

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-187179

(P2008-187179A)

(43) 公開日 平成20年8月14日(2008.8.14)

(51) Int.Cl.

**H01L 21/3065 (2006.01)**  
**H01L 21/205 (2006.01)**  
**H05H 1/46 (2006.01)**  
**C23C 16/505 (2006.01)**

F 1

H01L 21/302  
H01L 21/205  
H05H 1/46  
C23C 16/505

1 O 1 B  
M

テーマコード(参考)

4 K 030  
5 F 004  
5 F 045

審査請求 未請求 請求項の数 15 O L 外国語出願 (全 69 頁)

(21) 出願番号 特願2008-17173 (P2008-17173)  
(22) 出願日 平成20年1月29日 (2008.1.29)  
(31) 優先権主張番号 60/898,632  
(32) 優先日 平成19年1月30日 (2007.1.30)  
(33) 優先権主張国 米国(US)  
(31) 優先権主張番号 11/733764  
(32) 優先日 平成19年4月11日 (2007.4.11)  
(33) 優先権主張国 米国(US)

(71) 出願人 390040660  
アプライド マテリアルズ インコーポレイテッド  
APPLIED MATERIALS, INCORPORATED  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95054 サンタクララ バウアーズ アベニュー 3050  
(74) 代理人 100101502  
弁理士 安齋 嘉章  
(72) 発明者 ケネス エス コリンズ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95120 サンノゼ グレンビュードライブ 7214

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】複数のVHF源の電力を配分することによる、ウェハ全体のプラズマプロセス均一性の改善

## (57) 【要約】

【課題】少なくとも天井電極と、ワークピースサポート電極とを含む電極を有するプラズマリアクタチャンバーにおいて、ワークピースを処理する方法を提供する。

【解決手段】この方法は、各VHF周波数f1及びf2の各RF電源を、(a)電極の夫々か、(b)電極の共通する1つに結合する工程であって、中心が高い不均一なプラズマイオン分布を生成するのにf1が十分に高く、中心が低い不均一なプラズマイオン分布を生成するのにf2が十分に低い工程を含む。この方法は、f1周波数でのRFパラメータ対f2周波数でのRFパラメータの比を調整して、プラズマイオン密度分布を制御する工程であって、RFパラメータが、RF電力、RF電圧又はRF電流のうち1つである工程を含む。

【選択図】図1A

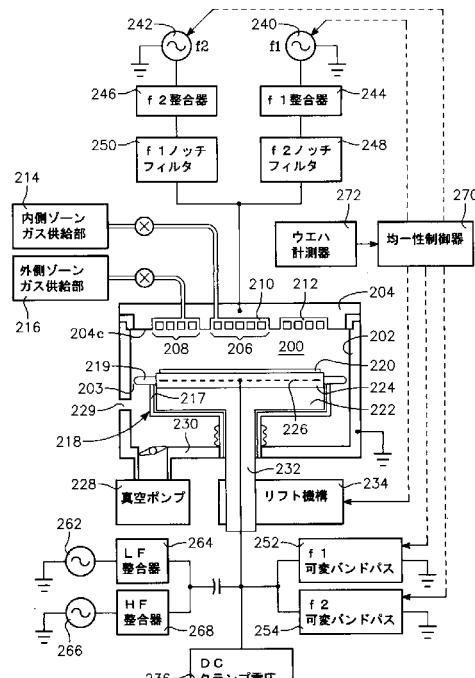


FIG. 1A

**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

少なくとも天井電極とワークピースサポート電極とを含む電極を有するプラズマリアクタチャンバにおいて、ワークピースを処理する方法であって、前記方法が、

各VHF周波数 $f_1$ 及び $f_2$ の各RF電源を、(a)前記電極の夫々か、(b)前記電極の共通する1つに結合する工程であって、中心が高い不均一なプラズマイオン分布を生成するのに $f_1$ が十分に高く、中心が高い不均一なプラズマイオン分布を生成するのに $f_2$ が十分に低い工程と、

$f_1$ 周波数でのRFパラメータ対 $f_2$ 周波数でのRFパラメータの比を調整して、プラズマイオン密度分布を制御する工程であって、前記RFパラメータが、(a)RF電力、(b)RF電圧及び(c)RF電流のうち1つである工程とを含む方法。  
10

**【請求項 2】**

$f_1$ が約110MHzを超える、 $f_2$ が約90MHz未満である請求項1記載の方法。

**【請求項 3】**

前記調整工程が、 $f_2$ 周波数でのRFパラメータに対する $f_1$ 周波数でのRFパラメータの比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減少する工程を含む請求項1記載の方法。

**【請求項 4】**

前記調整工程が、 $f_1$ 周波数でのRFパラメータに対する $f_2$ 周波数でのRFパラメータの比を減じることにより、端部が高いプラズマイオン密度不均一性を減少する工程を含む請求項1記載の方法。  
20

**【請求項 5】**

前記周波数 $f_1$ 及び $f_2$ 要素について、前記天井電極と、前記ワークピースサポート電極の間を直接流れるRF電流に、各中心接地リターンパスを提供する工程と、

前記各周波数 $f_1$ 及び $f_2$ について、端部接地リターンパスを提供する工程とを含む請求項1記載の方法。

**【請求項 6】**

前記周波数 $f_1$ に対応する前記中心接地リターンパスの前記インピーダンスを調整して、 $f_1$ での前記RF電力が、プラズマイオン密度分布において、中心が高い不均一性を生成する傾向を増大又は減少する工程を含む請求項5記載の方法。  
30

**【請求項 7】**

前記周波数 $f_2$ に対応する前記中心接地リターンパスの前記インピーダンスを調整して、 $f_2$ での前記RF電力が、プラズマイオン密度分布において、中心が高い不均一性を生成する傾向を増大又は減少する工程を含む請求項5記載の方法。

**【請求項 8】**

前記中心接地リターンパスの少なくとも1つのインピーダンスを調整して、プラズマイオン密度分布を制御する工程を含む請求項5記載の方法。

**【請求項 9】**

前記インピーダンスを調整する工程を実施して、前記端部接地リターンパス中の前記電流を増大して、中心が高い不均一性を抑制する請求項8記載の方法。  
40

**【請求項 10】**

前記インピーダンスを調整する工程を実施して、前記中心接地リターンパス中の前記電流を増大して、端部が高い不均一性を抑制する請求項8記載の方法。

**【請求項 11】**

前記結合する工程が、前記周波数 $f_1$ の前記RF電源を、前記チャンバの前記天井電極に結合し、前記周波数 $f_2$ の前記RF電源を、前記ワークピースサポート電極に結合する工程を含む請求項1記載の方法。

**【請求項 12】**

前記結合する工程が、前記周波数 $f_1$ の前記RF電源及び前記周波数 $f_2$ の前記RF電源を、前記天井電極に結合する工程を含む請求項1記載の方法。  
50

**【請求項 1 3】**

前記結合する工程が、前記周波数  $f_1$  の前記 R F 電源を、第 1 の天井電極に結合する工程と、前記周波数  $f_2$  の前記 R F 電源を、前記第 1 の天井電極と同心である第 2 の天井電極に結合する工程を含む請求項 1 記載の方法。

**【請求項 1 4】**

前記結合する工程が、 $f_1$  まで調整された共振器を用い、非線形ミキサとして前記チャンバの前記プラズマを用いて、基本周波数  $f_0$  から、調波である周波数  $f_1$  の前記 R F 電力を生成する工程である請求項 1 記載の方法。

**【請求項 1 5】**

前記ワークピースと、前記天井電極の間のギャップを調整することにより、前記プラスマイオン密度分布を調整する工程を含む請求項 1 記載の方法。 10

**【発明の詳細な説明】****【関連出願の相互参照】****【0 0 0 1】**

本出願は、2007年1月30日出願の米国特許仮出願第 60 / 898,632 号及び 2007 年 4 月 11 日出願の米国特許出願第 11 / 733,764 号に基づく優先権を主張する。

**【背景】****【0 0 0 2】**

本発明の実施形態は、半導体ウエハ等のワークピースを処理するための容量結合プラズマ源に係る。容量結合プラズマ源は、天井電極を含み、これは、110 MHz を超える非常に高い周波数 (VHF) 周波数で駆動され、比較的低電圧で高密度プラズマを生成することができる。容量結合プラズマ源は、さらに、低電極腐食のために、低電極電位を生成することができ、所望であれば、ウエハ表面でイオンエネルギーを低レベルに制限でき、プラズマ密度の広い範囲（非常に少ない～非常に多いプラズマイオン密度）にわたって動作できる。こうしたプラズマ源に固有の 1 つの問題は、天井電極が、プラズマの実効誘電率のために、放射伝送線効果及び負荷を示すことである。例えば、150 MHz で、自由空間 4 分の 1 波長は約 20 インチであり、略天井電極の直径（約 15 インチ）である。従って、R F 界は、天井電極の表面全体で大きく異なり、ウエハ表面でのプロセス不均一性を生じさせる。実効誘電率が 1 を超えるプラズマについては、有効波長は、天井電極直径未満まで減じ、R F 界の不均一性が悪化する。これによって、ウエハ表面全体の処理不均一性が悪化する。エッティングプロセスについては、これによって、ウエハ表面全体にわたって、不均一な端部の少ないエッティングレート分布が生成される。 20 30

**【0 0 0 3】**

かかる望ましくない影響を減じるために、様々なアプローチが用いられている。1 つのアプローチでは、磁気ステアリングを用いて、プラズマイオン分布を変える、例えば、その中心が高い不均一性を減じて、やや平らな分布を生成している。このアプローチによる 1 つの問題は、源の中心が高い不均一性が、磁気ステアリングの補正能力を超えることである。このアプローチによる他の問題は、磁束密度が高すぎると、ワークピースの帯電損傷となり得ることである。他のアプローチは、より多くのプラズマ R F バイアス電力をウエハに印加することにより、プラズマシース（又はバイアス）電圧を増大するものである。これには、プラズマシース厚さを増加する、言い換えると、典型的には、天井プラズマシース全体のキャパシタンス及びウエハプラズマシース全体のキャパシタンスを減じる効果があり、これによって、天井シースキャパシタンス、プラズマキャパシタンス及びウエハシースキャパシタンスを含む連続した 3 つのキャパシタが形成される。正味の影響は、プラズマの誘電率の影響を減じ、これによって、R F 界の不均一性が減少することである。ある酸化物エッティングプラズマプロセスレシピに必要な高バイアス電圧は、後者のアプローチと適合する。しかしながら、高プラズマバイアス電圧は、他のタイプのプラズマプロセスにおいては望ましくない。最低プラズマバイアス電圧を用いるプロセスでは、最悪の不均一性を示す。 40 50

## 【0004】

プロセスレシピにより決まる他のプロセス条件は、磁気ステアリングかバイアス（シース）電圧と同じ位大きな、プラズマ分布による影響を有しているという事実により、かかるアプローチは複雑なものとなっている。例えば、チャンバ圧力を増加すると、中心があまり高くなく、中心がより少ないプラズマイオン分布を生成し、チャンバ圧力を減少すると、より中心が高い分布が生成される。プラズマ分布における他の変化は、電源（プラズマ密度）、ガスの化学反応、ガス混合物の電気陰性度、ポンピングレート、ガスフローレート及びプロセスレシピにより必要とされるその他パラメータにより生じる。

## 【発明の概要】

## 【0005】

10

少なくとも天井電極と、ワークピースサポート電極とを含む電極を有するプラズマリアクタチャンバにおいて、ワークピースを処理する方法が提供される。この方法は、各VHF周波数 $f_1$ 及び $f_2$ の各RF電源を、(a)電極の夫々か、(b)電極の共通する1つに結合する工程であって、中心が高い不均一なプラズマイオン分布を生成するのに $f_1$ が十分に高く、中心が低い不均一なプラズマイオン分布を生成するのに $f_2$ が十分に低い工程を含む。この方法は、 $f_1$ 周波数でのRFパラメータ対 $f_2$ 周波数でのRFパラメータの比を調整して、プラズマイオン密度分布を制御する工程であって、RFパラメータが、RF電力、RF電圧又はRF電流のうち1つである工程を含む。

## 【0006】

20

一実施形態において、 $f_1$ は、約110MHzを超える、 $f_2$ は、約90MHz未満である。関連の実施形態において、調整には、 $f_2$ 周波数でのRFパラメータに対する $f_1$ 周波数でのRFパラメータの比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減少することが含まれる。他の関連の実施形態において、調整には、 $f_1$ 周波数でのRFパラメータに対する $f_2$ 周波数でのRFパラメータの比を減じることにより、端部が高いプラズマイオン密度不均一性を減少することが含まれる。

## 【0007】

30

一実施形態において、方法は、周波数 $f_1$ 及び $f_2$ 要素について、天井電極と、ワークピースサポート電極の間を直接流れるRF電流に、各中心接地リターンパスを提供する工程と、各周波数 $f_1$ 及び $f_2$ について、端部接地リターンパスを提供する工程とを含む。他の実施形態において、方法は、周波数 $f_1$ に対応する中心接地リターンパスのインピーダンスを調整して、 $f_1$ でのRF電力が、プラズマイオン密度分布において、中心が高い不均一性を生成する傾向を増大又は減少する工程を含む。

## 【0008】

更なる実施形態において、方法は、周波数 $f_2$ に対応する中心接地リターンパスのインピーダンスを調整して、 $f_2$ でのRF電力が、プラズマイオン密度分布において、中心が低い、又は端部が高い不均一性を生成する傾向を増大又は減少する工程を含む。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0009】

40

図1Aは、プラズマリアクタの簡略概略図である。このプラズマリアクタは、異なる電源周波数で容量結合プラズマ電源を配分することにより、プラズマイオン密度の放射分布を制御することができる。リアクタは、シリンダ形側壁202と、ディスク形天井204に囲まれた真空チャンバ200を有している。天井204は、導電性天井電極と、ガス分配シャワー・ヘッド又はプレートの両方であり、本明細書においては、天井電極204と呼ぶ。天井電極は、任意で、導電性、半導体又は絶縁材料でカバーされていてもよい。天井電極204は、その底面204cに、ガス注入オリフィスの内側及び外側ゾーン206、208を有しており、これらは、夫々、内側及び外側内部ガスマニホールド210、212に結合している。内側及び外側ゾーンプロセスガス供給部214、216は、プロセスガスを、内側及び外側マニホールド210、212へ提供する。ウエハサポート台座218は、半導体ウエハ220等のワークピースをサポートすることができる。台座218は、静電チャックの特徴を有していてもよく、これは、導電性ベース層222と、内部電極22

50

6を密閉している絶縁上層224とを有している。真空ポンプ228が、チャンバ200の床230を通して結合されている。台座218は、脚232にサポートされていて、この脚は、台座218のレベルを昇降できるリフト機構234に結合されている。一実施形態において、リフト機構234は、約0.3インチ～約6インチのウエハから天井までのギャップ範囲を与える。ウエハは、直流電源236から電極226まで直流クランプ電圧を印加することにより、台座にクランプされている。直流電源236は、典型的に、ローパスフィルタを有しており、電極226に存在するRF電圧から直流電源を分離している。RFバイアス電力は、内部電極226に直接的に結合されても、導電性ベース層222を通して間接的に結合されてもよい。台座218は、典型的に、導電性接地筐体217を有しており、これは、典型的に、石英、セラミック、プラスチック等の絶縁材料により、導電性ベース層222及び内部電極226から分離されている。或いは、導電性ベース層218は、接地されていてもよい。

10

## 【0010】

チャンバ200全体のプラズマイオン放射分布の均一性は、一対のVHFプラズマ電源発生器240、242を提供することにより制御される。一態様において、RF発生器240は、VHF範囲の上部に周波数を有しており、約110～250MHz、通常は約162MHzである。一方、他のRF発生器は、VHF範囲の下部に周波数を有しており、約40～90MHz、通常は約60MHzである。発生器240（単体で適用された場合）からの高VHF周波数は、中心が高く、端部が低い、プラズマイオン密度放射分布を生成する傾向があり、一方、発生器242（単体で適用された場合）からの低VHF周波数は、中心が低く、端部が高い、プラズマイオン密度放射分布を生成する傾向があることを知見した。この点で、2つの発生器は、同時に用いると、互いに補い合う。一実施形態において、発生器240、242の一方の出力電力を、互いに調整して、中心が低いパターンと、中心が高いパターンとの間で、プラズマイオン密度放射分布を変える。2つの発生器240、242のRF電力（電圧又は電流）レベルの比を選択して、中心が多く、中心が少ない不均一性を最小とし、略均一な、両方のタイプの不均一性がほとんどない、従って、ほとんど、又は実質的に均一な、プラズマイオン分布となるようにする。かかる均一性は、ウエハ又はワークピース全体のエッティングレートの放射分布を測定することにより判断できる。均一性が増大すると、この分布の変動は減少する。エッティングレートのより均一な放射分布となる変動は、例えば、4%以下と低い。

20

## 【0011】

一実施形態において、高VHF周波数発生器240は、インピーダンス整合ネットワーク244を通して、天井電極204に結合している。このネットワークは、固定されているか、動的であり、集中要素か、分散要素のいずれかとして形成されている。低VHF周波数発生器242は、インピーダンス整合ネットワーク246を通して、天井電極204に結合している。このネットワークは、集中要素か、分散要素のいずれかとして形成されていて、固定されているか、動的である。高VHF整合器244の出力は、ノッチフィルタ248、或いは、ハイパスフィルタによって、低VHF発生器242の出力から保護されている。ノッチフィルタ248は、低VHF発生器242の周波数f2付近に中心のある狭帯域をブロックするように調整されており、ハイパスフィルタは、低VHF発生器242の周波数f2をブロックするよう調整されている。低VHF整合器246の出力は、ノッチフィルタ250、或いは、ローパスフィルタによって、高VHF発生器240の出力から保護されている。ノッチフィルタ250は、高VHF発生器240の周波数f1付近に中心のある狭帯域をブロックするように調整されており、ローパスフィルタは、高VHF発生器240の周波数f1をブロックするよう調整されている。フィルタ回路は、整合ネットワークに関する従来の方式に従って設計されており、必要な周波数分離で、所望の整合範囲が得られるようなものとなっている。

30

## 【0012】

2つのRF接地リターンバスが、VHF周波数f1、f2の夫々について提供されている。図面で示される通り、側壁202を接地することにより、チャンバ200の側部に沿

40

50

ったパスが提供されている。このパスに沿ったVHF電流は、端部が多く、中心が少ないプラズマイオン放射分布、又は、チャンバの中心を通るRF接地リターンパスに対して、少なくとも中心があまり多くないプラズマイオン放射分布を促進する。互いに独立して制御される、調整可能な（可変の）各バンドパスフィルタ252、254を通して、台座電極226（又はベース層222）を接地に結合することにより、チャンバ200の中心を通るパスは、任意で提供される。可変のバンドパスフィルタ252は、高VHF発生器240の周波数 $f_1$ を含む（又は、少なくとも略その中心にある）狭帯域を有する。可変のバンドパスフィルタ254は、低VHF発生器242の周波数 $f_2$ を含む（又は、少なくとも略その中心にある）狭帯域を有する。バンドパスフィルタ252、254は両方共、各バンドパス周波数 $f_1$ 、 $f_2$ で接地に各インピーダンスを与える。これらのインピーダンスは、制御器270により変えて、台座電極226と側壁202の間でのRF電流の各発生器240、242からの分割を決定する。この電流の割り当ては、各バンドパスフィルタ252、254のリアクタンスを変えることにより制御する。容量及び誘導コンポーネントの従来のRFフィルタ回路を用いて、可変バンドパスフィルタ252、254を実行してよい。従来の方式に従って、これらのフィルタは、容量及び誘導コンポーネントの集中要素として、又は同心調整要素又はスタブといった分散要素として実行してもよい。例えば、図1Bは、図1Aのリアクタに用いることができるタイプの可変バンドパスフィルタの簡略概略図である。図1Bの可変バンドパスフィルタは、分路キャパシタ256、インダクタ258及び負荷キャパシタ260を含むことができる。キャパシタ256、260のいずれか、又は両方が可変である。一態様によれば、フィルタ252、254は、必ずしもバンドパスフィルタでなくてよく、バンドパスフィルタの周波数応答を有してもよい。例えば、フィルタ252、254の一方又は両方が、ハイパスフィルタ又はローパスフィルタであってよく、或いは、応答が可変で、任意のタイプのフィルタとして機能するリアクタンス素子であってよい。この代わりに、台座電極226を接地することにより、チャンバ200の中心を通るRF接地リターンパスを、提供してもよい。これは、ハイパスフィルタを通して、RFバイアスの有効な分離を行う。

