target component 310 may be obtained by varying the control parameter of control component 300.

Advantageously, it is not necessary to know the precise shape of the transfer function T if the transfer function T is a monotonic function. Specifically, the relationship may be exploited as long as the directional relationship between target component 310 and control component 300 is known. Thus, determining whether adjusting the control parameter of control component 300 above or below its baseline value produces the optimal beam current provides information regarding the direction in which the target parameter for target component 310 must be adjusted (assuming that the control parameter of control component 300 is returned to its baseline value).

By way of example, the deflection of a charged particle beam by a deflection magnet is a function of the magnetic field produced by the magnet and the energy of the charged particles in the charged particle beam. The mass analyzer 16 used for selecting a desired species from the ion beam is shown schematically in FIG. 6. Mass analyzer 16 includes a magnet 332, a resolving mask 334 and a magnet power supply 336. Magnet 332 includes spaced-apart magnet polepieces, having a gap between them for passage of ion beam 14, and a magnet coil (not shown). The magnet power supply 336 provides a magnet current to the magnet coil for producing a magnetic field B in the gap between the

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 16 -

magnet polepieces. Resolving mask 334 includes a resolving slit 338 for passing the desired ion species.

The ion source 12 includes an arc chamber 340, an extraction electrode 342 and an extraction power supply 346. Arc chamber 340 generates ion beam 14, and extraction electrode 342 accelerates ion beam 14 to a desired energy. The energy of ion beam 14 is determined by an extraction voltage applied to extraction electrode 342 by extraction power supply 346.

When mass analyzer 16 is properly tuned, the desired ion species in ion beam 14 is deflected by a known angle by magnet 332 and passes through resolving slit 338.

10 Undesired ion species are deflected by different angles and are intercepted by resolving mask 334. The deflection of the desired ion species by magnet 332 is a function of the magnetic field B in the gap between the magnet polepieces, which in turn is an approximate function of the magnet current supplied by magnet power supply 336. In addition, the deflection of ion beam 14 by magnet 332 is a function of the ion beam 15 energy, which in turn is a function of the extraction voltage applied to the extraction electrode 342 of ion source 12.

In this example, the magnetic field B exhibits a slow response to changes in magnet current, whereas the beam energy exhibits a fast response to changes in extraction voltage. In order to rapidly tune the slow response magnet 332, the magnet is designated 20 as the target component and the extraction electrode 342 of ion source 12 is designated as the control component. The extraction voltage (the control parameter) is modulated about a desired baseline value, and the beam current downstream of resolving slit 338 is monitored, typically by a Faraday beam sensor 350. Faraday beam sensor 350 preferably includes a current-to-voltage converter which provides a Faraday readback voltage in 25 response to the sensed beam current. The readback voltage thus represents ion beam current.

The power supply interface obtains a set of paired values of the control parameter and the corresponding beam current. The control parameter values may be predetermined modulation values or measured values. The paired values are obtained simultaneously or 30 nearly simultaneously. The sets of paired values are used to evaluate the tuning of the target component.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 17 -

As shown in FIG. 7, a curve 360 represents the beam current  $I$  downstream of resolving slit 338 as a function of the magnetic field  $B$  produced by magnet 332. The beam current has a peak value for a magnetic field  $B_1$ . Assume that the magnetic field has an initial value of  $B_0$  and that the required beam energy is  $E_1$ , as established by the requirements of the implant process. The goal of the tuning process is to adjust the magnetic field to a value  $B_1$  such that the peak beam current  $I$  downstream of resolving slit 338 occurs at required energy  $E_1$ . As shown in FIG. 8, the beam current downstream of resolving slit 338 is also a function of beam energy  $E$ . A curve 362 represents beam current as a function of beam energy for a mistuned condition where the magnetic field is  $B_0$  and the peak beam current does not occur at energy  $E_1$ . Curve 364 represents beam current as a function of beam energy for a tuned condition where the magnetic field is  $B_1$ , and the peak beam current occurs at energy  $E_1$ .

An example of a process for rapidly tuning mass analyzer magnet 332 to ensure operation at the magnetic field  $B_1$  which produces peak beam current at energy  $E_1$  is described with reference to the flow chart of FIG. 9. The slow response magnet 332 is designated as the target component and the fast response extraction electrode 342 of ion source 12 is designated as the control component. In step 370, the control parameter (extraction voltage) is modulated about the desired value by modulating the extraction control voltage supplied to extraction power supply 346. In the example of FIGS. 6-8, the extraction voltage is modulated so as to modulate the beam energy about required beam energy  $E_1$ , as indicated by arrow 366 in FIG. 8.

In step 372, the beam current downstream of the target component is measured as the control parameter is modulated. In the example of FIGS. 6-8, the beam current downstream of resolving slit 338 is measured by Faraday beam sensor 350. Thus the beam current at a desired deflection angle is measured. FIG. 10 is a graph of voltage as a function of time and illustrates an example of Faraday readback voltage as a function of time during modulation of the control parameter. In FIG. 10, curve 390 represents the modulated control parameter and curve 392 represents the sampled Faraday readback voltage. The center of modulation of the control parameter occurs at time  $t_1$ , and the peak readback voltage occurs at time  $t_2$ , indicating a mistuned condition. The beam current measurements are analyzed in step 374, and, in particular, the peak beam current may be compared with the beam current at the desired beam energy  $E_1$ . The difference between

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 18 -

the peak beam current and the beam current at energy  $E_1$  is indicative of the tuning or mistuning of the target component. That is, where the peak beam current and the beam current at energy  $E_1$  differ, the target component is mistuned.

In step 376, a determination is made as to whether the target parameter is sufficiently close to a desired value representative of optimal tuning. The determination of whether the target parameter is sufficiently close to the desired value is discussed below. However, the determination can be based on a decision that the beam current at energy  $E_1$  is within a specified range of the peak beam current.

When the target parameter is determined in step 376 not to be sufficiently close to the desired value, a target parameter adjustment is determined in step 378. Both an adjustment direction and an increment size are associated with the target parameter adjustment. The adjustment direction is typically known based on a direction of displacement of curve 362 (FIG. 8) from energy  $E_1$  and the operating characteristics of the control and target components. The adjustment direction may be preprogrammed into the controller in response to the beam current measurements obtained in step 372. The magnitude of the target parameter adjustment can also be based on knowledge of the control component and the target component and the difference between the peak beam current and the beam current at energy  $E_1$ . However, a precise adjustment magnitude is not required, since adjustment can be completed in one or more iterations of the tuning process. In one approach, the adjustment increments are larger at the start of the tuning process and decrease on subsequent iterations. In step 380, the target parameter is adjusted in the selected direction by the selected adjustment increment. The process then returns to step 370 to perform another iteration of the tuning process. If a determination is made in step 376 that the target parameter is sufficiently close to the desired value, the tuning process for the target component is complete.

#### Power Supply Interfaces

Individual power supply interfaces 34-40 and components affected by the respective power supply interfaces 34-40 are illustrated in FIGS. 11, 13, 15 and 17. Control of the components of the ion implanter 10 is discussed in connection with power supply interfaces 34-40, which implement the tuning algorithms described herein. Flow

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 19 -

diagrams of embodiments of the tuning processes performed by power supply interfaces 34-40 are shown in FIGS. 12, 14, 16, and 18, respectively.

In FIGS. 11, 13, 15, and 17, the power supplies required for operation of the respective components of the ion implanter are included within the respective blocks, and 5 the power supply interfaces provide control signals to the respective power supplies. Thus for example in FIG. 11, ion source 12 includes extraction power supply 346 (FIG. 6) and mass analyzer 16 includes magnet power supply 336.

As shown in FIG. 11, the mass analyzer power supply interface (PSI) 34 interfaces with the ion source 12 the mass analyzer 16 and a low energy Faraday beam sensor 58.

10 As known in the art, the Faraday beam sensor is a device which produces an electrical current in response to an ion beam. The Faraday beam sensor 58 preferably includes a current-to-voltage converter for generating a Faraday readback voltage in response to the sensed beam current. The PSI 34 outputs an extraction control voltage on line 72 to control the extraction power supply in ion source 12, and a mass analyzer control voltage on line 74 to control the mass analyzer power supply in mass analyzer 16. The PSI 34 communicates with the computer 32 via a control output signal on line 82. The PSI 34 15 also receives, as inputs, a control input signal on line 76 from computer 32, an extraction readback voltage on line 78 and a low energy Faraday readback voltage on line 80. The extraction readback voltage represents the output of the extraction power supply, and the 20 Faraday readback voltage represents the beam current downstream of mass analyzer 16.

In operation, as shown in FIG. 12, the central controller 30 sets up the ion implanter for mass analyzer tuning in step 400. This includes moving low energy Faraday beam sensor 58 into position. In step 402, the central controller 30 sends a tune command to the mass analyzer PSI 34. Approximate values of the control voltages for the selected 25 beam profile are accessed in a system database by central controller 30 and are sent to the mass analyzer PSI 34. The mass analyzer PSI 34 uses the approximate values to set the initial control voltages in step 404. In particular, the mass analyzer PSI 34 sets the initial extraction control voltage on line 72 and the initial mass analyzer control voltage on line 74. The mass analyzer 34 then executes a mass analyzer tuning algorithm in step 406.

30 The tuning algorithm shown in FIGS. 5-10 and described above is utilized. The mass analyzer PSI 34 modulates the extraction control voltage supplied to ion source 12 and monitors the low energy Faraday readback voltage. The readback voltage values are

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 20 -

analyzed to determine required adjustments to the mass analyzer control voltage as described in detail above. Several iterations of the tuning algorithm may be required to achieve the desired tuning. After tuning of the mass analyzer has been completed, a tuned response is sent to the central controller 30 in step 408.

5 Tuning the mass analyzer 16 by modulating the mass analyzer control voltage on line 74 would be time consuming, since the magnet in the mass analyzer 16 may take several seconds to over a minute to stabilize when the control voltage on line 74 is changed.

To achieve faster tuning, the mass analyzer 16 is tuned by modulating the  
10 extraction control voltage on line 72 and monitoring the ion beam downstream of the mass analyzer 16 at the low energy Faraday beam sensor 58. Modulating the extraction control voltage on line 72 so as to vary the ion beam energy is equivalent to modulating the magnetic field of the magnet in mass analyzer 16 and enables the PSI 34 to determine the effect of stronger or weaker magnetic fields on the ion beam 14.

