



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

内部領域を有するプラズマダクト内にプラズマを形成するための高密度プラズマ源であって、

a) 筒状の内面並びに第 1 の中心軸を有し、内部に前記第 1 の中心軸と一致した第 2 の中心軸を有する環状キャビティが形成された環状の絶縁本体と、

b) 前記環状のキャビティ内に配設され、プラズマダクトの内部領域内に第 1 の磁界を発生するように動作可能であり、プラズマに誘導結合される誘導コイルとを具備するプラズマ源。

## 【請求項 2】

前記環状の絶縁本体の上面と下面との少なくとも一方の近くで、少なくとも 1 つの磁石リングの形態で配設され、互いに離間された複数の磁石をさらに具備する請求項 1 のプラズマ源。

## 【請求項 3】

前記誘導コイルに電氣的に接続された T - 整合ネットワークをさらに具備する請求項 1 のプラズマ源。

## 【請求項 4】

前記 T - 整合ネットワークに電氣的に接続されたプラズマ源用 R F 電力供給源をさらに具備する請求項 3 のプラズマ源。

## 【請求項 5】

前記 T - 整合ネットワークは、前記誘導コイルの第 1 並びに第 2 の端部に電氣的に接続されている請求項 3 のプラズマ源。

## 【請求項 6】

前記 T - 整合ネットワークは、前記誘導コイルにより規定された面内に配設された第 1 並びに第 2 の可変コンデンサーを有する請求項 3 のプラズマ源。

## 【請求項 7】

前記 T - 整合ネットワークは、前記誘導コイルにより規定された面に対して垂直に配設された第 1 並びに第 2 の可変コンデンサーを有する請求項 3 のプラズマ源。

## 【請求項 8】

前記誘導コイルは、銅コイルを有する請求項 1 のプラズマ源。

## 【請求項 9】

前記環状の絶縁本体は、テフロンで形成された本体を有する請求項 1 のプラズマ源。

## 【請求項 10】

前記環状の絶縁本体の上面と下面との近くで、第 1 並びに第 2 の同心磁石リングの形態で夫々配設され、互いに離間された複数の磁石をさらに具備し、これら第 1 並びに第 2 の同心磁石リングは、等しい数の磁石を有する請求項 1 のプラズマ源。

## 【請求項 11】

前記磁石は、DC 磁界用磁石を有する請求項 2 のプラズマ源。

## 【請求項 12】

前記磁石は、リングカプス形態と、ミラー磁界形態と、ダイポール形態との 1 つに配設された磁石のリングを有する請求項 2 のプラズマ源。

## 【請求項 13】

前記プラズマダクト内のプラズマ密度は、前記 R F 電力供給源により誘導コイルに印加される 500 W に対して約  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  以上である請求項 4 のプラズマ源。

## 【請求項 14】

前記プラズマダクト内のプラズマ密度は、前記 R F 電力供給源により誘導コイルに印加される 500 W に対して約  $1 \text{ ないし } 1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  以上である請求項 4 のプラズマ源。

## 【請求項 15】

前記環状のキャビティ内の前記環状の誘導コイルのキャビティから延び、前記環状の絶縁

10

20

30

40

50

本体の内面に向かって径方向に延びた冷却流体用のチャンネルをさらに具備し、また、前記誘導コイルは、冷却流体を移動させることが可能であり、前記誘導コイルと冷却流体用のチャンネルとの間に流体的連通を与えるように位置された、互いに離間した複数のアパチャを有する請求項 1 のプラズマ源。

【請求項 16】

前記環状の絶縁本体を囲んでいる接地された導電体ハウジングをさらに具備する請求項 1 のプラズマ源。

【請求項 17】

前記環状の絶縁本体の内面に近接して配設され、前記導電体ハウジングに接地された静電シールドをさらに具備する請求項 16 のプラズマ源。

10

【請求項 18】

前記環状の絶縁本体の内面に近接して配設された静電シールドをさらに具備する請求項 1 のプラズマ源。

【請求項 19】

(a) 中心軸と、上壁と、側壁とを有し、プラズマを支持可能な第 1 の内部領域を囲んでいるプラズマ反応炉チャンバと、

(b) この反応炉チャンバの前記上壁並びにノもしくは側壁に装着され、前記第 1 の内部領域と連通した第 2 の内部領域を囲んでいるダクト側壁を有する少なくとも 1 つのプラズマダクトと、

20

(c) 前記上壁と対向し、ワークピースを支持するためのチャックと、

(d) 少なくとも前記プラズマダクトの一部を囲んでおり、前記第 2 の内部領域内にプラズマ発生領域を規定したプラズマ源とを具備し、このプラズマ源は、

前記中心軸と実質的に同軸な、環状の絶縁本体と、

前記環状のキャピティ内に配設され、プラズマダクトの内部領域内に第 1 の磁界を発生するように動作可能であり、プラズマに誘導結合される誘導コイルとを有する、ワークピースを処理するためのプラズマ反応炉システム。

【請求項 20】

前記少なくとも 1 つのプラズマダクトは、前記上壁と対応するプラズマ源とに夫々装着され、ディスク形状に配設され、互いに離間した複数のプラズマダクトを有する請求項 19 のプラズマ反応炉システム。

30

【請求項 21】

前記少なくとも 1 つのプラズマダクトは、前記側壁と対応するプラズマ源とに夫々装着され、リング形状に配設され、互いに離間した複数のプラズマダクトを有する請求項 19 のプラズマ反応炉システム。

【請求項 22】

i) 前記プラズマ発生領域の中にガスを導入するように、前記プラズマダクトと流体的に連通されるガス供給システムと、

ii) 前記プラズマダクトと前記プラズマ反応炉チャンバとの少なくとも一方に流体的に連通されるガス分配システムと、

iii) 前記誘導コイルに電氣的に接続される T - 整合ネットワーク、並びに、この T - 整合ネットワークと電氣的に接続された第 1 の RF 電力供給源と、

40

iv) 前記誘導コイルに流体的に連通される冷媒供給システムと、

v) 前記第 1 の内部領域に流体的に連通される真空システムと、

vi) 前記チャックに電氣的に接続される第 2 の RF 電力供給源と

vii) 前記反応炉チャンバの側壁に形成され、前記第 1 の内部領域に連通された第 3 の内部領域を囲んでおり、第 3 の内部領域を介して前記チャックへとワークピースが通ることを可能にしているドアが装着され、前記チャックと共に動作的に関連したワークピース取り扱いシステムをさらに有するロードチャンバと、の少なくとも 1 つをさらに具備する請求項 19 のプラズマ反応炉システム。

【請求項 23】

50

前記反応炉の動作を制御するための制御システムをさらに具備する請求項 2 2 のプラズマ反応炉システム。

【請求項 2 4】

a) チャンバの内部領域と連通したプラズマダクトのプラズマ発生領域の中にプラズマガスを射出する工程と、

b) 前記プラズマ発生領域を囲んでいる環状の誘導コイルに T - 整合ネットワークを介して RF 電力を供給し、前記プラズマ発生領域内に第 1 の磁界を発生させる工程と、

c) 前記 T - 整合ネットワークを介して戻る誘導コイルから反射された反射電力の量を測定する工程と、

d) 前記工程 (c) で測定された反射電力の量を最少にするように、前記 T - 整合ネットワークの容量を調節する工程とを具備する、プラズマチャンバの内部領域内に高密度プラズマを形成する方法。 10

【請求項 2 5】

冷却流体を前記誘導コイル中に流す工程をさらに具備する請求項 2 4 の方法。

【請求項 2 6】

反応性プラズマを形成するように、プラズマチャンバの内部領域の中に反応性ガスを射出する工程をさらに具備する請求項 2 4 の方法。

【請求項 2 7】

プラズマチャンバの内部領域の中にプラズマ発生領域からプラズマが拡散してワークピースと反応することを可能にする工程をさらに具備する請求項 2 4 の方法。 20

【請求項 2 8】

反応性プラズマがワークピースと反応することを可能にする工程をさらに具備する請求項 2 2 の方法。

【請求項 2 9】

a) チャンバの内部領域と連通し、互いに離間し、反応炉チャンバの内部領域内に均一で高密度のプラズマを与えるように配設された複数のプラズマダクトのそれぞれの中のプラズマ発生領域の中にプラズマガスを出す工程と、

b) 夫々が前記プラズマ発生領域を囲んでいる環状の誘導コイルに、複数の T - 整合ネットワークを夫々介して RF 電力を供給し、前記プラズマ発生領域の各々内に第 1 の磁界を発生させる工程と、 30

c) 前記 T - 整合ネットワークの各々を介して戻る各誘導コイルから反射された反射電力の量を測定する工程と、

d) 前記工程 (c) で測定された反射電力の量を最少にするように、前記 T - 整合ネットワークの各々の容量を調節する工程とを具備する、プラズマチャンバの内部領域内に高密度プラズマを形成する方法。

【請求項 3 0】

冷却流体を前記誘導コイル中に流す工程をさらに具備する請求項 2 9 の方法。

【請求項 3 1】

反応性プラズマを形成するように、プラズマチャンバの内部領域の中に反応性ガスを射出する工程をさらに具備する請求項 2 9 の方法。 40

【請求項 3 2】

プラズマチャンバの内部領域の中にプラズマ発生領域からプラズマが拡散してワークピースと反応することを可能にする工程をさらに具備する請求項 3 0 の方法。

【請求項 3 3】

反応性プラズマがワークピースと反応することを可能にする工程をさらに具備する請求項 3 1 の方法。

【請求項 3 4】

a) 環状の絶縁本体内に収容された誘導コイルを有するプラズマ源を、排気路の周りに配置させて、排気路の中にプラズマ発生領域を規定する工程と、

b) 前記排気路を通るガスの少なくとも一部を解離させるように、プラズマ源を動作させ 50

る工程とを具備する、排気路を有し、ガスを含むチャンバ内の排気を浄化する方法。

【請求項 35】

プラズマ発生領域を通るガスへの電力の変換を最小にするように、プラズマ源の T - 整合ネットワークを同調させる工程をさらに具備する請求項 34 の方法。

【請求項 36】

プラズマ源の下流にある浄化システムに、解離されたガスを通す工程をさらに具備する請求項 34 の方法。

【請求項 37】

複数のプラズマ源を排気路に沿って配設する工程をさらに具備する請求項 34 の方法。

【請求項 38】

誘導コイルの第 1 並びに第 2 の端部に R F 電力供給源により印加される電力を調節するための整合ネットワークであって、

前記 R F 電力供給源に結合された第 3 の端部と、前記誘導コイルの第 1 の端部に結合された第 4 の端部とを有する第 1 の可変コンデンサーと、

前記誘導コイルの第 2 の端部に接続された第 5 の端部と、前記第 1 の可変コンデンサーの第 3 の端部に結合された第 6 の端部とを有する第 2 の可変コンデンサーとを具備する整合ネットワーク。

【請求項 39】

R F 電力供給源をさらに具備する請求項 38 の整合ネットワーク。

【請求項 40】

前記 R F 電力供給源と第 1 の可変コンデンサーとの間に結合された電力計をさらに具備する請求項 39 の整合ネットワーク。

【請求項 41】

前記第 1 並びに第 2 の可変コンデンサーは、前記誘導コイルの面内に物理的に配設されている請求項 38 の整合ネットワーク。

【請求項 42】

前記第 1 並びに第 2 の可変コンデンサーは、前記誘導コイルの面に対して物理的に垂直に配設されている請求項 38 の整合ネットワーク。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、2001年3月23日に出願された米国出願60/277,966並びに2001年3月23日に出願された米国出願60/277,965に対する優先権を請求している。これら出願の内容は、参照としてここに組入れられる。

【0002】

本発明は、一般的にはプラズマ処理システム並びに方法に関し、特に、プラズマ処理システムで使用されるのに適した誘導結合高密度プラズマ源に関する。

【背景技術】

【0003】

イオン化された気体、即ち、“プラズマ”は、半導体装置、フラットパネルディスプレイ、並びに材料のエッチングもしくは堆積(“プラズマ処理”)が必要な他の製品の処理並びに製造のときに使用され得る。プラズマは、半導体集積回路のウエハから材料をエッチング、即ち、除去するため、もしくは材料を半導体、導体もしくは絶縁体の表面上にスパッタリングもしくは堆積するために使用され得る。製造もしくは形成プロセスで使用するためのプラズマの発生は、一般的には、“チャック”と一般に称されているワークピース支持部材上に載置された、集積回路(IC)のウエハのようなワークピースを収容したチャンバの中に低圧の処理ガスを導入することによりなされる。チャンバ内での低圧ガスの分子は、ガス分子がチャンバの中に入った後にプラズマ源によりプラズマへとイオン化される。そして、プラズマは、ワークピースを支持しているチャックにR F電力を印加することによりバイアスされ得るワークピース上に流れてこれと反応する。

10

20

30

40

50

## 【0004】

プラズマ処理をより有効にするためには、プラズマは、好ましくは、高密度（1立方センチメートル当たりの電子もしくはイオンの数で測定される）を有し、均一であることである。高密度プラズマ処理は、スループットを高め、かくして、半導体製造での製造効率を高くする。さらに、プラズマは、処理システム内のラジカルが短い滞留時間を有するように、小さい体積（薄く平坦）を有することが好ましい。短いラジカルの滞留時間は、高アスペクト比のエッチングフューチャーでの高速並びに選択エッチングを果たすために、プラズマ内のラジカルの適当な解離の制御を可能にする。

## 【0005】

発展されて一般に使用されている1つの形式のプラズマ源は、平行平板型容量結合プラズマ（CCP）源である。このような源は、代表的には、13.56MHzで動作するけれども、他の周波数でも動作し得る。この平行平板型プラズマ源は、一般的に狭いギャップ間隔と小さいプラズマ体積とを有する。しかし、これは、 $10^{11}$  イオン/ccより低い低密度プラズマを一般に発生させ、これは、エッチング速度を制限する。

## 【0006】

他の形式のプラズマ源は、電子サイクロトロン共鳴（“ECR”）源である。これは、 $10^{11}$  ないし  $10^{12}$  イオン/cc以上のオーダの比較的高い密度を有するプラズマを発生させるマイクロ波（2.45GHz）のエネルギー源を使用している。このECR源は、比較的高いプラズマ密度とイオンエネルギーの良好な制御とを果たすけれども、プラズマ源にかなり大きい磁界を必要とし、このことは、一般的には処理反応炉では好ましくない。さらに、大きいウエハの全体に渡って均一なプラズマを発生させることは難しい。

## 【0007】

3番目の形式のプラズマ源は、誘導結合プラズマ源（ICP）である。これは、プラズマを発生させるために、誘導結合高周波を使用している。この形式のプラズマ源は、比較的高いプラズマ密度（ $10^{12}$  イオン/cc以上）を果たし、高周波源（代表的には13.56MHz）で作動する。しかし、この従来の誘導結合プラズマの欠点は、基板の上方の領域での不均一なプラズマ密度である。また、このプラズマ体積は、非常に大きく、ラジカルにとって非常に長い滞留時間となり、エッチング速度を制限する。

## 【0008】

第4の形式のプラズマ源は、比較的一定の大きさの磁界を使用するヘリコンプラズマ源である。これは、非常に高い密度（ $10^{13}$  イオン/cc）を発生させることが可能であり、高周波源（2ないし30MHz）で動作する。このようなヘリコン源は、伝播波長の1/2以上の最少長さで、システム内の低周波ホイストラー波の伝播と緩衝とを必要とする。このために、短いシステムでは、プラズマ発生効率が一般的には激減する。

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0009】

高密度プラズマ（ $10^{12}$  イオン/cc以上）を発生させることの可能な上記従来のシステムにおいて、効率は、小さい容量でのプラズマの発生では一般に犠牲にされている。このような非効率性は、製造目的のためには、高密度プラズマ処理に対してコストを高くしている。

## 【0010】

本発明は、一般的にはプラズマ処理システム並びに方法に関し、特に、プラズマ処理システムで使用されるのに適した誘導結合高密度プラズマ源に関する。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0011】

本発明の一態様は、上面、下面、筒状の内面並びに第1の中心軸を有する環状の絶縁本体を有する高密度プラズマ源である。環状のキャビティが、絶縁本体内に形成され、このキャビティは、前記第1の中心軸と一致した第2の中心軸を有する。アンテナとして機能する単一の誘導コイルが、前記環状のキャビティ内に配置され、プラズマのダクト内に第1

の磁界を発生するように動作可能であり、また、環状の本体がプラズマダクトの一部の周りに配置されているときには、内部に形成されたプラズマに誘導結合される。設置された導電性のハウジングが、前記環状の絶縁本体を囲んでいる。静電シールドが、絶縁本体の内面近くに配設され、かつ前記導電性ハウジングに接地されている。T - 整合ネットワークが、前記誘導コイルと電氣的に接続されている。このT - 整合ネットワークは、前記誘導コイルのアンテナからプラズマへの電力の効率的な変換を果たすように同調可能な第1並びに第2の可変コンデンサーを有する。

**【0012】**

本発明の第2の態様において、上述されたプラズマ源は、前記環状の絶縁本体の上面近くに、第1の磁石リングの形態で配設され、互いに離間された複数の第1の磁石と、前記環状の絶縁本体の下面近くに、第2の磁石リングの形態で配設され、互いに離間された複数の第2の磁石とをさらに有する。

10

**【0013】**

本発明の第3の態様は、ワークピースを処理するためのプラズマ反応炉システムである。このシステムは、中心軸と、上壁と、側壁とを有し、プラズマを支持可能な第1の内部領域を囲んでいるプラズマ反応炉チャンバを有する。少なくとも1つのプラズマダクトが、この反応炉チャンバの前記上壁並びにノもしくは側壁に装着されている。前記プラズマダクトのそれぞれは、前記プラズマ反応炉チャンバの内部領域と連通した第2の内部領域を囲んでいるダクト側壁を有する。簡単に前で説明され、後で詳しく説明されるようなプラズマ源が、プラズマダクトの一部を囲み、第2の領域内にプラズマ発生領域を規定している。