10

20

30

40

50

### 【0013】

RFバイアス電力は、ESC電極226に印加される。これは、LFインピーダンス整合器264を通した低周波数RF電力発生器262からのLF電力（例えば、約2MHz）、及びHFインピーダンス整合器268を通した高周波数RF電力発生器266からのHF電力（例えば、約13.56MHz）を有している。典型的に、RFバイアス周波数を選択して、LF電力レベルは、ピークイオンエネルギーを制御し、HF電力レベルは、イオンエネルギー分布の中心幅を制御するようとする。RF電流接地パスは、ESC電極226に印加された各RFバイアス源に提供されてもよい。バンドパス又はローパスフィルタを通して天井を接地に結合することにより、天井204を通るパスが任意で、提供されてもよい。更に、可変リアクタンスをパスに挿入して、天井へのバイアスリターン電流を、他の表面へのバイアスリターン電流、即ち、壁202及びリング219への電流、に對して、制御してもよい。挿入リアクタンス又はインピーダンスを増加して、より多くのバイアスリターン電流を端部（リング219又は壁202）へ通してもよい。これは、端部が高いプラズマイオン密度均一性条件を好む傾向がある。或いは、挿入リアクタンス又はインピーダンスを減少して、より少ないバイアスリターン電流を端部（リング219又は壁202）へ通してもよい。これは、中心が高いプラズマイオン密度均一性条件を好む傾向がある。

### 【0014】

2つのVHF電源発生器240、242は、連続波(CW)モードで操作されてもよいし、互いに同調又は非同調パルスであってもよい。更に、バイアス電力発生器262、266のいずれか、又は両方が、CWモード又はパルスマードで操作されてもよい。パルスマードでは、そのデューティサイクルを制御して、ウエハ表面で、時間平均RFバイアス電力又は電圧（従って、イオンエネルギー）を制御してもよい。バイアス発生器262、266のパルスは、互いに、且つ／又は電源発生器240、242に対して、同調又は非

同調であってもよい。パルスマードでは、互いにパルス同調の前述の発生器の任意の対が、時間の一一致した、又は時間のずれたRFエンベロープを有していて、重なっていても重なっていなくてもよい。

#### 【0015】

ウエハ220表面全体のガスフローの均一性及びウエハ端部近傍のRF界の均一性は、ウエハ下接地リターン219を提供することにより改善することができる。リターン219は、台座218のウエハサポート表面の下のレベルで台座218の側部から放射状に外側に延びている。ウエハ下接地リターン219は、側壁202に向って延びていて、ギャップ203を形成するシリンドラ又はフラットな環形リングの形状であるのが典型的である。このギャップ203は、ウエハ上のプロセス領域から、真空ポンプ228により排気されるウエハ下のポンピング環へのガスフローを部分的に制限する。ウエハ下接地リターンのレベルは、ウエハスリットバルブ229やポンピングポート等の特徴の上である。これらは、ガスフローパターンや静電又は電磁場の非対称から生じるプラズマ分布に望ましくない非対称性を生成する。側壁とウエハ下接地リターン219の外側端部の間の狭いギャップは、ガスフローを部分的に制限し、これによって、ウエハ220上の領域の非対称性がかなりなくなって、プロセス均一性が改善される。一実施形態において、ウエハ下接地面219は、導電性材料で形成され、接地に接続されている。従って、ウエハ端部に、より均一な接地基準が提供され、より均一な電場が与えられ、チャンバ内部の導電性表面の分配が非対称となり難い。リング219はまた、プラズマ境界として作用して、プラズマの容積を、リング219上のチャンバ領域に限定するのを補助する。変形実施形態において、リング219は、接地面としては作用せず、その代わりに、非導電性材料で形成されている。他の変形実施形態において、接地リターンリング(又はシリンドラ)219は、ワーカピース又はウエハレベルにある、或いはワーカピースレベルの上にある。天井レベル又はその近傍で、天井電極204を同軸で囲んでいてよい。他の実施形態において、接地リターンリング219のレベルを、リフト機構により、ワーカピースレベルに対して選択的に調整してもよい。例えば、リング219を台座218の外側に取り付けることにより、リング219を、台座リフト機構により昇降する。接地リターンリング219は、チャンバの他の接地面(ESCベース層等)から絶縁して、接地に直接結合せず、代わりに、可変のリアクタンス素子(例えば、可変フィルタ252)を通して接地に結合するようになる。この場合、接地リターンリング219は、VHF周波数f2に対する端部接地リターンパスとして作用する。この端部接地リターンパスの高さは、従って、可変であり、リアクタの調整可能なパラメータの1つとして作用する。

#### 【0016】

均一性制御器270は、2つのVHF発生器240、242の相対電力出力レベル、及び任意で、可変バンドパスフィルタ252、254のインピーダンスを制御する。制御器270は、高VHF周波数(f1)バンドパスフィルタのインピーダンスを設定して、高VHF周波数f1で、側壁202よりも、ウエハ220を通して、低インピーダンスリターンパスを接地に提供することができる。これによって、f1発生器240からの電力は、より顕著に中心が高い放射分布を生成する。更に、制御器270は、低VHF周波数(f2)バンドパスフィルタのインピーダンスを設定して、低VHF周波数f2で、側壁202よりも、ウエハ220を通して、高インピーダンスリターンパスを接地に提供することができる。これによって、f2発生器242からの電力は、より顕著に中心が低く、端部が高い放射分布を生成する。制御器270は、高及び低VHF周波数発生器240、242の相対電力出力レベルを配分し、エッチングレート分布における中心が高い不均一性を抑制するか(低VHF周波数発生器242の電力出力を増大することにより)、エッチングレート分布における端部が高い不均一性を抑制するか(高VHF周波数発生器240の電力出力を増大することにより)のいずれかを行う。制御器270は、下流又はインラインの計測ツール272により、前に処理されたウエハで測定された不均一性パターンに応答して、かかる調整を行ってよい。連続したウエハの処理中、制御器270においてプログラムされたアルゴリズムとして実施される標準フィードバック制御補正技術を用いて

10

20

30

40

50

、均一性制御器 270 により連続した補正を行って、計測ツール 272 により感知されるエッチングレート分布の不均一性を最小とする。計測ツール 272 は、制御器 270 に、プラズマイオン密度分布が、主に中心が高い不均一性であるか、主に端部が高い不均一性であるかを知らせるようにプログラムされていてもよい。或いは、計測ツール 272 は、イン・サイチュのセンサとして、制御器 270 にリアルタイムの信号を提供してもよい。  
OES(発光分析装置)センサを、様々な半径で、天井 204 に配置して、放射プラズマ励起種密度を示すようにしてもよい。プラズマ自身を光源として用いてもよいし、外部光源を用いてもよい。或いは、干渉センサを、様々な半径で、天井 204 に配置して、半径の関数としてのワークピースフィルム厚さレートの変化を示すようにしてもよい。或いは、イオンフラックスセンサを、様々な半径で、天井 204 に配置して、放射プラズマイオン密度を示すようにしてもよい。或いは、電圧センサを、様々な半径で、天井 204 に配置して、放射電極電圧を示すようにしてもよい。或いは、分離電圧センサを、様々な半径で、天井 204 に配置して、放射プラズマ浮遊電位を示すようにしてもよい。プラズマ均一性のリアルタイム制御は、センサ入力及び従来の技術を用いて、制御器 270 により実施してもよい。

10

## 【0017】

また、均一性制御器はリフト機構 234 も制御でき、他の制御寸法を与えて、プラズマイオン分布の均一性(又はエッチングレート分布の均一性)を改善する。台座 218 を天井電極 204 に向って持ち上げると、ウエハから天井までのギャップが減少して、ウエハ中心近傍のプラズマイオン密度が抑えられ、ウエハ端部近傍のプラズマイオン密度が促進される。反対に、台座 218 を天井電極 204 から離れるように下げるとき、ウエハから天井までのギャップが増大して、ウエハ中心全体のプラズマイオン密度が促進され、ウエハ端部でのプラズマイオン密度が減じる。このように、プラズマ分布は、台座 218 を昇降することにより、夫々、中心をより多く、又は中心をより少なくすることができます。上述した通り、プラズマ分布は、高 VHF 周波数電力対低 VHF 周波数電力の比を増減することにより、夫々、中心をより多く、又は中心をより少なくすることができます。このように、台座の高さと VHF 電力比は、プラズマイオン分布に影響する 2 つの異なる制御因子である。均一性制御器 270 は、これらの制御因子の両方を用いて、プラズマイオン分布均一性を最適にすることができる。例えば、端部が高いプラズマ不均一性は、高 VHF 周波数発生器 240 の出力電力を増大することにより、減少させてもよく、これは、プラズマイオン分布における中心が高いピークを増大する傾向がある。VHF 電力配分を更に変更することを必要とせずに、台座 218 を持ち上げて、ウエハから天井までのギャップを減少させることにより、最適なプラズマ分布が実現されるまで、この中心が高いピークの増大は、抑制することができる。これは、低 RF バイアス及び低チャンバ圧力を求めるプロセスレシピに有用である。このケースでは、プラズマイオン分布において中心が高いピークが特に顕著である。両 VHF 周波数配分の制御は、ウエハから天井までのギャップの制御と共に、不均一性の範囲を広げるが、制御器 270 はこれに対抗することができる。中心が高い不均一性がひどい場合には、例えば、制御器 270 は、高対低 VHF 周波数電力配分と、狭いウエハから天井までのギャップの両方の増大を求める。

20

## 【0018】

特定の VHF 周波数(例えば、 $f_1$  又は  $f_2$ )が、不均一プラズマイオン密度分布にピークを有する場合に、可変のウエハから天井までのギャップが影響する。従って、制御器 270 は、ギャップを設定して、 $f_1$  の選択を最適化し、主に中心が高い不均一プラズマイオン密度分布を生成し、 $f_2$  の選択を最適化し、主に端部が高い不均一プラズマイオン密度分布を生成することができる。例えば、制御器 270 は、ウエハから天井までのギャップを設定して、 $f_1$  及び  $f_2$  の選択を最適化し、異なる不均一性パターンを生成する。また、制御器 270 は、異なる周波数  $f_1$ 、 $f_2$  で RF 電力(電流又は電圧)の比を変えて、プラズマイオン分布を制御し、その不均一性を減じる。

30

## 【0019】

制御器 270 は、以下のいずれかを測定し、制御(変更)することにより、プラズマイ

40

50

オン密度分布において、主に中心が高い、又は端部が高い不均一性があるという計測ツール 272 からの表示に応答して、その不均一性を減少する傾向がある。(a) 周波数  $f_1$ 、 $f_2$  での RF 電圧比、(b) 周波数  $f_1$ 、 $f_2$  での RF 電流比、又は(c) 周波数  $f_1$ 、 $f_2$  での RF 電力比。かかる測定は、各電極で、例えば、互いに好適な場所で行ってよい。

#### 【0020】

変形モードにおいて、制御器 270 は、高( $f_1$ )及び低( $f_2$ )VHF 発生器 240、242 で、電力の配分を変更することを必要とせずに、プラズマイオン密度分布を変える。この代わりに、プラズマイオン密度分布は、制御器 270 により変わる。これは、 $f_1$  及び  $f_2$  可変バンドパスフィルタ 252、254 で表わされる中心接地リターンパスへのインピーダンスを変更することによりなされる。例えば、プラズマ密度分布において、中心ピークを作成したり、端部ピークを抑制する高周波数( $f_1$ )VHF 電力の傾向は、可変バンドパスフィルタ 252 により  $f_1$  電力に示されるインピーダンスを変えることにより増減できる。同様に、プラズマイオン密度分布において、端部ピークを作成したり、中心ピークを抑制する低周波数( $f_2$ )VHF 電力の傾向は、可変バンドパスフィルタ 254 により  $f_2$  電力に示されるインピーダンスを変えることにより増減できる。かかる変更は、中心接地リターンパス(天井からウエハ)と、側部接地リターンパス(側壁 202 を通る)の間での各周波数  $f_1$ 、 $f_2$  での VHF 電流の配分に影響する。より多くの  $f_1$  電力を中心接地リターンパスへ向けることにより、中心が高い分布を作成する高 VHF 周波数( $f_1$ )電力の傾向が増大する。より多くの  $f_2$  電力を側部接地リターンパスへ向けることにより、端部が高い分布を作成する低 VHF 周波数( $f_2$ )電力の傾向が増大する。場合によっては、制御器は、2つの周波数  $f_1$ 、 $f_2$  の一方のみについて、接地リターンパス配分を変更してもよい。

10

20

30

#### 【0021】

図 1 のリアクタの更なる変形モードにおいて、VHF 発生器の 1 つのみ(例えば、発生器 240 のみ)が RF 電力を提供し、他方の発生器(例えば、発生器 242)は用いない、又は省く。均一性制御器 270 は、 $f_1$  バンドパスフィルタ 252 を変えることにより、プラズマイオン放射分布を変更して、ESC 電極 226 を通る接地リターンパスのインピーダンスを制御する。これは、ESC 電極 226 を通る中心パスと、側壁 202 を通る側部パスの間の接地リターン電流を配分する。その結果、制御器 270 のこの特徴が、プラズマイオン分布(エッティングレート分布も同等)における中心が高い、及び中心が低い不均一性を変えて、均一性を最適化する。

2 つのみの VHF 発生器 240、242 が図 1A には示されているが、これより多い異なる周波数の VHF 発生器を用いてもよい。例えば、2 つの VHF 発生器 240、242 のいずれよりも高い周波数を有する第 3 の VHF 発生器を用いてもよい。上述した通り、高 VHF 周波数発生器(例えば、162 MHz)は、プラズマイオン分布に中心ピークを生成し、低周波数発生器 242(60 MHz)は端部ピークを生成する。均一性は、より高い周波数を有する第 3 の VHF 発生器を導入することにより改善され、プラズマイオン密度放射分布における最小を充填する中心と端部の間にピークを生成する。

40

#### 【0022】

図 1A のリアクタを用いて、单一 HF(13.56 MHz) 周波数源により通常生成される非常に低密度のバイアスのみのプラズマというプラズマプロセス条件特徴を再生して、プラズマイオンを生成し、ウエハのバイアス電圧を制御してもよい。このシミュレーションは次のようにして実現してもよい。すなわち、発生器 264 からの LF(例えば、2 MHz) のバイアス電力のみを印加し、2 つの VHF 発生器 240、242 夫々の出力電力を非常に低レベル(例えば、10 ワット)に設定することにより、所望の低プラズマイオン密度を構築する。この利点は次のようなことである。2 つの発生器 240、242 を、出力電力において、非常に僅かな変化により調整すると、单一の HF(13.56 MHz) 周波数源で得られるよりも、より広い範囲の変更プロセス条件にわたってプラズマ均一性を維持できることである。

50

## 【0023】

図2は、図1Aのリアクタの変形例を示す。低VHF周波数( $f_2$ )発生器242、その整合器246及びノッチフィルタ250が、天井電極204でなく、ESC電極226に結合されている。この場合、 $f_2$ 接地リターンパスは、天井電極204を通る。従って、 $f_2$ 可変バンドパスフィルタ254は、ESC電極226でなく、天井電極204に結合されている。高VHF周波数( $f_1$ )発生器240からのRF電流をブロックするよう調整されたノッチフィルタ255は、 $f_2$ バンドパスフィルタ254に接続されていてよい。同様に、低VHF周波数( $f_2$ )発生器242からのRF電流をブロックするよう調整されたノッチフィルタ253は、 $f_1$ バンドパスフィルタ252に接続されていてよい。

10

## 【0024】

図2のリアクタの変形モードにおいて、上(天井電極204)下(ESC電極206)に印加されたVHF周波数 $f_1$ 及び $f_2$ は、夫々同じ周波数( $f_1 = f_2$ )である。この場合、制御器270は、天井電極204とESC電極226で、電圧(又は電流)間での位相を変えることにより、イオン密度(又はエッチングレート)の放射分布を変える。天井電極204とESC電極226で、電流間の位相は、例えば、バンドパスフィルタ252、254のリアクタンスを変えることにより制御してよい。或いは、位相は、1つ又は両方の発生器240、242で制御してもよい。例えば、バンドパスフィルタ252、254のリアクタンスが同じ場合には(そして、他に違いがない場合には)、天井及びESC電極204、226で、RF電流間の位相角度はゼロである。180度の位相で、実質的に全ての電流が、天井電極204と、ESC電極226の間を流れ、プラズマイオン密度又はエッチングレートの中心が高い分布が生成される。ゼロ度の位相では、実質的に全ての電流が、天井電極204か、ESC電極226のいずれかから、側壁202まで流れ、中心が低く、端部が高い分布が生成される。従って、制御器207は、0と180度の間で位相角を変えて、様々な結果を得ることができる。

20

## 【0025】

図2のリアクタの他の変形モードにおいて、VHF発生器のうち1つのみ(例えば、 $f_2$ 発生器242のみ)が、RF電力を提供し、他方の発生器240は、用いない、又は省く。均一性制御器270は、 $f_2$ バンドパスフィルタ254を変えることにより、プラズマイオン放射分布を変えて、天井電極204を通る接地リターンパスのインピーダンスを制御する。これによって、側壁202を通る接地リターンパスの(固定)インピーダンスに対して増減するようになる。これは、天井電極204を通る中心バスと、側壁202を通る側部バスの間で、接地リターン電流を配分する。その結果、制御器270のこの特徴が、プラズマイオン分布(エッチングレート分布も同様)における中心が高い、及び中心が低い不均一性を変えて、均一性を最適化する。

30

## 【0026】

図2のリアクタの更に他の変形モードにおいて、VHF発生器の1つのみ(即ち、 $f_1$ 発生器240のみ)が、RF電力を提供し、他方の発生器242は用いない、又は省く。均一性制御器270は、 $f_2$ バンドパスフィルタ252を変えることにより、プラズマイオン放射分布を変更して、ESC電極226を通る接地リターンバスのインピーダンスを制御する。これは、側壁202を通る接地リターンバスの(固定)インピーダンスに対して増減する。これは、ESC電極226を通る中心バスと、側壁202を通る側部バスの間の接地リターン電流を配分する。その結果、制御器270のこの特徴が、プラズマイオン分布(エッチングレート分布も同等)における中心が高い、及び中心が低い不均一性を変えて、均一性を最適化する。

40

## 【0027】

図3A及び3Bに、図1のリアクタの変形例を示す。天井電極204が、放射状の内側及び外側セクション204a、204bに分割されている。これらは、互いに電気的に分離されていて、発生器240、242の夫々により別個に駆動される。いずれかの発生器を選択して、内側電極204aを駆動し、他方で外側電極204bを駆動してよいが、高

50

VHF周波数発生器240は、内側電極204aに結合されていて、低VHF周波数発生器242は外側電極204bに結合されているのが好ましい。中心が高いイオン分布を生成する高周波数の傾向を促進し、中心が低いイオン分布を生成する低周波数の傾向を促進するためである。