15 Tuning of the low energy magnetic quadrupole 18 is now described in connection with FIGS. 13 and 14. As shown in FIG. 13, the low energy magnetic quadrupole power supply interface (PSI) 36 interfaces with the low energy magnetic quadrupole 18 and a high energy Faraday 62. Specifically, the PSI 36 outputs low energy magnetic quadrupole control voltages on lines 84. The low energy magnetic quadrupole 18 in this embodiment  
20 has several pairs of electrodes, each pair of which receives its own operating voltage from a power supply. Accordingly, the control voltages on lines 84 are used to control multiple parameters of the low energy magnetic quadrupole 18, including left/right balance, up/down balance, strength and trim.

The PSI 36 also receives as inputs low energy magnetic quadrupole readback  
25 voltages on line 86, a high energy Faraday readback voltage on line 88, and a controller input on line 90. The low energy quadrupole readback voltages represent the outputs of the low energy quadrupole power supplies, and the high energy Faraday readback voltage represents the beam current downstream of charge state resolving magnet 23. When the low energy magnetic quadrupole 18 is fully tuned, the PSI 36 outputs a tuned response on  
30 line 92.

In operation, as shown in FIG. 14, the central controller sets up the ion implanter for low energy quadrupole tuning in step 500. The setup includes moving the high energy

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 21 -

Faraday beam sensor 62 into position. In one embodiment, high energy Faraday beam sensor 62 is located between the deflection plates of scanner 24. In another embodiment, high energy Faraday beam sensor 62 is located at a beam dump for parallelizing magnet 26. In this embodiment the parallelizing magnet 26 is turned off in order to make beam current measurements with high energy Faraday beam sensor 62. In step 502, the central controller 30 sends a tune command to low energy quadrupole PSI 36. Approximate values of the control voltages for the selected beam profile are accessed in the system database by central controller 30 and are sent to PSI 36. In step 504, PSI 36 uses the approximate values to set initial control voltages for the selected beam profile. In particular, PSI 36 sets low energy quadrupole control voltages for each of the sets of electrodes of low energy quadrupole 18 on lines 84. PSI 36 then adjusts a control voltage of a selected set of electrodes for peak beam current in step 506. This adjustment may be accomplished by modulating the control voltage of the selected electrodes and observing the control voltage value which provides peak beam current. The control voltage is then set at the value which provides peak beam current. In step 508, the adjustment process is repeated for each set of electrodes of low energy quadrupole 18. After all sets of electrodes have been adjusted for peak beam current, a tuned response is sent to central controller 30 in step 510.

The high energy Faraday beam sensor 62 then may be moved out of the path of the ion beam, if desired, or left in position for use by the other power supply interfaces which tune subsequent beamline elements, such as the charge state resolving magnet 23 or the high energy magnetic quadrupole 22.

To tune the low energy magnetic quadrupole 18, the PSI 36 superimposes an AC component on the DC control voltage of a selected line 84 to form a modulated control voltage. The actual voltages appearing on the electrodes of the low energy magnetic quadrupole 18 are input to the PSI 36 via low energy magnetic quadrupole readback voltages on lines 86. The PSI 36 receives high energy Faraday readback voltage samples on line 88, correlates those voltage samples to the voltages at the electrodes of the low energy magnetic quadrupole 18 and determines the control voltage that provides maximum beam current. The same process is then implemented for each set of electrodes of the low energy magnetic quadrupole 18.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 22 -

Tuning of the high energy magnetic quadrupole 22 is similar to the process for tuning the low energy magnetic quadrupole. Likewise, tuning the charge state resolving magnet 23 is similar in concept to the process for tuning the mass analyzer 14 as discussed above in connection with FIGS. 11 and 12. Tuning of these two components is now 5 described in connection with FIGS. 15 and 16.

As shown in FIG. 15, the high energy magnetic quadrupole power supply interface (PSI) 38 interfaces with the high energy magnetic quadrupole 22, the charge state resolving magnet 23, and the high energy Faraday beam sensor 62. As noted above, high energy Faraday beam sensor 62 may be located in scanner 24 or may be located 10 downstream of parallelizing magnet 26. The PSI 38 outputs high energy magnetic quadrupole control voltages on lines 94 and a charge state resolving magnet control voltage on line 96. The high energy magnetic quadrupole in this embodiment, like the low energy magnetic quadrupole 18, has several pairs of electrodes, each pair of which receives its own operating voltage from a power supply. The electrodes of the high 15 energy magnetic quadrupole 22 in this instance each control one of several beam parameters, for example left/right balance and up/down balance. The high energy magnetic quadrupole 22 may control additional beam parameters, such as strength and trim, if desired.

The PSI 38 receives as inputs high energy magnetic quadrupole readback voltages 20 on lines 98, a high energy Faraday readback voltage on line 100, and a control input on line 102. The high energy quadrupole readback voltages represent the outputs of the high energy quadrupole power supplies, and the high energy Faraday readback voltage represents the beam current downstream of charge state resolving magnet 23. After high 25 energy magnetic quadrupole 22 and charge state resolving magnet 23 have been tuned, the PSI 38 outputs a tuned response on line 104.

In operation, as shown in FIG. 16, central controller 30 sets up the ion implanter for high energy quadrupole tuning and charge state resolving magnet tuning in step 600. The setup involves moving the high energy Faraday beam sensor 62 into position for beam sensing. In step 602, the central controller 30 sends a tune command to high energy 30 quadrupole PSI 38. Approximate values of the control voltages for the selected beam profile are accessed in the system database and are sent to PSI 38. In step 604, PSI 38 sets initial control voltages in accordance with the approximate values transmitted from central

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 23 -

- controller 30. In particular, PSI 38 sets high energy quadrupole control voltages on lines 94 and a charge state resolving magnet control voltage on line 96. In step 606, the PSI 38 adjusts the control voltage of a selected set of electrodes of high energy quadrupole 22 for peak beam current. As described above in connection with the low energy quadrupole 18, 5 the PSI 38 superimposes an AC component on the DC control voltage of a selected set of electrodes to provide a modulated control voltage. The high energy Faraday readback voltage is monitored as the quadrupole control voltage is modulated, and the control voltage is adjusted to the value which provides peak beam current. In step 608, the adjustment is repeated for each set of electrodes of high energy quadrupole 22.
- 10 In step 610, a charge state resolving magnet tuning algorithm is executed. The charge state resolving magnet 23 separates ions having different charge states by causing different deflections of ions according to charge state. The tuning algorithm for the charge state resolving magnet 23 corresponds to the tuning algorithm described above in connection with FIGS. 5 and 9. In this algorithm, the target component is the charge state 15 resolving magnet 23, the target parameter is the charge state resolving magnet control voltage, the control component is a selected set of electrodes of high energy quadrupole 22 and the control parameter is the control voltage of the selected set of high energy quadrupole electrodes. The high energy quadrupole 22 is designed such that the selected set of electrodes produces a deflection of the ion beam in response to the control voltage.
- 20 The deflection causes the ion beam to enter the charge state resolving magnet 23 at an entry angle that is a function of the beam deflection. The differing angles at which the ion beam enters charge state resolving magnet 23 cause the ion beam to exit from charge state resolving magnet 23 at different positions. The beam current varies as a function of entry angle. If the peak beam current occurs at an entry angle that differs from the desired entry 25 angle, an adjustment to the charge state resolving magnet control voltage is determined. The determined adjustment is applied to the charge state resolving magnet, and the measurement is repeated. The tuning process is continued until the peak beam current occurs at the desired beam entry angle. In this tuning algorithm, the entry angle of the ion beam into the charge state resolving magnet 23 is the modulated control parameter.
- 26 Tuning the charge state resolving magnet 23 by modulating the control voltage on line 96 would be relatively time consuming, since magnet 23 has a relatively long

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 24 -

response time and may take a substantial amount of time to stabilize once a change has been made to the control voltage on line 96.

To quickly tune the charge state resolving magnet 23, one of the control voltages supplied to the high energy quadrupole is modulated to simulate modulation of the charge state resolving magnet control voltage. Modulation of the high energy quadrupole control voltage causes deflection of the ion beam and a variation of the entry angle of the ion beam into charge state resolving magnet 23. Modulation of the high energy magnetic quadrupole 22 control voltage enables the PSI 38 to image the ion beam during the course of the modulation and to use the image to tune the charge state resolving magnet 23 as discussed above. In this context, modulating the high energy magnetic quadrupole control voltage on line 94 may be treated as equivalent to modulating the magnetic field of the charge state resolving magnet 23, since either modulation enables the PSI 38 to determine how a stronger or weaker magnetic field affects the ion beam 14. If the PSI 38 determines that the charge state resolving magnet is not tuned, it determines the direction in which the control voltage on line 96 should be adjusted and makes the appropriate adjustment.

In step 612, a focusing algorithm for focusing high energy quadrupole 22 is executed. The focusing algorithm involves application of a modulated control voltage to a selected set of electrodes of high energy quadrupole 22. The modulation causes the ion beam to sweep slowly across an aperture 106 between scanner entrance plates 108.

The high energy Faraday beam sensor 62 is located behind aperture 106 and thus detects the beam 14 only when the beam is not blocked by scanner entrance plates 108. Applicants determined that it is possible to relate the rate of change of the Faraday readback voltage to the spot size of the ion beam 14 at the aperture 106. Specifically, applicants determined that an ion beam with a smaller diameter transitions across the edge of the aperture 106 faster than an ion beam with a larger diameter, assuming a constant sweep rate. Accordingly, by searching for the largest first derivative of the readback voltage as the beam is swept across the Faraday beam sensor 62, it is possible to tune the control voltages of the high energy magnetic quadrupole 22 to minimize the spot size, and hence to focus the beam at the entrance to the scanner 24.

Examples of the Faraday readback voltage as a function of time, for different spot sizes, as the ion beam is swept across aperture 106 are illustrated in FIG. 19. Curves 630, 632 and 634 represent large, medium and small beam diameters, respectively. As

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 25 -

illustrated, curve 634, which represents a small beam diameter, transitions quickly across the edge of aperture 106 and has the largest first derivative of the readback voltage.

After the focusing algorithm has been executed in step 612, the PSI 38 sends a tuned response to central controller 30 in step 614.