20

**【0014】**

本発明の第4の態様は、プラズマチャンバの内部領域内に高密度プラズマを形成する方方である。この方法は、チャンバの内部領域と連通したプラズマダクトのプラズマ発生領域の中にプラズマガスを射出する工程を有する。次の工程は、前記プラズマ発生領域を囲んでいる単一の環状の誘導コイルにT - 整合ネットワークを介してRF電力を供給し、前記プラズマ発生領域内に第1の磁界を発生させることを含んでいる。また、次の工程は、前記T - 整合ネットワークを介して戻る誘導コイルから反射された反射電力の量を測定することを含んでいる。最後の工程は、反射電力の量を最少にするように、前記T - 整合ネットワークの容量を調節することを含んでいる。

30

**【0015】**

プラズマの均一性の要求は、さらに大きくなるウエハサイズのためにより必要になるので、基板の上方の広い領域全体に渡って均一に分布された高密度プラズマを形成するように、個々のプラズマ密度が制御された状態で複数の小さいプラズマ源を使用することが好ましい。

**【発明を実施するための最良の形態】****【0016】**

本発明は、一般的にはプラズマ処理システム並びに方法に関し、特に、プラズマ処理システムで使用されるのに適した誘導結合高密度プラズマ源に関する。

40

**【0017】**

図1には、外壁22と上壁24と下壁26とを備え、内部領域30を囲んでいる反応炉チャンバ20を有するプラズマ反応炉システム10が示されている。前記内部領域30は、上壁に近接した上側内部領域34と、この上側内部領域に隣接した下側内部領域36とを含んでいる。このチャンバ20は、ステンレス鋼、アルミニウム、金属合金、もしくは種々のセラミックを含む種々の材料で構成され得る。ステンレス鋼、もしくはアルミニウムを使用することにより、効果的なチャンバ冷却を果たすことが可能であり、また、プラズマとプラズマチャンバとの間の反応を減じることができる。また、セラミックを使用することにより、プラズマチャンバ24の壁22の中への高周波電磁波の消費を減じる。システム10の特別な適用への考察は、どの材料がこの適用のために最も適しているかを導く

50

。本発明の好ましい実施の形態は、中心軸 A を有する円筒状の金属チャンパを使用している。

#### 【0018】

前記下壁 26 に近接した内部領域 30 には、ワークピースホルダー、即ち、“チャック”が配置されている。このチャックは、プラズマ処理されるワークピース W を支持することの可能な上面 46 を有している。このワークピース W は、上面 WS を有している。チャンパ 20 のサイズは、発生されるプラズマがワークピースの全体をカバーするようにチャンパは十分に大きくなければならないので、特別の処理されるワークピース W のサイズに依存している。例えば、ワークピース W が 8 インチ半導体ウエハの場合には、チャンパ 20 内で発生されるプラズマは、半導体ウエハの直径全体に渡って均一にカバーするのに十分な直径（例えば、6 インチ以上）を有さなければならない。

10

#### 【0019】

前記中心軸 A とアラインメントするようにしてチャンパ 20 の上壁 20 には、内側領域 72 を囲んでいる外壁 64 と上壁 68 とを有する円筒形のダクト 60 が装着されている。このダクトは、プラズマのチャンパの上壁 24 に形成された開口 78 を介して前記内部領域 30 と連通している。前記プラズマ用ダクトの上壁 68 は、ガス源に接続され得るガス入口ポート 84 を有する。プラズマ用ダクト 60 は、好ましくは、チャンパ 20 の内部領域 30 にプラズマが入るための導管として機能するのに適するように、サファイヤのようなセラミック材もしくはガラスのような石英（例えば、石英チューブ）、もしくは、同様の非反応性材料、または、アルミナでできている。このプラズマ用ダクト 60 の周りには、

20

#### 【0020】

図 1 にさらに示すように、システム 10 は、ガス 114 をプラズマ用のダクトの内部領域の中に供給するために、さらに、前記ガス入口ポート 84 に接続されたガスライン 112 を介して内部領域 72 と流体的に連通したガス源 110 を有する。このガス源 110 は、適当なプラズマに形成されることの可能なアルゴンのようなイオン化可能なキャリアガスを供給し得る。酸素、 $CF_4$ 、 $HBr$ 、並びに  $Cl$  のような反応性処理ガスが、チャンパの内部領域 30 と流体的に連通したガス分配システム 115 を介して反応炉チャンパに射出され得る。前記ガス分配システム 115（プラズマ用ダクト 60 ではなく）を介して処理チャンパ 20 の内部領域 30 に直接に処理ガスを供給することにより、酸化エッチングの適用に対して一般的に好ましい、解離の程度を減じるようにすることができる。しかし、他の化学現象に対しては、さらに高く解離される処理ガスが好ましい。このような場合、ガス分配システムは、ダクト 60 の内部領域 72 と流体的に連通され得る。使用される特別なガスは、処理されるワークピースの表面 WS を形成している材料（ポリシリコン、銅、アルミニウム、もしくは二酸化シリコン）に依存している。

30

#### 【0021】

システム 10 は、また、下壁 26 に配置された真空ポート 130 に接続された真空ライン 124 を介して、チャンパの内部領域 30 と流体的に連通した真空システム 120 を有する。種々の真空システムにより真空に引かれることが可能であり、特別なシステムは、内部領域 30 内の所望の圧力に依存している。本発明の好ましい実施の形態においては、真空システム 120 は、ターボ分子ポンプと、このポンプとチャンパ 20 との間に配置され、コントローラからの電気信号により遠隔層さされ得る電気/機械ゲートバルブ（図示せず）とを有している。この真空システム 120 と前記ガス供給システム 110 とは、一緒になって、適用に応じて略 1 m Torr ないし 1 Torr の範囲内にチャンパ 20 内の圧力を減じることができる。

40

#### 【0022】

システム 10 は、さらに、シール可能なドア 144 を有し、チャック 44 の近くでプラズマチャンパ 20 に装着されたワークピースロードチャンパ 140 を有する。このチャンパ

50

140は、壁22に形成された開口150を介して内部領域30と連通している。ドア144は、ワークピースWがワークピースロードチャンバ140の中へと配置されることを可能にするようなサイズを有する。このシステムは、また、ロードチャンバを介してワークピースWをチャックから、またチャックへと搬送するように、ロードチャンバ140とチャック144との動作的に関連付けられたワークピース取り扱いシステム156を有する。

【0023】

また、システム10は、冷却入力ライン162と冷却排出ライン164とによりプラズマ源100に流体的に接続され、プラズマ発生プロセスの間プラズマ源を冷却する冷却システム160を有する。この冷却システム160は、後で詳述される。

10

【0024】

前記プラズマ源100には、また、電力ライン180を介して、RF電力をプラズマ源に供給するためのRF電力供給源182が接続されている。整合ネットワーク186が、後で詳述されるように、プラズマとのインピーダンス整合を果たすように、RF電力供給源182とESRFアンテナ90との間に設けられている。供給並びに反射された電力を測定することの可能な電力計188が、プラズマ源100に供給並びにここから反射されたRF電力の大きさ測定するように、RF電力供給源182と整合ネットワーク186との間に配設されている。

【0025】

システム10は、また、チャック44と電氣的に接続され、プラズマ処理の間にイオン化されたガスがワークピースWに向かって引かれ得るようにチャックをバイアスするためのチャック用RF電力供給源190を有し得る。

20

【0026】

さらに、システム10は、前記チャック用RF電力供給源190と、プラズマ源用RF電力供給源182と、冷却システム160と、ワークピース取り扱いシステム156と、真空システム120と、ガス供給システム110と、ガス分配システム115とに電氣的に接続された主制御システム210を有する。この制御システム210は、夫々の電気信号によって、上記システムの動作を制御並びに調整する。

【0027】

図1を参照して、システム10の動作を以下に説明する。制御システム210は、ワークピース取り扱いシステム156によって、ロードチャンバ140を通してチャック44の上面46の上にワークピースWを配置させる。そして、制御システム210は、真空システム120を駆動させて、チャンバ20の内部領域30を排気させる。内部領域30の圧力が、所定のレベル(例えば、 $10^{-8}$ ないし $10^{-4}$  Torr)に減じられると、制御システム210は、ガス供給システム110並びに/もしくはガス分配システム115からのプラズマ源100の内部領域72並びに/もしくはチャンバ20の内部領域30の中へのガスの流れを生じさせる。これとほとんど同時に、制御システム210は、RF電力供給源182を駆動させて、ESRFアンテナ90を動作させる。ガス114が、内部領域72を流れるのに従って、ガスはイオン化されて、プラズマガス(“プラズマ”)230を形成させる。中にプラズマが形成される内部領域72の部分は、プラズマ発生領域と称され、符号72'で示されている。処理ガスの反応種が、膨張しているプラズマ内の処理ガスの解離により反応炉チャンバ20の内部領域30内で形成される。そして、制御システム210は、チャック44にバイアスがかかるように、オプション的に、チャック用RF電力供給源190を駆動させる。プラズマ230は、拡散によりワークピースWの方に流れて、ワークピースWの上面WSと反応する。このプラズマ処理の間に発生される使用済みプラズマ、並びに他のガス生成物は、真空システム120により内部領域30から最終的には排出される。

30

40

【0028】

ワークピースWの領域で膨張するプラズマの均一性は、大型のワークピースに対してはワークピースの中心領域に度々制限されてしまう。従って、図2(A)並びに図3(A)に

50

示されるように、大型のワークピースに対しては、複合プラズマ源（100A, 100B, ... 100N）が、図1の単一のプラズマ源と交換され得る。図2（A）の実施の形態において、プラズマ源は、上壁24にディスク形状に夫々配設され、ワークピースの表面近くに均一なプラズマ212（図2（B）に示されている）を発生するために使用され得る。代わって、上面領域（例えば、図1に示されたチャンバ20の上壁24が利用できないCVDもしくはPECVD用の反応炉に対しては、複合コンパクト源（100A, 100B, ... 100N）が、図3（A）並びに（B）に示されるように、リング形状配置で円筒の壁（例えば、チャンバ20の外壁22）に配設され得る。両者の形態において、個々のプラズマ源100A, 100B, ... 100Nは、自身のガス供給ライン112と、RF電力発生器182と、整合ネットワーク186とを、プラズマ密度と化学性質との完全な制御のために、有してする。

10

#### 【0029】

コンパクトプラズマ源

図4を参照して、本発明のコンパクトプラズマ源が以下に詳述される。

#### 【0030】

プラズマ源100は、絶縁材で形成され、内面304と、外面306と、プラズマ源がシステム10に組み入れられたときにはチャンバ20の中心軸Aとアラインメントされる回転軸A'とを有する環状ブロック300を備えている。この環状ブロック300は、好ましくは、テフロン（商標名）もしくは同様の非導電性材で形成され、また、好ましくは、真中で互いに接続された2つの別々のブロックにより形成されている。このブロック300内には、回転軸としての軸A'を有する環状の誘導コイル用チャンネル316が形成されている。さらに、ブロック300内には、誘導コイル用チャンネル316に接続され、軸A'に向かって延びた1もしくは複数の冷却チャンネル324が設けられている。

20

#### 【0031】

誘導コイル340が、前記誘導コイル用チャンネル316内に、これと機械的に拘束されて配設されている。この誘導コイルは、ESRFアンテナ90として図1で示された単一ループアンテナを構成している。この誘導コイル340は、導電材により、好ましくは、銅により形成されている。誘導コイル340は、FLOURINERT（商標名）のような誘電性の冷却流体が流れることができる内部344を有するチューブの形状である。また、このコイルは、前記冷却システム160と、コイル340と、冷却用チャンネル324との間に流体的連通を果たさせるように、長さに沿って増加するように配置された複数のアパチャア348を有している。このコイル340は、電力ライン180を介して整合ネットワーク186とプラズマ源用RF電力供給源182（図1）とに電氣的に接続されている。以下に説明されるように、冷却ライン162、164が、冷却システム160を誘導コイル340に接続している。

30

#### 【0032】

図4に示されるように、静電シールド360（E-シールドもしくはファラデーシールドとも称されている）が内面304の近くに配設されている。このシールドは、軸A'（即ち、垂直即ちy方向）に平行にアラインメントされた複数のスロット366を有し、電氣的に接地された円筒状の導電シートにより構成されている。前記スロット366は、一定間隔（例えば、等間隔）に配置されても、また、シールド可能なシールドのグループを使用して、離間して配設されていても良い。（シールド可能なシールドの一例は、参照としてここで組み入れられるPCT/US98/21623に開示されている。再び図4を参照すると、前記静電シールド360は、誘導コイル340と、コイルからの電磁界がプラズマと結合することを可能にするように通る領域を制限することにより、プラズマ発生領域72'内に形成されるプラズマ230と誘導コイル340との間の容量結合を最少にするように機能する。プラズマ源の一部としての静電シールドの役割は、参照としてここで組み入れられる米国特許No. 5,234,529に開示されている。プラズマ源100がプラズマダクト60の周りに位置されているときには、静電シールド360は、ブロック300の内面304とプラズマダクトの壁64との間に配置される。冷却流体が、静電シ

40

50

ルド360と壁64に沿って流れて、プラズマ源100により囲まれたプラズマダクト60の部分を冷却することができるように、内面304と壁64との間に十分に広いスペース(図示せず)が設けられていることが好ましい。

#### 【0033】

プラズマ源100は、上面404と下面406とを備え、前記ブロック300を囲んだハウジング400をさらに有する。このハウジング400は、接地され得るように、金属(例えば、銅)のような導体でできていることが好ましい。前記静電シールド360は、これもまた接地されるように、上並びに下エッジでハウジング400に電氣的に接続されている。また、このハウジング400は、他の装置がシールドされた状態でハウジングに装着され得るように、上面404並びに/もしくは下面406に配置されたシールド416(例えば、O-リング)を有し得る。

10

#### 【0034】

プラズマ源のための磁石

図6にまた示すように、プラズマ源100は、前記上面404並びに/もしくは下面406の近くに配設された複数の磁石420をオプション的に有する。これら磁石は、下側磁石リング422と上側磁石リング424とを夫々形成するように、誘導コイルのチャンネル316の上下に環状のリング形状に配置されたブロックの形態となった永久磁石であることが好ましい。これら磁石は、代わって電磁石でも良い。図6では、上側磁石リング422は、8個の磁石であるように示されている。例示的な実施の形態においては、プラズマ源100は、下側磁石リング422と上側磁石リング424とにおいて16ないし24個の磁石を有する。このような磁石は、互いに等間隔もしくは不等間隔で離間し得る。また、これら磁石420は、前記ハウジング400内、もしくは、図4に示されているように、別のシールドされたハウジング430内に設けられ得る。これら磁石420の役割は、所望の結果(例えば、高められた効率、高プラズマ密度、もしくは好ましいプラズマの流れ方向)を果たすためにプラズマ230の振るまいに影響を与えるように、プラズマ発生領域72'の近くに部分的な磁界を発生させることである。磁石420は、 $10^{13}$ イオン/cc以上のプラズマ密度を生じさせて、磁石が使用されていない場合と比較すると約3Xのファクターだけプラズマ密度を一般的に増すように、プラズマ源100の一部として代表的に必要とされている。このプラズマ密度の増加は、電子エネルギー分布関数(EEDF)のテールでのエネルギー電子の磁氣的拘束の結果であり、これは、中性気体のイオン化に対応可能である。

20

30

#### 【0035】

図7Aないし7Cには、磁化方向が矢印450(矢印の先端は磁石の北極を示す)で表わされた、磁石420のための3つの異なる磁氣的形態が示されている。図7Aないし7Cで示された3つの形態での磁力線は、図8ないし10に夫々示されている。磁界(mod-B)のモジュラス(modulus)輪郭は、等磁線MB1, MB2並びにMB3により、夫々示されている。磁力線B1, B2並びにB3は、比較的部分的であり、プラズマ発生領域72'の夫々の縁で最大強度を有することが判る。

#### 【0036】

図7A並びに8を参照すると、上側並びに下側磁石リング422, 424の全ての磁石420が、これらの北極が径方向内側に向けられるように指向されたリングカプス形態と称されるものが示されている。図8で磁力線B1は、リングカプス磁界の形態を示している。鳥の巣状の閉じたmod-B等磁線により囲まれた、プラズマダクトの軸の近くの中央面に最少の磁界が生じている。所謂最少B形態は、プラズマに対して安定した磁氣的拘束を与える。このような形態は、最高のプラズマ密度( $10^{13}$ イオン/cc以上のオーダ)を与える。しかし、リングカプス形態において、磁力線B1は、プラズマイオン(例えば、図1のプラズマ230)が、しっかりと拘束されないでプラズマダクト60の壁64と相互反応をするようにさせる。この結果、壁64から材料がスパッタリングされる。代表的なリングカプス形態は、ESRFアンテナの領域の近くで約50ガウスの磁界強度を生じさせる。図8で示されているように、2つの二次最少B領域M1, M2が存在して

40

50

いることが、判る。一方(M1)は、上側の磁石リングの近くにあり、他方(M2)は、下側の磁石リングの近くにある。これら部分的な最少部は、また、プラズマダクト内に高密度プラズマを発生させる助けとなる。

#### 【0037】

図7B並びに9を参照すると、ミラー磁界形態と称されるものが示されている。これでは、上側磁石リング422の磁石420の全ての磁気モーメントは、これらの北極が径方向内方に向けられるように指向されているが、下側磁石リング424の磁石420の全ては、これらの北極が径方向外方に向けられるように指向されている。勿論、夫々の磁石リングの磁極の向きは、同様の効果を奏するように逆にされ得る。図9での磁力線B2は、ミラー磁界形態を示している。このミラー磁界形態において、磁力線B2は、かなり長い(即ち、軸方向)成分を有する。これは、プラズマダクト60の壁64をスパッタリングから防ぐように機能する。しかし、ミラー形態でのプラズマ密度は、図7Aのリングカプス形態で可能である密度よりも約25%だけ減じられる。代表的なミラー磁界形態は、約300ガウスの最少磁界強度を与える。ミラー形態での部分的な最少B領域は、最高のプラズマ密度を有するよう見られる。