#### 【0028】

図4は、図1のリアクタの変形例を示す。両VHF発生器240、242が、ESCR電極226を駆動し、接地リターンバンドパスフィルタ252、254が、天井電極204に結合されている。

#### 【0029】

図5は、図2のリアクタの変形例を示す。2つの周波数 $f_1$ 及び $f_2$ は両方共、VHFバンドの低部にある。例えば、 $f_1$ 及び $f_2$ は、夫々、54MHzと60MHzである。これは、略200MHz又は150MHzを超える出力周波数を有する高VHF周波数発生器の必要性が排除されることから、大幅なコスト削減を意味している。図5のリアクタにおいて、中心が高い応答を与える高VHF周波数（例えば、162MHz）の失われた分は、天井電極204に（或いは、 $f_1$ 発生器240の出力に）結合された高VHF周波数（例えば、162MHz）共振器274により生成される。共振器274は、第3の調波等、 $f_1$ の奇数調波で共振するよう調整されているのが好ましい。例えば、 $f_1 = 54$  MHzの場合には、共振器274で生成される第3の調波は162MHzとなる。高調波の生成は、リアクタチャンバにおけるプラズマの非線形応答により促進され、共振器274と協働して、周波数倍器として機能する。可変バンドパスフィルタ252を、 $f_1$ の第3の調波まで調整して、発生器240から $f_1$ でのRF電力の一部が、 $f_1$ での第3の調波まで変換される。  
10

#### 【0030】

図5のリアクタの他の変形モードにおいて、VHF発生器の1つのみ（即ち、発生器240のみ）が、RF電力を提供し、他方の発生器242は用いない、又は省く。均一性制御器270は、 $f_1$ バンドパスフィルタ252を変えることにより、プラズマイオン放射分布を変更して、天井電極204を通る接地リターンパスのインピーダンスを制御する。これは、側壁202を通る接地リターンパスの（固定）インピーダンスに対して増減する。これは、天井電極204を通る中心パスと、側壁202を通る側部パスの間の接地リターン電流を配分する。その結果、制御器270のこの特徴が、プラズマイオン分布（エッティングレート分布も同等）における中心が高い、及び中心が低い不均一性を変えて、均一性を最適化する。  
20

#### 【0031】

図6は、同時に高低VHF周波数を用いるが、大幅なコスト削減を行うために、単一の低VHF周波数発生器のみを用いるリアクタの変形例を示す。低VHF発生器240は、可変周波数発振器（VFO）であり、周波数が、基本周波数 $f$ 及び $f \pm f$ 間に、制御器270により変化する。ここで、 $f$ は、 $f$ からの僅かな偏差である。共振器274は、基本周波数 $f$ の第3の調波、 $F = 3 \cdot f$ まで調整される。発生器240の周波数を変えることにより、第3の調波 $F$ に変換される発生器の出力電力の割合は、発生器出力周波数 $f \pm f$ と基本周波数 $f$ の差に逆比例して増減する。第3の調波は、共振器274の共振周波数である。その結果、両周波数、即ち、発生器出力周波数 $f \pm f$ と、調波周波数 $F$ は、プラズマに結合し、それらの相対的な電力レベルは、発生器240の出力周波数を変えることにより制御されることになる。発生器出力周波数と基本周波数 $f$ の差を減らすことによって、第3の調波でプラズマに結合した電力は増え、基本 $f$ での電力は減る。これによって、中心が高い不均一性は増え、端部が高い不均一性は減る。反対に、発生器出力周波数と基本周波数 $f$ の差を増やすことによって、第3の調波でプラズマに結合した電力は減り、基本 $f$ での電力は増える。これによって、端部が高い不均一性は増え、中心が高い不均一性は減る。従って、プラズマ不均一性は、VFO又は発生器240の周波数を変えることにより、制御器270により調節される。2つの可変バンドパスフィルタ252、254は、夫々、基本 $f$ と第3の調波 $F$ に中心のあるバスバンドを有する。  
30  
40  
50

## 【0032】

一態様において、内部チャンバ要素は、アルミニウム等の金属で形成されている。プラズマ処理中の金属汚染を防ぐ、又は最少にするために、プラズマに晒される可能性のある金属チャンバ要素の表面、例えば、側壁202の内側表面や台座218の露出面は、例えば、イットリア等のプロセス適合性のある材料のフィルムでコートされる。フィルムは、プラズマスプレー コートされたイットリアであってもよい。或いは、イットリア等のバルクセラミック材料を、下にある金属内部チャンバ要素にボンドしてもよい。例えば、天井204は、プラズマに露出された側に、ボンドされたセラミック板を有していてもよい。側壁202は、プラズマに晒される側に、ボンドされたセラミックシリンダを有していたり、リング219は、プラズマに晒される側に、ボンドされたセラミックリングを有していてもよい。セラミック材料は、ドープ又はその他製造されて、その電気抵抗が、半導体範囲（例えば、 $10^8 \sim 10^{12}$  オーム \* cm）にあるようにして、ESC電極226に印加されたESCクランプ電圧のためのDC電流リターンパスを提供する。これらのチャンバ表面は、ポリマー等の材料の望ましくない堆積や蓄積を最小にするために加熱する、例えば、又は、エッチングを最小又は排除するために冷却する、又は加熱と冷却の両方を用いて温度制御してもよい。チャンバの内部表面は、適切な化学薬品を用いて、プラズマエッティングプロセスにおいて、清浄にする。例えば、ドライクリーニングステップでは、酸素又は酸素含有、或いは塩素又は塩素含有ガスをチャンバに導入し、VHF電源発生器240、242及び/又はバイアス電力発生器262、266を用いて、プラズマを生成してもよい。

10

20

30

40

## 【0033】

図7に、図1のリアクタを用いて実施できるプロセスを示す。図7のブロック300で、RFプラズマ電源を、2つの異なるVHF周波数f1及びf2で、同時に、電極（天井又はウエハ）を通して容量結合する。f1はVHFバンドの高い範囲（例えば、162MHz）であり、f2はVHFバンドの低い領域（例えば、50~60MHz）である。ブロック302で、図1に示すように、バンドパスフィルタ252、254を接地に提供することにより、各周波数f1及びf2について、対向電極（ウエハ又は天井）を通して個々の中心接地リターンパスを提供する。図7のブロック304において、図1に示すように、側壁202を接地することにより、各周波数f1及びf2について、側壁を通して端部リターンパスを提供する。ブロック306において、f1中心リターンパスのインピーダンスを、f1端部リターンパスのインピーダンスに対して調整し、バンドパスフィルタ252を調整することにより、f1周波数での中心リターンパスへの電流の流れを促進する。ブロック308において、f2端部リターンパスのインピーダンスを、f2中心リターンパスのインピーダンスに対して調整し、バンドパスフィルタ254を調整することにより、f2周波数での側壁への電流の流れを促進する。ブロック310において、均一性制御器270は、f1周波数でのVHF電力対f2周波数でのVHF電力の比を選択することにより、放射プラズマイオン密度分布の均一性を改善する。ブロック310のステップを実施して、f1周波数でのVHF電力対f2周波数でのVHF電力の比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減じる（ブロック312）。或いは、ブロック310のステップを実施して、f1周波数でのVHF電力に対するf2周波数でのVHF電力の比を減じることにより、端部が高いプラズマイオン密度分布不均一性を減じる（ブロック314）。イオン密度分布に影響を及ぼす、又は改善する他のやり方として、制御器270が、f1かf2又はその両方の中心及び端部リターンパスのインピーダンスを調整し（各バンドパスフィルタ252、254を調整することにより）、次のいずれかを行う。（a）端部に向ってより多くの電流を流して、中心が高い不均一性を抑制する、か（b）中心に向ってより多くの電流を流して、端部が高い不均一性を抑制する（ブロック316）。

## 【0034】

この説明において、均一性とは、放射プラズマイオン密度分布についてである。かかる分布は、リアクタにおいてプラズマエッティングプロセスにより処理されたウエハ表面全体

50

で測定できるエッティングレート放射分布と推定、又は等価と考えられる。

【0035】

図8に、図2のリアクタを用いて実施できるプロセスを示す。図8のブロック318のステップにおいて、RFプラズマ電源を、上VHF周波数 $f_1$ （例えば、約162MHz）で、1つの電極（天井又はウエハ）を通して容量結合し、一方、RFプラズマ電源を、低VHF周波数 $f_2$ （例えば、約50～60MHz）で、対向電極（ウエハ又は天井）を通して容量結合する。ブロック320において、中心リターンパスを、周波数 $f_1$ について、対向電極を通して提供する。ブロック322において、中心リターンパスを、周波数 $f_2$ について、電極を通して提供する。ブロック324のステップにおいて、各周波数 $f_1$ 及び $f_2$ について、側壁を通る端部リターンパス。ブロック346のステップにおいて、 $f_1$ 中心リターンパスのインピーダンスを、 $f_1$ 端部リターンパスのインピーダンスに対して調整し、可変バンドパスフィルタ252を調整することにより、中心リターンパスへの、 $f_1$ 周波数での電流の流れを促進する。ブロック328のステップにおいて、 $f_2$ 側部リターンパスのインピーダンスを、 $f_2$ 中心リターンパスのインピーダンスに対して調整して、可変バンドパスフィルタ254を調整することにより、側壁への、 $f_2$ 周波数での電流の流れを促進する。ブロック330のステップにおいて、制御器270は、 $f_1$ 周波数でのVHF電力対 $f_2$ 周波数でのVHF電力の比を選択することにより、放射プラズマイオン密度分布の均一性を改善する。このステップを実施して、 $f_2$ 周波数でのVHF電力に対する $f_1$ 周波数でのVHF電力の比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減じる（ブロック332）。このステップを実施して、 $f_1$ 周波数でのVHF電力に対する $f_2$ 周波数でのVHF電力の比を減じることにより、端部が高いプラズマイオン密度分布不均一性を減じる（ブロック334）。ブロック330のステップの代わりに、又はこれに加えて、制御器270は、 $f_1$ か $f_2$ 又はその両方の中心及び端部リターンパスのインピーダンスを調整することにより（各バンドパスフィルタ252、254を調整することにより）、均一性を改善して、次のいずれかを行う。（a）端部に向ってより多くの電流を流して、中心が高い不均一性を抑制する、か（b）中心に向ってより多くの電流を流して、端部が高い不均一性を抑制する（図8のブロック336）。

【0036】

図9に、図3Aのリアクタを用いて実施できるプロセスを示す。図9のプロセスにおいて、上VHF周波数 $f_1$ RFプラズマ電源で内側天井電極を通してRFプラズマ電源を、低VHF周波数 $f_2$ で、外側天井電極を通して容量結合する（図9のブロック338）。ブロック340において、接地に結合したバンドパスフィルタ252を提供することにより、中心リターンパスを、ウエハを通して、周波数 $f_1$ について提供する。ブロック342において、接地に結合したバンドパスフィルタ254を提供することにより、ウエハを通る中心リターンパスを、周波数 $f_2$ について提供する。図9のブロック344において、図3Aに示す通り、側壁202を接地することにより、各周波数 $f_1$ 及び $f_2$ について、側壁202を通る端部リターンパス。ブロック326のステップにおいて、 $f_1$ 中心リターンパスのインピーダンスを、 $f_1$ 端部リターンパスのインピーダンスに対して調整して、バンドパスフィルタ252のリアクタンスを調整することにより、中心リターンパスへの、 $f_1$ 周波数での電流の流れを促進する。ブロック348のステップにおいて、 $f_2$ 端部リターンパスのインピーダンスを、 $f_2$ 中心リターンパスのインピーダンスに対して調整して、バンドパスフィルタ254のリアクタンスを調整することにより、側壁への、 $f_2$ 周波数での電流の大量の流れを促進する。ブロック350において、制御器270は、 $f_1$ 周波数でのVHF電力対 $f_2$ 周波数でのVHF電力の比を選択することにより、放射プラズマイオン密度分布（又はウエハでのエッティングレート分布）の均一性を改善する。このステップを実施して、 $f_1$ 周波数でのVHF電力対 $f_2$ 周波数でのVHF電力の比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減じる（ブロック352）。或いは、このステップを実施して、 $f_1$ 周波数でのVHF電力に対する $f_2$ 周波数でのVHF電力の比を減じることにより、端部が高いプラズマイオン密度分布不均一性を減じる（ブロック354）。ブロック350のステップの代わりに、又はこれに加えて、制御器2

10

20

30

40

50

70は、 $f_1$ か $f_2$ 又はその両方の中心及び端部リターンパスのインピーダンスを調整することにより、プラズマイオン密度分布（又はウエハでのエッチングレート分布）の均一性を改善して、次のいずれかを行う。（a）端部に向ってより多くの電流を流して、中心が高い不均一性を抑制する、か（b）中心に向ってより多くの電流を流して、端部が高い不均一性を抑制する（図9のブロック356）。

#### 【0037】

図10は、図2のリアクタで実施できるプロセスを示す。これは、互いに等しい（又は、互いに少なくとも略等しい）図2の2つのVHF周波数 $f_1$ 及び $f_2$ を設定することによるものである。バンドパスフィルタ252、254は、この場合は、可変リアクタンスとして用い、天井及びウエハで、VHF電圧（又は電流）間の位相を制御したり、変えることができる。図10のブロック358のステップにおいて、RFプラズマ電源を、VHF周波数で、1つの電極（天井又はウエハ）を通して容量結合し、一方、RFプラズマ電源を、同じVHF周波数で、対向電極（ウエハ及び天井）を通して容量結合する。ブロック360において、可変リアクタンス（例えば、可変バンドパスフィルタ252）等の制御要素を、位相を制御するために、図2の対向電極226に提供する。ブロック362において、可変リアクタンス（例えば、可変バンドパスフィルタ254）等の制御要素を、位相を制御するために、電極204に提供する。ブロック364のステップにおいて、側壁202を接地することにより、端部リターンパスを提供する。ブロック366のステップにおいて、制御器270は、電極と対向電極で、VHF電流間の位相差を制御することにより、放射プラズマイオン密度分布の均一性を改善する。このステップを実施して、位相差を180度へ動かすことにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減じてもよい（図10のブロック367）。或いは、ブロック368のステップを実施して、位相差を0度へ動かすことにより、端部が高いプラズマイオン密度分布を減じてもよい。

#### 【0038】

図11に、図5のリアクタを用いて実施できるプロセスを示す。図11のブロック370において、RFプラズマ電源を、夫々、電極（図5の204）及び対向電極（図5の226）に、VHFバンドの低領域に両方ともある2つの同様のVHF周波数 $f_1$ 及び $f_2$ で。これは、高VHF周波数（例えば、160～200MHz）発生器のコストが排除されることから、大幅なコスト削減を表している。図11のブロック372において、電極204を、 $f_1$ の奇数（例えば、第3）調波である共振周波数を有する共振器（図5の274）に結合する。これは、VHFバンドの高領域にあって、奇数（例えば、第3）調波（例えば、162MHz）でVHF電力を生成する。ブロック374において、個々の中心リターンパスを、例えば、バンドパスフィルタ252を提供することにより、 $f_1$ の第3の調波について、対向電極（図5の266）を通して提供する。ブロック376において、個々の中心リターンパスを、例えば、バンドパスフィルタ254を提供することにより、VHF周波数 $f_2$ について、電極204を通して提供する。ブロック378において、端部リターンパスを、側壁（図5の202）を接地することにより、 $f_2$ について、及び $f_1$ の奇数の調波について、側壁を通して提供する。ブロック380のステップにおいて、制御器270は、バンドパスフィルタ252のリアクタンスを調整することにより、 $f_1$ 調波中心リターンパスのインピーダンスを、 $f_1$ 調波端部リターンパスのインピーダンスに対して調整して、中心リターンパスへの $f_1$ 調波での電流の流れを促進する。ブロック382のステップにおいて、制御器270は、バンドパスフィルタ254のリアクタンスを調整することにより、 $f_2$ 端部リターンパスのインピーダンスを、 $f_2$ 中心リターンパスのインピーダンスに対して調整して、側壁への $f_2$ 周波数での電流の流れを促進する。制御器270は、 $f_1$ 及び $f_2$ 発生器間でのVHF電力比を選択することにより、放射プラズマイオン密度分布の均一性を改善し、プラズマに結合された $f_1$ 調波電力と $f_2$ 電力間の比を制御する（ブロック384）。このステップを実施して、 $f_2$ 周波数でのVHF電力に対する $f_1$ 周波数で生成されたVHF電力の比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減じる（ブロック386）。或いは、このステップを実施して、 $f_1$ 周波数で生成されたVHF電力に対する $f_2$ 周波数でのVHF電力の比を減じる

ことにより、端部が高いプラズマイオン密度分布不均一性を減じる（図11のブロック388）。ブロック384のステップの代わりに、又はこれに加えて、制御器270は、 $f_2$ か $f_1$ の調波のいずれか又はその両方の中心及び端部リターンパスのインピーダンスを調整することにより、プラズマイオン密度分布の均一性を改善して、次のいずれかを行う。（a）端部に向ってより多くの電流を流して、中心が高い不均一性を抑制する、か（b）中心に向ってより多くの電流を流して、端部が高い不均一性を抑制する（ブロック390）。

### 【0039】

図12に、図5のリアクタの変形例を用いて実施できるプロセスを示す。 $f_2$ バンドパスフィルタ254、 $f_2$ 発生器及び整合器242、246の場所が交換されて、両周波数 $f_1$ 、 $f_2$ が天井電極204を駆動する。ブロック392において、RF plasma電源を、同時に2つの同様の低VHF周波数 $f_1$ 及び $f_2$ で、電極（例えば、図5の天井電極）へ。ブロック394で、 $f_1$ の奇数調波である共振周波数を有する共振器（図5の274）を、電極204に結合して、奇数調波でVHF電力を生成する。この周波数アップコンバージョンは、周波数倍効果を与えるプラズマの非線形応答により促進される。図12のブロック396において、個々の中心リターンパスを、接地に結合されたバンドパスフィルタ252を提供することにより、 $f_1$ の調波について、対向電極（図5の226）を通して提供する。図12のブロック398において、個々の中心接地リターンパスを、接地に結合された図5のバンドパスフィルタ254を提供することにより、VHF周波数 $f_2$ について、対向電極を通して提供する。ブロック400において、図5の側壁202を接地することにより、端部リターンパスを、 $f_2$ 及び $f_1$ の調波について、側壁を通して提供する。ブロック402において、制御器270は、 $f_1$ 調波中心リターンパスのインピーダンスを、 $f_1$ 調波端部リターンパスのインピーダンスに対して調整して、図5のバンドパスフィルタ252を調整することにより、中心リターンパスを通る $f_1$ 調波での電流の流れを促進する。図12のブロック404において、制御器270は、図5のバンドパスフィルタ254のリアクタンスを調整することにより、 $f_2$ 端部リターンパスのインピーダンスを、 $f_2$ 中心リターンパスのインピーダンスに対して調整して、側壁への $f_2$ 周波数での電流の流れを促進する。ブロック406において、制御器270は、 $f_1$ 及び $f_2$ 発生器間でのVHF電力比を選択することにより、放射プラズマイオン密度分布の均一性を改善し、プラズマに結合された $f_1$ 調波電力と $f_2$ 電力間の比を制御する。このステップを実施して、 $f_2$ 周波数でのVHF電力に対する $f_1$ 調波でのVHF電力の比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減じる（ブロック408）。或いは、このステップを実施して、 $f_1$ 調波でのVHF電力に対する $f_2$ 周波数でのVHF電力の比を減じることにより、端部が高いプラズマイオン密度分布不均一性を減じる（ブロック410）。ブロック408でのプロセスの代わりに、又はこれに加えて、制御器270は、 $f_1$ 調波か $f_2$ のいずれか又はその両方の中心及び端部リターンパスのインピーダンスを調整することにより、均一性を改善して、次のいずれかを行う。（a）端部に向ってより多くの電流を流して、中心が高い不均一性を抑制する、か（b）中心に向ってより多くの電流を流して、端部が高い不均一性を抑制する（図12のブロック412）。