5 Tuning of parallelizing magnet 26 and an optional final tuning of the high energy magnetic quadrupole 22 is now described with reference to FIGS. 17 and 18. As shown in FIG. 17, the parallelizing magnet power supply interface 40 receives a control input on line 110 and outputs control voltages to high energy magnetic quadrupole 22 on lines 112, a control voltage to scanner 24 on line 114, and a control voltage to parallelizing magnet 10 26 on line 116. The PSI 40 also receives high energy magnetic quadrupole readback voltages on lines 118 and a profiling Faraday readback voltage on line 120. The high energy quadrupole readback voltages represent the outputs of the high energy quadrupole power supplies, and the profiling Faraday readback voltage represents the beam current downstream of parallelizing magnet 26. A profiling Faraday beam sensor 68 is located in 15 end station 28 and is preferably positioned at the center of its travel.

The PSI 40 tunes the parallelizing magnet 26 by deflecting the ion beam with the scanner 24 and monitoring the effects of deflection on the profiling Faraday readback voltage. Specifically, the parallelizing magnet 26 responds relatively slowly to changes in the control voltage on line 116, as compared to the response time of the scanner 24.

20 Accordingly, it is faster to deflect the ion beam 14 with the scanner 24 to simulate modulation of the parallelizing magnet control voltage. The PSI 40 uses the readback voltage from the profiling Faraday beam sensor 68 to determine the direction in which the control voltage of the parallelizing magnet should be adjusted.

In operation, as shown in FIG. 18, the central controller 30 sets up the ion 25 implanter for tuning of parallelizing magnet 26 in step 700. This includes moving the profiling Faraday beam sensor 68 to the center of its travel. In step 702, the central controller 30 sends a tune command to parallelizing magnet PSI 40 with approximate values of the control voltages for the selected beam profile. In step 704, the PSI 40 sets the initial control voltages corresponding to the approximate values transmitted from 30 central controller 30. In particular, PSI 40 sets initial high energy quadrupole control voltages on lines 112, a scanner control voltage on line 114, and a parallelizing magnet control voltage on line 116. The PSI 40 then executes a parallelizing magnet tuning

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 26 -

- algorithm in step 706. In particular, the scanner control voltage on line 114 is modulated to produce a deflection of ion beam 14. This causes the entry angle of the ion beam into parallelizing magnet 26 to vary in accordance with the deflection. The variation in entry angle produces a variation in the position of the ion beam at the output of parallelizing magnet 26. The profiling Faraday beam sensor 68 senses the beam and provides a Faraday readback voltage to PSI 40 as the beam is deflected by scanner 24. The deflection angle which produces peak beam current is used to determine a required adjustment to parallelizing magnet control voltage 116. The process is repeated until the peak beam current is obtained for a desired deflection of the ion beam by scanner 24.
- 10        The parallelizing magnet tuning algorithm is similar to the algorithm used for tuning the charge state resolving magnet 23, as described above. In particular, the magnet is the target component and the magnet control voltage is the target parameter. The control component is the scanner 24, which produces deflection of the ion beam in response to modulation of the scanner control voltage. In this algorithm, variation of the entry angle of the ion beam into the parallelizing magnet 26 is equivalent to varying the magnetic field of parallelizing magnet 26. However, the entry angle can be varied much more quickly than the magnetic field, thus permitting faster tuning. After completion of the parallelizing magnet tuning algorithm in step 706, the PSI 40 sends a tuned response to central controller 30 in step 708.
- 15        The preceding description has focused on an ion implanter and a method and apparatus for tuning an ion implanter. The invention is not limited in this regard, however, as the invention can be applied more broadly to tune any charged particle beam system.

25

#### Tuning Procedure

One embodiment of a tuning procedure is now described in more detail. The control system shown in FIG. 2 implements a specific procedure depending on the type of component being tuned. The tuning procedures implemented by the control system may be generally grouped, however, into three methods: image, search and spot size tuning.

- 30        The image method is used to tune slow-response components, such as magnets. In this method, an electrostatic component is modulated such that the beam is effectively

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 27 -

"imaged" continuously while the magnet or other slow response component is adjusted to the correct setting (see FIG. 12).

One embodiment of an exemplary image is set forth in FIG. 10. As shown in FIG. 10, in the image tuning method, the control voltage applied to a control component, such as an electrostatic component, is varied and the response represented by the readback voltage, typically acquired by a Faraday beam sensor, is recorded during the modulation. This forms an "image" of the spatial distribution of the beam presented to the magnetic component. The control voltage of the magnetic component may be adjusted to bring the strongest portion of the beam into correct alignment out of the magnetic component.

10 The search method may be used to tune fast-response electrostatic components. In this method, the component being tuned is modulated to effectively "image" the area surrounding the present value, and the center point of the modulation is adjusted toward the peak. This provides robustness against beam fluctuations, and can be implemented with the same tuning algorithm as the image method.

15 Spot size tuning may be used to tune the high energy magnetic quadrupole 22 and any other component that affects beam focus. Whereas the search and image methods seek to maximize beam current, this step also monitors the beam spot size. Tuning of this parameter is accomplished by evaluating the sharpness of the beam focus, as indicated by the first derivative of the beam current as a function of beam position.

20 Within this generalized framework, the control system must make specific measurements and draw from these measurements conclusions regarding optimal parameters for tuning the beam 14. Several aspects of the manner in which the control system arrives at its conclusions are now described.

25 **Entry Conditions**

The control system starts the tuning process by establishing certain initial conditions. For example, when there is no beam, or when the beam is unstable due to a rising temperature or changing species, tuning cannot be conducted. In general, it is assumed that the implanter is running a stable beam, and that the control system has 30 initialized the beamline control parameters to values that are approximately correct for the given implant process to be affected.

Of course, it is not expected that the control system can initialize the beamline to fully tuned values. In that case, tuning would be unnecessary. The term "approximately correct," in this context, therefore, means that for each component that is tuned, there is a certain capture range -- if the difference between the initial value and the tuned value is 5 within this range, tuning can be accomplished. In general, the control system accepts parameters that are adjusted to create an appropriate capture range.

#### Firmware Parameters

The modulation tuning procedure disclosed herein is an iterative process, wherein 10 a core algorithm is repeated until tuning is complete. Each iteration, essentially, is an independent process. During each iteration, the process collects data, analyzes the data, and adjusts the tuning. Specifically, a control parameter is varied through a series of steps (both above and below a nominal value), the beam current is monitored, and relevant data is stored. At the end of the cycle, the stored data is analyzed to determine how the target 15 parameter should be adjusted. Finally, the target parameter is adjusted towards its tuned value.

Various conditions must be accounted for in each iteration. For example, there are phase lags in some hardware, most notably the power supplies. These phase lags may disrupt the purity of the algorithm, in that a control parameter modulation from one cycle 20 may actually fall into the period of the following cycle. This is generally a minor issue, since all cycles involve such modulations, and the algorithm depends upon readbacks (not commands) to determine how a power supply is actually functioning.

Likewise, data from a single cycle may be insufficient to declare that the device is optimally tuned. Therefore, data from a number of cycles may be collected and correlated 25 with preceding cycle(s) or immediately preceding cycle(s) to confirm a provisional success.

Finally, as the tuning process proceeds, the target component is adjusted closer to a tuned condition. In one embodiment, the cycle-level parameters are altered at this stage. Early cycles, in this embodiment have a broad capture range, to be able to discriminate 30 against false peaks, and simply try to place the peak into a central area so that the region examined can be reduced. Later cycles, in this embodiment, have a smaller capture range,

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 29 -

depending upon an input condition where the target component is nearly tuned, and pay special attention to end conditions that indicate optimal tuning.

Data Collection

5        The primary factors affecting the data collection phase include the shape and speed of the control parameter modulation. It is assumed that readbacks of the beam current and the true value of the control parameter are performed as frequently as possible, within firmware constraints, so no readback parameter need be transmitted from the central controller 30 to the power supply interface, although a readback frequency parameter  
10      could be included, if desired.

In general, any desired wave shape may be used in connection with the control parameter modulation. However, since it is generally undesirable to produce a rapid change in any parameter, a gradual back-and-forth variation about the nominal value is preferred. This may be a sine wave, a triangle wave, or a similar wave shape. A triangle  
15      wave is currently envisioned as optimal, since it minimizes the maximum rate of change of the control parameter.

Since there is no special need for a particular wave shape, in one embodiment, the software is configured to generate its own sequence of control parameter voltages, given the desired amplitude of the control parameter modulation. In another embodiment, to  
20      maximize flexibility without introducing a large number of parameters, an adjunct parameter is used to specify, by enumeration, what general type of curve shape is desired from a predetermined set of options (sine, triangle, ramp-then-drop, etc.).

The speed of the control parameter modulation, unlike the shape, however, is generally important. If the modulation is too fast in relation to the amplitude, the power  
25      supply driving the control parameter may not be able to keep up. If the modulation is too fast in relation to a firmware limit of how rapidly control parameter changes can be commanded, the command parameter curve may be ragged. If the modulation is too fast in relation to how rapidly the beam current readback is sampled, there may be gaps in the resulting beam image, resulting in data collection that misses the true peak. Conversely, if  
30      the modulation is too slow, the entire tuning process may be unacceptably slow.

Two types of speed variables are involved. One variable is the duration of an entire cycle, while the other is the interval between control parameter commands. If it is

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 30 -

assumed that commands may be sent at a firmware-dictated limit, then the algorithm may automatically create a step sequence of the appropriate granularity, given a desired cycle period. In this case, the only speed parameter is the cycle period. Some factors bounding acceptable values are dependent upon the firmware's operating speed (e.g. readback rate),  
5 while others are dependent upon physical time (e.g. power supplies).

#### Data Analysis

In the data analysis phase, the PSI determines whether the target parameter is too high, too low, or within an acceptable range. Various aspects of the data analysis phase,  
10 such as optimization, determining whether the target parameter is close enough, and error detection are now discussed.

#### Optimization

Initially, the PSI must determine a value for the optimal control parameter setting.  
15 One approach is to record the control parameter readback that corresponds to the highest beam current that was observed.

A potential problem with this approach is that it may not allow for end-case discrimination. The peak may not be in a single defined control parameter setting - there  
20 may be a flat plateau with optimal beam current over a range, and the tuning procedure may make it desirable to find the center of that range. Simply choosing the best observed beam current draws the process towards a random point in this plateau on each cycle. If the algorithm is asked to tune at a level of fineness where it observes a plateau, these phantom pulls cause the algorithm to enter an endless fine-tuning chase towards the ever-moving "best" point on the plateau.