10

#### 【0038】

図7C, 10並びに11を参照すると、ダイポール形態と称されるものが示されている。これでは、各磁石リング422, 424の磁石の半部分が、これらの北極が径方向内方に向けられるように指向されているが、磁石リングの他の(反対の)磁石は、これらの北極が径方向外方に向けられるように指向されている。図11の破線466は、異なる磁化方向を有する磁石リング422の部分間の分離線を示す。さらに異なる実施の形態において、如何なる1つのリングの磁石もまた、隣接するリング相互が、N磁石が他のN磁石の上方にあるようか、N磁石がS磁石の上方にあるようにアラインメントされた状態で、N, S, N, S等にされ得る。このような異なる実施の形態の何れにおいても、同じリングでの近接して対向する磁石間の間隔は、幾つかの同じ磁石が互いに隣接している(例えば、図11)リングと比べてより好ましい。

20

#### 【0039】

図示されたダイポール形態は、主としてプラズマ発生領域72'の上方並びに/もしくは下方の水平面を横切って延びる磁力線を有する。このような磁界の形態は、プラズマ発生領域72'に比較的重いイオンを強く拘束しないけれども、この領域内で電子を拘束する。上側磁石リング422による磁界の向きにより、磁力線B3は、ガス入口ポート84からのガス流入もしくは処理反応炉の流失入口流れ(図示せず)から、プラズマ発生領域72'を分離することができ。同様に、下側磁石リング424による磁界の向きは、プラズマ発生領域の下流にある部品(即ち、真空ポンプ)からプラズマ発生領域72'を分離するために利用され得る。代わって、上側並びに下側磁石リング422, 424の両方は、組み合わせられて、プラズマ発生領域72'を直接に分離するのに利用され得る。プラズマ発生領域72'からの電子は、磁界B3を横切って反応炉チャンバ20の内部領域30中へと拡散(電子-中性子衝突によって)のみ可能である。このような磁気的分離は、プラズマを制御するためには好ましい。早い電子(10ないし30eVを越えるエネルギーを有する)は、部分的な磁界により反射されるけれども、拡散されたプラズマは、約1eVの温度の低いエネルギーの電子のみを含んでいる。この性質は、制御可能な電子エネルギー分布関数(EEDF)で大きく均一なプラズマを形成するのに使用され得る。

30

40

#### 【0040】

##### 整合ネットワーク

本発明のプラズマ源の一実施の形態に、以下に説明する整合ネットワークが、また、含まれている。(このような整合ネットワークは、本発明のプラズマ源で使用するのは好ましいけれども、要求されない)。従って、図12並びに再び図1とを参照すると、プラズマ源100は、整合ネットワーク186に接続されている。この整合ネットワークは、RF電力ライン180によって、誘導コイル(即ち、ESRFループアンテナ)340に、また、RF電力供給源182に電氣的に接続されている。RF電力供給源182と整合ネッ

50

トワーク 186 との間に配設された電力計 188 は、プラズマ源 100 に供給され、またこれから反射される電力値を測定する。このプラズマ源 100 と整合ネットワーク 186 とは、一緒になってプラズマ源 100' を構成している。

#### 【0041】

前記整合ネットワーク 186 は、RF 供給ライン 180 と第 1 のコンデンサーコントローラ 502 とに電氣的に接続された第 1 の可変コンデンサー 500 を有する。このコンデンサーコントローラは、第 1 の可変コンデンサー 500 の容量を変更するのに使用される。この第 1 の可変コンデンサー 500 は、誘導コイル 340 に電氣的に接続されている。整合ネットワーク 186 は、さらに、第 2 のコンデンサーコントローラ 508 に電氣的に接続された第 2 の可変コンデンサー 506 を有する。この第 2 のコンデンサーコントローラは、第 2 の可変コンデンサー 506 の容量を変更するのに使用される。この第 2 の可変コンデンサー 506 は、誘導コイル 340 に並列に、かつ第 1 の可変コンデンサー 500 の出力ノードに接続されており、また、接地端 512 を有している。この整合ネットワーク 186 の形態は、所謂“T-整合ネットワーク”であり、図 15 に概略的に示されている。

#### 【0042】

図 15 において、T-整合ネットワーク回路 540 は、プラズマ源の RF 電力供給源 182 である電源  $V_G$  を有する。この電源  $V_G$  には、プラズマ源の RF 電力供給源 182 のインピーダンスを示す抵抗  $R_G$  が直列に接続されている。破線のボックス 542 により示された、回路 540 の“T”部分は、前記第 1 並びに第 2 の可変コンデンサー 500, 506 に夫々対応した第 1 並びに第 2 の可変コンデンサー  $C_S$  (“直列”に対しては  $S$ )、 $C_P$  (“並列”に対しては  $P$ ) の配置を含んでいる。さらに、回路 540 には、前記誘導コイル 340 の負荷インピーダンス(代表的には 0.1 ないし 0.2 オーム)を表わすインダクタ  $L$  並びにレジスタ  $R$  と、プラズマ発生領域 72' 内に発生されるプラズマ 230 のインピーダンスとが含まれている。

#### 【0043】

図 12 を参照すると、本発明の好ましい実施の形態において、誘導コイル 340 は、第 1 並びに第 2 の端部 340A, 340B を有するようにデザインされている。この第 1 の端部 340A は、前記第 1 並びに第 2 の可変コンデンサー 500, 506 が接続されたライン 520 に接続されている。前記第 2 の端部 340B は、第 2 の可変コンデンサー 506 の接地端 512 に接続されたライン 528 に接続されている。これは、T-整合ネットワーク形態の好ましい構成である。図 13 (A) 並びに (B) に示されているように、第 1 並びに第 2 の可変コンデンサー 500, 506 は、最少の軸方向の広がりのために、誘導コイル 340 の面 P 内に物理的に配設されている。代わって、図 14 (A) 並びに (B) に示されているように、これらは、径方向のディメンションでの最少の広がりのために、前記面 P に対して垂直に配置され得る。

#### 【0044】

プラズマ源と整合ネットワークとの組合わせの動作効率

比較的小さい直径の単一のループアンテナにとって、アンテナの直列抵抗  $r$  (銅コイルの抵抗とプラズマの抵抗とを含む) は、一般的には非常に小さい。そして、抵抗負荷により導かれる電力  $P$  は、 $P = i^2 r$  となる。ここで、 $r$  は、負荷を流れる RMS 電流である。明かに、負荷を流れる非常に大きい RF 電流が、かなりの大きさの電力を果たすためには必要である。従って、回路抵抗は、出力された電力がプラズマ発生のためにほとんど使用されるように、最少でなければならない。これは、コンデンサー  $C_P$  を可能な限り負荷に近づけて負荷を横切るように配置させることにより、達成され得る。また、このコンデンサー自身は、可能な限り小さい直列抵抗を含まなければならない。このコンデンサーの値は、ループインダクタンス(プラズマから貢献され得るものを含んでいる)を有する共振回路が RF 源の周波数で満足されるように選ばなければならない。

#### 【0045】

$$\omega^{-2} = L (C_S + C_P) \quad (1)$$

10

20

30

40

50

これは、 $C_S$  が  $C_P$  に並列に接続され、かつ両者が負荷に直列であるためである。  
前記コンデンサー  $C_P$  は、また、RF 電力発生器と負荷との間のインピーダンス変換のための分枝コンデンサーとして機能する。かくして、 $C_S$  を流れる電流は以下の通りである。

【0046】

$$i_s = C_S / (C_S + C_P) i \quad (2)$$

負荷で消失される電力は、以下の式により与えられる。

【0047】

$$P = i^2 r = i_s^2 R \quad (3)$$

ここで、 $R$  は、図15に示された回路の入力インピーダンスである。式(3)を(2)で置換えると、入力インピーダンス  $R$  は、以下の式により与えられる。 10

【0048】

$$R = [(C_S + C_P) / C_S]^2 r \quad (4)$$

かくして、印加される RF 周波数 に対して T - 整合ネットワーク 540 の  $C_S$  と  $C_P$  とを同調させて、電力発生器  $R_g$  の入力インピーダンスと出力インピーダンスとを整合させることにより、 $R = R_g$  となり、理想的な整合が実現される。

【0049】

図15の T - 整合ネットワーク 540 において、要素  $L$  並びに  $R$  は、アンテナ並びにプラズマからの貢献成分を含んでいることが判る。プラズマが形成される前は、 $L$  と  $R$  とは、それぞれ、単に、アンテナインダクタンス並びに回路の抵抗である。回路自体で常時電力の消失はある。閉回路ループ ( $L$ ,  $C_P$ ,  $R$  - 回路ループ) のパス長を短くすると、回路ロスは減少する。さらに、低ロス真空コンデンサーが、 $C_P$  のために使用されることが好ましい。また、回路は、回路並びに接続部の導電体の抵抗を減じるように、冷却し続けることが好ましい。 20

【0050】

プラズマが形成されると、プラズマは、プラズマ抵抗により終了される等価変圧器の単一巻きの二次コイルとして機能する。かくして、プラズマの存在は、回路インダクタンス  $L$  と抵抗  $r$  とを変調することになる。このために、 $C_S$  並びに  $C_P$  のための調節は、所望のプラズマ状態のためには、良い整合を果たすようにされなければならない。図15に示された T - 整合回路の効率は、簡単でエレガントな方法で決定され得る。この効率は、ここでは、プラズマ  $P_{abs}$  で実際に吸収される電力を全入力電力  $P$  で除したように規定される。即ち、以下のようになる。 30

【0051】

$$= P_{abs} / P = r_{plasma} / (r_{circuit} + r_{plasma}) \quad (5)$$

負荷抵抗  $R_{circuit} = (r_{circuit} + r_{plasma})$  は、式(4)による整合入力抵抗  $R_g$  に関連されて、以下のように書き換えられる。

【0052】

$$R_g = 50 = K (r_{circuit} + r_{plasma}) \quad (6)$$

ここで、 $K$  は、式(4)での容量比の二乗を示している。 $r_{circuit}$  と  $r_{plasma}$  とを夫々決定するために、コンデンサーのセッティングを乱すことがなく、整合から RF 電力発生器をターンオフ並びに切ることができる。アンテナ回路の入力抵抗は、インピーダンスメータにより測定され得る。即ち、 40

$$R_{circuit} = K r_{circuit} \quad (7)$$

従って、以下のような効率を得る。

【0053】

$$\begin{aligned} &= P_{abs} / P = r_{plasma} / (r_{circuit} + r_{plasma}) \\ &= R_{circuit} / R_g \quad (8) \end{aligned}$$

厳密に言えば、共振周波数は、プラズマがターンオフされると少し変化するので、測定されたインピーダンス  $R_{circuit}$  は、正確には正しくない。しかし、以下の表1から見るように、この周波数の相違は、測定精度に対してほとんど意味がないほ 50

どに小さい。

【0054】

以下の表は、プラズマ源100'に供給される異なる入力RF電力レベルに対するプラズマ源効率を示している。この表は、効率が102ワットから1000ワットのRF電力レベルへと入力電力 $P_{inp}$ が大きくなるのに従って高くなることを示している。

【0055】

表において、Rは、プラズマのターンオフで測定された回路の入力インピーダンスであり、また、 $R_G = 50$  は、発生器の抵抗（出力インピーダンス）であり、図15を参照して上述されたように、プラズマのオンでの回路に対する整合された入力抵抗に等しい。表1のデータは、図16にプロットされている。測定された回路共振周波数は、27.12 MHzの印加周波数から僅かだけ（0.5 MHz）それであり、また、回路の品質ファクターQは、ほとんど同じであることに気付くであろう。Rの測定のエラーは、品質ファクターの測定に基づいて、約1%になるように想定される。コンパクトなプラズマ源でのプラズマ密度は、ラングミュアプローブを使用して測定された結果、500 Wの印加電力で約 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ である。1000 Wで、測定されたプラズマ密度は、圧力が1ないし20 m Torrのアルゴンガスのもとで、1ないし $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ である。

【表1】

本発明のプラズマ源とT-整合ネットワークとのための入力RF信号並びに対応した効率			
入力電力 $P_{inp}$ [W]	プラズマが焼勢された後		効率 $\eta = 1 - R/R_g$ [%]
	共振周波数 $f$ [MHz]	入力抵抗 $R$ [ $\Omega$ ]	
102	27.007	32.4	35.2
200	26.910	26.2	47.6
300	26.850	24.1	51.8
398	26.833	23.2	53.6
600	26.794	22.0	56.0
803	26.787	21.5	57.0
1,000	26.713	21.1	57.8

誘電結合プラズマ（例えば、M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, "Principles of plasma discharges and materials processing", Jon Wiley & Sons, Inc., を見よ）のために一般に使用されているL形式の整合ネットワークと比較されたときに、T-整合は、4つの異なる効果、即ち、高効率と、広いチューニング範囲と、小さい容量と、小さいコンデンサー（物理的ディメンション）とを有する。これらは、順次説明されるであろう。

【0056】

効率

L整合では、大きいRF電流が、Lと $C_s$ と $C_p$ との直列接続を循環する。ここで、 $C_s \gg C_p$ である。かくして、この電流は、両コンデンサーを流れるばかりではなく、大きいコンデンサーは、相互接続を比較的長くして、流路に沿って抵抗ロスを生じさせる。一方、T-整合での大きいRF電流は、Lと $C_p$ とにより形成されたループ中に含まれている。平行コンデンサーが、負荷の直ぐ近くに配置されていれば、リーク長さは、非常に短くされ得る。さらに、コンデンサー $C_s$ を流れるRF電流は、負荷を流れるRF電流よりも小さく、かくして、ロスは、非常に小さい。

【0057】

整合範囲

L 整合に対する抵抗変換式は以下のように与えられる。

【0058】

$$r = 1 / \sqrt{C_p^2 R g} \quad (9)$$

T - 整合に対しては、等価式は以下のように与えられる。

【0059】

$$r = \sqrt{L^2 C_s^2 R g}$$

上記式(9)並びに(10)から、L - 整合で非常に小さい抵抗  $r$  を整合するには非常に大きいシャントコンデンサー  $C_p$  を必要とし、反対に T - 整合は、非常に小さい直列コンデンサー  $C_s$  を必要とすることが判ることができる。

10

【0060】

コンデンサーの値

$C_p$  は、L 並びに T 整合ネットワークの両方とも一般に  $C_s$  よりも非常に大きいので、共振状態は、L - 整合では  $C_s$  の値により、そして T - 整合では  $C_p$  の値により、主として決定される。

【0061】

$$C_s^{L - match} C_p^{T - match} = 1 / \sqrt{L} \quad (11)$$

これら2つのコンデンサーは、両方の整合ネットワークで比較され得る値を有するので、以下のように書くことができる。

20

【0062】

$$C_p^{L - match} C_s^{L - match} C_p^{T - match} C_s^{T - match} \quad (12)$$

かくして、T - 整合は、L - 整合よりも小さいコンデンサーを使用している。実際には、3ないし30 pF の容量範囲を有するトリマーコンデンサーが、平行コンデンサー  $C_p$  として機能するように、8ないし1000 pF の容量範囲を有するキャパシターに平行となるように挿入されている。また、3ないし30 pF の容量範囲を有するコンデンサーが、直列コンデンサー  $C_s$  として使用されている。

【0063】

整合ネットワークへの冷却システムの組入れ

30

プラズマ発生効率を高めるために、回路抵抗が、冷却システム160(図1)を整合ネットワーク186に組入れることにより最少にされている。図12を再び参照すると、冷媒を誘導コイル340の内部344に供給する冷却ライン162が、整合ネットワーク186に組入れられている。図1を参照して前に説明されたように、冷媒は、開口348を介して誘導コイル340の外に流れて冷却チャンネル324を流れる。図12は、覆い体550が、内部552の中にあるプラズマ源100と整合ネットワーク186の一部とを囲んでいる、本発明の好ましい実施の形態を示している。また、この覆い体550は、図4を参照して説明されたハウジング400の代わりとして機能できる。また、好ましいデザインは、プラズマ源100と整合ネットワーク186とを冷却するように内部552の中で冷媒が循環するのを可能にしている。そして、冷媒は、冷却排出ライン164を介して排出される。この好ましい実施の形態の変形例として、整合ネットワーク186は、ハウジング400(図4)にシールされ得る自身のハウジング(図示せず)内に設置され得る。

40

【0064】

上述した構造を使用した、プラズマ源100'もしくはこれの一部を冷却する工程は、インピーダンスが最少にされるように、種々の回路要素の抵抗を維持するように機能する。例えば、誘導コイル340の抵抗は、通常は0.1ないし0.2オームであるけれども、コイルの温度が非常に高くされた場合には、0.5オームのように高くなる。同様に、可変コンデンサー500, 506は、また、これらの温度が制御されなければ、高くなった抵抗を有する。さらに、プラズマ源100の冷却は、一般的には、プラズマを形成すると

50

きに発生する多量の熱のために、必要である。プラズマ源 100 を構成している種々の部品をこのような多量の熱にさらすと、これらの寿命が短くなるか、早期に破損する可能性がある。

【0065】

浄化システムとしてのプラズマ源

本発明のプラズマ源 100 は、例えば、過フルオロ化合物 ( P F C ) の放出を減じるように、浄化システムとしても使用され得る。図 17 には、側壁 624 と、上壁 626 と、下壁 630 とを有し、プラズマ 628 を維持することの可能な内部領域 626 を囲んでいる反応炉チャンバ 620 を備えたプラズマ反応炉システム 600 が示されている。このチャンバ 620 は、図 4 のチャンバ 20 と同様である。上側電極 630 が、ワークピース W を支持可能なチャック 634 の上方で、内部領域 626 内に配置されている。この上側電極 630 は、ガスが上壁 626 を介して内部領域 626 の中へと流れることを可能にさせるガス入口 640 を有する。プラズマ形成システム 656 の一部である誘導コイル 650 は、上側電極 630 を収容しているチャンバ 620 の一部を囲んでいると共に、 R F 源 660 に接続されている。