### 【0040】

図13に、図6のリアクタを用いて実施できるプロセスを示す。単一の低VHF周波数発生器（約50～60MHz）のみを用いて、前述したリアクタにおいて2つの発生器を必要とする機能を実現する。図13のブロック414において、RF plasma電源を、基本低VHF周波数 $f$ を含む周波数範囲を有する可変周波数VHF発生器240から、電極（例えば、図6の天井電極204）を通して容量結合する。ブロック416において、電極204を、基本周波数 $f$ の奇数調波である共振周波数 $F$ を有する共振器274に結合して、非線形混合要素として、チャンバ内のプラズマを用いて、奇数調波で、VHF電力を生成する。ブロック418において、接地に結合したバンドパスフィルタ252を提供することにより、個々の中心リターンパスを、対向電極（例えば、図6のESC電極226）を通して、調波周波数 $F$ について提供する。ブロック420において、接地に結合した

10

20

30

40

50

バンドパスフィルタ 254 を提供することにより、個々の中心リターンパスを、対向電極（例えば、図 6 の 226）を通して、基本 VHF 周波数  $f$  について提供する。図 12 のブロック 422において、図 6 の側壁 202 を接地することにより、端部リターンパスを、側壁を通して、両周波数  $f$  及び  $F$  について。図 12 のブロック 424において、制御器 270 は、可変バンドパスフィルタ 252 を調整することにより、 $F$  中心リターンパスのインピーダンスを、 $F$  端部リターンパスのインピーダンスに対して調整して、中心リターンパスへの  $F$  での電流の流れを促進する。ブロック 426において、制御器 270 は、可変バンドパスフィルタ 254 を調整することにより、 $f$  端部リターンパスのインピーダンスを、 $f$  中心リターンパスのインピーダンスに対して調整して、側壁への  $f$  周波数での電流の流れを促進する。ブロック 428において、制御器 270 は、基本  $f$  での（又はその近傍での）VHF 電力対調波  $F$  での VHF 電力の比を制御することにより、プラズマイオン密度分布均一性を改善する。これは、 $f$  から  $F$  へアップコンバートされた電力の比を制御することによりなされる。この比は、VHF 発生器の可変出力周波数と基本周波数  $f$  の差を制御することにより制御される。発生器出力周波数が、基本に近づくにつれて、例えば、（第 3 の）調波  $F$  へ変換された可変周波数発生器 240 により生成された VHF 電力の比が増加する。 $F$  での VHF 電力対  $f$  での VHF 電力の最大比は、発生器周波数が基本  $f$  に等しい時に得られる。ブロック 428 のステップを実施して、 $f$  での VHF 電力に対する  $F$  での VHF 電力の比を減じることにより、中心が高いプラズマイオン密度分布を減じる（図 13 のブロック 430）。或いは、ブロック 428 のステップを実施して、 $F$  での VHF 電力に対する  $f$  周波数での VHF 電力の比を減じることにより、端部が高いプラズマイオン密度分布不均一性を減じる（図 13 のブロック 432）。ブロック 428 のステップの代わりに、又はこれに加えて、制御器 270 は、 $F$  か  $f$  のいずれか又はその両方の中心及び端部リターンパスのインピーダンスを調整することにより、均一性を改善して、次のいずれかを行う。各バンドパスフィルタ 252、254 を調整することにより、（a）端部に向ってより多くの電流を流して、中心が高い不均一性を抑制する、か（b）中心に向ってより多くの電流を流して、端部が高い不均一性を抑制する。

#### 【0041】

静電チャック 218 を用いると、ウエハ 220 への、又はウエハ 220 からの熱伝達の高レートが、静電チャックがなく熱伝達が乏しい非常に低い（mT）チャンバ圧力であっても、促進される。この特徴によって、真空ポンプ 228 が、非常に強力なターボポンプとなって、非常に低いチャンバ圧力を求めるチャンバレシピを実行することができる。非常に少ない～非常に多いプラズマイオン密度（例えば、 $10^9 \sim 10^{11}$  イオン / cc）を生成し得る VHF 電源 240、242 と組み合わせると、これらの特徴は、ウエハ温度及びプラズマイオン密度分布均一性を完全に制御しながら、高バイアス又は高熱負荷で、低チャンバ圧力（mT範囲）、高プラズマイオン密度（ $10^{10} \sim 10^{11}$  イオン / cc 範囲）の新しい可能性を与えるものである。図 1～6 のリアクタに含まれるこれらの特徴は、低チャンバ圧力及び高プラズマイオン密度を必要としながらも、高熱負荷を与える誘電性エッチングプラズマプロセスやプラズマ浸漬イオン注入プロセス等の特定のプロセスのニーズを満たすものである。しかしながら、これらのリアクタは、様々なチャンバ圧力（mT～トル）、様々なウエハ熱負荷及び様々なイオン密度（例えば、 $10^9 \sim 10^{11}$  イオン / cc）で実施することができる。従って、図 1～6 のリアクタは、チャンバ圧が高かったり低かったり、そしてプラズマイオン密度が高かったり低かったりするプラズマエンハンスド化学蒸着（PECVD）、プラズマエンハンスド物理蒸着（PEPVD）、プラズマドーピング及びプラズマエンハンスド材料変性等その他のプロセスの実施に用いてもよい。

#### 【0042】

上記は、本発明の実施形態に係るものであるが、本発明のその他及び更なる実施形態は、その基本的な範囲から逸脱することなく考案でき、その範囲は、添付の特許請求の範囲に基づいて定められる。

#### 【図面の簡単な説明】

10

20

30

40

50

**【0043】**

本発明の上記実施形態が達成され、詳細に理解できるように、上に簡単にまとめた本発明のより具体的な説明を、添付図面に例示されたその実施形態を参照して行う。しかしながら、添付図面は、本発明の典型的な実施形態のみを例示するだけであるため、その範囲を限定するものとは解釈されず、本発明は他の等しく有効な実施形態も含み得ることに留意すべきである。

**【0044】**

【図1A】天井電極に印加された複数のVHF電源周波数を有するプラズマリアクタを示す図である。

【図1B】図1Aのリアクタにおいて、RF接地リターンパスのインピーダンスを制御する可変リアクタンス又はバンドパスフィルタの要素を示す図である。  
10

【図2】対向する電極に印加された異なるVHF周波数を有するプラズマリアクタを示す図である。

**【図3A】~**

【図3B】各同心電極に印加された異なるVHF周波数によるプラズマリアクタを示す図である。

【図4】カソード電極に印加された異なるVHF周波数によるプラズマリアクタを示す図である。

【図5】2つのVHF電源周波数によるプラズマリアクタを示す図であり、高VHF電源周波数が、低VHF周波数発生器及び第3の調波共振器を用いて生成される。  
20

【図6】VHFバンドの低部分（例えば、50～60MHz）に単一のVHF可変周波数発生器と、第3の調波共振器とを備えたプラズマリアクタを示す図であり、発生器出力周波数を変えることにより決まる電力レベルで、VHFバンドの高部分（例えば、100MHzを超える）にVHF周波数成分を生成する。

【図7】図1のリアクタを用いて実施できるプロセスを示す図である。

【図8】図2のリアクタを用いて実施できるプロセスを示す図である。

【図9】図3Aのリアクタを用いて実施できるプロセスを示す図である。

【図10】互いに等しい図2の2つのVHF周波数 $f_1$ 及び $f_2$ を設定することにより、図2のリアクタにおいて実施できるプロセスを示す図である。

【図11】図5のリアクタを用いて実施されるプロセスを示す図である。  
30

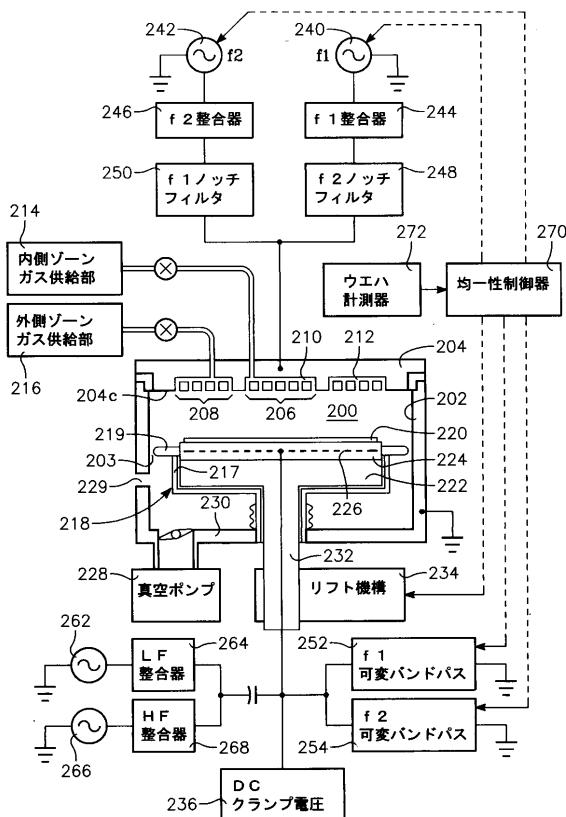
【図12】図5のリアクタの変形例で実施できるプロセスを示す図であり、 $f_2$ バンドパスフィルタ254及び $f_2$ 発生器及び整合器242、246の場所が交換されている。

【図13】単一の低VHF周波数発生器のみを用いて、図6のリアクタで実施されるプロセスを示す図である。

**【0045】**

理解を促すために、図面に共通の同一の要素を示すのに、可能な場合には、同一の参照番号を用いてある。図面は全て概略であり、縮尺は合っていない。

【図 1A】



【図 1B】

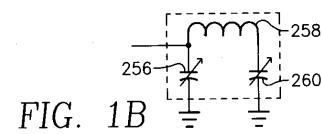
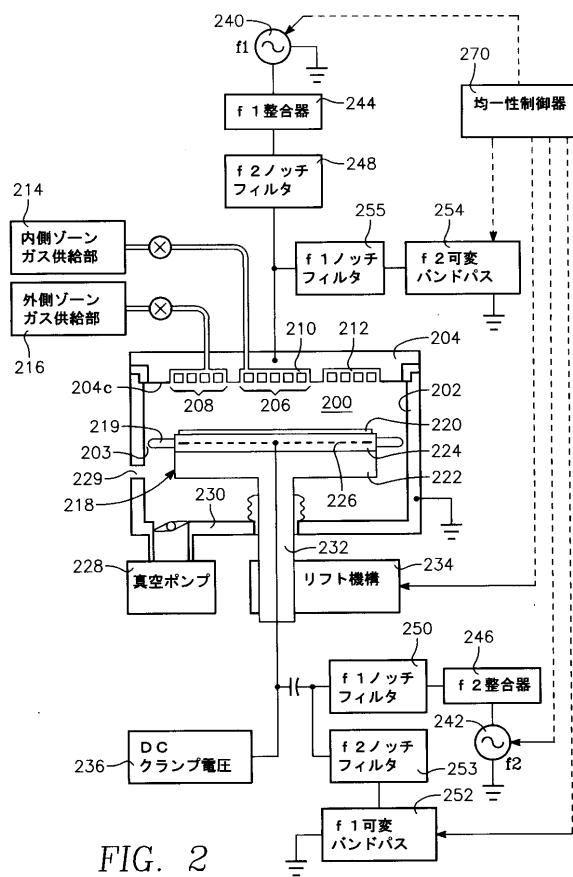