25 In one embodiment, to address this issue, the control parameter readbacks from all readings that show near-optimal beam currents are averaged. This method aims towards the center of the plateau. This requires a parameter declaring what constitutes near-optimal, as a fraction of the peak observed beam current during that cycle. Conceptually, this parameter may be considered a threshold relating to the plateau height. To return to  
30 the simple case of driving toward the single best beam current observation, this parameter can be set to 100 percent and only the peak reading is used.

When part, but not all, of the plateau is visible (because the control parameter modulation takes the beam off one edge of the plateau, but not the other), the averaging technique still yields the correct result regarding the direction of the optimal setting for the target parameter. Specifically, if only one edge of the plateau is visible, the target is  
5 clearly not tuned to the center of the peak, since a symmetrical variation of the control parameter reaches only one edge of the plateau. The center point, in this situation, is away from the visible edge of the plateau.

Once the optimal control parameter setting has been determined, it is necessary to determine whether the target parameter is too high or too low. This depends upon a  
10 polarity indicating the sign relationship between variation of the control parameter and the corresponding effect on the beam.

#### Determining "Close Enough"

In connection with determining the optimal control parameter, it is necessary to  
15 determine whether the target parameter is close enough to the correct tuning. If there is a direct and reliable relation between the control parameter and the beam current, one parameter is sufficient to indicate how close is close enough. This can be provided either as a count, for example, of units of control parameter variation or as a fraction of the full control parameter modulation range.

20 There are complicating factors, however. First, the beam current is noisy, and it may be necessary to demonstrate that the "close enough" condition is reliable across several cycles with the target parameter unchanged. Second, as noted above, there may be a flat plateau with optimal beam current over a range. Third, with some parameters, it is not really ideal to land on the center of the peak, but it is preferred to shift toward one side  
25 of the peak. The first of these issues implies some statistically driven parameter, while the second and third require some assumptions about the possible curve shapes that might be encountered.

The simplest approach to the statistical issue is to require a series of consecutive readings to all indicate "close enough." More elaborate methods might allow for  
30 occasional readings falling outside this window (such as a 3-of-4 voting rule). There is, however, a complication with methods that allow out-of-bounds results from a cycle. Specifically, if a cycle shows not close enough, the normal response of this algorithm is to

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 32 -

command an adjustment to the target parameter. Since the target component is now tuned differently, prior readings are no longer directly relevant to a statistical determination of the accuracy of the new tuning. Therefore, a statistical approach that considers readings outside the "close enough" range must inhibit tuning operations while voting is in progress.

5 A consecutive-reading approach may be viewed as a base case of this voting method, something like a 3-of-3 rule. Under this approach, a single out-of-bounds cycle causes tuning to resume. Therefore, it may be advantageous to incorporate a voting method into the firmware to allow maximum flexibility.

10

#### Error Detection

A few types of errors may be considered for trapping. For example, in some situations, a false peak may appear in the readback voltage. A false peak represents a peak in the beam current due to the charged particle beam system being tuned to an undesired isotope or element. If the true peak is higher than the false peak (by enough margin that the false peak is below the plateau height threshold), then the false peak is simply ignored. But if the true peak is lower than the false peak, something is needed to eliminate the false peak. Optionally, judicious selection of parameters and starting conditions may prevent the false peak from being detected by the PSI. In other situations, however, more elaborate procedures are required to remove the false peak.

15 In one embodiment, the false peak is removed by triggering an early termination of voting upon a cycle with a badly out-of-bounds result. This is an extension of the basic method, described above, which ignores the magnitude of the result from each cycle; but rather simply determines whether the result is within bounds, or out of bounds. To 20 implement this method, a parameter (with units similar to the "close enough" threshold parameter) is provided specifying, if a cycle is outside a particular range, that voting terminates and the process reverts to tuning.

In another embodiment, the shape of the curve (beam current vs. control parameter) is provided with additional definition, both with respect to the type of curve 25 that might be encountered, and in how the algorithm responds to these conditions to efficiently and accurately tune the implanter. Specifically, in such situations, the correct

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 33 -

tuning may not be toward the optimal beam current, or at the center of a plateau, but offset from this location.

#### Tuning Adjustment

5 Once the data analysis phase has determined how (and if) the target parameter should be adjusted, the final step is to actually adjust the target parameter toward a correct tuning. One issue is the magnitude of the change that should be commanded.

It may not be easy, or even possible, to calculate from the available data the magnitude of the necessary tuning change. However, it is generally fast and possible to  
10 determine the direction in which to adjust the target parameter to approach its optimal value.

At a given point in the tuning process - e.g., at a given cycle - there is generally a relationship between the range swept with the control parameter and the compensatory scale of adjustment anticipated for the target parameter. This knowledge may be stored  
15 externally, and generally need not be conveyed to the firmware. Accordingly, in one embodiment, the firmware is provided with a desired step size of the target parameter. If tuning is indicated by the data analysis, the target parameter is adjusted by the step size in the indicated direction.

The invention is not limited to using a set step size, however, as some higher  
20 degree of intelligence may be employed. For example, if the data analysis indicates that the target is just outside the "close enough" range, a smaller change in the target parameter may be desirable. There are two basic approaches to this estimation. One is to have several "bins" with different values for the magnitude by which the target parameter is adjusted; the other is to have a linear or polynomial function by which a magnitude is  
25 calculated. If desired, both methods may be made available. In any of these methods, the magnitudes of positive and negative changes need not be symmetric.

#### Slew Rate of Target Parameter

The preceding sections focused on the magnitude of the target parameter changes,  
30 without addressing the rate at which these changes are commanded. As with the control parameter, there is an upper limit for the speed at which the target parameter may be adjusted.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 34 -

It is desirable for the control parameter to continue cycling throughout the tuning process to minimize time varying effects, such as delays in the power supply. Additionally, a modulation waveform that abruptly starts and stops may be awkward to utilize if there is a phase shift. Further, the power supply may respond poorly to such 5 input.

Since the algorithm uses information from one cycle to learn how the target parameter must be adjusted, it is assumed that the target parameter is adjusted once per cycle. If that is too fast, then one solution is to simply slow down the cycles so that they take longer. One adverse consequence of a slower cycle is that tuning takes longer. This 10 should not be a limiting consideration, however, if the reason the speed is limited is a limitation on the speed at which the target parameter may be adjusted. Therefore, in a preferred embodiment, it is not necessary to include an independent parameter for the speed at which the target parameter is adjusted.

15 **Multiple Cycles**

The above consideration has focused on the level of individual tuning cycles. Full tuning, however, is an iterative process across many cycles. The cycle-level parameters may change during a tuning sequence as finer levels of granularity are used. As discussed above, the tuning command by the central controller 30 initiates a multi-cycle tuning 20 process, during which the firmware in the PSI is essentially autonomous. It is therefore necessary for the firmware to determine the appropriate cycle-level parameters for each phase of tuning.

In a preferred embodiment, tuning is a sequence of discrete phases, each phase based upon an entry condition, an exit condition, and a tuning strategy. The entry 25 condition relates to the "capture range" that is needed - how badly tuned the target component may be at the start of that phase. The exit condition relates the required tuning accuracy at that phase (early phases need only be within the capture range of the next phase, while the final tuning must be operationally satisfactory). The strategy is expressed in the range of parameters selected to progress from the entry state to the exit state.

30 In one embodiment, where a small number of phases is anticipated, i.e., - between about one and ten, the firmware may be an array of parameters, with one element for each phase.

Failure Response

- Tuning attempts sometimes fail. The system is able to detect failures, to respond appropriately with a second tuning attempt, and to report failures to the central controller
- 5    30 if the beam is not optimized.
- Even if the beam is found, the tuning process may fail for a number of reasons:
- 1) Power supplies may not be stabilized easily. As a result, a tuned beam may drift out-of-tune in the seconds following a tuning "success." In this case, the tuning process should be made slower, such as by lengthening the cycle time, or variations should
- 10    be made less extreme, i.e., the amplitude of the control parameter modulation should be reduced, or the magnitude of the target parameter adjustment should be reduced.
- 2) The algorithm may, for some reason, wander away from the beam. If the algorithm is within the "capture range" for the current level of granularity, then it is generally possible to recapture the beam. However, if the beam has left the capture range,
- 15    the system will react as if the beam is not found.
- 3) The algorithm may prematurely declare tuning complete. In this case, the "termination condition parameters" for ending the last tuning iteration are inadequate.
- 4) The system may find the false peak and optimize to that peak.
- In one embodiment, an expected minimum beam current parameter is used to
- 20    reduce the risk of finding the false peak or tuning within noise. The minimum current parameter tells the algorithm what kind of signal to expect. If the minimum beam current is not detected, then something is wrong enough to prevent tuning. The initial state of the machine may be outside the "capture range" of the tuning algorithm, or the beam may simply not be present.
- 25    To allow some reaction to no beam current, in one embodiment, the tuning algorithm may attempt a broader tuning sweep in this situation, since this type of error generally indicates that the beam is outside the range of the current tuning phase. Since this error may be encountered at any phase, it is most reasonable (except in the very first phase, when this is impossible) to simply revert to the first tuning phase. This allows the
- 30    system to take a wider view, and appropriately governs the behavior of the system during the broader search. Optionally, if this error occurs in the first phase, an ordinarily-skipped "zero phase" with an exceptionally broad range can be attempted.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 36 -

In an alternative embodiment, the step of evaluating the present tuning of the ion beam (step 230 in FIG. 4) may comprise a Fourier analysis of the beam current readback. Modulation of the control parameter induces a modulation of the beam current downstream from the control parameter. If the beamline is correctly tuned, the beam 5 current waveform will have regular peaks at the frequency of the control parameter modulation. However, if the beamline is incorrectly tuned, then the beam current waveform will have a "double bump" pattern that will introduce an impurity into the frequency spectrum of the beam current readback, including a high frequency component produced by the interval between these two peaks. These frequency impurities indicate 10 incorrect tuning of the target parameter. A frequency analysis of these impurities, combined with knowledge of the specific waveform employed, may be used to determine whether the target parameter should be increased or decreased to improve tuning.