10

【0066】

前記チャック 634 の近くでチャンバ 630 には、図 4 を参照して前に説明されたプラズマダクト 60 と同じプラズマダクト 670 が装着されている。このプラズマダクト 670 は、前記下壁 630 に形成された開口 684 を介して内部領域に連通した内部領域 680 を囲んでいる側壁 674 を有する。上述されたように、プラズマ源 100 と整合ネットワーク 186 は、プラズマダクト 670 の周りに設けられており、内部領域 680 内にプラズマ発生領域 680' を規定している。チャンバ 620 に接続された端部とは反対側のプラズマダクト 670 の端部は、真空ポンプのような排気システム 688 に流体的に接続されている。

20

【0067】

プラズマ源 100 の他の部品は、図 4 ないし 15 を参照して前に説明されたのと同じであり、図 17 では、図示のために省略されている。

【0068】

動作において、プラズマシステム 600 は、内部領域 626 の中へ C F<sub>4</sub> , C<sub>4</sub> F<sub>8</sub> , C<sub>5</sub> F<sub>8</sub> 等の例えば P F C を含んだ処理ガスを導入すると共に、プラズマ形成システム 656 を駆動することにより、チャック 634 上に載置されたワークピース W の近くにプラズマ 628 を形成する。C F<sub>3</sub> , C F<sub>2</sub> , C F , F 等の反応種が、また形成される。さらに、ワークピース W を処理 (例えば、エッチング) しているときに、S i F<sub>4</sub> , C O<sub>2</sub> 等の他の化学種が形成される。かくして、チャンバ 620 からの排気は、一般的には環境に優しくはなく、大気に直接排気するのには適していない。

30

【0069】

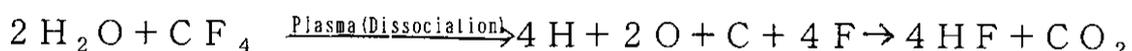
従って、排気路に沿ってプラズマ源 100 と整合ネットワーク 186 とを配置することにより、プラズマ処理の間に内部領域 626 内に形成される種々のガスは、プラズマ発生領域 680' を通ってこれらの化学的性質が変えられ得る。環境上問題のあるガスの解離を確実にするために、複数のプラズマ源 100 とこれに関連したネットワークとが、排気路に沿って直列に配置され得る。

40

【0070】

例えば、プラズマ源 100 のプラズマ発生特性は、使用されない C H<sub>4</sub> のようなガスを、H<sub>2</sub> O の解離により発生される酸素や水素と化学反応する C F<sub>4</sub> や F の成分に解離するように機能し得る。例えば、非常に簡単な化学反応は以下の通りである。

【数 1】



かくして、反応生成物は、排気システム 688 の下流にある他の公知のガス処理 “ スクラ

50

ピンビ"システム692により容易に処理されるHFやCO<sub>2</sub>を含むようになる。そして、処理されたガスは、大気に排気されるか、さらにろ過されて大気に放出され得る。

【0071】

本発明のプラズマ源の使用は、プラズマ反応炉システムに関連して、排気浄化システムとして記載されているけれども、このプラズマ源は、有害もしくは好ましくはないガス生成物が、大気に排出される前に処理される必要がある他の種類のシステムでの有効な浄化システムとして使用され得ることは、この分野の者にとって自明であろう。

【0072】

変形例

上述された実施の形態に加えて、他の変形が可能である。このような変形の1つにおいて、一連のプラズマ源（潜在的に各々が少なくとも1セットの対応する磁石を備えている）が、大型のプラズマ源を形成するように互いに積み重ねられている。他の変形において、1巻き以上のアンテナが、少なくとも1つのプラズマ源に使用されている。

【0073】

本発明の多くの態様と効果とが、詳細な説明から明かであり、かくして、本発明の真の精神と範囲とに従って説明されたような装置の全ての態様と効果とをカバーすることが添付の請求項により意図されている。さらに、種々の変形と変更とが、この分野の者にとって容易であろうから、ここに記載された正確な構成と動作とに本発明を制限することは望ましくない。従って、他の実施の形態が添付の請求項の範囲内である。

【図面の簡単な説明】

【0074】

【図1】本発明の単一プラズマ源を備えたプラズマ反応炉システムの概略的な断面図である。

【図2】(A)は、プラズマチャンバの上部にディスク形状に配設された本発明の複合プラズマ源を備えたプラズマ反応炉システムの平面図であり、(B)は、(A)のプラズマ反応炉システムの概略的な断面図である。

【図3】(A)は、反応炉チャンバを囲み、だリング形状に配設された本発明の複合プラズマ源を備えたプラズマ反応炉の平面図であり、チャック方向へのプラズマの流れを示す、また(B)は、(A)に示すプラズマ反応炉システムの概略的な断面図である。

【図4】別々のハウジングに囲まれた上側並びに下側磁石リングを示す、本発明のプラズマ源の概略的な断面図である。

【図5】図4に示すプラズマ源に使用されている円筒形の静電シールドの一部の斜視図である。

【図6】上側磁石リングを形成している磁石の環状の配置を示すように、上側磁石ハウジングが取り除かれた図4に示すプラズマ源の平面図である。

【図7】(A)ないし(C)は、それぞれ3つの異なる磁石形態を説明するための図であり、上側並びに下側磁石リングと、静電シールドと、プラズマダクトの壁とを示す、図4のプラズマ源の断面図である。

【図8】図7(A)の磁石形態に係わる磁界を示す図である。

【図9】図7(B)の磁石形態に係わる磁界を示す図である。

【図10】図7(C)の磁石形態に係わる磁界を示す図である。

【図11】図7(C)の断面でしめされた磁氣的形態のための上側磁石リングの磁氣的形態を示す平面図である。

【図12】プラズマ源と整合ネットワークとを囲んでいる覆い体のための好ましい実施の形態を示す、本発明のプラズマ源の概略的平面図である。

【図13】(A)は、システムが最小の軸方向ディメンションを有するように、配設された複数のコンデンサーを備えた、図12のプラズマ源の概略的平面図であり、(B)は、(A)のシステム断面図である。

【図14】(A)は、システムが最小の径方向ディメンションを有するように、配設された複数のコンデンサーを備えた、図12のプラズマ源の概略的平面図であり、(B)は、

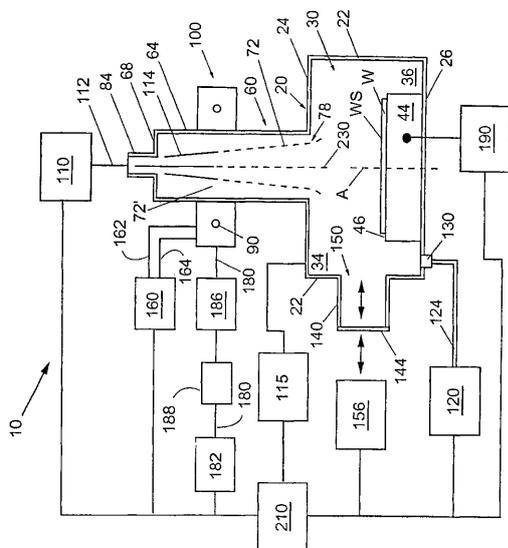
(A) のシステム断面図である。

【図 15】 図 12, 13 (a), 並びに 14 (A) のプラズマ源の T - 整合ネットワークの概略的回路図である。

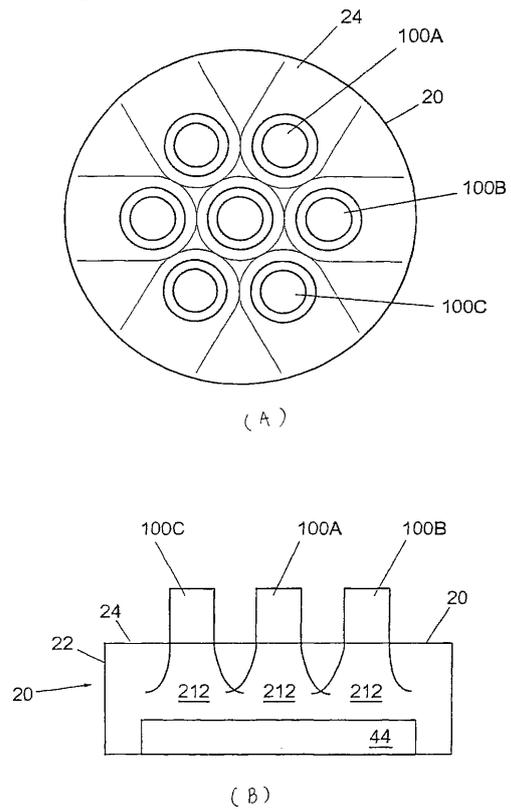
【図 16】 本発明のプラズマ源の効率を説明するための図であり、本発明のプラズマ源のための誘導コイルに印加される RF 電力の量に対するプラズマ源の効率をプロットした図である。

【図 17】 本発明のプラズマ源が排気浄化システムとして使用されるプラズマ反応炉システムの概略的な断面図である。

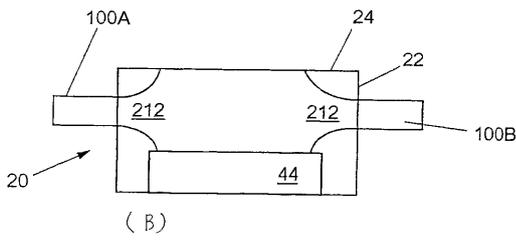
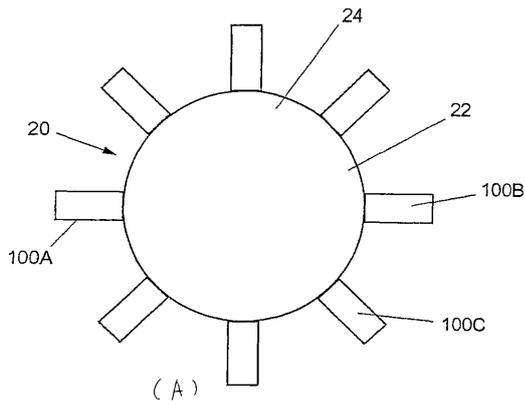
【 図 1 】