FIG. 1A

【図 2】



【図 3A】

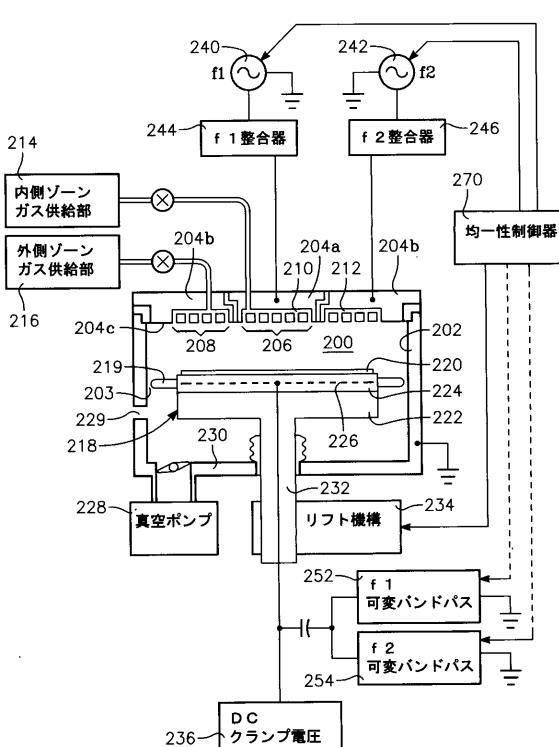


FIG. 2

FIG. 3A

【図 3B】

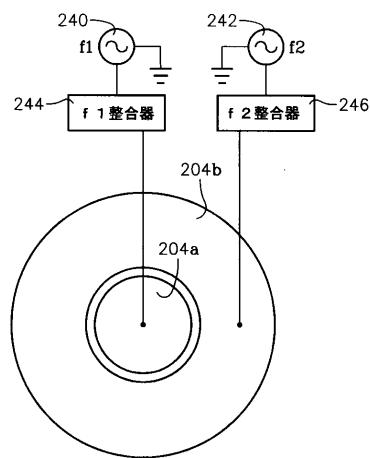


FIG. 3B

【図 4】

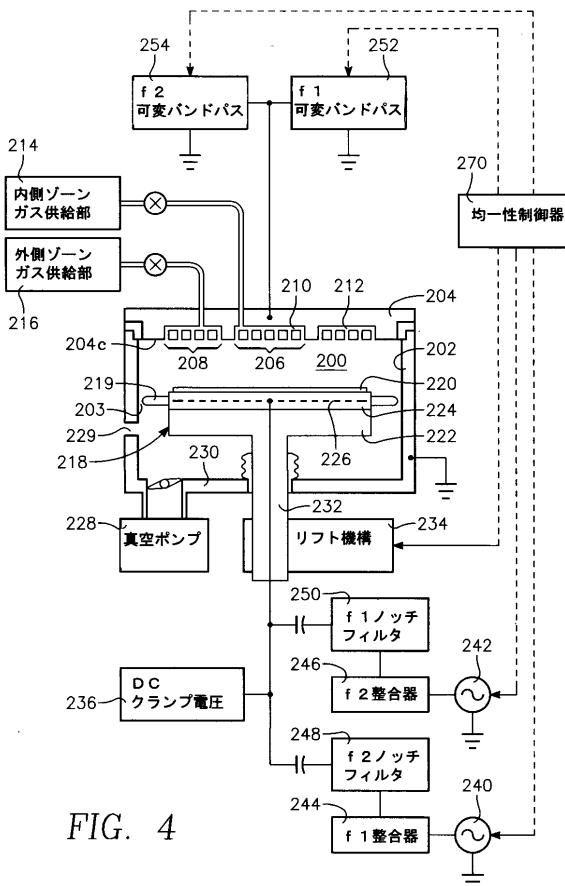


FIG. 4

【図 5】

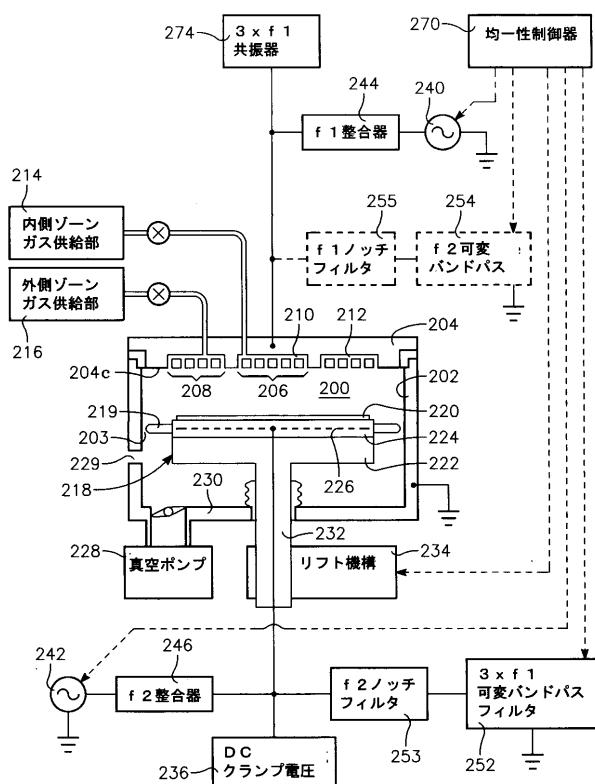


FIG. 5

【図 6】

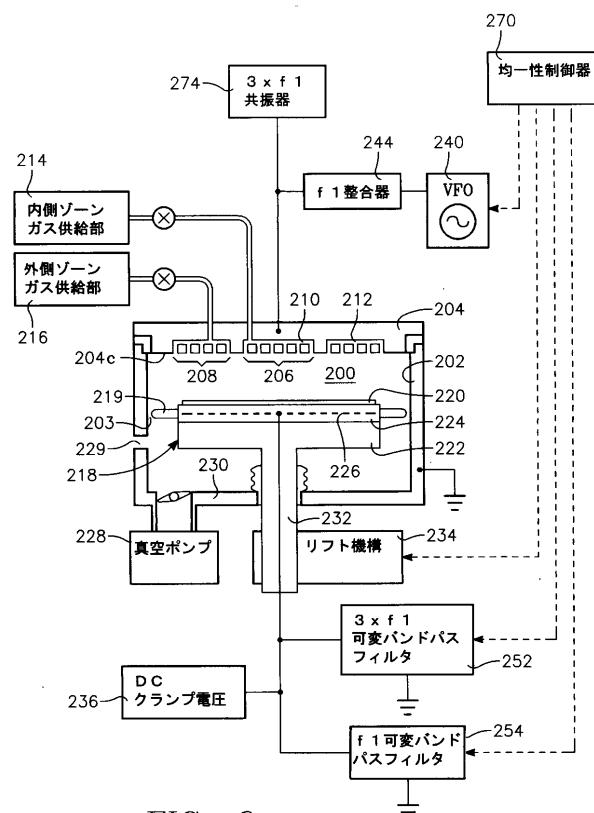


FIG. 6

【図7】

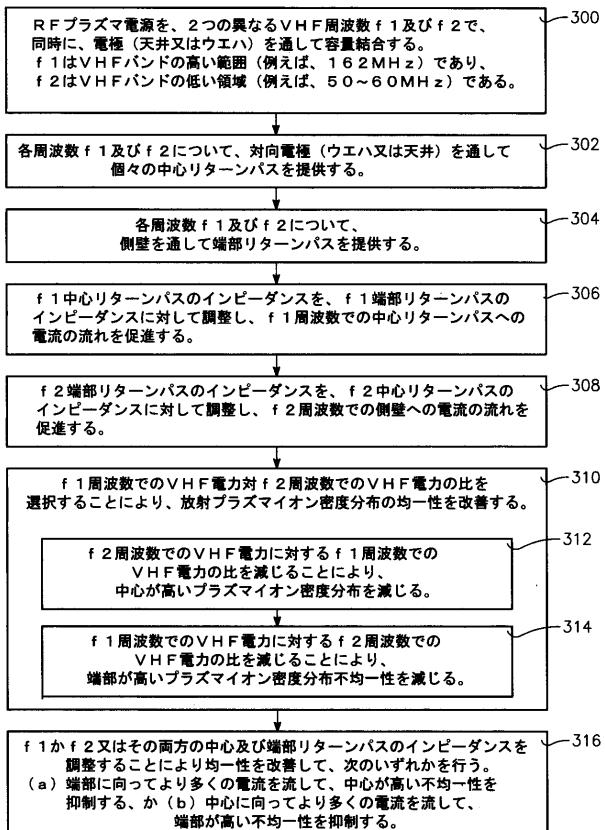


FIG. 7

【図8】

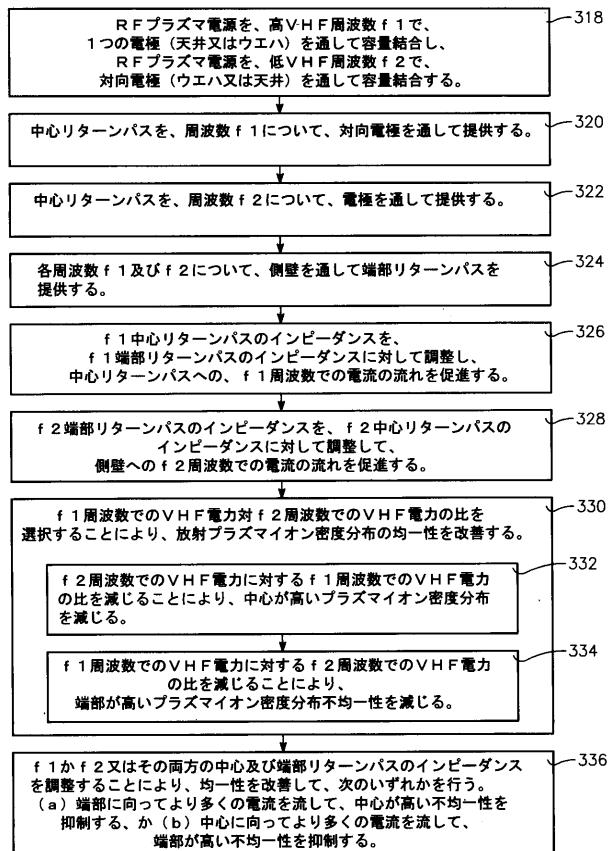


FIG. 8

【図9】

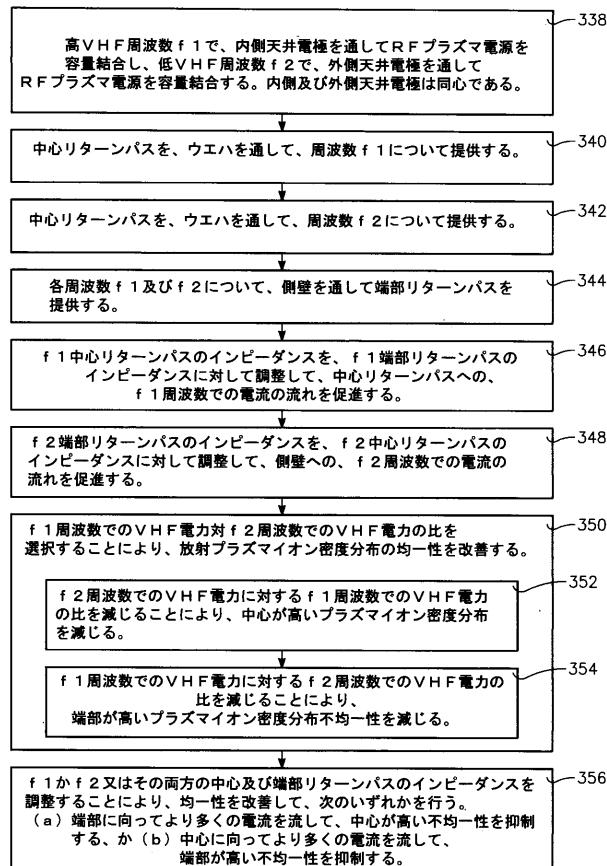


FIG. 9

【図10】

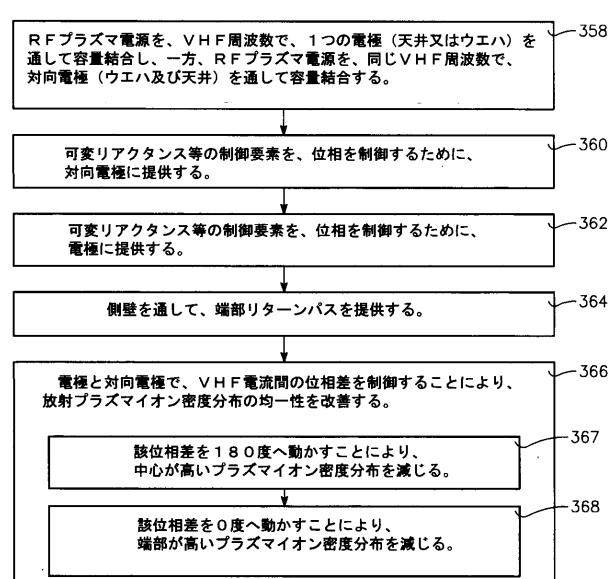


FIG. 10

【図11】

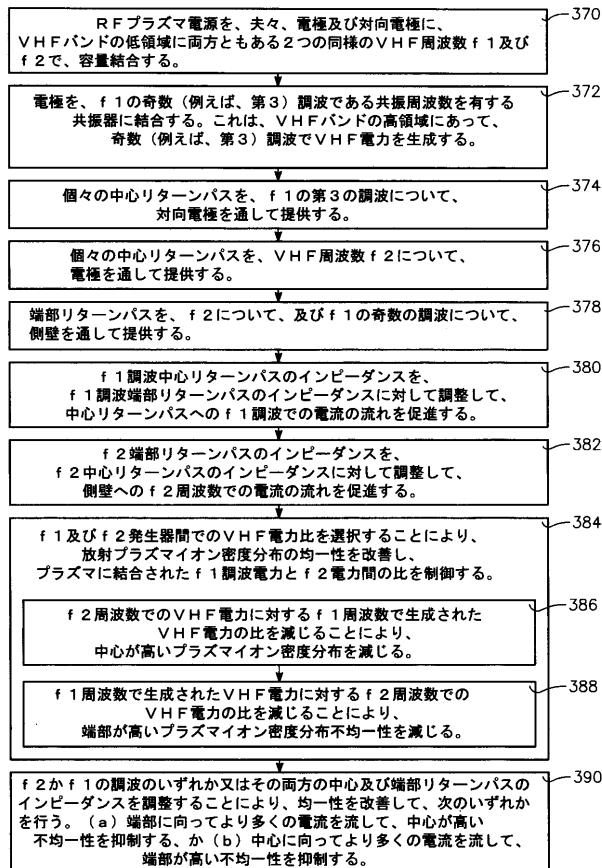


FIG. 11

【図12】

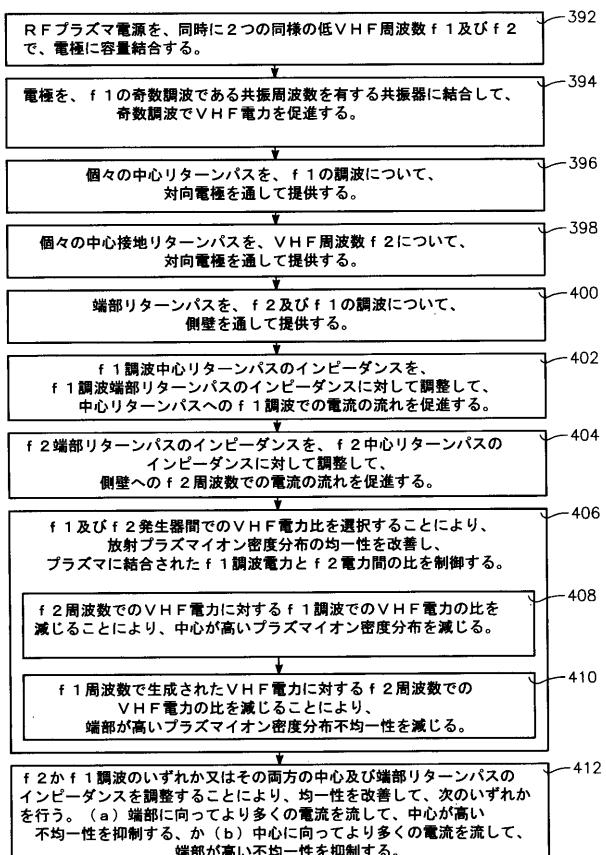


FIG. 12

【図13】

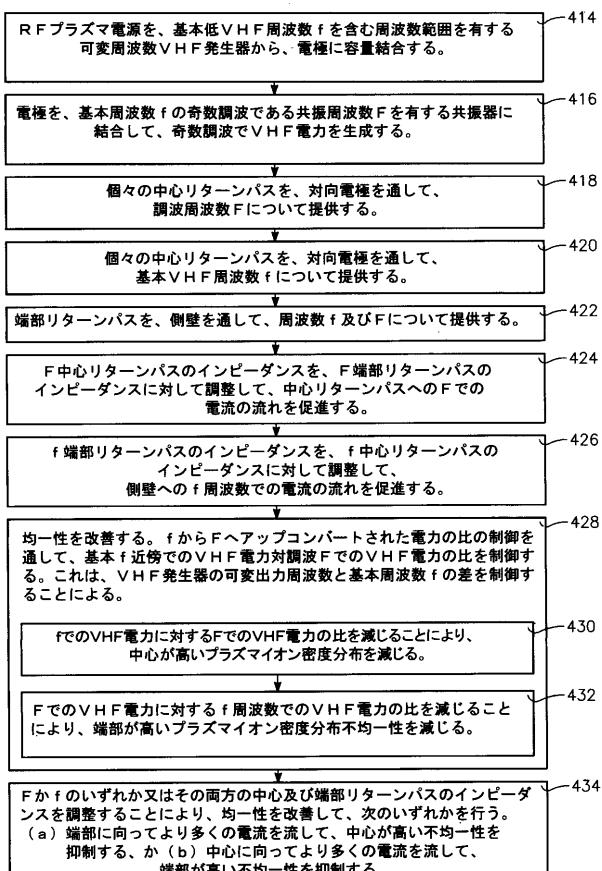


FIG. 13

---

フロントページの続き

(72)発明者 ヒロジ ハナワ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94086 サニーベール スブルース ドライブ 696

(72)発明者 カーティク ラマスワミ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95124 サンノゼ タウニーゲート ウェイ 1646

(72)発明者 ダグラス エイ バックバーガー ジュニア  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94550 リバーモア ビンテージ レーン 2076

(72)発明者 シャヒド ラウフ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94566 プレザントン コーテ パドレ 6167

(72)発明者 キャロル ベラ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95128 サンノゼ フルートデール アベニュー 21  
00 シャープ 6

(72)発明者 ローレンス ワング  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94539 フリモント パークメドウ コート 4558  
7

(72)発明者 ウォルター アール メリー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94086 サニーベール ウエスト アイオワ アベニュー  
- 982

(72)発明者 マシュー エル ミラー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94555 フリモント サリスバリー コート 3114

(72)発明者 スティーブン シー シャンノン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94401 サンマテオ トロリマン 1501

(72)発明者 アンドリュー ヌグエン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95132 サンノゼ ホステッター ロード 3148

(72)発明者 ジェームズ ピー クルーズ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95073 ソクエル ロウレル グレン ロード 232  
3

(72)発明者 ジェームズ カーダッチ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94086 サニーベール ゲイル アベニュー 731

(72)発明者 トロイ エス デトリック  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94024 ロス アルトス ラベンウッド ドライブ 1  
482

(72)発明者 サバハシュ デシュムカ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95138 サンノゼ アベンナイズ サーカル 528  
0

(72)発明者 ジェニファー ワイ サン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94086 サニーベール アルパイン テラス 9964

F ターム(参考) 4K030 CA04 FA03 JA03 JA06 JA16 JA17 JA18 KA14 KA18 KA19  
KA30  
5F004 AA01 BA04 BB11 BB18 BD04  
5F045 AA08 AF01 BB02 DP03 DQ10 EH14

## 【外国語明細書】

## PATENT

Atty. Docket No.: 011698 JAPA/ETCH/CHMBR/MDD

## TITLE OF THE INVENTION

**IMPROVING PLASMA PROCESS UNIFORMITY ACROSS A WAFER BY APPORTIONING POWER AMONG PLURAL VHF SOURCES**

Inventors: Kenneth S. Collins, Hiroji Hanawa, Kartik Ramaswamy, Douglas A. Buchberger Jr., Shahid Rauf, Kallol Bera, Lawrence Wong, Walter R. Merry, Matthew L. Miller, Steven C. Shannon, Andrew Nguyen, James P. Cruse, James Carducci, Troy S. Detrick, Subhash Deshmukh, and Jennifer Y. Sun

## CROSS-REFERENCE TO RELATED APPLICATIONS

[001] This application claims priority of both U.S. Provisional Application Serial No. 60/898,632, filed January 30, 2007 and U.S. Utility Application Serial No. 11/733,764, filed April 11, 2007.

## BACKGROUND

[002] Embodiments of the present invention concern a capacitively coupled plasma source for processing a workpiece such as a semiconductor wafer. A capacitively coupled plasma source comprises a ceiling electrode that is driven at a very high frequency (VHF) frequency over 110 MHz which can produce a high density plasma at a relatively low voltage. A capacitively coupled plasma source can further produce a low electrode potential for low electrode erosion, and permits the ion energy at the wafer surface to be limited to a low level if desired, while operating over a wide range of plasma density (very low to very high plasma ion density). One problem inherent in such a plasma source

is that the ceiling electrode exhibits radial transmission line effects and loading due to the effective dielectric constant of the plasma. For example, at 150 MHz, a free-space quarter wavelength is about 20 inches, which is on the order of the diameter of the ceiling electrode (about 15 inches). Therefore, the RF field varies significantly across the surface of the ceiling electrode, giving rise to process non-uniformities at the wafer surface. For a plasma with an effective dielectric constant greater than 1, the effective wavelength is reduced to less than the ceiling electrode diameter, worsening the non-uniformity of the RF field, making processing non-uniformities across the wafer surface worse. For an etch process, this may produce a non-uniform edge low etch rate distribution across the wafer surface.

[003] Various approaches are employed to reduce such undesirable effects. In one approach, magnetic steering may be employed to alter the plasma ion distribution, e.g., to reduce its center-high non-uniformity to produce a somewhat flatter distribution. One problem with this approach is that a center-high non-uniformity of the source may be beyond the corrective capability of magnetic steering. Another problem with this approach can be electrical charging damage of the workpiece if the magnetic flux density is too high. In another approach, the plasma sheath (or bias) voltage is increased by applying more plasma RF bias power to the wafer. This has the effect of increasing the plasma sheath thickness which in turn typically decreases the capacitance across the ceiling-plasma sheath as well as the capacitance across the wafer-plasma sheath,

thereby forming three capacitors in series, including the ceiling sheath capacitance, the plasma capacitance and the wafer sheath capacitance. The net effect is to reduce the effect of the dielectric constant of the plasma, thereby reducing the non-uniformity of the RF field. The high bias voltage required in some oxide etch plasma process recipes is compatible with this latter approach. However, a high plasma bias voltage is not desirable in some other types of plasma processes. The worst non-uniformities appear in processes employing the lowest plasma bias voltage.

[004] Such approaches are complicated by the fact that other process conditions dictated by the process recipe have as great an effect upon plasma distribution as either magnetic steering or bias (sheath) voltage. For example, increasing chamber pressure produces a less center high and a more center low plasma ion distribution, while decreasing the chamber pressure produces a more center high distribution. Other changes in plasma distribution are caused by source power (plasma density), gas chemistry, electronegativity of the gas mixture, pumping rate, gas flow rate and other parameters dictated by the process recipe.

#### SUMMARY OF THE INVENTION

[005] A method is provided for processing a workpiece in a plasma reactor chamber having electrodes including at least a ceiling electrode and a workpiece support electrode. The method includes coupling respective RF power sources of respective VHF frequencies  $f_1$  and  $f_2$  to either (a) respective ones of the electrodes or (b) a common one of the electrodes, where  $f_1$  is sufficiently high to produce a

center-high non-uniform plasma ion distribution and f2 is sufficiently low to produce a center-low non-uniform plasma ion distribution. The method further includes adjusting a ratio of an RF parameter at the f1 frequency to the RF parameter at the f2 frequency so as to control plasma ion density distribution, the RF parameter being any one of RF power, RF voltage or RF current.

[006] In one embodiment, f1 is greater than about 110 MHz and f2 is less than about 90 MHz. In a related embodiment, the adjusting includes reducing a center-high plasma ion density distribution by decreasing the ratio of the RF parameter at the f1 frequency relative to the RF parameter at the f2 frequency. In another related embodiment, the adjusting includes reducing an edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of the RF parameter at the f2 frequency relative to the RF parameter at the f1 frequency.

[007] In one embodiment, the method further includes providing respective center ground return paths for RF current passing directly between the ceiling electrode and the workpiece support electrode for the frequencies f1 and f2 elements, and providing an edge ground return path for each of the frequencies f1 and f2. In another embodiment, the method further includes adjusting the impedance of the center ground return path corresponding to the frequency f1 so as to increase or decrease the tendency of the RF power at f1 to produce a center-high non-uniformity in plasma ion density distribution.

[008] In a further embodiment, the method includes adjusting the impedance of the center ground return path corresponding

to the frequency  $f_2$  so as to increase or decrease the tendency of the RF power at  $f_2$  to produce a center-low or edge-high non-uniformity in plasma ion density distribution.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[0009] So that the manner in which the above recited embodiments of the invention are attained and can be understood in detail, a more particular description of the invention, briefly summarized above, may be had by reference to the embodiments thereof which are illustrated in the appended drawings. It is to be noted, however, that the appended drawings illustrate only typical embodiments of this invention and are therefore not to be considered limiting of its scope, for the invention may admit to other equally effective embodiments.

[0010] FIG. 1A illustrates a plasma reactor having multiple VHF source power frequencies applied to a ceiling electrode.

[0011] FIG. 1B depicts elements of a variable reactance or bandpass filter controlling the impedance of an RF ground return path in the reactor of FIG. 1A.

[0012] FIG. 2 illustrates a plasma reactor having different VHF frequencies applied to opposing electrodes.

[0013] FIGS. 3A and 3B illustrate a plasma reactor with different VHF frequencies applied to respective concentric electrodes.

[0014] FIG. 4 illustrates a plasma reactor with different VHF frequencies applied to the cathode electrode.

[0015] FIG. 5 illustrates a plasma reactor with two VHF source power frequencies, in which the high VHF source power

frequency is produced using a low VHF frequency generator and a third harmonic resonator.

[0016] FIG. 6 illustrates a plasma reactor with a single VHF variable frequency generator in the low portion (e.g., 50-60 MHz) of the VHF band with a third harmonic resonator to produce a VHF frequency component in the high portion (e.g., over 100 MHz) of the VHF band at a power level determined by varying the generator output frequency.

[0017] FIG. 7 illustrates a process that can be carried out using the reactor of FIG. 1.

[0018] FIG. 8 illustrates a process that can be carried out using the reactor of FIG. 2.

[0019] FIG. 9 illustrates a process that can be carried out using the reactor of FIG. 3A.

[0020] FIG. 10 illustrates a process that can be carried out in the reactor of FIG. 2 by setting the two VHF frequencies f1 and f2 of FIG. 2 equal to one another.

[0021] FIG. 11 illustrates a process that may be carried out using the reactor of FIG. 5.

[0022] FIG. 12 illustrates a process that can be carried out in a modification of the reactor of FIG. 5 in which the locations of the f2 bandpass filter 254 and the f2 generator and match 242, 246 are exchanged.