Tune Command

15 The tuning process is initiated by a single command containing parameters, discussed above, that enable the PSI to tune the beam. In an exemplary tuning command, a first data structure is transmitted, comprising several cycle independent parameters such as:

- 20 1) Minimal beam current;
- 2) Target parameter - minimum value;
- 3) Target parameter - maximum value;
- 4) Control parameter - minimum value; and
- 5) Control parameter - maximum value.

25 In addition, as a sixth element, the first data structure may include an array of a second data structure, with one array element for each tuning phase. This second data structure may comprise parameters such as:

- 30 1) Amplitude of control parameter modulation.
- 2) Type of control parameter modulation waveform.
- 3) Control parameter modulation cycle period.
- 4) Polarity of relationship used to determine sign of tuning required.

- 5) Plateau height threshold, for selecting data used to find averaged center of peak.
- 6) "Close Enough" threshold, for determining adequate tuning for terminating a phase.
- 5 7) Target Adjustment Magnitude for extreme positive off-peak condition.
- 8) Target Adjustment Magnitude for near-center condition.
- 9) Target Adjustment Magnitude for extreme negative off-peak condition.
- 10) Voting Termination Threshold, for detection of unreliable data for declaring success.
- 10 11) Number of trials that must be "close enough" to declare success.
- 12) Number of trials within which the preceding value must be achieved.

These lists of parameters are not exhaustive, as additional parameters may be desired or required, depending on the protocol or configuration of the control system and the  
15 particular hardware or firmware used. For example, additional parameters may be required to specify I/O lines, or to make the interrelationship between the hardware and firmware flexible.

#### Tuning Confirmation

- 20 In a standard application for an ion implanter, silicon wafers are sequentially presented to the beamline as wafer 27 (Fig. 1) for an ion implant process. Over an extended time, drift in beamline components may cause a correctly tuned beam to become slightly mistuned. To ensure proper quality, it may be desirable to periodically evaluate the beam tuning, to detect any developing mistuning before processing additional wafers.
- 25 It may be desirable to evaluate beam tuning without initiating a standard tuning process. Beam evaluation can be performed much more rapidly than beam tuning, and so evaluations can be performed more frequently during wafer processing without impacting wafer throughput. If the beam is found to be sufficiently mistuned, it is desirable to alert the operator, suspend wafer processing, and optionally initiate a full beam tuning procedure.
- 30 To evaluate the beam for this purpose, a portion of the full tuning method may be used. Specifically, the target parameter may be modulated about its initial value, and then

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 38 -

restored to that value, while the beam current is sampled downstream of the control component. The standard beam evaluation procedure, used at the end of the tuning process to confirm that the beam is correctly tuned, may be used to evaluate the beam quality.

5 It should be understood that various changes and modifications of the embodiments shown in the drawings and described in the specification may be made within the spirit and scope of the present invention. Accordingly, it is intended that all matter contained in the above description and shown in the accompanying drawings be interpreted in an illustrative and not in a limiting sense. The invention is limited only as  
10 defined in the following claims and the equivalents thereto.

What is claimed is:

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 39 -

**CLAIMS**

1. A method for evaluating the tuning of a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherein a charged particle beam is transported through said target component, comprising the steps of:
    - 5 (a) varying a control parameter of a control component located upstream of the target component, wherein said control parameter has a predetermined relation to said control component;
    - (b) measuring beam current downstream of said target component in said charged particle beam system as said control parameter is varied; and
  - 10 (c) evaluating the tuning of said target parameter based on the beam current measurements and the predetermined relation between the target component and the control parameter.
2. A method as defined in claim 1, wherein the step of evaluating the tuning of said target parameter comprises determining whether the beam current is at least a predetermined fraction of the maximum observed beam current when said control parameter is at its initial value.
  - 15 3. A method as defined in claim 2, further comprising the step of performing two or more iterations of all steps until a predetermined voting criteria is reached.
  4. A method as defined in claim 3, where said predetermined voting criteria comprises the beam current exceeding a predetermined fraction of the maximum observed beam current, in at least a predetermined number of iterations.
- 25
5. A method as defined in claim 1, wherein the step of evaluating the tuning of said target parameter comprises determining whether maximum beam current is measured when said control parameter is offset above or below its initial value.
- 30 6. A method as defined in claim 1, wherein the step of evaluating the tuning of said target parameter comprises determining whether said target parameter is tuned to a higher or lower value than would result in maximum beam current measured downstream

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 40 -

from said target parameter, based upon the beam current measurements and the predetermined relation between said target component and said control parameter.

7. A method as defined in claim 1, further comprising the step of adjusting  
5 said target parameter based upon the evaluation of said target parameter.

8. A method as defined in claim 7, further comprising the step of performing  
two or more iterations of all steps until the measured beam current meets a predetermined  
criteria.

10 9. A method as defined in claim 8, wherein the variation of said control  
parameter is smaller in magnitude during an iteration than in a preceding iteration.

15 10. A method as defined in claim 8, wherein said predetermined criteria  
constitutes the beam current being at least a predetermined fraction of the maximum  
observed beam current when said control parameter is at its initial value.

11. A method as defined in claim 7, wherein the step of adjusting said target  
parameter comprises analyzing the beam current measurements to determine a target  
20 parameter adjustment and adjusting said target parameter by the determined target  
parameter adjustment.

12. A method as defined in claim 11, wherein the step of analyzing the beam  
current measurements comprises determining a target parameter adjustment direction and  
25 magnitude to shift a peak beam current toward a required value of said control parameter.

13. A method as defined in claim 1, wherein said target component comprises a  
magnet which generates a magnetic field in response to a current, and wherein said target  
parameter comprises the approximate current supplied to said magnet.

30 14. A method as defined in claim 13, wherein the control component comprises  
an electrostatic component which generates an electric field in response to a control

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 41 -

voltage and wherein the step of varying the control parameter comprises varying the control voltage.

15. A method as defined in claim 13, wherein said control parameter comprises  
5 the approximate entry angle of the charged particle beam into said magnet.

16. A method as defined in claim 13, wherein said control parameter comprises  
the approximate entry velocity of the charged particle beam into said magnet.

10 17. A method as defined in claim 13, wherein said target component comprises  
a bending magnet of a mass analyzer.

18. A method as defined in claim 13, wherein said target component comprises  
a charge state resolving magnet.

15 19. A method as defined in claim 13, wherein said target component comprises  
a parallelizing magnet for converting trajectories of said beam into substantially parallel  
trajectories.

20 20. A method as defined in claim 1, wherein said target component comprises  
an electrostatic component which generates an electric field in response to a voltage, and  
wherein said target parameter comprises the approximate voltage applied to said  
electrostatic component.

25 21. A method as defined in claim 1, wherein said control parameter comprises  
the approximate value of a power supply output feeding said control component.

22. A method as defined in claim 21, further comprising the step of measuring  
the value of said power supply output during the variation of said control parameter.

30 23. A method as defined in claim 22, further comprising the step of  
determining a secondary value of said power supply, within the range of values bounded

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 42 -

by the extreme members of a set comprising at least one measurement of said control parameter readback recorded nearly simultaneously with at least one measurement of said beam current at least a predetermined fraction of the peak observed beam current.

5        24. A method as defined in claim 23, further comprising the steps of reading a nominal control parameter readback value prior to initiating the variation of said control parameter; and adjusting said target parameter from its initial value by a predetermined function of the signed difference between said secondary value of said power supply and said nominal control parameter readback value.

10

25. A method as defined in claim 1, wherein the step of varying said control parameter comprises modulating the control parameter with a periodic waveform.

15        26. A method as defined in claim 1, wherein the step of varying said control parameter comprises stepping the control parameter through a predetermined pattern of discrete values.

20        27. A method as defined in claim 1, wherein said control parameter comprises the approximate value of a power supply output feeding said control component.

25

28. A method as defined in claim 27, wherein the step of varying said control parameter comprises stepping the control parameter through a predetermined pattern of discrete values more rapidly than said power supply output can stabilize in response to each setting.

25

29. A method as defined in claim 1, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current with a Faraday beam sensor located downstream of said target component.

30

30. A method as defined in claim 1, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current with a parametric current transformer located downstream of said target component.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 43 -

31. A method as defined in claim 1, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current samples for different values of said control parameter.

5

32. A method as defined in claim 1, further comprising the step of restoring said control parameter to its initial value.

33. A method as defined in claim 1, wherein said control parameter responds to  
10 adjustment more rapidly than said target component responds to adjustment.

34. A method as defined in claim 1, wherein the step of evaluating said target parameter comprises performing a Fourier analysis on the waveform of the measured beam current.

15

35. A method as defined in claim 1, wherein said charged particle beam system comprises an ion implanter.

36. A method as defined in claim 1, wherein said charged particle beam system  
20 comprises a particle accelerator.

37. A method as defined in claim 1, wherein said charged particle beam system comprises a mass spectrometer.

25 38. A method for tuning a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherin a charged particle beam is transported through said target component, comprising the steps of:

- (a) determining a nominal target parameter value;
- (b) measuring a nominal readback value of said target parameter;
- 30 (c) varying said target parameter in a predetermined pattern about said nominal target parameter value;

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 44 -

- (d) measuring the beam current downstream of said target component in said charged particle beam system, and the target parameter readback value of said power supply output, as said target parameter is varied;
- (e) determining an optimal readback value, within the range of values bounded by the extreme members of a set comprising at least one measurement of said target parameter readback value recorded nearly simultaneously with at least one measurement of said beam current at least a predetermined fraction of the peak observed beam current;
- (f) adjusting the nominal target parameter value by a predetermined function of the signed difference between said nominal readback value and said optimal readback value; and
- (g) performing two or more iterations of at least steps (b), (c), (d) and (e) until said beam current measurements meet a predetermined criteria.

39. A method as defined in claim 38, wherein the variation of said target parameter is equal or smaller in magnitude during an iteration than in a preceding iteration.

40. A method as defined in claim 38, wherein said predetermined criteria constitutes beam current being at least a predetermined fraction of the maximum observed beam current when the absolute difference between said optimal readback value and said nominal readback value is smaller in magnitude than a predetermined threshold.

41. A method as defined in claim 38, wherein said target component comprises an electrostatic component which generates an electric field in response to a voltage, and wherein said target parameter comprises the approximate voltage applied to said electrostatic component.

42. A method as defined in claim 38, wherein the step of varying said target parameter comprises modulating the target parameter with a periodic waveform.