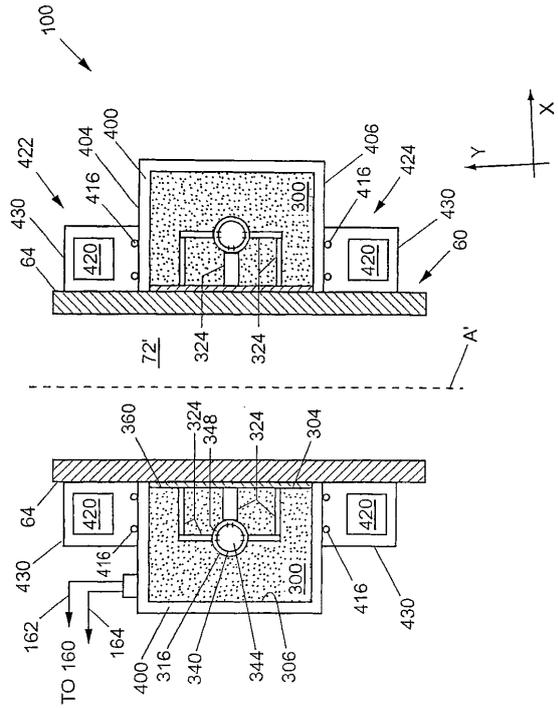
【 図 2 】



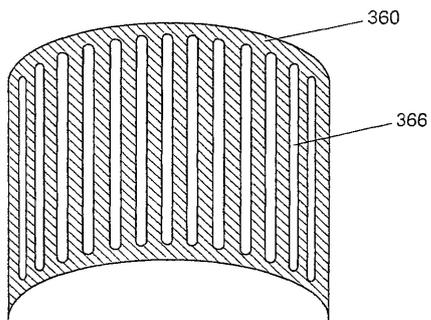
【 図 3 】



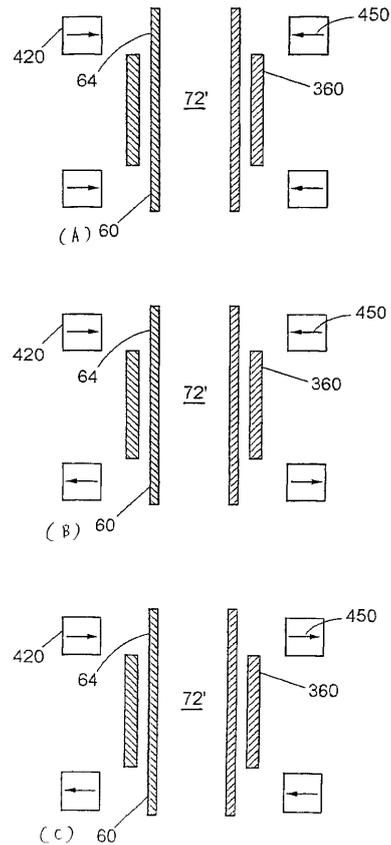
【 図 4 】



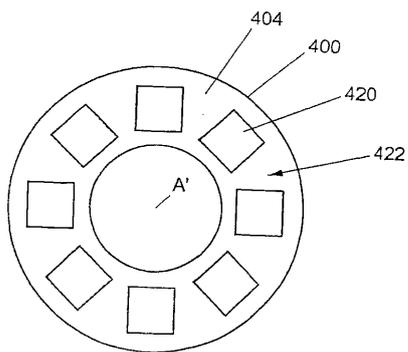
【 図 5 】



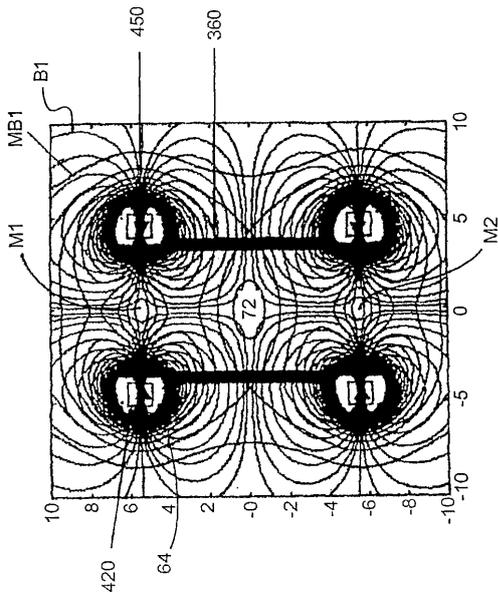
【 図 7 】



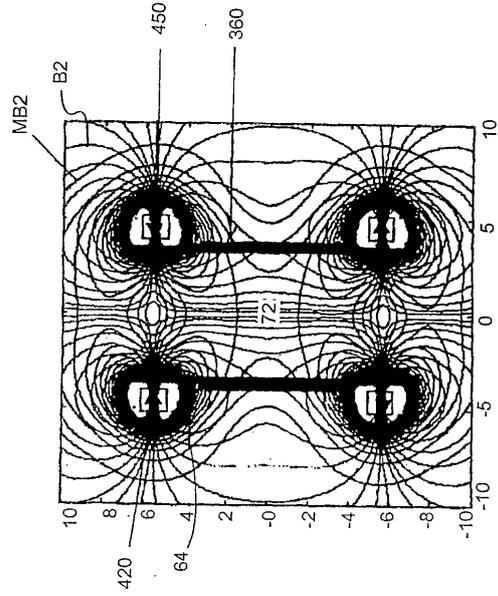
【 図 6 】



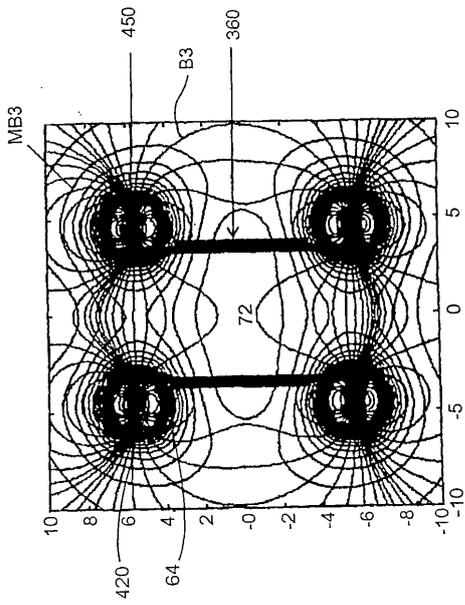
【 図 8 】



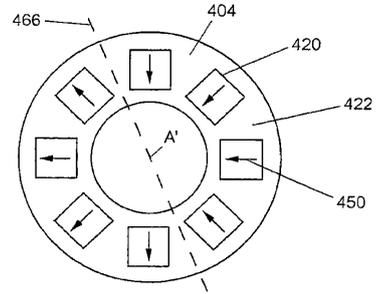
【 図 9 】



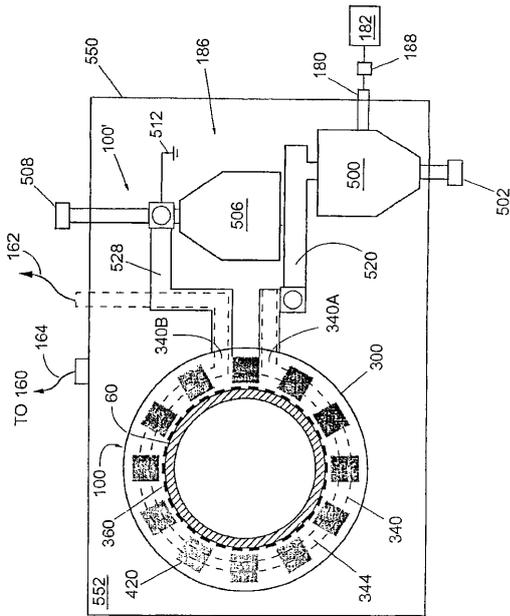
【 図 10 】



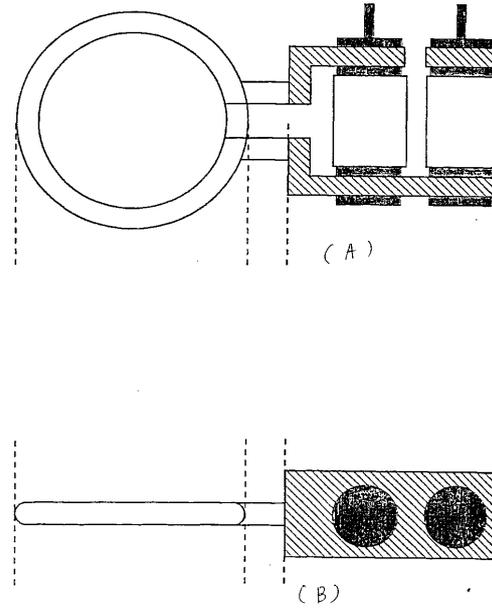
【 図 11 】



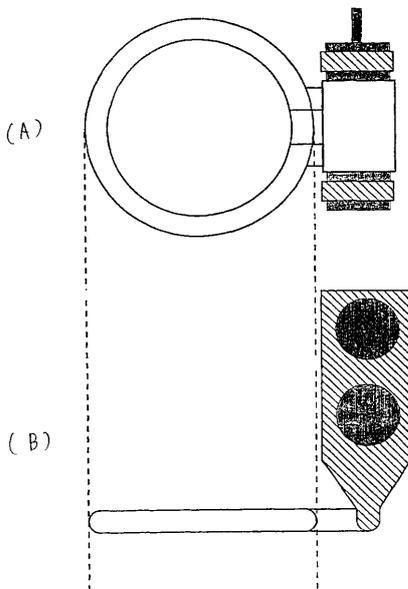
【 図 1 2 】



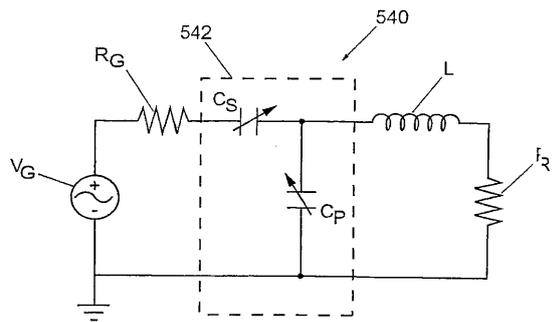
【 図 1 3 】



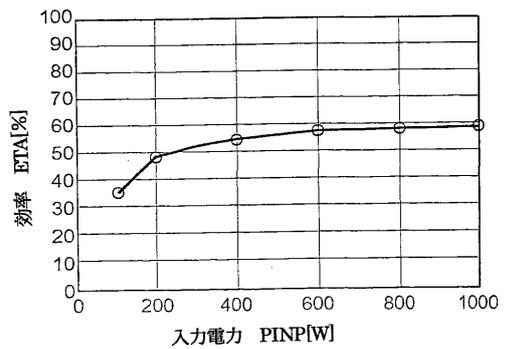
【 図 1 4 】



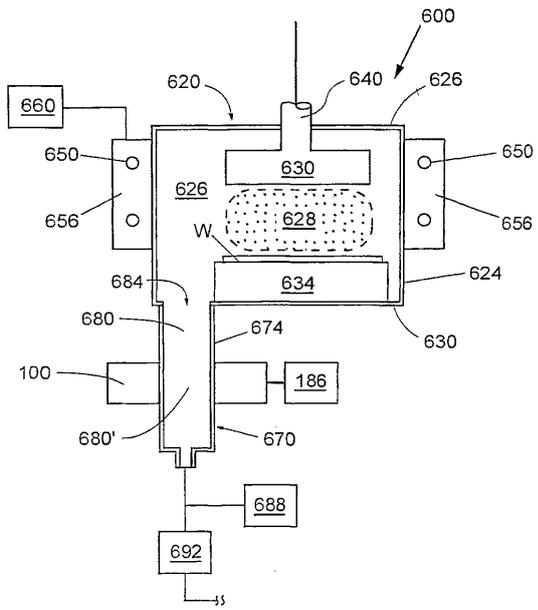
【 図 1 5 】



【 図 1 6 】



【 図 17 】



【国際公開パンフレット】

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

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
5 December 2002 (05.12.2002)

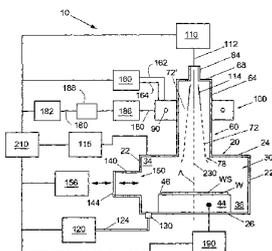
PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/097937 A1

- (51) International Patent Classification: **H01T 23/00**,  
C23F 102
- (21) International Application Number: PCT/US02/23080
- (22) International Filing Date: 25 March 2002 (25.03.2002)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data:  
60/277,965 23 March 2001 (23.03.2001) US  
60/277,965 23 March 2001 (23.03.2001) US
- (71) Applicant (for all designated States except US): **TOKYO ELECTRON LIMITED** (JP/JP); TBS Broadcast Center, 3-6 Akasaka 5-chome, Minato-ku, Tokyo 107-8481 (JP).
- (72) Inventors; and  
(75) Inventors/Applicants (for US only): **QUON, Bill, H.** [US/US]; 1020 East Sunburst Lane, Tempe, AZ 85284 (US). **JEVTIC, Jovan** [YU/US]; IGC Medical Advances, Inc., 10437 Innovation Drive, Milwaukee, WI 53225 (US). **ANTLEY, Sam** [US/US]; 3129 South Greenwood Circle, Mesa, AZ 85212 (US). **STRANG, Eric, J.** [US/US]; 1081 West Oriole Way, Chandler, AZ 85248 (US).
- (74) Agent: **CASEY, Michael, R.**; Oblon, Spivak, McClelland, Maier & Neustadt, P.C., Fourth Floor, Crystal Square Five, 1755 Jefferson Davis Highway, Arlington, VA 22202 (US).
- (81) Designated States (national): AF, AG, AI, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TH, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SI, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IL, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent

[Continued on next page]

(54) Title: INDUCTIVELY COUPLED HIGH-DENSITY PLASMA SOURCE



(57) Abstract: A high-density plasma source (100) is disclosed. The source includes an annular insulating body (300) with an annular cavity (316) formed within. An inductor coil (340) serving as an antenna is arranged within the annular cavity and is operable to generate a first magnetic field within a plasma duct (60) interior region (72) and inductively couple to the plasma when the annular body is arranged to surround a portion of the plasma duct. A grounded conductive housing (400) surrounds the annular insulating body. An electrostatic shield (360) is arranged adjacent the inner surface of the insulating body and is grounded to the conductive housing. Upper and lower magnet rings (422 and 424) are preferably arranged adjacent the upper and lower surfaces of the annular insulating body outside of the conductive housing. A T-match network is in electrical communication with said inductor coil and is adapted to provide for efficient transfer of RF power from an RF power source to the plasma. At least one plasma source can be used to form a high-density plasma suitable for plasma processing of a workpiece residing in a plasma chamber in communication with the at least one source.

WO 02/097937 A1

---

**WO 02/097937 A1** 

(BI, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NI, SN, TD, TG). *For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

**Published:**

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

WO 02/097937

PCT/US02/22080

**TITLE OF THE INVENTION****INDUCTIVELY COUPLED HIGH-DENSITY PLASMA SOURCE****CROSS-REFERENCE TO RELATED APPLICATIONS**

This application claims priority to U.S. Application Serial No. 60/277,966, filed on March 23, 2001 and U.S. Application Serial No. 60/277,965, filed on March 23, 2001. The contents of those applications are incorporated herein by reference.

**BACKGROUND OF THE INVENTION****Field of the Invention**

The present invention relates generally to plasma processing systems and methods, and in particular relates to inductively coupled high-density plasma sources suitable for use in a plasma processing system.

**Background of the Invention**

Ionized gas or "plasma" may be used during processing and fabrication of semiconductor devices, flat panel displays and other products requiring etching or deposition ("plasma processing") of materials. Plasma may be used to etch or remove material from semiconductor integrated circuit wafers, or sputter or deposit material onto a semiconducting, conducting or insulating surface. Creating a plasma for use in manufacturing or fabrication processes typically is done by introducing a low-pressure process gas into a chamber surrounding a workpiece, such as an integrated circuit (IC) wafer, that resides on a workpiece support member, more commonly referred to as a "chuck." The molecules of the low-pressure gas in the chamber are ionized into a plasma by a plasma source after the gas molecules enter the chamber. The plasma then flows over and interacts with the workpiece, which may be biased by providing RF power to the chuck supporting the workpiece.

To be most effective in plasma processing, the plasma preferably has a high-density (measured as the number of electrons or ions per cubic centimeter) and is uniform. High-density plasma processing can increase throughput and therefore increase production in semiconductor manufacturing. Furthermore, the plasma preferably has a small volume (thin and flat) so that the radicals in the process system have a short residence time. A short radical residence time permits control of the proper dissociation of radicals in the plasma volume for achieving high rate, selective etch in high aspect ratio etch features.

WO 02/097937

PCT/US02/22060

One type of plasma source that has been developed and commonly used is a parallel-plate, capacitively coupled plasma (CCP) source. Such a source uses radio-frequency (RF) power sources to generate the plasma through gas discharge. These power sources typically operate at 13.56 MHz, but can operate at other frequencies. Parallel-plate plasma sources usually have small gap spacing and small plasma volume. However, they typically generate low-density plasmas of less than  $10^{11}$  ions/cc which limits the etch rate.

Another type of plasma source is an electron cyclotron resonance ("ECR") source, which uses microwave (2.45 GHz) energy sources to generate a plasma having relatively high densities, on the order of  $10^{11}$  –  $10^{12}$  ions/cc and greater. Although an ECR source provides a relatively high plasma density and good control of ion energy, it requires in the plasma source a significant magnetic field, which is normally undesirable in the processing reactor. In addition, difficulties arise in generating uniform plasmas over large wafer areas.

A third type of plasma source is an inductively coupled plasma (ICP) source, which uses an inductively coupled radio-frequency power to generate the plasma. This type of plasma source provides for a relatively high plasma density ( $10^{12}$  ions/cc or greater) and operates with a radio-frequency source (typically 13.56 MHz). However, a shortcoming of conventional inductively coupled plasma sources is a non-uniform plasma density in the region above the substrate. The plasma volume is also very large, resulting in very long residence times for the radicals, which limits the etch rate.

A fourth type of plasma source is the Helicon plasma source, which uses a relatively constant volume magnetic field. It is capable of generating a very high density ( $10^{13}$  ions/cc) and operates with a radio-frequency source (typically 2-30 MHz). The Helicon source requires propagation and damping of the low frequency whistler wave in a system with minimum length greater than one half of the propagating wavelength. In short systems, the plasma generating efficiency is usually reduced drastically.

For those prior art systems capable of producing a high-density plasma (in excess of  $10^{12}$  ions/cc), efficiency is generally sacrificed in producing plasma in a small volume. This inefficiency makes high-density plasma processing a costly proposition for manufacturing purposes.

#### **BRIEF SUMMARY OF THE INVENTION**

The present invention relates generally to plasma processing systems and methods, and in particular relates to an inductively coupled high-density plasma source suitable for use in a plasma processing system.

WO 02/097937

PCT/US02/22060

A first aspect of the present invention is a high-density plasma source that includes an annular insulating body having an upper surface, a lower surface, a cylindrical inner surface and a first central axis. An annular cavity is formed within the insulating body having a second central axis that coincides with the first central axis. A single inductor coil that serves as an antenna is arranged within the annular cavity and is operable to generate a first magnetic field within a plasma duct interior region and inductively couple to the plasma formed therein when the annular body is arranged around a portion of the plasma duct. A grounded conductive housing surrounds the annular insulating body, and an electrostatic shield is arranged adjacent the insulating body inner surface and is grounded to the conductive housing. A T-match network is in electrical communication with the inductor coil. The T-match network includes first and second variable capacitors that are tunable to provide for efficient transfer of RF power from the inductor coil antenna to the plasma.

In a second aspect of the present invention, the above-described plasma source includes a first plurality of spaced apart magnets arranged in a first concentric magnet ring adjacent the insulating body upper surface, and a second plurality of spaced apart magnets arranged in a second concentric magnet ring adjacent the insulating body lower surface.

A third aspect of the invention is a plasma reactor system for processing a workpiece. The system comprises a plasma reactor chamber having a central axis, an upper wall and sidewalls surrounding a first interior region capable of supporting a plasma. At least one plasma duct is attached to the upper wall and/or to the sidewall of the reactor chamber. The plasma ducts each have duct sidewalls that enclose second interior regions that are in communication with the plasma reactor chamber interior region. Plasma sources, as described briefly immediately above and in more detail below, surround a portion of each plasma duct, and define plasma generation regions within each second region. A chuck is arranged opposite the upper wall and supports a workpiece to be processed.

A fourth aspect of the invention is a method of forming a high-density plasma in an interior region of a plasma chamber. The method includes the steps of injecting plasma gas into a plasma generation region of a plasma duct that is in communication with the chamber interior region. The next step involves providing RF power through a T-match network to a single annular inductor coil surrounding the plasma generation region, thereby generating a first magnetic field within the plasma generation region. The next step includes measuring an amount of reflected power reflected from the inductor coil passing back through the T-match network. The last step involves adjusting the capacitance of the T-match network so as to minimize the amount of reflected power.

WO 02/097937

PCT/US02/22060

As the plasma uniformity requirements are more critical for still larger wafer size, it is desirable to use a plurality of smaller plasma sources, with individual plasma density control to form a high-density plasma uniformly distributed over a large region above the substrate.

#### **BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS**

FIG. 1A is a schematic cross-sectional diagram of a plasma reactor system with a single plasma source of the present invention;

FIG. 1B is a plan view of a plasma reactor system with multiple plasma sources of the present invention arranged in a disk configuration atop the plasma chamber;

FIG. 1C is a schematic cross-sectional diagram of a plasma reactor system of FIG. 1B, showing the flow of plasma toward the chuck;

FIG. 1D is a plan view of a plasma reactor with multiple plasma sources of the present invention arranged in a ring configuration surrounding the reactor chamber, showing the flow of plasma toward the chuck;

FIG. 1E is a schematic cross-sectional diagram of the plasma reactor system of FIG. 1D;

FIG. 2 is a cross-sectional schematic diagram of the plasma source of the present invention showing the upper and lower magnet rings enclosed in separate housings;

FIG. 3 is a perspective view of a portion of the cylindrical electrostatic shield used in the plasma source of FIG. 2;

FIG. 4 is a plan view of the plasma source of FIG. 2 with the upper magnet housing removed to illustrate the annular arrangement of the magnets making up the upper magnet ring;

FIGS. 5A-5C are close-up cross-sectional diagrams of the plasma source of FIG. 2 showing just the plasma duct wall, the electrostatic shield, and the magnets in the upper and lower magnet rings, illustrating the three different magnet configurations;

FIGS. 5D-5F illustrate the magnetic fields corresponding to the magnet configurations of FIGS. 5A-5C, respectively;

FIG. 5G is a plan view of the magnetic configuration of the upper magnet ring for the magnetic configuration shown in cross-section in FIG. 5C;

FIGS. 6A is a schematic plan view of the plasma source of the present invention showing a preferred embodiment for an enclosure that surrounds the plasma source and the match network;

WO 02/097937

PCT/US02/22060

FIG. 6B is a schematic plan view of the plasma source of FIG. 6A with the variable capacitors arranged so that the system has a minimum axial dimension;

FIG. 6C is a cross-sectional view of the system of FIG. 6B;

FIG. 6D is a schematic plan view of the plasma source of FIG. 6A with the variable capacitors arranged so that the system has a minimum radial dimension;

FIG. 6E is a cross-sectional view of the system of FIG. 6D;

FIG. 7 is a schematic circuit diagram of the T-match network of the plasma source of FIGS. 6A, 6B and 6D;

FIG. 8 is a plot of plasma source efficiency vs. the amount of RF power provided to the inductor coil for the plasma source of the present invention, illustrating the efficiency of the plasma source of the present invention; and

FIG. 9 is a cross-sectional schematic diagram of a plasma reactor system in which the plasma source of the present invention is used as an exhaust abatement system.

#### **DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS**

The present invention relates generally to plasma processing systems and methods, and in particular relates to inductively coupled high-density plasma sources suitable for use in a plasma processing system.

With reference now to FIG. 1A, there is shown a plasma reactor system 10 that includes a reactor chamber 20 having an outer wall 22, an upper wall 24 and a lower wall 26 that enclose an interior region 30. Interior region 30 includes an upper interior region 34 closest to the upper wall, and a lower interior region 36 adjacent the upper region. Chamber 20 may be constructed of various materials, including stainless steel, aluminum, metal alloys, or various ceramics. The use of stainless steel or aluminum allows for effective chamber cooling and can reduce reactions between the plasma and the plasma chamber. The use of ceramic materials reduces dissipation of radio-frequency electromagnetic waves into walls 22 of plasma chamber 24. Considerations of the particular application of system 10 dictates which material is best suited for that application. A preferred embodiment of the present invention employs a cylindrical metallic chamber with a central axis A.

Residing in interior region 30 adjacent lower wall 26 is a workpiece holder or "chuck" 44 having an upper surface 46 capable of supporting a workpiece W to be plasma processed. Workpiece W has an upper surface WS. The size of chamber 20 depends on the size of the particular workpieces W to be processed, as the chamber must be large enough so that the plasma generated will cover the entire portion of the workpiece. For example, if workpiece W

WO 02/097937

PCT/US02/22080

is an eight-inch semiconductor wafer, the plasma generated within chamber 20 must have a large enough diameter (e.g. over 6 inches) to uniformly cover the full diameter of the semiconductor wafer.

Attached to upper wall 24 of chamber 20 and aligned with central axis A is a cylindrical duct 60 having an outer wall 64 and an upper wall 68 enclosing an interior region 72. The latter is in communication with interior region 30 via an aperture 78 formed in plasma chamber upper wall 24. Plasma duct upper wall 68 includes a gas inlet port 84 to which can be connected a gas source. Plasma duct 60 is preferably quartz (e.g., a quartz tube) or similar non-reactive material, such as glass or a ceramic material such as sapphire, or alumina, suitable for serving as a conduit for plasma to enter interior region 30 of chamber 20. Surrounding a portion of plasma duct 60 is electrostatically shielded radio frequency (ESRF) antenna 90, discussed in greater detail below. Duct 60 and ESRF antenna 90 constitute part of a plasma source 100 of the present invention, discussed in greater detail below.