[0023] FIG. 13 illustrates a process that may be carried out in the reactor of FIG. 6, using only a single lower VHF frequency generator.

[0024] To facilitate understanding, identical reference numerals have been used, where possible, to designate identical elements that are common to the figures. The drawings in the figures are all schematic and not to scale.

## DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

[0025] FIG. 1A is a simplified schematic diagram of a plasma reactor capable of controlling radial distribution of plasma ion density by apportioning capacitively coupled plasma source power among different source power frequencies. The reactor has a vacuum chamber 200 enclosed by a cylindrical side wall 202 and a disk-shaped ceiling 204. The ceiling 204 is both a conductive ceiling electrode as well as a gas distribution showerhead or plate, and will be referred to herein as the ceiling electrode 204. The ceiling electrode may optionally be covered with a conducting, semiconducting or insulating material. The ceiling electrode 204 includes inner and outer zones 206, 208 of gas injection orifices on its bottom surface 204c coupled to respective inner and outer internal gas manifolds 210, 212. Inner and outer zone process gas supplies 214, 216 furnish process gases to the inner and outer manifolds 210, 212. A wafer support pedestal 218 can support a workpiece such as a semiconductor wafer 220. The pedestal 218 may have the features of an electrostatic chuck, including a conductive base layer 222 and an insulating top layer 224 that encloses an internal electrode 226. A vacuum pump 228 is coupled through the floor 230 of the chamber 200. The pedestal 218 is supported on a leg 232 that is coupled to a lift mechanism 234 that can elevate or depress the level of the pedestal 218. In one implementation, the lift mechanism 234 provides a wafer-to-ceiling gap range from about 0.3 inch to about 6 inches. The wafer is clamped onto the pedestal by applying a D.C. clamping voltage from a D.C. supply 236 to

the electrode 226. D.C. supply 236 typically includes a low-pass filter to isolate the DC supply from the RF voltage present on the electrode 226. RF bias power may be coupled directly to the internal electrode 226, or indirectly through the conductive base layer 222. Pedestal 218 typically includes a conductive ground housing 217 that is typically isolated from conductive base layer 222 and internal electrode 226 by an insulating material such as quartz, ceramic or plastic. Alternatively, conductive base layer 218 may be grounded.

**[0026]** The uniformity of the plasma ion radial distribution across the chamber 200 is controlled by providing a pair of VHF plasma source power generators 240, 242. In one aspect, the RF generator 240 has a frequency in the upper portion of the VHF range, on the order of between 110 and 250 MHz, and nominally about 162 MHz, while the other RF generator has a frequency in the lower portion of the VHF range, on the order of about 40-90 MHz, and nominally about 60 MHz. We have discovered that the higher VHF frequency from the generator 240 (if applied alone) tends to produce a plasma ion density radial distribution that is center high and edge low, while the lower VHF frequency from the generator 242 (if applied alone) tends to produce a plasma ion density radial distribution that is center low and edge high. In this respect, the two generators complement one another when used simultaneously. In one embodiment, the output power of one of the generators 240, 242 are adjusted with respect to the one another to change the plasma ion density radial distribution between a center low pattern and a center high pattern. A selection

of the ratio of the RF power (or voltage or current) levels of the two generators 240, 242 is made to minimize the center high and center low non-uniformities and establish a more nearly uniform plasma ion distribution that is approximately free of both types of non-uniformities, and therefore nearly or substantially uniform. Such uniformity may be determined by measuring the radial distribution of etch rate across a wafer or workpiece. The variance of this distribution decreases as uniformity increases. The variance for a more uniform radial distribution of etch rate may be as low as 4% or less, for example.

[0027] In one embodiment, the higher VHF frequency generator 240 is coupled to the ceiling electrode 204 through an impedance match network 244 that may be either fixed or dynamic and may be either formed of lumped or distributed elements. The lower VHF frequency generator 242 is coupled to the ceiling electrode 204 through an impedance match network 246 that is formed of either lumped or distributed elements and may be either fixed or dynamic. The output of the high VHF match 244 is protected from the output of the low VHF generator 242 by a notch filter 248 tuned to block a narrow band centered around the frequency  $f_2$  of the low VHF generator 242, or alternatively by a high-pass filter tuned to block the frequency  $f_2$  of the low VHF generator 242. The output of the low VHF match 246 is protected from the output of the high VHF generator 240 by a notch filter 250 tuned to block a narrow band centered around the frequency  $f_1$  of the high VHF generator 240, or alternatively by a low-pass filter tuned to block the frequency  $f_1$  of the high VHF generator 240. The filter

circuits are designed in accordance with conventional practice in conjunction with the matching networks so as to achieve the desired matching range with the required frequency isolation.

**[0028]** Two RF ground return paths are provided for each of the VHF frequencies  $f_1$ ,  $f_2$ . A path along the side of the chamber 200 is provided by grounding the side wall 202, as indicated in the drawing. VHF current along this path promotes an edge-high center low plasma ion radial distribution, or at least a less center-high plasma ion radial distribution relative to an RF ground return path through the center of the chamber. A path through the center of the chamber 200 is optionally provided by coupling the pedestal electrode 226 (or the base layer 222) to ground through respective tunable (variable) bandpass filters 252, 254 which are controlled independently of one another. The variable bandpass filter 252 has a narrow pass band that includes (or is centered at least approximately on) the frequency  $f_1$  of the higher VHF generator 240. The variable bandpass filter 254 has a narrow pass band that includes (or is centered at least approximately on) the frequency  $f_2$  of the lower VHF generator 242. Both bandpass filters 252, 254 provide respective impedances to ground at their respective bandpass frequencies  $f_1$ ,  $f_2$ . These impedances are varied by a controller 270 to determine the division of RF current from each generator 240, 242 between the pedestal electrode 226 and the side wall 202. The apportionment of this current is controlled by varying the reactance of each bandpass filter 252, 254. Conventional RF filter circuits of capacitive and inductive components may be employed to

implement the variable bandpass filters 252, 254. In accordance with conventional practice, these filters may be implemented as lumped elements of capacitive and inductive components or as distributed elements, such as coaxial tuning elements or stubs. For example, FIG. 1B is a simplified schematic diagram of a variable bandpass filter of the type that can be employed in the reactor of FIG. 1A. The variable bandpass filter of FIG. 1B can include a shunt capacitor 256, an inductor 258 and a load capacitor 260, either or both capacitors 256, 260 being variable. In accordance with one aspect, the filters 252, 254 may not necessarily be bandpass filters or have the frequency response of a bandpass filter. For example, one or both of the filters 252, 254 may be a high pass filter or a low pass filter, or a reactive element whose response can be varied to function as any type of filter. Alternatively, an RF ground return path through the center of the chamber 200 may be provided by grounding the pedestal electrode 226. This may be through a high-pass filter to permit effective isolation of the RF bias.

**[0029]** RF bias power is applied to the ESC electrode 226, including LF power (e.g., about 2 MHz) from a low frequency RF power generator 262 through an LF impedance match 264, and HF power (e.g., about 13.56 MHz) from a high frequency RF power generator 266 through an HF impedance match 268. Typically, the RF bias frequencies are selected such that the LF power level controls the peak ion energy, while the HF power level controls the central width of the ion energy distribution. An RF current ground path may be provided for each of the RF bias sources applied to the ESC electrode 226.

A path through the ceiling 204 is optionally provided by coupling the ceiling through a bandpass or low-pass filter to ground. Furthermore, a variable reactance may be inserted in the path to allow control of the bias return current to the ceiling relative to bias return current to other surfaces, namely current to the wall 202 and ring 219. The insertion reactance or impedance may be increased to force more bias return current to the edge (ring 219 or wall 202), which tends to favor an edge high plasma ion density uniformity condition. Alternatively, the insertion reactance or impedance may be decreased to force less bias return current to the edge (ring 219 or wall 202), which tends to favor a center high plasma ion density uniformity condition.

**[0030]** The two VHF source power generators 240, 242 may be operated in continuous wave (CW) mode or they may be pulsed synchronously or asynchronously with respect to one another. Moreover, either or both of the bias power generators 262, 266 may be operated in CW mode or in a pulsed mode. In the pulsed mode, their duty cycles may be controlled to control the time-averaged RF bias power or voltage (and therefore the ion energy) at the wafer surface. The pulsing of the bias generators 262, 266 may be synchronous or asynchronous with respect to each other and/or with respect to the source power generators 240, 242. In the pulsed mode, any pair of the foregoing generators that are pulsed synchronously to one another may have their RF envelopes coincident in time or offset in time and may be overlapping or non-overlapping.

**[0031]** Uniformity of gas flow across the surface of the wafer 220 and uniformity of the RF field near the wafer edge

can be improved by providing a below-wafer ground return 219 extending radially outwardly from the side of the pedestal 218 at a level that is below the wafer support surface of the pedestal 218. The below-wafer ground return 219 is typically shaped as a cylinder or a flat annular ring that extends toward the side wall 202 to form a gap 203 that partly constricts gas flow from the process region above the wafer into the pumping annulus below the wafer evacuated by the vacuum pump 228. The level of the below-wafer ground return is above features such as the wafer slit valve 229 or pumping port that produces undesirable asymmetries in the plasma distribution arising from asymmetries in gas flow pattern or electrostatic or electromagnetic fields. The narrow gap between the side wall and the outer edge of the below-wafer ground return 219 partially constricts gas flow, such that the region above the wafer 220 is fairly immune to such asymmetries, thereby improving process uniformity. In one implementation, the below-wafer ground plane 219 is formed of a conductive material and is connected to ground. It therefore provides a more uniform ground reference at the wafer edge that renders the electric field more uniform there and less susceptible to asymmetries in the distribution of conductive surfaces in the chamber interior. The ring 219 may also serve as a plasma boundary to help confine the plasma volume to the chamber region above the ring 219. In an alternative implementation, the ring 219 does not serve as a ground plane, and is instead formed of a non-conductive material. In another alternative implementation, the ground return ring (or cylinder) 219 is at the workpiece or wafer level or above workpiece level. It

may be at or near the ceiling level and concentrically surround the ceiling electrode 204. In another embodiment, the level of the ground return ring 219 may be selectively adjusted relative to the workpiece level with a lift mechanism. For example, by attaching the ring 219 to the outside of the pedestal 218, the ring 219 is lifted up and down by the pedestal lift mechanism. The ground return ring 219 may be insulated from other grounded surfaces in the chamber (such as the ESC base layer 224) so as to not be directly coupled to ground, and instead be coupled to ground through a variable reactive element (e.g., the variable filter 252). In this case, the ground return ring 219 serves as the edge ground return path for the VHF frequency f2. The height of this edge ground return path is therefore variable and serves as one of the adjustable parameters of the reactor.

**[0032]** A uniformity controller 270 controls the relative power output levels of the two VHF generators 240, 242 and optionally of the impedances of the variable bandpass filters 252, 254. The controller 270 can set the impedance of the high VHF frequency (f1) bandpass filter so as to provide a lower impedance return path to ground through the wafer 220 than the through the side wall 202 at the higher VHF frequency f1, so that the power from the f1 generator 240 produces a more pronounced center high radial distribution. Furthermore, the controller 270 can set the impedance of the low VHF frequency (f2) bandpass filter so as to provide a higher impedance return path to ground through the wafer 220 than through the side wall 202 at the lower VHF frequency f2, so that power from the f2 generator

242 produces a more pronounced center low and edge high radial distribution. The controller 270 apportions the relative power output levels of the high and low VHF frequency generators 240, 242 to either suppress a center high non-uniformity in etch rate distribution (by increasing the power output of the lower VHF frequency generator 242) or suppress an edge high non-uniformity in etch rate distribution (by increasing the power output of the higher VHF frequency generator 240). The controller 270 may make such adjustments in response to non-uniformity patterns measured on a previously-processed wafer by a downstream or in-line metrology tool 272. During the processing of successive wafers, standard feedback control corrective techniques, implemented as programmed algorithms in the controller 270, may be employed to enact successive corrections by the uniformity controller 270 to minimize non-uniformities in etch rate distribution sensed by the metrology tool 272. The metrology tool 272 may be programmed to inform the controller 270 whether plasma ion density distribution has a predominantly center-high non-uniformity or a predominantly edge-high non-uniformity. Alternatively, the metrology tool 272 may embody in-situ sensors may provide real-time signals to the controller 270. OES (optical emission spectroscopy) sensors may be placed on the ceiling 204 at various radii, providing an indication of radial plasma excited species density. The plasma itself may be used as the light source, or external light sources may be used. Alternatively, interferometry sensors may be placed on the ceiling 204 at various radii, providing an indication of workpiece film thickness rate of change as a function of

radius. Alternatively, ion flux sensors may be placed on the ceiling 204 at various radii, providing an indication of radial plasma ion density. Alternatively, voltage sensors may be placed on the ceiling 204 at various radii, providing an indication of radial electrode voltage. Alternatively, isolated voltage sensors may be placed on the ceiling 204 at various radii, providing an indication of radial plasma floating potential. Real-time control of plasma uniformity may be performed by controller 270 using sensor input and conventional techniques.

**[0033]** The uniformity controller can also control the lift mechanism 234, in order to provide another control dimension for improving uniformity of plasma ion distribution (or uniformity of etch rate distribution). By raising the pedestal 218 toward the ceiling electrode 204, the wafer-to-ceiling gap is decreased, which suppresses plasma ion density near the center of the wafer and promotes plasma ion density near the wafer edge. Conversely, by lowering the pedestal 218 away from the ceiling electrode 204, the wafer-to-ceiling gap is increased, which promotes plasma ion density over the wafer center while detracting from plasma ion density at the wafer edge. Thus, the plasma distribution may be rendered more center-high or more center-low by raising or lowering the pedestal 218, respectively. As discussed above, the plasma distribution may be rendered more center-high or more center-low by increasing or decreasing, respectively, the ratio of the higher VHF frequency power to lower VHF frequency power. Thus, the pedestal height and the VHF power ratio are two different controls that affect the plasma ion distribution.

The uniformity controller 270 can employ both of these controls simultaneously to optimize plasma ion distribution uniformity. For example, an edge-high plasma non-uniformity may be reduced by increasing the output power of the higher VHF frequency generator 240, which may tend to increase a center-high peak in plasma ion distribution. This increase in the center-high peak may be suppressed, without requiring further change in the VHF power apportionment, by raising the pedestal 218 to decrease the wafer-ceiling gap until an optimum plasma distribution is realized. This may be useful for process recipes calling for a low RF bias and a low chamber pressure, in which case the center-high peak in plasma ion distribution is particularly pronounced. The control of both VHF frequency apportionment together with control of the wafer-ceiling gap extends the range of non-uniformity that the controller 270 is capable of counteracting. For a severe center-high nonuniformity, for example, the controller 270 may call for both an increase in the higher-versus-lower VHF frequency power apportionment as well as a narrower wafer-ceiling gap.

[0034] The variable wafer-to-ceiling gap affects where a particular VHF frequency (e.g., f1 or f2) has a peak in non-uniform plasma ion density distribution. Therefore, the controller 270 can set the gap to optimize the choice of f1 to produce a predominantly center-high non-uniform plasma ion density distribution and the choice of f2 to produce a predominantly edge-high non-uniform plasma ion density distribution. For example, the controller 270 sets the wafer-ceiling gap to optimize the choice of f1 and f2 to produce the different non-uniformity patterns, and the

controller 270 varies the ratio of RF power (or current or voltage) at the different frequencies f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub> to control the plasma ion distribution and reduce its non-uniformities.

[0035] The controller 270 may respond to an indication from the metrology tool 272 of a predominantly center-high or edge-high non-uniformity in plasma ion density distribution by measuring and controlling (changing) any one of the following so as to tend to reduce that non-uniformity: (a) the ratio of RF voltages at the frequencies f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>; (b) the ratio of RF currents at the frequencies f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>; or (c) the ratio of RF power at the frequencies f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>. Such measurements may be made at the respective electrodes, for example, or another suitable location.

[0036] In one alternate mode, the controller 270 varies plasma ion density distribution without necessarily changing the apportionment of power among the higher (f<sub>1</sub>) and lower (f<sub>2</sub>) VHF generators 240, 242. Instead, plasma ion density distribution is changed by the controller 270 by varying the impedances to the center ground return paths presented by the f<sub>1</sub> and f<sub>2</sub> variable bandpass filters 252, 254. For example, the tendency of the higher frequency (f<sub>1</sub>) VHF power to create a center peak or suppress an edge peak in plasma density distribution may be increased or decreased by changing the impedance presented to the f<sub>1</sub> power by the variable bandpass filter 252. Likewise, the tendency of the lower frequency (f<sub>2</sub>) VHF power to create an edge peak or suppress a center peak in plasma ion density distribution may be increased or decreased by changing the impedance presented to the f<sub>2</sub> power by the variable bandpass filter 254. Such changes affect the apportionment of VHF current

at each of the frequencies f1, f2 between the center ground return path (ceiling-to-wafer) and the side ground return path (through the side wall 202). By directing more of the f1 power to the center ground return path, the tendency of the higher VHF frequency (f1) power to create a center-high distribution is increased. By directing more of the f2 power to the side ground return path, the tendency of the lower VHF frequency (f2) power to create an edge-high distribution is increased. In some cases, the controller may change the ground return path apportionment for only one of the two frequencies f1, f2.

**[0037]** In a further alternate mode of the reactor of FIG. 1, only one of the VHF generators (e.g., only the generator 240) provides RF power, the other generator (e.g., the generator 242) not being used or else being eliminated. The uniformity controller 270 changes the plasma ion radial distribution by varying the f1 bandpass filter 252 so as to control the impedance of the ground return path through the ESC electrode 226. This apportions the ground return currents between the center path through the ESC electrode 226 and the side path through the side wall 202. As a result, this feature of the controller 270 varies the center-high and center-low non-uniformities in plasma ion distribution (or equivalently in etch rate distribution) to optimize uniformity.

**[0038]** While only two VHF generators 240, 242 are illustrated in FIG. 1A, more VHF generators may be employed of different frequencies. For example, a third VHF generator may be employed having a frequency higher than either of the two VHF generators 240, 242. As described

above, the high VHF frequency generator (e.g., 162 MHz) produces a center peak in plasma ion distribution while the lower frequency generator 242 (60 MHz) produces an edge peak. Uniformity may be improved by introducing a third VHF generator having an even higher frequency that produces peaks between the center and edge that fill in the minima in the plasma ion density radial distribution.

**[0039]** The reactor of FIG. 1A may be used to reproduce plasma process conditions characteristic of a very low density bias-only plasma conventionally produced with a single HF (13.56 MHz) frequency source to both generate plasma ions and control the bias voltage on the wafer. This simulation may be realized by applying only an LF (e.g., 2 MHz) bias power from the generator 264, and setting the output power of each of the two VHF generators 240, 242 to a very low level (e.g., 10 Watts) to establish the low plasma ion density desired. The advantage of this is that the two generators 240, 242 may be adjusted with very fine changes in output power to maintain plasma uniformity over a far wider range of changing process conditions than would be achievable with a single HF (13.56 MHz) frequency source.

**[0040]** FIG. 2 depicts a modification of the reactor of FIG. 1A, in which the lower VHF frequency (f2) generator 242 and its match 246 and notch filter 250 are coupled to the ESC electrode 226 rather than the ceiling electrode 204. In this case, the f2 ground return path is through the ceiling electrode 204. Therefore, the f2 variable bandpass filter 254 is coupled to the ceiling electrode 204 rather than the ESC electrode 226. A notch filter 255 tuned to block RF current from the higher VHF frequency (f1) generator 240 may

be connected to the f2 bandpass filter 254. Likewise, a notch filter 253 tuned to block RF current from the lower VHF frequency (f2) generator 242 may be connected to the f1 bandpass filter 252.