43. A method as defined in claim 38, wherein the step of varying said target parameter comprises stepping the target parameter through a series of discrete values.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 45 -

44. A method as defined in claim 38, wherein said target parameter comprises the approximate value of a power supply output feeding said target component.

45. A method as defined in claim 44, wherein the step of varying said target parameter comprises stepping the target parameter through a series of discrete values more rapidly than said power supply output can stabilize in response to each setting.

46. A method as defined in claim 38, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current with a Faraday beam sensor located downstream of said target component.

47. A method as defined in claim 38, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current with a parametric current transformer located downstream of said target component.

48. A method as defined in claim 38, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current samples for different values of said target parameter.

49. A method as defined in claim 38, wherein the step of evaluating said target parameter comprises performing a Fourier analysis on the waveform of the measured beam current.

50. A method as defined in claim 38, wherein said charged particle beam system comprises an ion implanter.

51. A method as defined in claim 38, wherein said charged particle beam system comprises a particle accelerator.

52. A method as defined in claim 38, wherein said charged particle beam system comprises a mass spectrometer.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 46 -

53. A method for evaluating the tuning of a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherein a charged particle beam is transported through said target component, and said target parameter determines the approximate downstream focus of said charged particle beam, comprising the steps of:

- 5 (a) determining a nominal target parameter value, wherein said target parameter determines the approximate position of said charged particle beam at the plane of a beam current sensing device located downstream from said target component within said charged particle beam system;
- 10 (b) varying said target parameter in a predetermined pattern about said nominal control parameter value, such that said charged particle beam is alternately incident on and not incident on said beam current sensing device;
- 15 (c) measuring beam current with said beam current sensing device, as said target parameter is varied;
- (d) determining the sharpness of the transition between said charged particle beam being incident on and not incident on said beam current sensing device; and
- 15 (e) evaluating the tuning of said target parameter based at least in part on said sharpness.

54. A method as defined in claim 53, wherein the step of determining sharpness constitutes determining the derivative of beam current as a function of said target parameter as said charged particle beam is passed across an edge of said beam current sensing means.

55. A method as defined in claim 53, wherein the step of evaluating the tuning of said target parameter further comprises evaluating a predetermined function, taking as inputs at least said sharpness and the maximum observed beam current.

56. A method as defined in claim 53, comprising performing two or more iterations of at least steps (b), (c), (d) and (e) until the evaluated tuning of said target component meets a predetermined criteria.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 47 -

57. A method as defined in claim 56, wherein the variation of said control parameter is equal or smaller in magnitude during an iteration than in a preceding iteration.

5 58. A method as defined in claim 56, wherein said predetermined criteria constitutes beam current being at least a predetermined fraction of the maximum observed beam current when the absolute difference between said optimal readback value and said nominal readback value is smaller in magnitude than a predetermined threshold.

10 59. A method as defined in claim 53, wherein said target component comprises an electrostatic component which generates an electric field in response to a voltage, and wherein said target parameter comprises the approximate voltage applied to said electrostatic component.

15 60. A method as defined in claim 53, wherein the step of varying said target parameter comprises modulating the target parameter with a periodic waveform.

61. A method as defined in claim 53, wherein the step of varying said target parameter comprises stepping the target parameter through a series of discrete values.

20 62. A method as defined in claim 53, wherein the step of varying said target parameter comprises stepping the target parameter through a series of discrete values more rapidly than said target parameter can stabilize in response to each setting.

25 63. A method as defined in claim 53, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current with a Faraday beam sensor located downstream of said target component.

64. A method as defined in claim 53, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current with a parametric current transformer located downstream of said target component.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 48 -

65. A method as defined in claim 53, wherein the step of measuring beam current comprises measuring beam current samples for different values of said target parameter.

5 66. A method as defined in claim 53, wherein said charged particle beam system comprises an ion implanter.

67. A method as defined in claim 53, wherein said charged particle beam system comprises a particle accelerator.

10 68. Apparatus for evaluating the tuning of a target parameter of a target component in a charged particle beam system, wherein a charged particle beam is transported through the target component, comprising:  
15 means for varying a control parameter of a control component located upstream of the target component, wherein said control parameter has a predetermined relation to the target component;  
means for measuring beam current downstream of the target component as the control parameter is varied; and  
means for evaluating the tuning of the target parameter based on the beam current  
20 measurements and the predetermined relation between the target component and the control parameter.

69. Charged particle beam apparatus comprising:  
25 a target component controlled by a target parameter;  
a control component controlled by a control parameter and located upstream of the target component;  
a beam sensor located downstream of the target component for sensing a charged particle beam transported through the control component and the target component; and  
a controller for varying the control parameter and evaluating the tuning of the  
30 target parameter in response to beam current measurements received from the beam sensor, based on the predetermined relation between the target component and the control parameter.

WO 03/021630

PCT/US02/21751

- 49 -

70. A charged particle beam system comprising:  
one or more beamline components through which a charged particle beam is  
transported;  
5        a centralized controller for controlling the system; and  
          at least one localized controller containing a tuning algorithm for automatically  
tuning a selected one of said one or more beamline components in response to a tune  
command from said centralized controller.
- 10        71. A method for adjusting the focus of a charged particle beam, comprising  
the steps of:  
          (a) deflecting the charged particle beam across an edge of an aperture;  
          (b) determining the rate of change of beam current downstream of the aperture  
as the beam is deflected across the edge of the aperture;  
15        (c) repeating steps (a) and (b) for different focus settings of the charged  
particle beam; and  
          (d) selecting the focus setting which gives the highest rate of change of beam  
current downstream of the aperture as the beam is deflected across the edge of the  
aperture.
- 20        72. In a charged particle beam system comprising a plurality of beamline  
components through which a charged particle beam is transported, a centralized controller  
and one or more power supply controllers for controlling individual ones of said beamline  
components, a tuning method comprising the steps of:  
25        said centralized controller sending a tune command to a selected one of said power  
supply interfaces; and  
          the selected power supply controller automatically executing a tuning algorithm in  
response to the tune command.