With continuing reference to FIG.1, system 10 further includes a gas source 110 in pneumatic communication with interior region 72 via a gas line 112 connected to gas inlet port 84, for providing a gas 114 into the plasma duct interior region. Gas source 110 may provide an ionizable carrier gas, such as Argon, capable of being formed into a suitable plasma. A reactive process gas, such as Oxygen,  $CF_4$ , HBr, and Cl, may be injected to the reactor chamber via a gas distribution system 115 in pneumatic communication with chamber interior region 30. Addition of process gas directly to interior region 30 of process chamber 20 through gas distribution system 115 (rather than through plasma duct 60) can lead to a reduced degree of dissociation, generally preferred for oxide etch applications. However, for other chemistries, a more highly dissociated process gas may be desirable. In such cases, gas distribution system can be in pneumatic communication with interior region 72 of duct 60. The particular gas used depends on the material (e.g., polysilicon, copper, aluminum or silicon dioxide) making up workpiece surface WS to be processed.

System 10 also includes a vacuum system 120 in pneumatic communication with chamber interior region 30 via a vacuum line 124 connected to a vacuum port 130 located in lower wall 26. A vacuum can be drawn by a variety of vacuum systems, the particular system depending on the desired pressure in interior region 30. In a preferred embodiment of the present invention, vacuum system 120 includes a turbomolecular pump and an electro-mechanical gate valve (not shown) between the pump and chamber 20 that is capable of being remotely operated via an electrical signal from a controller. Vacuum system 120 and

WO 02/097937

PCT/US02/22080

gas supply system 110 together are capable of reducing the pressure in chamber 20 to within the range of approximately 1 mTorr to 1 Torr, depending on the application.

System 10 further includes a workpiece load chamber 140 having a sealable door 144, attached to plasma chamber 20 near chuck 44. Chamber 140 is in communication with interior region 30 through an aperture 150 in wall 22. Door 144 is sized to allow a workpiece W to be placed into workpiece load chamber 140. Also included is a workpiece handling system 156 in operable communication with load chamber 140 and chuck 144 for transporting workpieces W to and from the chuck through the load chamber.

Also included in system 10 is a cooling system 160 fluidly connected, via cooling in-line 162 and cooling out-line 164, to the plasma source 100, for cooling the plasma source during the plasma generation process. Cooling system 160 is discussed in greater detail below.

Also connected to the plasma source 100 via a power line 180 is a RF power supply 182 for providing RF power to the plasma source. A match network 186 is provided between RF power supply 182 and ESRF antenna 90 for providing an impedance match to the plasma, as described further below. A power meter 188 capable of measuring forward and reflected power is arranged between RF power supply 182 and match network 186, for measuring the amount of RF power provided to and reflected from plasma source 100.

System 10 may also include a chuck RF power source 190 in electrical communication with chuck 44 for biasing the chuck so that ionized gas may be drawn toward workpiece W during plasma processing.

System 10 further includes a main control system 210 electrically connected to chuck RF power supply 190, plasma source RF power supply 182, cooling system 160, workpiece handling system 156, vacuum system 120, gas supply system 110 and gas distribution system 115. Control system 210 controls and coordinates the operation of the above-mentioned systems through respective electrical signals.

With continuing reference to FIG. 1A, system 10 operates as follows. Control system 210 initiates the placement of workpiece W onto upper surface 46 of chuck 44 through load chamber 140 via workpiece handling system 156. Control system 210 then activates vacuum system 120 to pump down interior region 30 of chamber 20. Once the pressure of interior region 30 is reduced to a certain level (e.g.,  $10^{-8}$  to  $10^{-4}$  Torr), control system 210 initiates the flow of gas from gas supply system 110 and/or gas distribution system 115 into interior region 72 of plasma source 100 and/or interior region 30 of chamber 20. At about the same time, control system 210 activates RF power supply 182 to activate ESRF antenna 90. As gas

WO 02/097937

PCT/US02/22060

114 flows through interior region 72, the gas is ionized, thereby forming a plasma gas ("plasma") 230. The portion of interior region 72 wherein plasma 230 is formed is called the plasma generation region, and is denoted by 72'. Reactive species of the process gases are formed in interior region 30 of reactor chamber 20 by dissociation of the process gases in the expanding plasma. Control system 210 then optionally activates chuck RF power supply 190 to bias chuck 44. Plasma 230 flows toward workpiece W via diffusion, and interacts with upper surface WS workpiece. Spent plasma 230 and other gaseous products produced during plasma processing are ultimately exhausted from interior region 30 by vacuum system 120.

The uniformity of the expanding plasma in the region of workpiece W is often limited to the workpiece's central region for larger workpieces. Accordingly, as shown in FIGS. 1B and 1D for a large workpiece, multiple plasma sources (100A, 100B, ... 100N) may replace the single plasma source of FIG. 1A. In the embodiment of FIG. 1B, the plasma sources are arranged in a disk configuration on upper wall 24 may be used to generate a uniform plasma 212 (as shown in FIG. 1C) near the surface of the workpiece. Alternatively, for CVD or PECVD reactors in which the top surface area (e.g., upper wall 24 of chamber 20; see FIG. 1A) is not available, the multiple compact sources (100A, 100B, ... 100N) can be arranged in the cylindrical wall (e.g., outer wall 22 of chamber 20) in a ring configuration, as shown in FIGS. 1D and 1E. In both configurations, each individual plasma source 100A, 100B, ... 100N has its own gas feed line 112, RF power generator 182 and match network system 186 for full control of the plasma density and chemistry.

#### *The compact plasma source*

With reference now to FIG. 2, compact plasma source 100 of the present invention is now described in greater detail.

Plasma source 100 comprises an annular block 300 of insulating material having an inner surface 304, an outer surface 306 and an axis of rotation A' that is aligned with central axis A of chamber 20 when the plasma source is incorporated into system 10. Annular block 300 is preferably made of TEFLON<sup>®</sup> or like non-conducting material, and is preferably formed from two separate blocks that are pieced together in the middle. Within block 300 is formed an annular inductor coil channel 316 having A' as its axis of rotation. Further included within block 300 are one or more coolant channels 324 connected to inductor coil channel 316 and that extend toward axis A'.

Arranged within inductor coil channel 316 and mechanically constrained therein is an inductor coil 340 that constitutes a single loop antenna, identified above in FIG. 1A as ESRF

WO 02/097937

PCT/US02/22080

antenna 90. Inductor coil 340 is made from conducting material, and is preferably copper. Inductor coil 340 is in the form of a tube having an interior 344 through which a dielectric cooling fluid, such as FLOURINERT<sup>®</sup>, can flow. Coil 340 includes apertures 348 incrementally positioned along its length so as to provide fluid communication between coolant system 160, coil 340 and coolant channels 324. Coil 340 is electrically connected to match network 186 and plasma source RF power supply 182 via power line 180 (FIG. 1A). As described below, coolant lines 162 and 164 connect coolant system 160 to inductor coil 340.

With reference now also to FIG. 3, arranged adjacent interior surface 304 is an electrostatic shield 360 (also referred to as an E-shield or Faraday shield) comprising an electrically grounded, cylindrical conductive sheet with slots 366 aligned parallel with axis A' (i.e., in the vertical or y-direction). Slots 366 may either be fixedly spaced (e.g., at equal distances) or may be spaced apart using a slideable grouping of shields. (One embodiment of slideable shields is disclosed in PCT/US98/21623, which is incorporated herein by reference in its entirety.) With reference again to FIG. 2, electrostatic shield 360 serves to minimize capacitive coupling between inductor coil 340 and plasma 230 formed within plasma generation region 72' by limiting the area through which the electromagnetic field from the coil can couple to the plasma. The role of an electrostatic shield as part of a plasma source is discussed in U.S. Patent No. 5,234,529, which patent is incorporated by reference herein. When plasma source 100 is in place around plasma duct 60, electrostatic shield 360 resides between interior surface 304 of block 300 and wall 64 of the plasma duct. It is preferred that sufficient space (not shown) be provided between inner surface 304 and wall 64 so that cooling fluid can flow over electrostatic shield 360 and wall 64 to cool the portion of plasma duct 60 surrounded by plasma source 100.

Plasma source 100 further includes a housing 400 having an upper surface 404 and a lower surface 406 that surrounds block 300. Housing 400 is preferably made of a conductor, such as metal (e.g., copper), so that the housing can be grounded. Electrostatic shield 360 is electrically connected to housing 400 at its upper and lower edges so that the electrostatic shield is also grounded. Housing 400 may include seals 416 (e.g., O-rings) on upper surface 404 and/or lower surface 406 so that other apparatus can be mounted to the housing in a sealed manner.

*The magnets for the plasma source*

WO 02/097937

PCT/US02/22080

With reference now also to FIG. 4, plasma source 100 also optionally includes a plurality of magnets 420 arranged adjacent upper surface 404 and/or lower surface 406. Magnets 420 are preferably permanent (i.e., fixed or "DC" field) and in the form of blocks arranged in annular ring fashion above and below inductor coil channel 316, thus forming an upper magnet ring 422 and a lower magnet ring 424, respectively. Magnets 420 may alternatively be electromagnets. In FIG. 4, upper magnet ring 422 is shown as having eight magnets. In an exemplary embodiment, plasma source 100 includes between 16 and 24 magnets between upper magnet ring 422 and lower magnet ring 424. Such magnets may be evenly or spaced varying separations therebetween. Magnets 420 may be included within housing 400, or may be housed in a separate sealed housing 430, as shown in FIG. 2. The role of magnets 420 is to create a local magnetic field adjacent plasma generation region 72' that affects the behavior of plasma 230 to achieve a desired result (e.g., increased efficiency, a high plasma density or a preferred plasma flow direction). Magnets 420 are typically required as part of plasma source 100 to generate a plasma density of  $10^{13}$  ions/cc or higher, and generally increase the plasma density by about a factor of 3X as compared to when magnets are not used. The plasma density increase is a result of magnetic confinement for the energetic electrons in the tail of the electron energy distribution function (EEDF), which are responsible for ionization of the neutral gas.

With reference now to FIGS. 5A-5C, there are shown three different magnetic configurations for magnets 420, with the magnetic orientation given by arrow 450 (the arrowhead represents the magnet's north pole). The magnetic field lines for the three configurations illustrated in FIGS. 5A-5C are indicated in FIGS. 5D-5F, respectively. The modulus contours of the magnetic field (mod-B) are indicated by contour lines MB1, MB2, and MB3, respectively. Note that magnetic field lines B1, B2, and B3 are relatively localized, having their greatest strength at the respective margins of plasma generation region 72'.

With reference to FIGS. 5A and 5D, there is shown what is called the ring-cusp configuration, wherein all magnets 420 in the upper and lower magnet rings 422 and 424 are oriented such that their north pole is directed radially inwards. The field lines B1 in FIG. 5D represent a ring-cusp magnetic field topology. There is a minimum-field region in the mid-plane near the axis of the plasma duct, encircled by the nested close mod-B contour lines. The so-called minimum-B configuration provides a stable magnetic confinement for the plasma. Such a configuration provides for the highest plasma density (on the order of  $10^{13}$  ions/cc or greater). However, in a ring-cusp configuration, magnetic field lines B1 are such that the plasma ions (e.g., plasma 230 of FIG. 1A) are not tightly confined and tend to interact with

WO 02/097937

PCT/US02/22060

wall 64 of plasma duct 60. This can result in material being sputtered from wall 64. A typical ring-cusp configuration produces a magnetic field strength of approximately 50 Gauss near the region of the ESRF antenna. Notice that there are two secondary minimum-B regions M1 and M2 shown in FIG. 5D; one near the top magnet array (M1) and one near the bottom magnet array (M2). These local minima also help create a high density plasma in the plasma duct.

With reference now to FIGS. 5B and 5E, there is shown what is called the mirror-field configuration, wherein the magnetic moments of all of magnets 420 in upper magnet ring 422 are oriented with their north pole directed radially inwards, while all of the magnets in the lower magnet ring 424 are oriented with their north pole directed radially outwards. Of course, the magnet pole orientations of the respective magnet rings may be reversed to provide the same effect. The field lines B2 in FIG. 5E represent a magnetic mirror field topology. In the mirror-field configuration, magnetic field lines B2 have a significant longitudinal (i.e., axial) component. This serves to protect wall 64 of plasma duct 60 from sputtering. However, the plasma density in the mirror configuration is reduced by approximately 25% from that possible with the ring-cusp configuration of FIG. 5A. A typical mirror-field configuration produces a minimum magnetic field strength of approximately 300 Gauss. The local minimum-B regions in the mirror configuration are found to have the highest plasma density.

With reference now to FIG. 5C, 5F and 5G, there is shown what is called the dipole configuration, wherein half of magnets 420 in each magnet ring 422 and 424 are oriented with their north poles directed radially inward, while the other (opposing) half of the magnets in the ring are oriented with north poles directed radially outward. Dashed line 466 in FIG. 5G represents the dividing line between the portions of ring 422 having the different magnetic orientations. In yet another embodiment, the magnets in any one ring may also be configured N, S, N, S, etc. with adjacent rings either being aligned such that a N magnet is above another N magnet, or such that an N magnet is above an S magnet. In either such alternative embodiment, the spacing between adjacent opposing magnets in the same ring is preferably increased as compared to rings where several like magnets are adjacent each other (e.g., see Figure 5G).

The illustrated dipole configuration has magnetic field lines B3 that extend primarily across a transverse plane above and/or below plasma generation region 72'. Such a magnetic field orientation provides for electron confinement within plasma generation region 72', while not strongly confining the heavier ions to this region. The magnetic field orientation in

WO 02/097937

PCT/US02/22080

upper magnet ring 422 results in magnetic field lines B3 that can isolate plasma generation region 72' from gas inflow from gas inlet port 84 or process reactor effluent inlet flow (not shown). Likewise, the magnetic field orientation in lower magnet ring 424 may be utilized to isolate plasma generation region 72' from components (i.e. vacuum pumps) downstream of the plasma generation region. Alternatively, both upper and lower magnet rings 422 and 424 may be utilized in combination to isolate plasma generation region 72' entirely. Electrons from plasma source region 72' can only diffuse (via electron-neutral collisions) into interior region 30 of reactor chamber 20 across magnetic field B3. Such magnetic isolation is desirable for controlling the plasma. Because the fast electrons (with energy in excess of 10-30 eV) are reflected by the local magnetic field, the diffused plasma includes only low energy electrons with a temperature of about 1 eV. This property can be used in forming large uniform plasma with controllable electron energy distribution function (EEDF).

#### *The match network*

In one embodiment of the plasma source of the present invention, a match network, as described below, is also included. (Such match network is preferable, but not required, for use with the plasma source of the present invention.) Accordingly, with reference now to FIG. 6A and also again to FIG. 1A, plasma source 100 is connected to a match network 186, which is in electrical communication with inductor coil (i.e., ESRF loop antenna) 340 via RF power line 180, and also to RF power supply 182. Power meter 188, arranged between RF power supply 182 and match network 186 measures the amount of power provided to and reflected from plasma source 100. Together, plasma source 100 and match network 186 form a plasma source 100'.

Match network 186 includes a first variable capacitor 500 electrically connected to RF power line 180 and to a first capacitor controller 502 that is used to vary the capacitance of the first variable capacitor 500. The first variable capacitor 500 is electrically connected to an inductor coil 340. Match network 186 further includes a second variable capacitor 506 electrically connected to a second capacitor controller 508 that is used to vary the capacitance of the second variable capacitor 500. The second variable capacitor 506 is electrically connected in parallel with inductor coil 340 and to the output node of the first variable capacitor 500, and has a grounded end 512. The topology of match network 186 is a so-called "T-match network," and is schematically illustrated in FIG. 7.

In FIG. 7, T-match network circuit 540 comprises a voltage source  $V_G$ , which is plasma source RF power supply 182. Connected in series with voltage source  $V_G$  is a resistor

WO 02/097937

PCT/US02/22080

$R_G$ , which represents the impedance of plasma source RF power supply 182. The "T" part of circuit 540, as indicated by the dashed box 542, includes an arrangement of first and second variable capacitors  $C_S$  (S for "series") and  $C_P$  (P for "parallel"), which correspond to first and second variable capacitors 500 and 502, respectively. Further included in circuit 540 are an inductor L and a resistor R, which represent the load impedance of inductor coil 340 (typically between 0.1 and 0.2 Ohms) as well as the impedance of plasma 230 created in plasma generation region 72'.

With reference again to FIG. 6A, in a preferred embodiment of the present invention, inductor coil 340 is designed to have first and second ends 340A and 340B. First end 340A is connected to line 520 to which first and second variable capacitors 500 and 506 are connected. Second end 340B is connected to a line 528, which is also connected to grounded end 512 of second variable capacitor 506. This is a preferred implementation of the T-match network configuration. With reference to FIGS. 6B and 6C, the first and second variable capacitors 500 and 506 are physically arranged in plane P of inductor coil 340 for minimum axial extent. Alternatively, with reference to FIGS. 6D and 6E, they can be mounted perpendicular to plane P for minimum extent in the radial dimension.

*Operational efficiency of plasma source and match network combination*

For a single loop antenna with a relatively small diameter, the antenna series resistance  $r$  (including the resistance of the copper coil and that of the plasma) is usually very small. The power  $P$  delivered to the resistive load equals:  $P=i^2r$ , where  $i$  is the RMS current through the load. Clearly, a very large RF current through the load is required in order to achieve a significant amount of power. Consequently, the circuit resistance must be minimized so the delivered power is mostly used for plasma generation. This can be achieved by placing the capacitor  $C_P$  across the load as close to the load as possible. The capacitor itself must also contain as little series resistance as possible. The value of the capacitance should be chosen such that a resonant circuit with the loop inductance  $L$  (including what may be contributed from the plasma) is satisfied at the RF source frequency:

$$\omega^{-2} = L(C_S + C_P), \quad (1)$$

which follows from the fact that  $C_S$  is connected in parallel with  $C_P$  and both are in series with the load.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

The capacitor  $C_p$  also serves as the shunt capacitor for the impedance transformer between the RF power generator and the load, so the current passing  $C_s$  is

$$i_s = C_s / (C_s + C_p) i \quad (2)$$

The power dissipated in the load is then given by

$$P = i_r^2 r = i_s^2 R \quad (3)$$

where  $R$  is the input impedance of the circuit in FIG. 7. Substituting (2) into (3), the input impedance  $R$  is given by:

$$R = [(C_s + C_p) / C_s]^2 r \quad (4)$$

Thus, by tuning  $C_p$  and  $C_s$  of T-match network 540 for the applied RF frequency  $\omega$  to match the input impedance and output impedance of the power generator  $R_g$ ,  $R = R_g$ , an ideal match is realized.