[0041] In one alternative mode of the reactor of FIG. 2, the VHF frequencies f1 and f2 applied to the top (ceiling electrode 204) and bottom (ESC electrode 226) respectively are the same frequency ( $f_1 = f_2$ ). In this case, the controller 270 varies radial distribution of ion density (or etch rate) by varying the phase between the voltages (or currents) at the ceiling electrode 204 and the ESC electrode 226. The phase between the currents at the ceiling electrode 204 and the ESC electrode 226 may be controlled, for example, by varying the reactance of the bandpass filters 252, 254. Alternatively, the phase may be controlled at one or both generators 240, 242. For example, if the reactances of the bandpass filters 252, 254 are the same (and if there are no other differences), then the phase angle between the RF currents at the ceiling and ESC electrodes 204, 226 is zero. At a phase of 180 degrees, essentially all of the current flows between the ceiling electrode 204 and the ESC electrode 226, generating a center-high distribution of plasma ion density or etch rate. At a phase of zero degrees, essentially all of the current flows from either the ceiling electrode 204 or the ESC electrode 226 to the side wall 202, generating a center-low edge-high distribution. Therefore, the controller 270 can vary the phase angle between 0 and 180 degrees to attain a wide range of results.

**[0042]** In another alternate mode of the reactor of FIG. 2, only one of the VHF generators (i.e., only the f2 generator 242) provides RF power, the other generator 240 not being used or else being eliminated. The uniformity controller 270 changes the plasma ion radial distribution by varying the f2 bandpass filter 254 so as to control the impedance of the ground return path through the ceiling electrode 204, so that it increases or decreases relative to the (fixed) impedance of the ground return path through the side wall 202. This apportions the ground return current between the center path through the ceiling electrode 204 and the side path through the side wall 202. As a result, this feature of the controller 270 varies the center-high and center-low non-uniformities in plasma ion distribution (or equivalently in etch rate distribution) to optimize uniformity.

**[0043]** In yet another alternate mode of the reactor of FIG. 2, only one of the VHF generators (i.e., only the f1 generator 240) provides RF power, the other generator 242 not being used or else being eliminated. The uniformity controller 270 changes the plasma ion radial distribution by varying the f2 bandpass filter 252 so as to control the impedance of the ground return path through the ESC electrode 226, so that it increases or decreases relative to the (fixed) impedance of the ground return path through the side wall 202. This apportions the ground return current between the center path through the ESC electrode 226 and the side path through the side wall 202. As a result, this feature of the controller 270 varies the center-high and center-low non-uniformities in plasma ion distribution (or

equivalently in etch rate distribution) to optimize uniformity.

**[0044]** FIGS. 3A and 3B depict a modification of the reactor of FIG. 1 in which the ceiling electrode 204 is divided into radially inner and outer sections 204a, 204b that are electrically isolated from one another, and separately driven by respective ones of the generators 240, 242. While either generator may be selected to drive the inner electrode 204a leaving the other to drive the outer electrode 204b, it is preferred that the higher VHF frequency generator 240 be coupled to the inner electrode 204a and the lower VHF frequency generator 242 be coupled to the outer electrode 204b, in order to enhance the tendency of the higher frequency to develop a center-high ion distribution and enhance the tendency of the lower frequency to develop a center-low ion distribution.

**[0045]** FIG. 4 depicts a modification of the reactor of FIG. 1 in which both the VHF generators 240, 242 drive the ESC electrode 226 while the ground return bandpass filters 252, 254 are coupled to the ceiling electrode 204.

**[0046]** FIG. 5 depicts a modification of the reactor of FIG. 2, in which the two frequencies f1 and f2 are both in the lower portion of the VHF band. For example, f1 and f2 may be 54 MHz and 60 MHz, respectively. This represents a significant cost savings by eliminating the need for a high VHF frequency generator having an output frequency near 200 MHz or over 150 MHz. In the reactor of FIG. 5, the missing high VHF frequency (e.g., 162 MHz), that provides the center-high response, is produced with a high VHF frequency (e.g., 162 MHz) resonator 274 coupled to the ceiling

electrode 204 (or alternatively to the output of the  $f_1$  generator 240). Preferably, the resonator 274 is tuned to resonate at an odd harmonic of  $f_1$ , such as the third harmonic. For example, if  $f_1 = 54$  MHz, then the third harmonic generated in the resonator 274 would be 162 MHz. Production of the higher harmonic is facilitated by the non-linear response of the plasma in the reactor chamber that functions as a frequency multiplier in cooperation with the resonator 274. The variable bandpass filter 252 is tuned to the third harmonic of  $f_1$  so that some of the RF power at  $f_1$  from the generator 240 is converted to the third harmonic of  $f_1$ .

**[0047]** In another alternate mode of the reactor of FIG. 5, only one of the VHF generators (i.e., only the generator 240) provides RF power, the other generator 242 not being used or else being eliminated. The uniformity controller 270 changes the plasma ion radial distribution by varying the  $f_1$  bandpass filter 252 so as to control the impedance of the ground return path through the ceiling electrode 204, so that it increases or decreases relative to the (fixed) impedance of the ground return path through the side wall 202. This apportions the ground return currents between the center path through the ceiling electrode 204 and the side path through the side wall 202. As a result, this feature of the controller 270 varies the center-high and center-low non-uniformities in plasma ion distribution (or equivalently in etch rate distribution) to optimize uniformity.

**[0048]** FIG. 6 depicts a modification of the reactor employing simultaneous high and low VHF frequencies but employing only a single low VHF frequency generator to

achieve a great cost savings. The low VHF generator 240 is a variable frequency oscillator (VFO) whose frequency is varied by the controller 270 between a fundamental frequency  $f$  and  $f \pm \Delta f$ , where  $\Delta f$  is a small deviation from  $f$ . The resonator 274 is tuned to the third harmonic,  $F = 3 \cdot f$ , of the fundamental frequency  $f$ . By changing the frequency of the generator 240, the proportion of the output power of the generator that is converted to the third harmonic  $F$  is increased or decreased in inverse proportion to the difference between the generator output frequency  $f \pm \Delta f$  and the fundamental frequency  $f$  whose third harmonic is the resonant frequency of the resonator 274. The result is that both frequencies, i.e., the generator output frequency  $f \pm \Delta f$  and the harmonic frequency  $F$ , are coupled to the plasma, and their relative power levels are controlled by varying the output frequency of the generator 240. By decreasing the difference between the generator output frequency and the fundamental frequency  $f$ , the power coupled to the plasma at the third harmonic increases while the power at the fundamental,  $f$ , decreases, thereby increasing the center-high non-uniformity or decreasing the edge-high non-uniformity. Conversely, by increasing the difference between the generator output frequency and the fundamental frequency  $f$ , the power coupled to the plasma at the third harmonic decreases while the power at the fundamental,  $f$ , increases, thereby increasing the edge-high non-uniformity or decreasing the center-high non-uniformity. Therefore, plasma uniformity is regulated by the controller 270 by varying the frequency of the VFO or generator 240. The two variable bandpass filters 252, 254 have passbands centered

at, respectively, the fundamental, f, and the third harmonic, F.

**[0049]** In one aspect, the interior chamber elements are formed of a metal such as aluminum. In order to prevent or minimize metal contamination during plasma processing, the surfaces of the metal chamber elements that can be exposed to plasma, such as the interior surface of the side wall 202 and the exposed surfaces of the pedestal 218, are coated with a film of a process-compatible material, such as yttria, for example. The film may be a plasma-spray-coated yttria. Alternatively, bulk ceramic material such as yttria may be bonded to underlying metal interior chamber elements. For example, the ceiling 204 may have a bonded ceramic plate on the side exposed to plasma. The sidewall 202 may include a bonded ceramic cylinder on the side exposed to plasma, or the ring 219 may include a bonded ceramic ring on the side exposed to plasma. Ceramic materials may be doped or otherwise fabricated such that their electrical resistivity is in the semiconducting range (e.g., resistivity in the range  $10^8$  to  $10^{12}$  ohm\*cm) to provide a DC current return path for the ESC clamping voltage applied to the ESC electrode 226. These chamber surfaces may be heated in order to minimize undesired deposition or accumulation of materials such as polymers, for example, or cooled to minimize or eliminate etching, or temperature controlled employing both heating and cooling. The interior surfaces of the chamber may be cleaned in a plasma etch process by employing an appropriate chemistry. For example, in a dry cleaning step, oxygen or oxygen-containing, or chlorine or chlorine-containing gas may be introduced into the chamber

and a plasma may be generated using the VHF source power generators 240, 242 and/or the bias power generators 262, 266.

[0050] FIG. 7 illustrates a process that can be carried out using the reactor of FIG. 1. In block 300 of FIG. 7, RF plasma source power is capacitively coupled through an electrode (ceiling or wafer) at two different VHF frequencies f1 and f2 simultaneously, where f1 is in the higher range of the VHF band (e.g., 162 MHz) and f2 is in the lower region of the VHF band (e.g., 50-60 MHz). In block 302, an individual center ground return path is provided through a counter electrode (wafer or ceiling) for each of the frequencies f1 and f2, by providing the bandpass filters 252, 254 to ground as shown in FIG. 1. In block 304 of FIG. 7, an edge return path is provided through the side wall for each of the frequencies f1 and f2 by grounding the side wall 202 as shown in FIG. 1. In block 306, the impedance of the f1 center return path is adjusted relative to the impedance of the f1 edge return path to promote current flow at the f1 frequency to the center return path, by adjusting the bandpass filter 252. In block 308, the impedance of the f2 edge return path is adjusted relative to the impedance of the f2 center return path to promote current flow at the f2 frequency to the side wall, by adjusting the bandpass filter 254. In block 310, the uniformity controller 270 improves the uniformity of the radial plasma ion density distribution by selecting a ratio of VHF power at the f1 frequency to VHF power at the f2 frequency. The step of block 310 may be carried out to reduce a center-high plasma ion density distribution by

decreasing the ratio of VHF power at the f1 frequency relative to VHF power at the f2 frequency (block 312). Or, the step of block 310 may be carried out to reduce an edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of VHF power at the f2 frequency relative to VHF power at the f1 frequency (block 314). As another way of affecting or improving ion density distribution, the controller 270 may adjust the impedances of the center and edge return paths of either or both f1 and f2 (by adjusting the respective bandpass filters 252, 254) to either: (a) channel more current toward the edge in order to suppress a center-high non-uniformity or (b) channel more current toward the center to suppress an edge-high non-uniformity (block 316).

**[0051]** In this description, uniformity may be referred to with respect to radial plasma ion density distribution. It is understood that such a distribution is inferred from or is equivalent to etch rate radial distribution that can be measured across the surface of a wafer that has been processed by a plasma etch process in the reactor.

**[0052]** FIG. 8 illustrates a process that can be carried out using the reactor of FIG. 2. In the step of block 318 of FIG. 8, RF plasma source power is capacitively coupled through one electrode (ceiling or wafer) at an upper VHF frequency f1 (e.g., about 162 MHz) while RF plasma source power is capacitively coupled through the counterelectrode (wafer or ceiling) at a lower VHF frequency f2 (e.g., about 50-60 MHz). In block 320, a center return path is provided through the counterelectrode for the frequency f1. In block 322, a center return path is provided through the electrode

for the frequency f2. In the step of block 324, an edge return path through the side wall for each of the frequencies f1 and f2. In the step of block 326, the impedance of the f1 center return path is adjusted relative to the impedance of the f1 edge return path to promote current flow at the f1 frequency to the center return path, by adjusting the variable bandpass filter 252. In the step of block 328, the impedance of the f2 side return path is adjusted relative to the impedance of the f2 center return path to promote current flow at the f2 frequency to the side wall, by adjusting the variable bandpass filter 254. In the step of block 330, the controller 270 improves the uniformity of the radial plasma ion density distribution by selecting a ratio of VHF power at the f1 frequency to VHF power at the f2 frequency. This step may be carried out to reduce center-high plasma ion density distribution by decreasing the ratio of VHF power at the f1 frequency relative to VHF power at the f2 frequency (block 332). This step may be carried out to reduce edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of VHF power at the f2 frequency relative to VHF power at the f1 frequency (block 334). Alternatively or in addition to the step of block 330, the controller 270 may improve uniformity by adjusting the impedances of the center and edge return paths of either or both f1 and f2 (by adjusting the respective bandpass filters 252, 254) to either: (a) channel more current toward the edge in order to suppress a center-high non-uniformity or (b) channel more current toward the center to suppress an edge-high non-uniformity (block 336 of FIG. 8).

[0053] FIG. 9 illustrates a process that can be carried out using the reactor of FIG. 3A. In the process of FIG. 9, RF plasma source power through an inner ceiling electrode at an upper VHF frequency f1 RF plasma source power is capacitively coupled through an outer ceiling electrode at lower VHF frequency f2 (block 338 of FIG. 9). In block 340, a center return path is provided through the wafer for the frequency f1 by providing the bandpass filter 252 coupled to ground. In block 342, a center return path through the wafer is provided for the frequency f2 by providing the bandpass filter 254 coupled to ground. In block 344 of FIG. 9, an edge return path through the side wall 202 for each of the frequencies f1 and f2 by grounding the side wall 202, as shown in FIG. 3A. In the step of block 346, the impedance of the f1 center return path is adjusted relative to the impedance of the f1 edge return path to promote current flow at the f1 frequency to the center return path, by adjusting the reactance of the bandpass filter 252. In the step of block 348, the impedance of the f2 edge return path is adjusted relative to the impedance of the f2 center return path to promote larger current flow at the f2 frequency to the side wall, by adjusting the reactance of the bandpass filter 254. In block 350, the controller 270 improves the uniformity of the radial plasma ion density distribution (or of etch rate distribution on the wafer) by selecting a ratio of VHF power at the f1 frequency to VHF power at the f2 frequency. This step may be carried out to reduce a center-high plasma ion density distribution by decreasing the ratio of VHF power at the f1 frequency relative to VHF power at the f2 frequency (block 352). Or, this step may be carried

out to reduce edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of VHF power at the f2 frequency relative to VHF power at the f1 frequency (block 354). Alternatively, or in addition to the step of block 350, the controller 270 may improve uniformity of plasma ion density distribution (or etch rate distribution on the wafer) by adjusting the impedances of the center and edge return paths of either or both f1 and f2 to either: (a) channel more current toward the edge in order to suppress a center-high non-uniformity or (b) channel more current toward the center to suppress an edge-high non-uniformity (block 356 of FIG. 9).

**[0054]** FIG. 10 illustrates a process that can be carried out in the reactor of FIG. 2 by setting the two VHF frequencies f1 and f2 of FIG. 2 equal to one another (or at least nearly equal to one another). The bandpass filters 252, 254 are used in this case as variable reactances that can control or vary the phase between the VHF voltages (or currents) at the ceiling and wafer. In the step of block 358 of FIG. 10, RF plasma source power is capacitively coupled through one electrode (ceiling or wafer) at a VHF frequency while capacitively coupling RF plasma source power through the counterelectrode (wafer or ceiling) at the same VHF frequency. In block 360, a control element such as a variable reactance (e.g., the variable bandpass filter 252) is provided at the counterelectrode 226 of FIG. 2 for controlling phase. In block 362, a control element such as a variable reactance (e.g., the variable bandpass filter 254) is provided at the electrode 204 for controlling phase. In the step of block 364, an edge return path is provided by

grounding the side wall 202. In the step of block 366, the controller 270 improves the uniformity of the radial plasma ion density distribution by controlling the phase difference between the VHF currents at the electrode and the counterelectrode. This step may be carried out to reduce a center-high plasma ion density distribution by moving the phase difference toward 180 degrees (block 367 of FIG. 10). Or, the step of block 368 may be carried out to reduce an edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by moving the phase difference towards 0 degrees.

**[0055]** FIG. 11 illustrates a process that may be carried out using the reactor of FIG. 5. In block 370 of FIG. 11, RF plasma source power at two similar VHF frequencies  $f_1$  and  $f_2$ , both in the lower region of the VHF band, to an electrode (204 of FIG. 5) and to a counterelectrode (226 of FIG. 5), respectively. This represents a significant cost savings by eliminating the cost of a high VHF frequency (e.g., 160-200 MHz) generator. In block 372 of FIG. 11, the electrode 204 is coupled to a resonator (274 of FIG. 5) having a resonant frequency which is an odd (e.g., third) harmonic of  $f_1$ , and lies in the higher region of the VHF band, so as to produce VHF power at the odd (e.g., third) harmonic (e.g., 162 MHz). In block 374, an individual center return path is provided through the counter electrode (266 of FIG. 5) for the third harmonic of  $f_1$ , for example by providing the bandpass filter 252. In block 376, an individual center return path is provided through the electrode 204 for the VHF frequency  $f_2$ , for example by providing the bandpass filter 254. In block 378, an edge return path is provided through the side wall for  $f_2$  and for

the odd harmonic of f1, by grounding the side wall (202 of FIG. 5). In the step of block 380, the controller 270 adjusts the impedance of the f1 harmonic center return path relative to the impedance of the f1 harmonic edge return path to promote current flow at the f1 harmonic to the center return path, by adjusting the reactance of the bandpass filter 252. In the step of block 382, the controller 270 adjusts the impedance of the f2 edge return path relative to the impedance of the f2 center return path to promote current flow at the f2 frequency to the side wall, by adjusting the reactance of the bandpass filter 254. The controller 270 improves the uniformity of the radial plasma ion density distribution by selecting a ratio of VHF power between the f1 and f2 generators to control the ratio between the f1 harmonic power and f2 power coupled to the plasma (block 384). This step may be carried out to reduce a center-high plasma ion density distribution by decreasing the ratio of VHF power generated at the f1 frequency relative to VHF power at the f2 frequency (block 386). Or, this step may be carried out to reduce edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of VHF power at the f2 frequency relative to VHF power generated at the f1 frequency (block 388 of FIG. 11). Alternatively or in addition to the step of block 384, the controller 270 may improve uniformity of plasma ion density distribution by adjusting the impedances of the center and edge return paths of either or both f2 and the harmonic of f1 to either: (a) channel more current toward the edge in order to suppress a center-high non-uniformity or (b)

channel more current toward the center to suppress an edge-high non-uniformity (block 390).

[0056] FIG. 12 illustrates a process that can be carried out in a modification of the reactor of FIG. 5 in which the locations of the f2 bandpass filter 254 and the f2 generator and match 242, 246 are exchanged, so that both frequencies f1, f2 drive the ceiling electrode 204. At block 392, RF plasma source power at two similar lower VHF frequencies f1 and f2 simultaneously to an electrode (e.g., the ceiling electrode 204 of FIG. 5). At block 394, a resonator (274 of FIG. 5) is coupled to the electrode 204, the resonator having a resonant frequency which is an odd harmonic of f1, so as to produce VHF power at the odd harmonic. This frequency up-conversion is facilitated by the non-linear response of the plasma that provides a frequency-multiplying effect. In block 396 of FIG. 12, an individual center return path is provided through a counter electrode (226 of FIG. 5) for the harmonic of f1, by providing the bandpass filter 252 coupled to ground. In block 398 of FIG. 12, an individual center ground return path is provided through the counterelectrode for the VHF frequency f2 by providing the bandpass filter 254 of FIG. 5 coupled to ground. In block 400, edge return paths are provided through the side wall for f2 and the harmonic of f1, by grounding the side wall 202 of FIG. 5. In block 402, the controller 270 adjusts the impedance of the f1 harmonic center return path relative to the impedance of the f1 harmonic edge return path to promote current flow at the f1 harmonic through the center return path, by adjusting the bandpass filter 252 of FIG. 5. In block 404 of FIG. 12, the controller 270 adjusts the impedance of the

f2 edge return path relative to the impedance of the f2 center return path to promote current flow at the f2 frequency to the side wall, by adjusting the reactance of the bandpass filter 254 of FIG. 5. In block 406, the controller 270 improve the uniformity of the radial plasma ion density distribution by selecting a ratio of VHF power between the f1 and f2 generators to control the ratio between the f1 harmonic power and f2 power coupled to the plasma. This step may be carried out to reduce center-high plasma ion density distribution by decreasing the ratio of VHF power at the f1 harmonic relative to VHF power at the f2 frequency (block 408). Or, this step may be carried out to reduce edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of VHF power at the f2 frequency relative to VHF power at the f1 harmonic (block 410). Alternatively or in addition to the process at block 408, the controller 270 may improve uniformity by adjusting the impedances of the center and edge return paths of either or both the f1 harmonic and f2, to either: (a) channel more current toward the edge in order to suppress a center-high non-uniformity or (b) channel more current toward the center to suppress an edge-high non-uniformity (block 412 of FIG. 12).