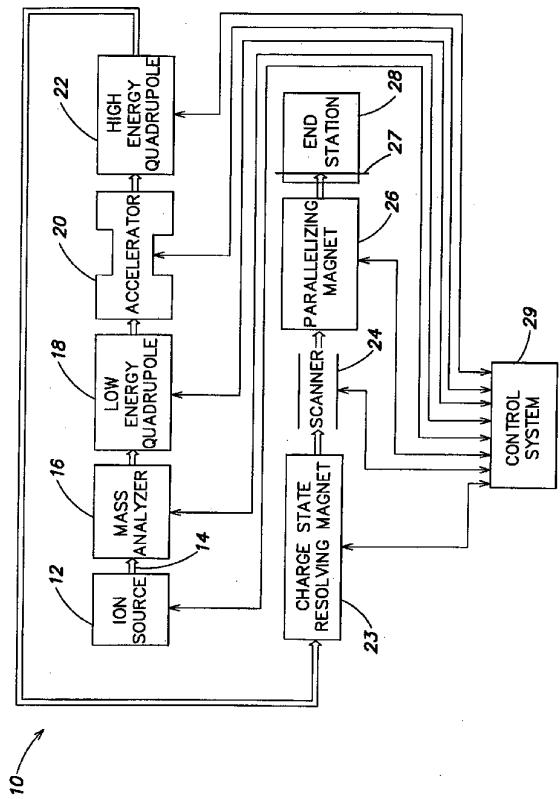


FIG. 1

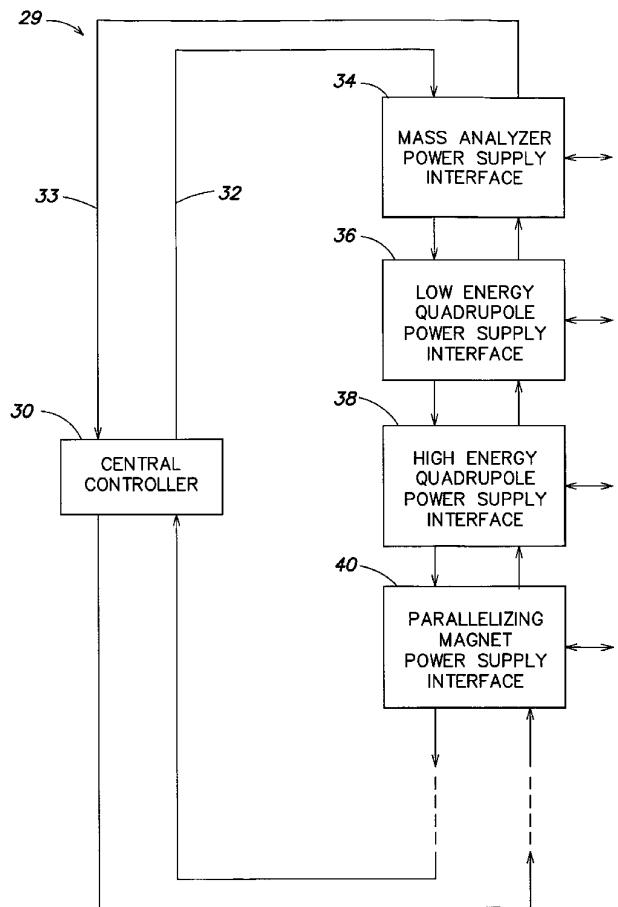


FIG. 2

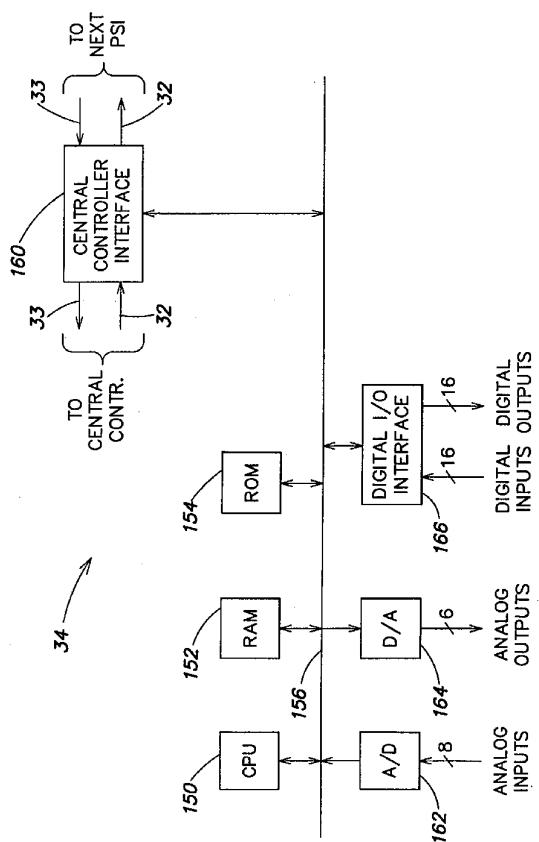
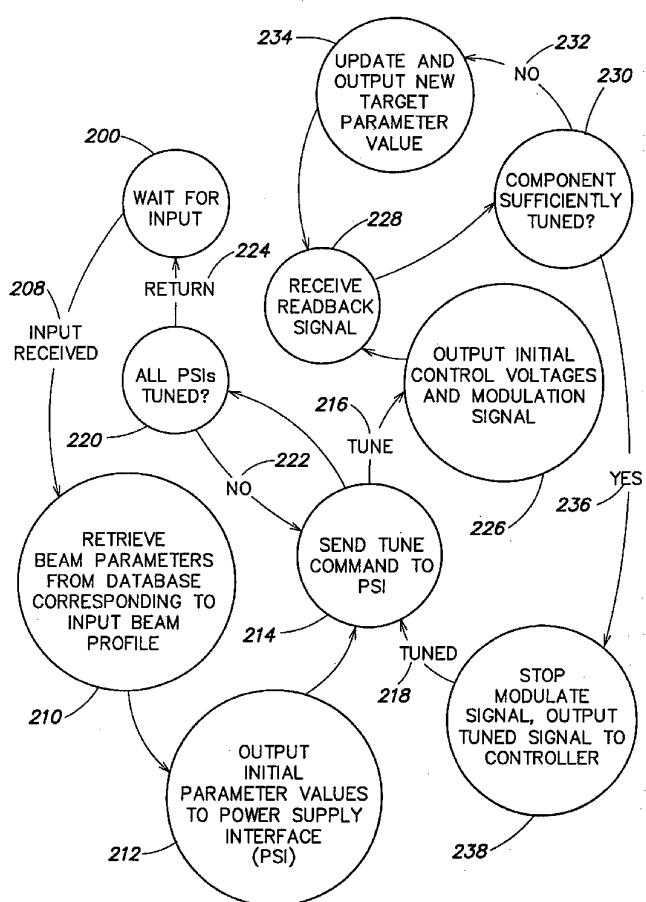