Note that in T-match network 540 of FIG. 7, elements  $L$  and  $R$  include contributions from the antenna and the plasma. Before the plasma is turned on,  $L$  and  $r$  are simply the antenna inductance and the resistance of the circuit, respectively. There is always power dissipation in the circuit alone. Shortening the path length of the closed circuit loop ( $L$ ,  $C_p$ ,  $R$ -circuit loop) reduces the circuitry loss. Moreover, a low loss vacuum capacitor is preferably used for  $C_p$ , and the circuit is preferably kept cool to reduce the resistivity of the conductor in the circuit and the joints.

When the plasma is turned on, the plasma acts as a single-turn secondary of an equivalent transformer terminated by a plasma resistance. The presence of the plasma thus modifies the circuit inductance  $L$  and resistance  $r$ . Therefore adjustment for  $C_s$  and  $C_p$  must be made to achieve a good match for the desired plasma condition. The efficiency of the T-match circuit in FIG. 7 can be determined in a simple and elegant manner. The efficiency  $\eta$  is defined herein as the fraction of the total input power  $P$  to the power actually absorbed in the plasma  $P_{abs}$ , viz.

$$\eta = P_{abs} / P = r_{plasma} / (r_{circuit} + r_{plasma}) \quad (5)$$

WO 02/097937

PCT/US02/22060

The load resistance  $R_{\text{circuit}} = (r_{\text{circuit}} + r_{\text{plasma}})$  is related to the match input resistance  $R_g$  by Equation (4), which is rewritten as

$$R_g = 50 \Omega = K (r_{\text{circuit}} + r_{\text{plasma}}), \quad (6)$$

where  $K$  stands for the square of the capacitance ratio in Equation (4). In order to determine  $r_{\text{circuit}}$  and  $r_{\text{plasma}}$  separately, one can now, without disturbing the capacitor setting, turn off and disconnect the RF power generator from the match. The input resistance of the antenna circuit can then be measured by an impedance meter, viz.

$$R_{\text{circuit}} = K r_{\text{circuit}}. \quad (7)$$

Consequently, we obtain the efficiency as follows:

$$\eta = P_{\text{aps}}/P = r_{\text{plasma}} / (r_{\text{circuit}} + r_{\text{plasma}}) = 1 - R_{\text{circuit}}/R_g. \quad (8)$$

Strictly speaking, since the resonance frequency changes slightly when the plasma is turned off, the measured impedance  $R_{\text{circuit}}$  is not exactly correct. However, as we can see from Table 1, below, this frequency difference is so small as to be of no consequence to the measurement accuracy.

Table 1 below illustrates the plasma source efficiency for different input RF power levels input to the plasma source 100'. The chart illustrates that the efficiency increases with the RF power level from 102 Watts to 1000 Watts of input power  $P_{\text{inp}}$ .

In the table,  $R$  is the input impedance of the circuit measured with plasma turned off and  $R_G = 50 \Omega$  is the generator resistance (output impedance), which equals to the matched input resistance for the circuit with plasma on, as discussed above in connection with FIG. 7. The data in Table 1 are plotted in FIG. 8. Notice that the measured circuit resonance frequency is only slightly (0.5 MHz) deviated from the applied frequency of 27.12 MHz, the circuit quality factor  $Q$  is nearly the same. The error in measuring  $R$  is estimated to be about 1% based on the quality factor measurements. The plasma density in the compact plasma source is about  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  for 500 W applied power as measured using a Langmuir probe.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

At 1000 W, the measured plasma density is  $1-1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , at pressure 1- to 20 m Torr in Argon gas.

TABLE 1. Input RF signals and corresponding efficiencies for the plasma source and T match network of the present invention

Input power $P_{in}$ [W]	After the plasma is extinguished		Efficiency $\eta = 1 - R/R_g$ [%]
	Resonant frequency $f$ [MHz]	Input resistance $R$ [ $\Omega$ ]	
102	27.007	32.4	35.2
200	26.910	26.2	47.6
300	26.850	24.1	51.8
398	26.833	23.2	53.6
600	26.794	22.0	56.0
803	26.787	21.5	57.0
1,000	26.713	21.1	57.8

When compared to an L-type matching network commonly used for inductively coupled plasma (See, e.g., M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, "Principles of plasma discharges and materials processing", Jon Wiley & Sons, Inc.), the T-match has four distinct advantages - higher efficiency, larger tuning range, smaller capacitances and smaller capacitors (physical dimensions). These will now be explained in turn.

#### Efficiency

In a L-match, the large RF current circulates through the series connection of  $L$ ,  $C_s$  and  $C_p$ , where  $C_s \gg C_p$ . Thus, not only does it flow through both capacitors, but the bulkiness of the capacitors makes the interconnections relatively long, causing resistive losses along the way. On the other hand, the large RF current in a T-match is contained in the loop formed by  $L$  and  $C_p$ . If the parallel capacitor is placed in the immediate vicinity of the load, the lead lengths can be made very short. Furthermore, the RF current flowing through the capacitor  $C_s$  is smaller than the RF current through the load, and consequently, the losses are much smaller.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

*Matching range*

The resistance transformation equation for L match is given by:

$$r = \frac{1}{\omega^2 C_p^2 R_g} . \quad (9)$$

For a T-match the equivalent equation is given by:

$$r = \omega^4 L^2 C_s^2 R_g . \quad (10)$$

We can see from Equations (9) and (10) that matching very low resistance  $r$  with a L-match requires very large shunt capacitor  $C_p$ , while a T-match, on the contrary, requires very small series capacitor  $C_s$ .

*Capacitor values*

Because  $C_p$  is usually much larger than  $C_s$  in both L and T matching networks, the resonance conditions are determined primarily by the values of  $C_s$  in the L-match and  $C_p$  in the T-match:

$$C_s^{L-match} \cong C_p^{T-match} \cong \frac{1}{\omega^2 L} . \quad (11)$$

Since these two capacitors have comparable values in both matching networks, it is possible to write:

$$C_p^{L-match} \geq C_s^{L-match} \cong C_p^{T-match} \geq C_s^{T-match} . \quad (12)$$

Thus, a T-match uses smaller capacitors than a L-match. In practice, a trim capacitor having a capacitance range of 3 to 30 pF has been inserted in parallel with a capacitor having a capacitance range of 8 to 1000 pF to serve as the parallel capacitor  $C_p$ . A capacitor having a range of 3 to 30 pF has been employed as the series capacitor  $C_s$ .

*Incorporation of coolant system into match network*

WO 02/097937

PCT/US02/22080

In order to increase the plasma production efficiency, the circuit resistance is minimized by incorporation of coolant system 160 (FIG. 1A) into match network 186. With reference again to FIG. 6A, incorporated into match network 186 is coolant in-line 162 that supplies a coolant to interior 344 of inductor coil 340. As described above in connection with FIG. 1A, the coolant flows out of inductor coil 340 through apertures 348 and through coolant channels 324. FIG. 6A illustrates a preferred embodiment of the invention in which an enclosure 550 surrounds both plasma source 100 and a portion of match network 186 within a volume 552. Enclosure 550 also can serve to replace housing 400 described above in connection with FIG. 2. A preferred design also allows the coolant to circulate within volume 552 to cool plasma source 100 and match network 186. The coolant is then removed via coolant out-line 164. As an alternative to this preferred embodiment, match network 186 can reside in its own housing (not shown) that can be sealed to housing 400 (FIG. 2).

The step of cooling plasma source 100 or a portion thereof using the arrangements described above serves to keep the resistance of the various circuit elements low so that the impedance is minimized. For example, while the resistance of inductor coil 340 is normally between 0.1 and 0.2 Ohms, it can get as high as 0.5 Ohms if the temperature of the coil is allowed to get too high. Likewise, variable capacitors 500 and 506 can also have an increased resistance if their temperature is not controlled. Further, the cooling of plasma source 100 generally is necessary because of the large amounts of heat generated in forming the plasma. Subjecting the various components making up plasma source 100 to such large amounts of heat can reduce their lifetime or cause the components to prematurely fail.

*Plasma source as an abatement system*

Plasma source 100 of the present invention can also be used as an abatement system to reduce, for instance, perfluorocompound (PFC) emission. With reference now to FIG. 9, there is shown a plasma reactor system 600 with a reactor chamber 620 having sidewalls 624, an upper wall 626 and a lower wall 630 enclosing an interior 626 capable of supporting a plasma 628. Chamber 620 is similar to chamber 20 of FIG. 2. An upper electrode 630 is located in interior region 626 above a chuck 634 capable of supporting a workpiece W. Upper electrode 630 includes a gas inlet 640 that allows gas to flow into interior region 626 through upper wall 626. Inductor coil 650 as part of a plasma-forming system 656 surrounds the portion of chamber 620 that houses upper electrode 630, and is connected to a RF source 660.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

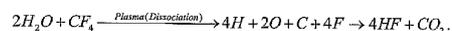
Attached to chamber 630 near chuck 634 is a plasma duct 670 identical to plasma duct 60 described above in connection with FIG. 2. Plasma duct 670 has sidewalls 674 enclosing an interior 680 that communicates with interior region 626 through an aperture 684 in lower wall 630. Plasma source 100 and match network 186, as described above, are provided around plasma duct 670, thereby defining a plasma generation region 680' within interior region 680. The end of plasma duct 670 opposite the end connected to chamber 620 is pneumatically connected to an exhaust system 688, such as a vacuum pump.

The remaining elements of plasma source 100 are as described above in connection with FIGS. 2-7, and are omitted from FIG. 9 for the sake of illustration.

In operation, plasma system 600 creates plasma 628 adjacent workpiece W residing on chuck 634 by introducing a process gas that may contain, for example, a PFC, such as  $CF_4$ ,  $C_4F_8$ ,  $C_5F_8$ , etc., into interior region 626 and activating plasma-forming system 656. Also formed are reactant species of gas, such as  $CF_3$ ,  $CF_2$ ,  $CF$ ,  $F$ , etc. Further, upon processing (e.g., etching) workpiece W, other chemical species, such as  $SiF_4$ ,  $CO_2$ , etc. are formed. Thus, the exhaust from chamber 620 is generally environmentally unfriendly and not suitable for directly exhausting into the atmosphere.

Accordingly, by placing plasma source 100 and match network 186 along the exhaust path, the various gases formed in the interior region 626 during plasma processing can be passed through plasma generation region 680' to alter their chemistry. To ensure the dissociation of environmentally problematic gases, a plurality of plasma sources 100 and associated networks 186 can be arranged in series along the exhaust path.

For example, the plasma-generating properties of plasma source 100 can serve to dissociate a gas, such as unused  $CF_4$  into components, i.e.,  $CF_x$  and  $F$ ; chemically reactive with hydrogen and oxygen achieved through  $H_2O$  dissociation. For example, a very simplistic chemical reaction might be:



The reaction products can then comprise  $HF$  and  $CO_2$  gases readily handled by another conventional gas handling "scrubbing" system 692 downstream of exhaust system 688. The processed gases can then be exhausted into the atmosphere, or further filtered and then released into the atmosphere.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

Although the use of the plasma source of the present invention is described as a exhaust abatement system in connection with a plasma reactor system, it will be clear to one skilled in the art that the plasma source can be used as an effective abatement system in other kinds of systems where noxious or otherwise undesirable gas products need to be processed prior to being exhausted into the atmosphere.

*Variations*

In addition to the embodiments described above, other variations are possible. In one such variation, a series of plasma sources (potentially each with at least one set of corresponding magnets) are stacked on top of each other to form a larger plasma source. In another variation, an antenna of more than one turn is used in at least one plasma source.

The many features and advantages of the present invention are apparent from the detailed specification, and, thus, it is intended by the appended claims to cover all such features and advantages of the described apparatus that follow the true spirit and scope of the invention. Furthermore, since numerous modifications and changes will readily occur to those of skill in the art, it is not desired to limit the invention to the exact construction and operation described herein. Accordingly, other embodiments are within the scope of the appended claims.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

**Claims:**

1. A high-density plasma source for forming a plasma within a plasma duct having an interior region, comprising:
  - a) an annular insulating body including a cylindrical inner surface and a first central axis, with an annular cavity formed within said insulating body and having a second central axis that coincides with the first central axis; and
  - b) an inductor coil arranged within said annular cavity operable to generate a first magnetic field within the plasma duct interior region and inductively couple to the plasma.
2. A plasma source as claimed in claim 1, further comprising a plurality of spaced apart magnets arranged in at least one concentric magnet ring adjacent at least one of an upper and a lower surface of the annular insulating body.
3. A plasma source as claimed in claim 1, further comprising a T-match network in electrical communication with said inductor coil.
4. A plasma source as claimed in claim 3, further comprising a plasma source RF power supply electrically connected to said T-match network.
5. A plasma source as claimed in claim 3, wherein said T-match network is electrically connected to first and second ends of said inductor coil.
6. A plasma source as claimed in claim 3, wherein said T-match network comprises first and second variable capacitors arranged in a plane defined by said inductor coil.
7. A plasma source as claimed in claim 3, wherein said T-match network comprises first and second variable capacitors arranged perpendicular to a plane defined by said inductor coil.
8. A plasma source as claimed in claim 1, wherein said inductor coil comprises a copper coil.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

9. A plasma source as claimed in claim 1, wherein said annular insulating body comprises a TEFLON body.
10. A plasma source as claimed in claim 1, further comprising a plurality of spaced apart magnets arranged in first and second concentric magnet rings adjacent an upper and a lower surface of the annular insulating body, respectively, wherein said first and second concentric magnet rings comprise an equal number of magnets.
11. A plasma source as claimed in claim 2, wherein said magnets comprise DC field electromagnets.
12. A plasma source as claimed in claim 2, wherein said magnets comprise a ring of magnets arranged in one of a ring-cusp configuration, a mirror field configuration, and a dipole configuration.
13. A plasma source as claimed in claim 4, wherein the plasma density in the plasma duct is equal to or greater than about  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  for 500W RF power provided to said inductor coil by said RF power source.
14. A plasma source as claimed in claim 4, wherein the plasma density in the plasma duct is equal to or greater than about  $1-1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  for 1000W RF power provided to said inductor coil by said RF power source.
15. A plasma source as claimed in claim 1, further comprising a plurality of cooling fluid channels extending from said annular inductor coil cavity within said annular cavity and extending radially inward to an inner surface of the annular insulating body, wherein said inductor coil is capable of carrying a cooling fluid and comprises a plurality of incrementally spaced apertures positioned so as to provide fluid communication between said inductor coil and said coolant channels.
16. A plasma source as claimed in claim 1, further comprising a grounded conductive housing surrounding said annular insulating body.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

17. A plasma source as claimed in claim 16, further comprising an electrostatic shield arranged adjacent an inner surface of the annular insulating body and grounded to said conductive housing.

18. A plasma source as claimed in claim 11, further comprising an electrostatic shield arranged adjacent an inner surface of the annular insulating body.

19. A plasma reactor system for processing a workpiece, comprising:

- a) a plasma reactor chamber having a central axis, an upper wall and sidewalls surrounding a first interior region capable of supporting a plasma;
- b) at least one plasma duct attached to said upper wall and/or said sidewall of said reactor chamber and having duct sidewalls enclosing a second interior region in communication with said first interior region;
- c) a chuck arranged opposite said upper wall for supporting the workpiece; and
- d) a plasma source surrounding a portion of said at least one plasma duct and defining a plasma generation region within said second region, wherein the plasma source comprises:

an annular insulating body substantially concentric with the central axis, and  
an inductor coil arranged within said annular cavity operable to generate a first magnetic field within the plasma duct interior region and inductively couple to the plasma.

20. A plasma reactor system as claimed in claim 19, wherein the at least one plasma duct comprises plural spaced apart plasma ducts attached to said upper wall and corresponding plasma sources, arranged in a disk configuration.

21. A plasma reactor system as claimed in claim 19, wherein the at least one plasma duct comprises plural spaced plasma ducts attached to said sidewall and corresponding plasma sources, arranged in a ring configuration.

22. A plasma reactor system as claimed in claim 19, further comprising at least one of:

- i) a gas supply system in pneumatic communication with said plasma duct so as to introduce gas into said plasma generation region;

WO 02/097937

PCT/US02/22080

- ii) a gas distribution system in pneumatic communication with at least one of said plasma duct and said plasma reactor chamber;
- iii) a T-match network in electrical communication with said inductor coil; and a first RF power supply in electrical communication with said T-match network;
- iv) a coolant supply system in fluid communication with said inductor coil;
- v) a vacuum system in pneumatic communication with said first interior region;
- vi) a second RF power supply system in electrical communication with said chuck; and
- vii) a load chamber formed in said reactor chamber sidewalls and enclosing a third interior region in communication with said first interior region, with a sealable door attached thereto sized to allow a workpiece to pass through said third interior region to said chuck, and further including a workpiece handling system in operable communication with said load chamber and said chuck.

23. A plasma reactor as claimed in claim 22, further comprising a control system for controlling the operation of said reactor.

24. A method of forming a high-density plasma in an interior region of a plasma chamber, comprising the steps of:

- a) injecting plasma gas into a plasma generation region of a plasma duct that is in communication with the chamber interior region;
- b) providing RF power through a T-match network to an annular inductor coil surrounding said plasma generation region, thereby generating a first magnetic field within said plasma generation region;
- c) measuring an amount of reflected power reflected from said inductor coil passing back through said T-match network; and
- d) adjusting the capacitance of said T-match network so as to minimize the amount of reflected power measured in said step c).