**[0057]** FIG. 13 illustrates a process that may be carried out in the reactor of FIG. 6, using only a single lower VHF frequency generator (between about 50-60 MHz) to realize the functionality that requires two generators in the reactors described previously herein. In block 414 of FIG. 13, RF plasma source power is capacitively coupled through an electrode (e.g., the ceiling electrode 204 of FIG. 6) from a

variable frequency VHF generator 240 having a frequency range that includes a fundamental lower VHF frequency  $f$ . In block 416, a resonator 274 is coupled to the electrode 204, the resonator having a resonant frequency  $F$  which is an odd harmonic of the fundamental frequency  $f$ , so as to produce VHF power at the odd harmonic, using the plasma in the chamber as a non-linear mixing element. In block 418, an individual center return path is provided through a counterelectrode (e.g., the ESC electrode 226 of FIG. 6) for the harmonic frequency  $F$ , by providing the bandpass filter 252 coupled to ground. In block 420, an individual center return path is provided through the counterelectrode (226 of FIG. 6) for the fundamental VHF frequency  $f$ , by providing the bandpass filter 254 coupled to ground. In block 422 of FIG. 12, edge return paths through the side wall for both frequencies  $f$  and  $F$  by grounding the side wall 202 of FIG. 6. In block 424 of FIG. 12, the controller 270 adjusts the impedance of the  $F$  center return path relative to the impedance of the  $F$  edge return path to promote current flow at  $F$  to the center return path, by adjusting the variable bandpass filter 252. In block 426, the controller 270 adjusts the impedance of the  $f$  edge return path relative to the impedance of the  $f$  center return path to promote current flow at the  $f$  frequency to the side wall, by adjusting the variable bandpass filter 254. In block 428, the controller 270 improve plasma ion density distribution uniformity, by controlling the ratio of VHF power at (or near) the fundamental  $f$  to VHF power at harmonic  $F$ . This is accomplished by controlling the proportion of power up-converted from  $f$  to  $F$ . This proportion is controlled by

controlling the difference between the variable output frequency of the VHF generator and the fundamental frequency  $f$ . As the generator output frequency approaches closer to the fundamental, the proportion of VHF power produced by the variable frequency generator 240 converted to the (third) harmonic  $F$  increases, for example. The maximum ratio VHF power at  $F$  to VHF power at  $f$  is attained when the generator frequency equals the fundamental  $f$ . The step of block 428 may be carried out in order to reduce a center-high plasma ion density distribution by decreasing the ratio of VHF power at  $F$  relative to VHF power at  $f$  (block 430 of FIG. 13). Or, the step of block 428 may be carried out to reduce an edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of VHF power at the  $f$  frequency relative to VHF power at  $F$  (block 432 of FIG. 13). Alternatively or in addition to the step of block 428, the controller 270 may improve uniformity by adjusting the impedances of the center and edge return paths of either or both  $F$  and  $f$  to either: (a) channel more current toward the edge in order to suppress a center-high non-uniformity or (b) channel more current toward the center to suppress an edge-high non-uniformity, by adjusting the respective bandpass filters 252, 254.

**[0058]** The use of an electrostatic chuck 218 facilitates high rates of heat transfer to or from the wafer 220, even at very low ( $mT$ ) chamber pressures where heat transfer is poor without an electrostatic chuck. This feature enables the vacuum pump 228 to be a very powerful turbo pump to run chamber recipes calling for extremely low chamber pressures. These features, in combination with the VHF power sources

240, 242 that can produce very low to very high plasma ion densities (e.g.,  $10^9$  to  $10^{11}$  ions/cc), provide a novel capability of low chamber pressure (in the mT range), high plasma ion density (in the  $10^{10}$  to  $10^{11}$  ion/cc range) at high bias or high heat load while maintaining complete control of wafer temperature and plasma ion density distribution uniformity. These features, which are contained in the reactors of FIGS. 1-6, fulfill the needs of certain processes such as dielectric etch plasma processes and plasma immersion ion implantation processes that impose high heat load while requiring low chamber pressure and high plasma ion density. However, these reactors are capable of performing across a wide range of chamber pressure (mT to Torr), a wide range of wafer heat load and a wide range of plasma ion density (e.g.,  $10^9$  to  $10^{11}$  ions/cc). Therefore, the reactors of FIGS. 1-6 may also be employed in carrying out other processes at either high or low chamber pressure and at either high or low plasma ion density, such as plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD), plasma enhanced physical vapor deposition (PEPVD), plasma doping and plasma enhanced materials modification.

**[0059]** While the foregoing is directed to embodiments of the invention, other and further embodiments of the invention may be devised without departing from the basic scope thereof, and the scope thereof is determined by the claims that follow.

**CLAIMS:**

1. A method of processing a workpiece in a plasma reactor chamber having electrodes including at least a ceiling electrode and a workpiece support electrode, said method comprising:

coupling respective RF power sources of respective VHF frequencies  $f_1$  and  $f_2$  to one of: (a) respective ones of the electrodes, and (b) a common one of the electrodes, where  $f_1$  is sufficiently high to produce a center-high non-uniform plasma ion distribution and  $f_2$  is sufficiently low to produce a center-low non-uniform plasma ion distribution;

adjusting a ratio of an RF parameter at the  $f_1$  frequency to the RF parameter at the  $f_2$  frequency so as to control plasma ion density distribution, said RF parameter being one of: (a) RF power, (b) RF voltage, and (c) RF current.

2. The method of Claim 1 wherein  $f_1$  is greater than about 110 MHz and  $f_2$  is less than about 90 MHz.

3. The method of Claim 1 wherein said adjusting comprises:

reducing a center-high plasma ion density distribution by decreasing the ratio of the RF parameter at the  $f_1$  frequency relative to the RF parameter at the  $f_2$  frequency.

4. The method of Claim 1 wherein said adjusting comprises:

reducing an edge-high plasma ion density distribution nonuniformity by decreasing the ratio of the RF parameter at the f2 frequency relative to the RF parameter at the f1 frequency.

5. The method of Claim 1 further comprising:  
providing respective center ground return paths for RF current passing directly between the ceiling electrode and the workpiece support electrode for the frequencies f1 and f2 elements;  
providing an edge ground return path for each of the frequencies f1 and f2.

6. The method of Claim 5 further comprising:  
adjusting the impedance of the center ground return path corresponding to the frequency f1 so as to increase or decrease the tendency of the RF power at f1 to produce a center-high non-uniformity in plasma ion density distribution.

7. The method of Claim 5 further comprising:  
adjusting the impedance of the center ground return path corresponding to the frequency f2 so as to increase or decrease the tendency of the RF power at f2 to produce a center-low or edge-high non-uniformity in plasma ion density distribution.

8. The method of Claim 5 further comprising:

adjusting the impedance of at least one of the center ground return paths so as to control plasma ion density distribution.

9. The method of Claim 8 wherein said adjusting the impedance is performed so as to increase the current in the edge ground return path to suppress a center-high non-uniformity.

10. The method of Claim 8 wherein said adjusting the impedance is performed so as to increase the current in the center ground return path to suppress an edge-high non-uniformity.

11. The method of Claim 1 wherein:

    said coupling comprises coupling the RF power source of the frequency f1 to the ceiling electrode of the chamber while coupling the RF power source of the frequency f2 to the workpiece support electrode.

12. The method of Claim 1 wherein:

    said coupling comprises coupling the RF power source of the frequency f1 and the RF power source of the frequency f2 to the ceiling electrode.

13. The method of Claim 1 wherein said coupling comprises coupling the RF power source of the frequency f1 to a first ceiling electrode and coupling the RF power source of the frequency f2 to a second ceiling electrode that is concentric with the first ceiling electrode.

14. The method of Claim 1 wherein said coupling comprises:

generating the RF power of frequency  $f_1$  from a fundamental frequency  $f_0$  for which  $f_1$  is an harmonic using a resonator tuned to  $f_1$  and using the plasma in the chamber as a non-linear mixer.

15. The method of Claim 1 further comprising:  
adjusting the plasma ion density distribution by  
adjusting a gap between the workpiece and the ceiling electrode.

**ABSTRACT OF THE DISCLOSURE****1 Abstract**

A method is provided for processing a workpiece in a plasma reactor chamber having electrodes including at least a ceiling electrode and a workpiece support electrode. The method includes coupling respective RF power sources of respective VHF frequencies  $f_1$  and  $f_2$  to either (a) respective ones of the electrodes or (b) a common one of the electrodes, where  $f_1$  is sufficiently high to produce a center-high non-uniform plasma ion distribution and  $f_2$  is sufficiently low to produce a center-low non-uniform plasma ion distribution. The method further includes adjusting a ratio of an RF parameter at the  $f_1$  frequency to the RF parameter at the  $f_2$  frequency so as to control plasma ion density distribution, the RF parameter being any one of RF power, RF voltage or RF current.

**1 Representative Drawing****Fig. 1A**

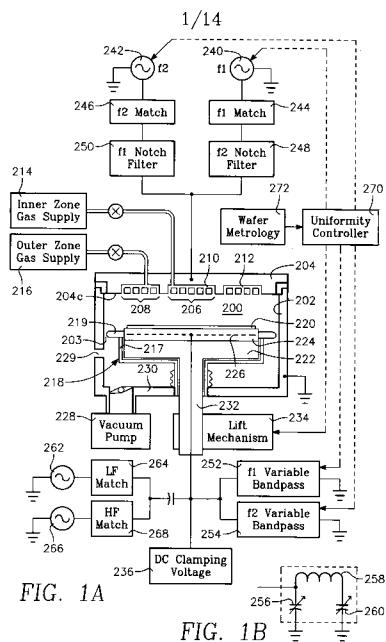
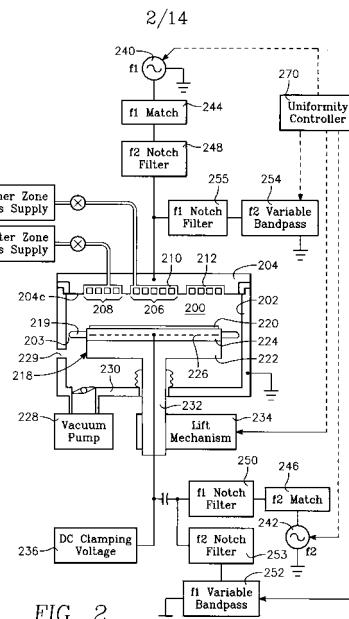
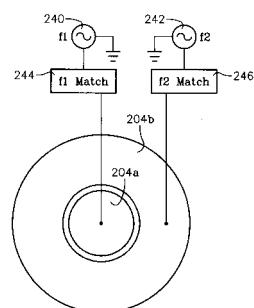
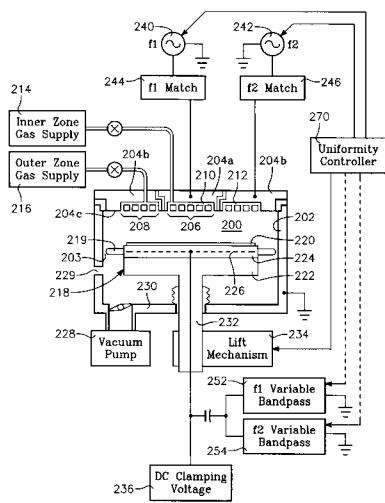


FIG. 1B

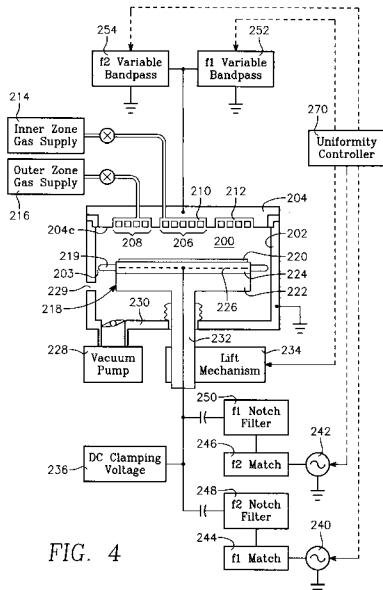


3/14

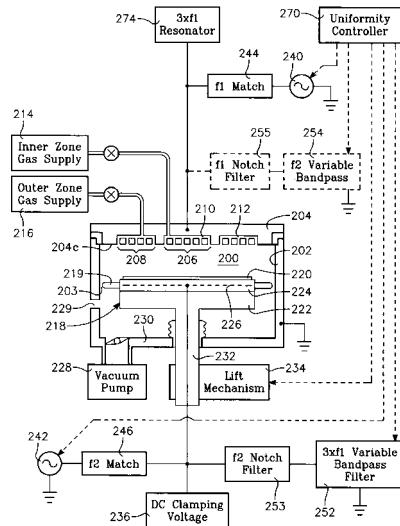
4/14



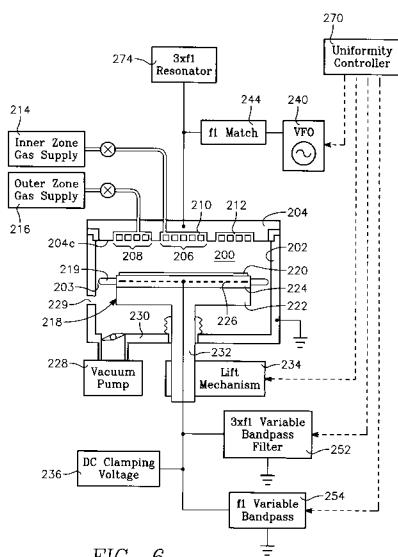
5/14



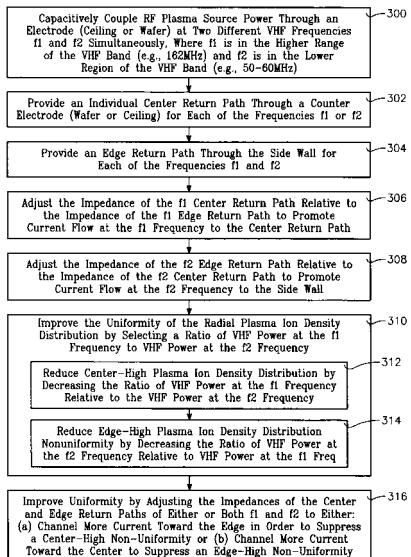
6/14



7/14



8/14



9/14

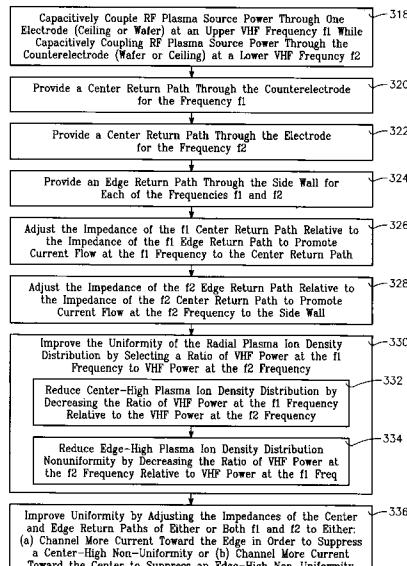


FIG. 8

10/14

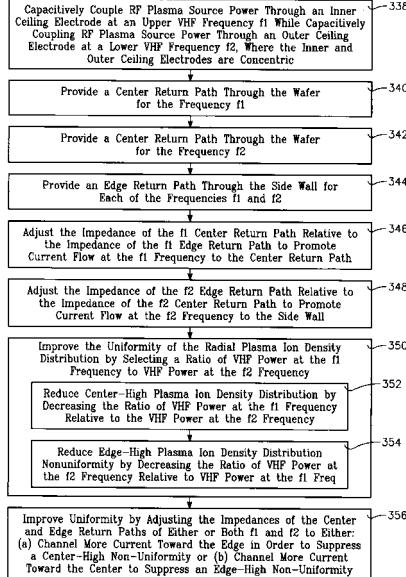


FIG. 9

11/14

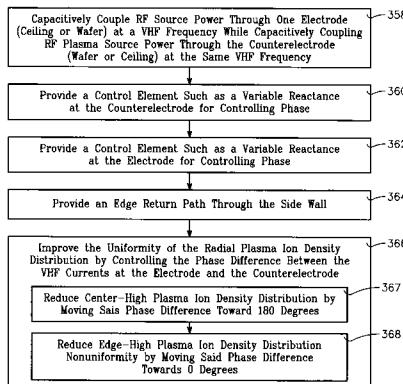


FIG. 10

12/14

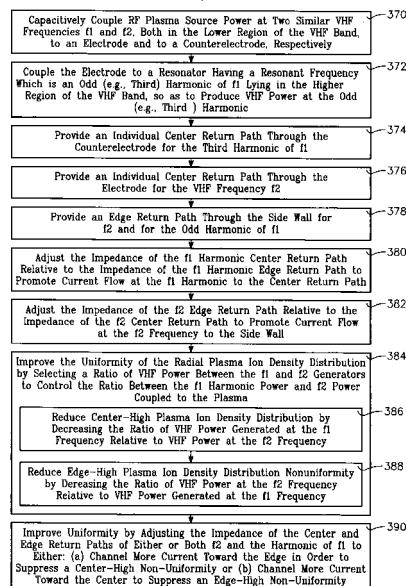


FIG. 11

13/14

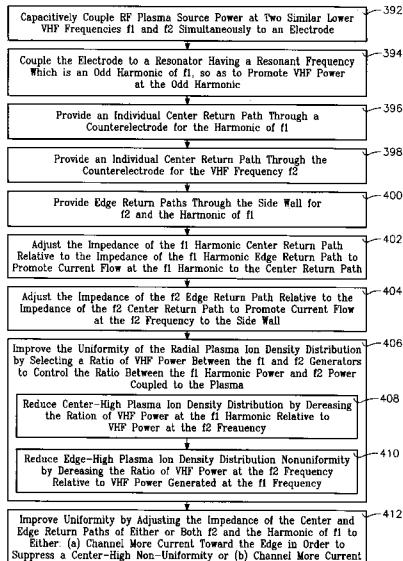


FIG. 12

14/14

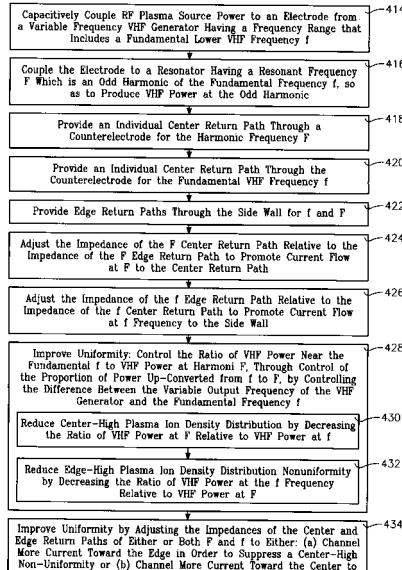


FIG. 13