FIG. 3

WO 03/021630

4/18

**FIG. 4**

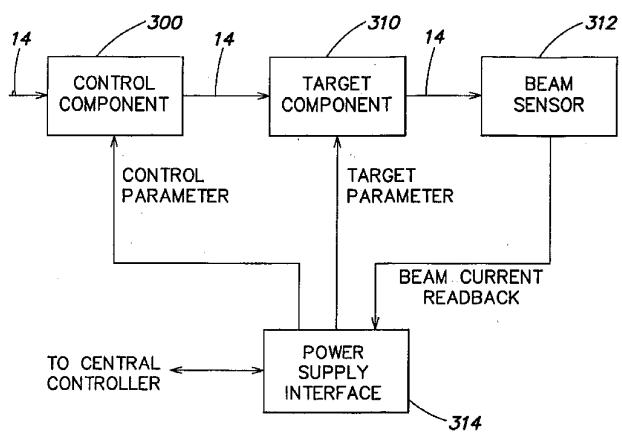


FIG. 5

WO 03/021630

6/18

PCT/US02/21751

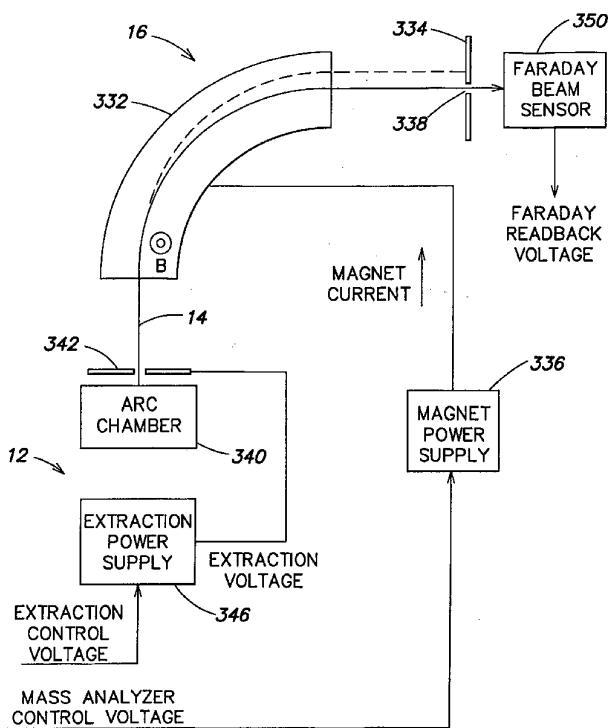


FIG. 6

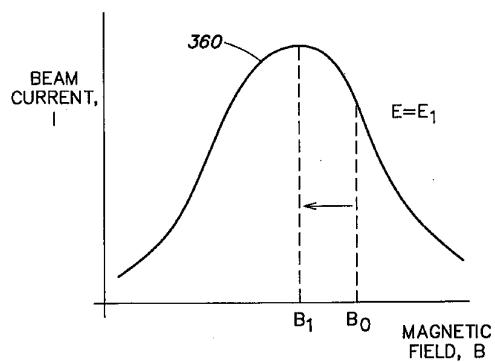


FIG. 7

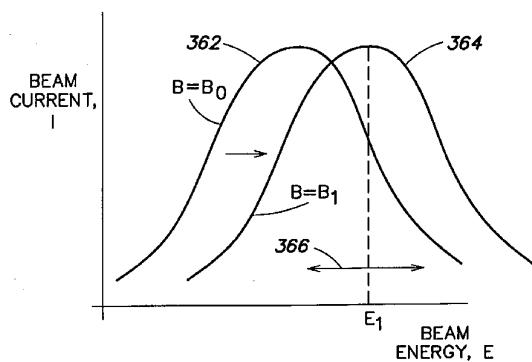


FIG. 8

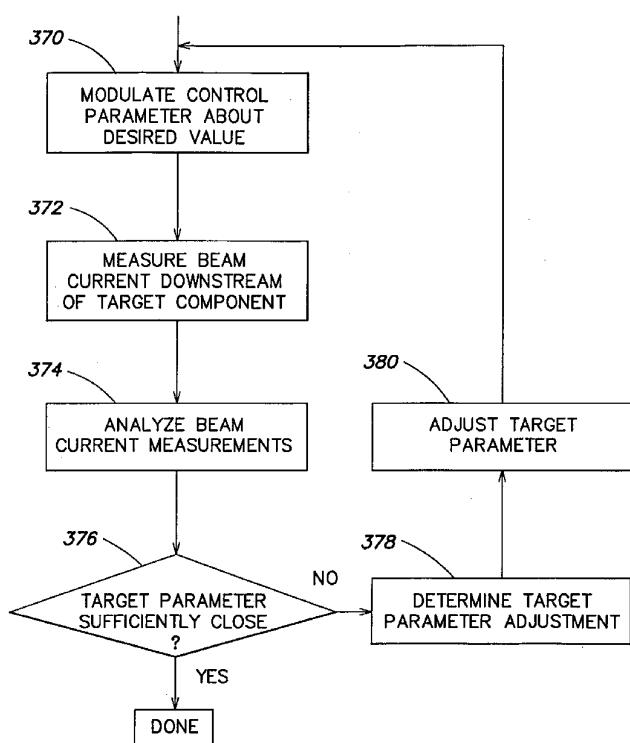


FIG. 9

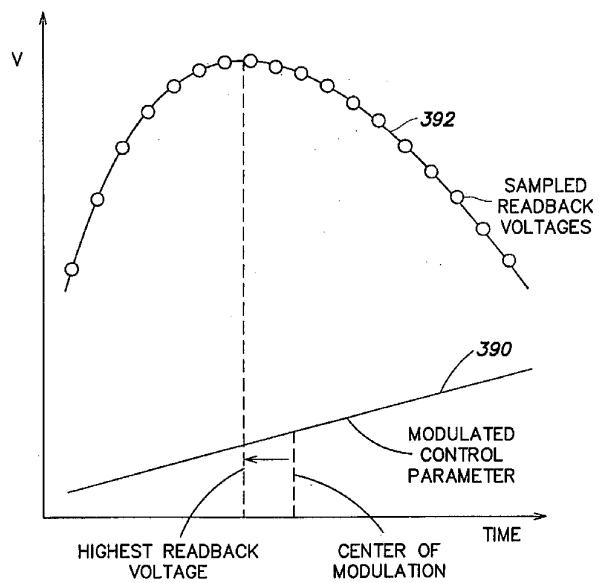


FIG. 10

WO 03/021630

10/18

PCT/US02/21751

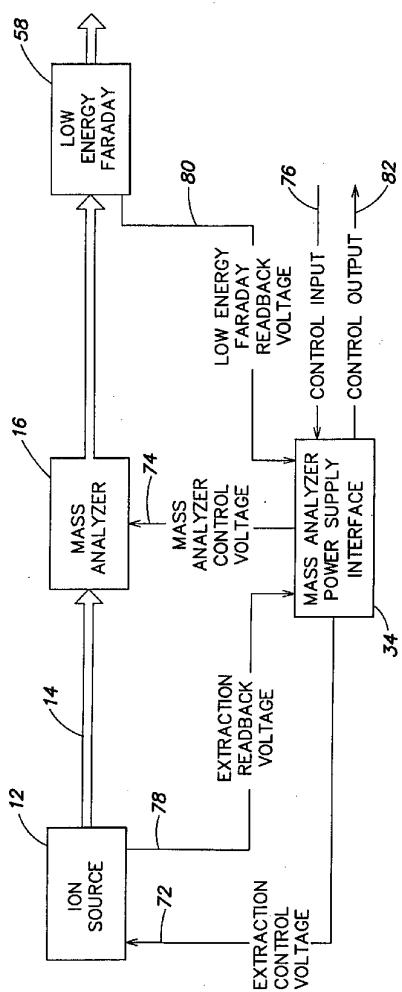


FIG. 11

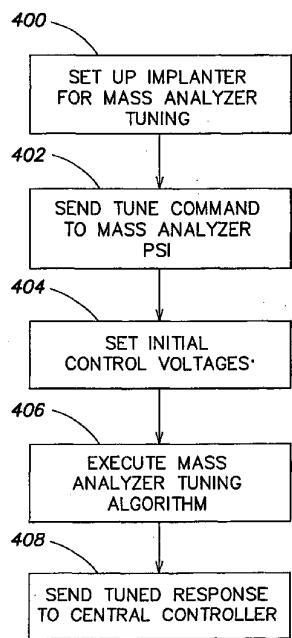


FIG. 12

WO 03/021630

12/18

PCT/US02/21751

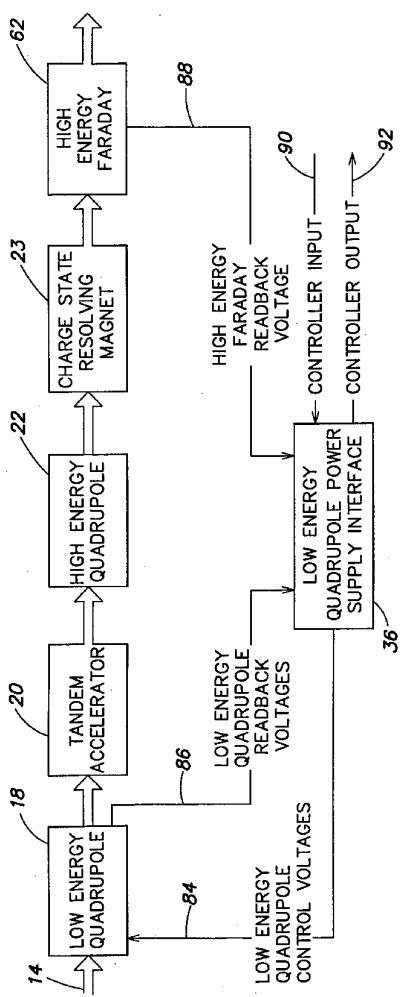
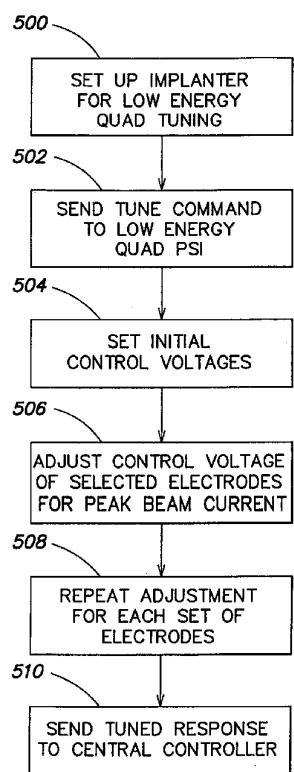


FIG. 13



*FIG. 14*

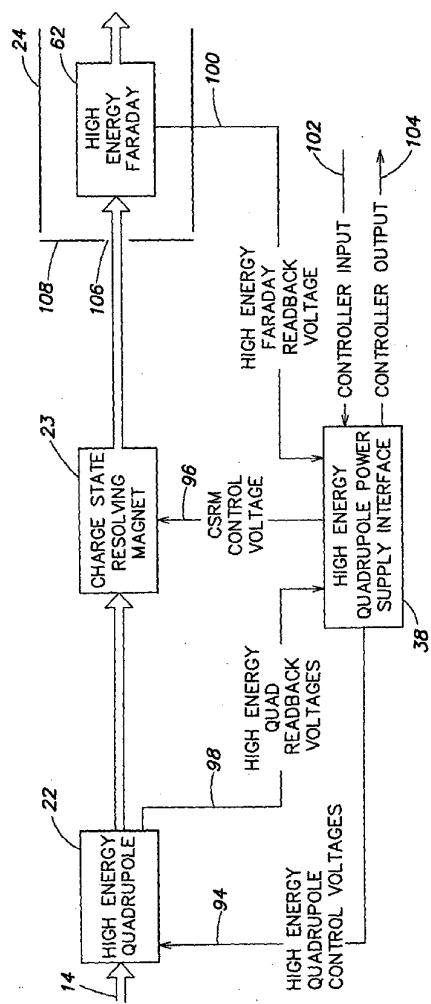


FIG. 15

WO 03/021630

PCT/US02/21751

15/18

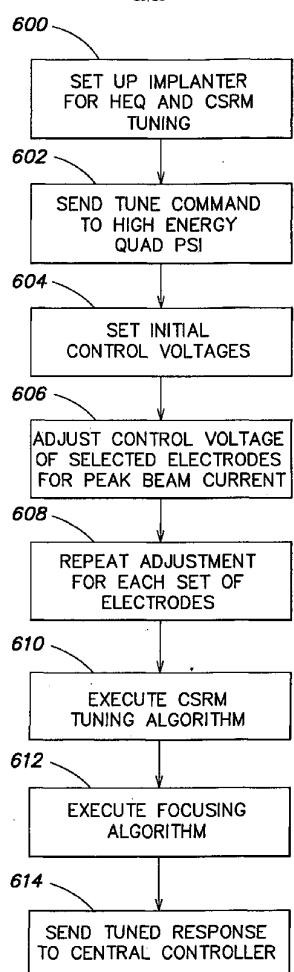


FIG. 16

WO 03/021630

16/18

PCT/US02/21751

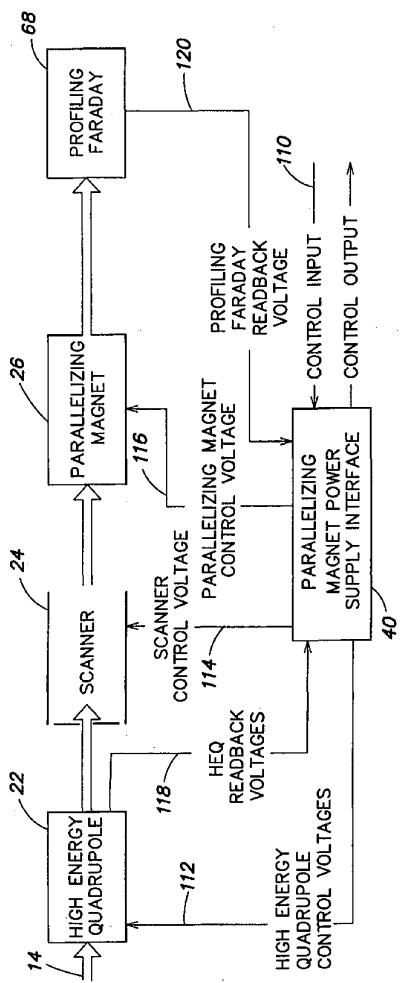
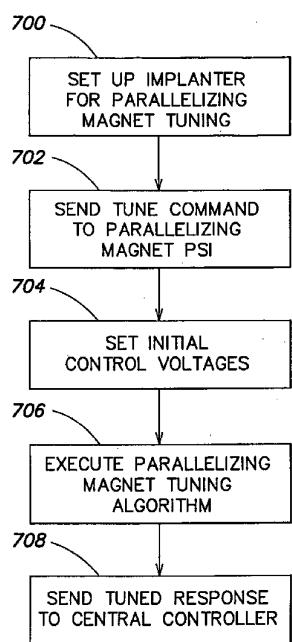


FIG. 17



*FIG. 18*

WO 03/021630

18/18

PCT/US02/21751

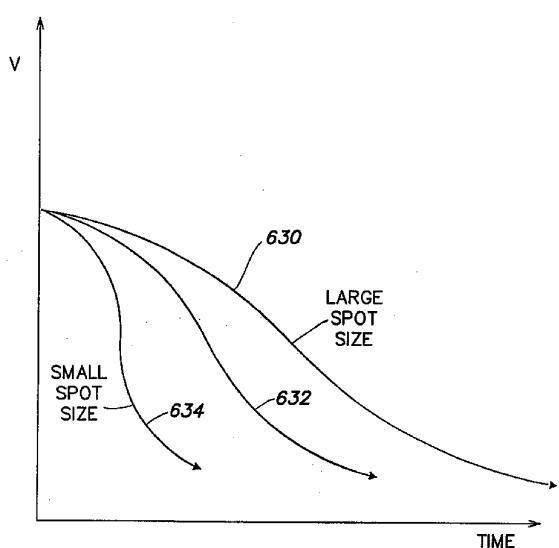


FIG. 19

## 【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No PCT/US 02/21751
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 H01J37/304 H01J37/317		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 H01J H01L		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used) WPI Data, PAJ, EPO-Internal, INSPEC		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P,A	WO 02 23583 A (VARIAN SEMICONDUCTOR EQUIPMENT) 21 March 2002 (2002-03-21) abstract; figures ---	1,38,53, 68-72
A	EP 0 986 091 A (EATON CORP) 15 March 2000 (2000-03-15) abstract; figures ---	1,38,53, 68-72
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1998, no. 10 31 August 1998 (1998-08-31) & JP 10 134745 A (JEOL LTD), 22 May 1998 (1998-05-22) abstract -----	71
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents : *A* document defining the general state of the art which is not cited to be of particular relevance *E* earlier document not published on or after the international filing date *L* document which may throw doubts on priority claims(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
** T* later document published after the international filing date or prior art date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other cited documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. *&* document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search  29 January 2003	Date of mailing of the international search report  06/02/2003	
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5618 Patentkant 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl. Fax. (+31-70) 340-3016	Authorized officer  Schaub, G	

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No  
PCT/US 02/21751

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)		Publication date
WO 0223583	A	21-03-2002	WO	0223583 A2		21-03-2002
EP 0986091	A	15-03-2000	US	6137112 A	24-10-2000	
			EP	0986091 A2	15-03-2000	
			JP	2000100372 A	07-04-2000	
			KR	2000023063 A	25-04-2000	
			SG	78388 A1	20-02-2001	
JP 10134745	A	22-05-1998	NONE			

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 1992)

---

フロントページの続き

(72)発明者 ホルブルック、デイビッド・エス

アメリカ合衆国マサチューセッツ州02173、レキシントン、イースト・ストリート262

(72)発明者 ラーディン、クリフォード・エイ

アメリカ合衆国ニューヨーク州、イタカ、ウエスト・セネカ・ストリート406

F ターム(参考) 5C030 AA01 AB05

5C034 AB02 AB03 AB05 CD02 CD03 CD04 CD07