25. A method as claimed in claim 24, and further comprising the step of passing a cooling fluid through said inductor coil.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

26. A method as claimed in claim 24, further comprising the step of injecting a reactive gas into the interior region of the plasma chamber so as to create a reactive plasma.

27. A method as claimed in claim 24, further comprising the step of allowing the plasma to diffuse from the plasma generation region into the interior region of the plasma chamber and interact with a workpiece.

28. A method as claimed in claim 22, further comprising the step of allowing the reactive plasma to interact with a workpiece.

29. A method of forming a high-density plasma within an interior region of a plasma reactor chamber, comprising:

a) injecting plasma gas into a plurality of plasma generation regions, one in each of a corresponding plurality of spaced-apart plasma ducts in communication with the chamber interior region and arranged so as to provide a region of uniform, high-density plasma within the interior region of the reactor chamber;

b) providing RF power through a plurality of T-match networks each corresponding to an independent annular inductor coil surrounding each said plasma generation region, thereby generating a first magnetic field within each said plasma generation region;

c) measuring an amount of reflected power reflected from each said inductor coil passing back through each said T-match network; and

d) adjusting the capacitance of each said T-match network so as to minimize the amount of reflected power measured in said step c).

30. A method as claimed in claim 29, further comprising the step of passing a cooling fluid through each said inductor coil.

31. A method as claimed in claim 29, further comprising the step of injecting a reactive gas into the interior region of the plasma chamber to form a reactive plasma.

32. A method as claimed in claim 30, further comprising the step of allowing the plasma to diffuse from the plasma generation regions into the chamber interior region and interact with a workpiece.

WO 02/097937

PCT/US02/22060

33. A method as claimed in claim 31, further comprising the step of allowing the reactive plasma to interact with a workpiece.

34. A method of abating exhaust in a chamber containing a gas and having an exhaust path, comprising the steps of:

a) arranging a plasma source, including an inductor coil contained within an annular insulating body, around the exhaust path so as to define a plasma generation region within the exhaust path; and

b) activating the plasma source so as to dissociate at least a portion of gas traveling through the exhaust path.

35. A method as claimed in claim 34, further comprising the step of tuning the T-match network of the plasma source to maximize power transfer to gas passing through the plasma generation region.

36. A method as claimed in claim 34, further comprising the step of passing dissociated gas to a scrubbing system downstream of the plasma source.

37. A method as claimed in claim 34, further comprising the step of arranging a plurality of plasma sources along the exhaust path.

38. A match network for regulating a power applied by an RF power supply to first and second ends of an inductor coil, the network comprising:

a first variable capacitor having a third end, coupled to the RF power supply, and a fourth end, coupled to a first end of the inductor coil; and

a second variable capacitor having a fifth end, connected to a second end of the inductor coil and to ground, and a sixth end, coupled to the third end of the first variable capacitor.

39. The match network as claimed in claim 38, further comprising the RF power supply.

WO 02/097937

PCT/US02/22080

40. The match network as claimed in claim 39, further comprising a power meter coupled between the RF power supply and the first variable capacitor.

41. The match network as claimed in claim 38, wherein the first and second variable capacitors are physically arranged in a plane of the inductor coil.

42. The match network as claimed in claim 38, wherein the first and second variable capacitors are physically perpendicular to a plane of the inductor coil.

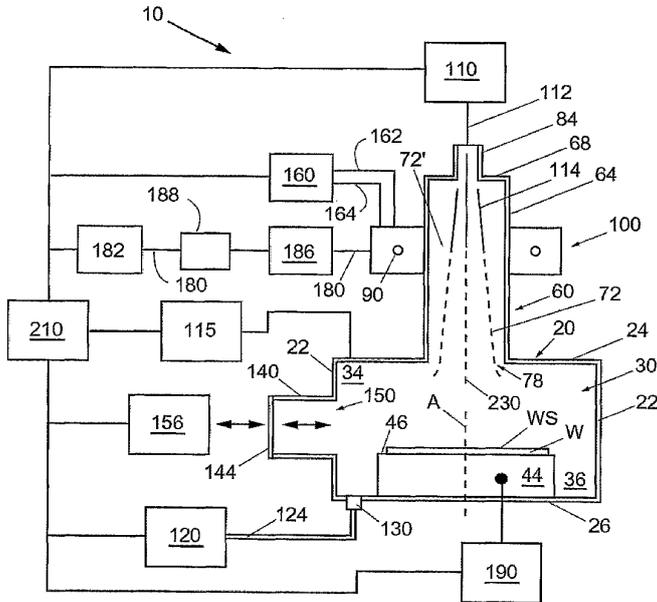


FIG. 1A

WO 02/097937

PCT/US02/22080

2/14

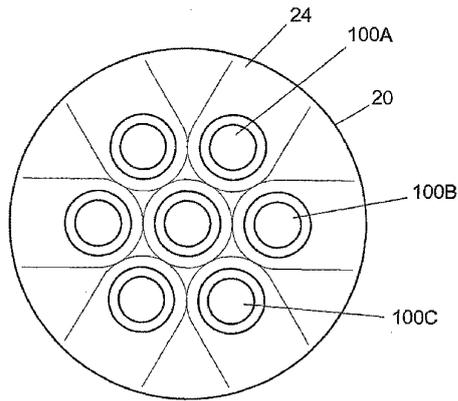


FIG. 1B

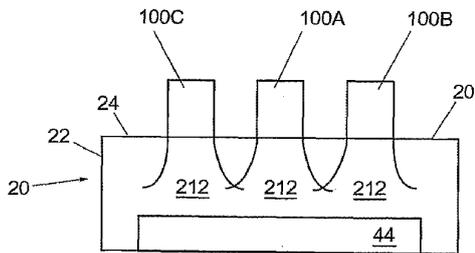


FIG. 1C

WO 02/097937

PCT/US02/22080

3/14

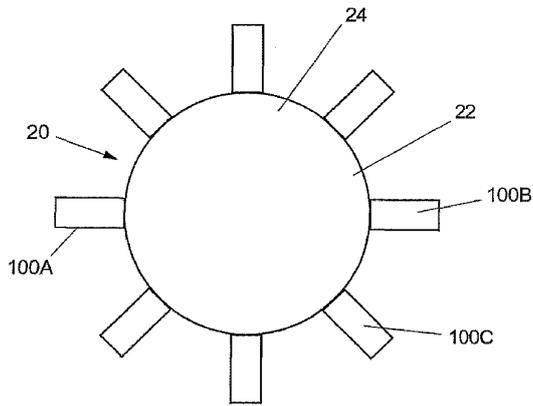


FIG. 1D

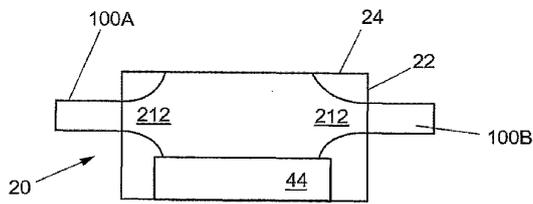
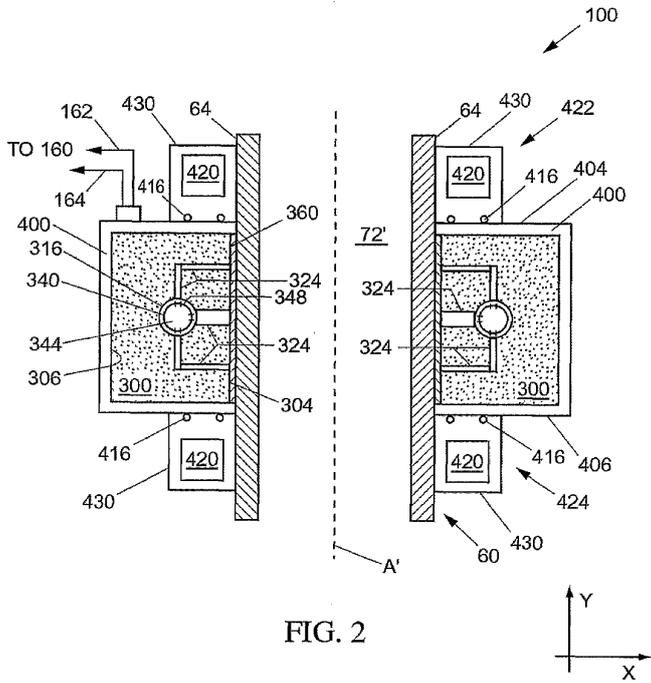


FIG. 1E

4/14



WO 02/097937

PCT/US02/22080

5/14

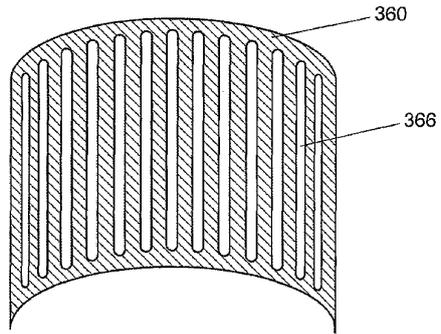


FIG. 3

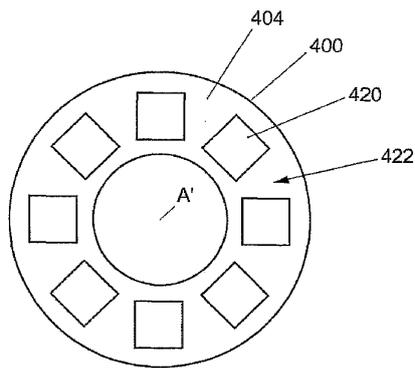


FIG. 4

6/14

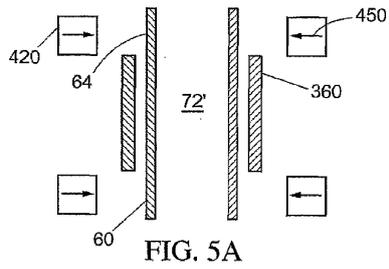


FIG. 5A

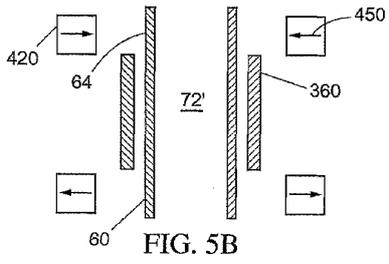


FIG. 5B

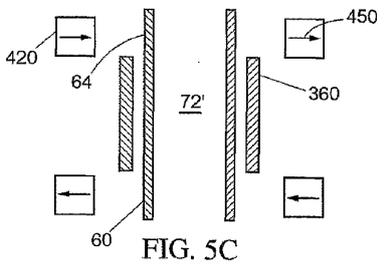


FIG. 5C

7/14

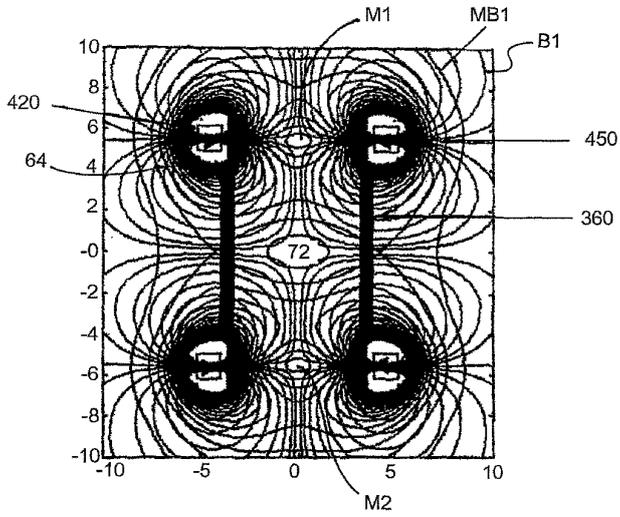


FIG. 5D

8/14

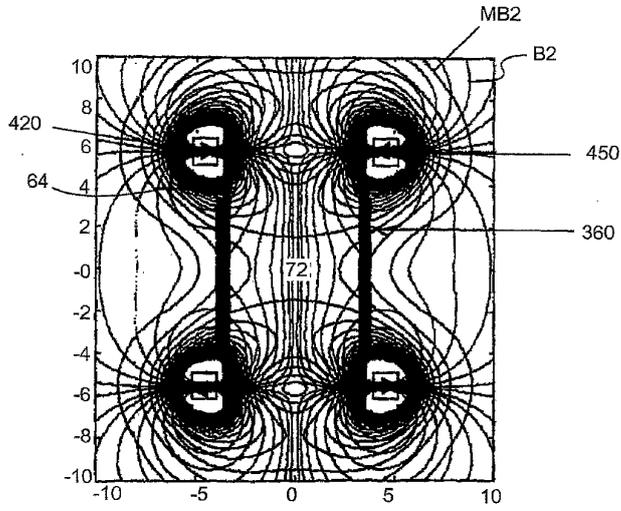


FIG. 5E

9/14

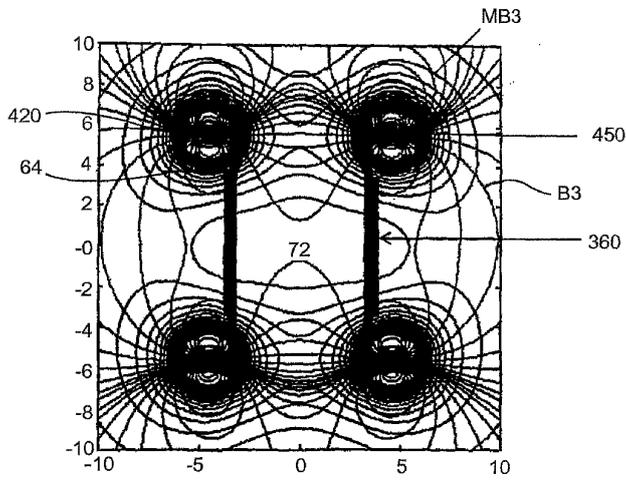


FIG. 5F

10/14

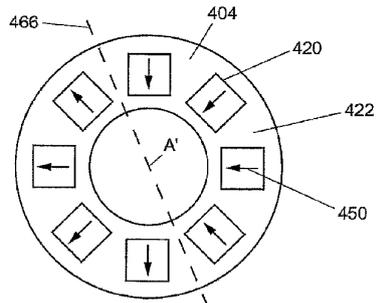


FIG. 5G

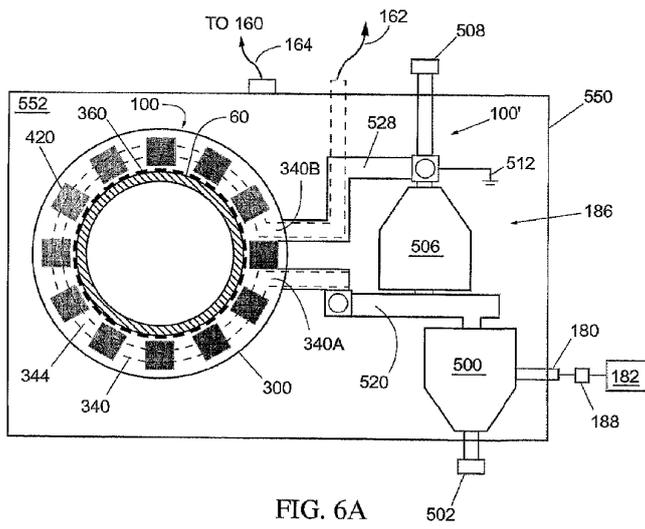


FIG. 6A

11/14

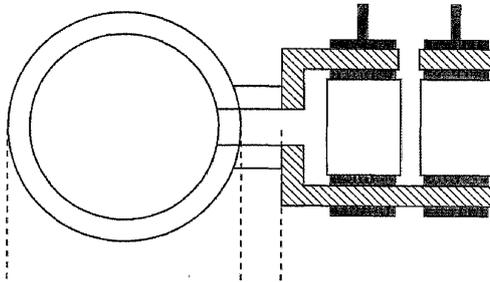


FIG. 6B

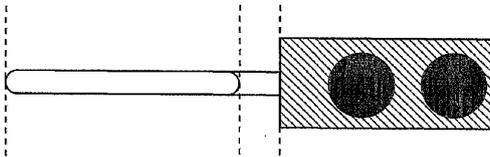
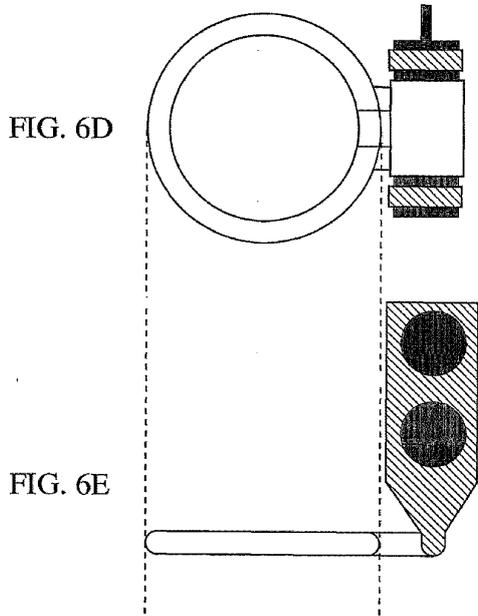


FIG. 6C

12/14



WO 02/097937

PCT/US02/22080

13/14

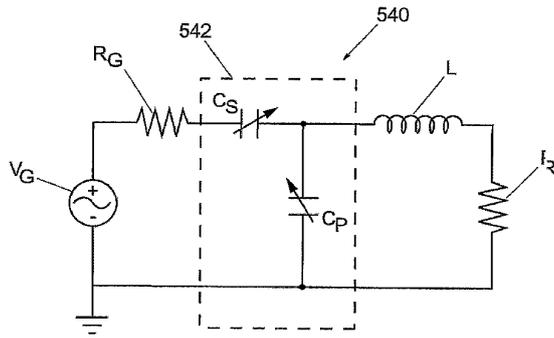


FIG. 7

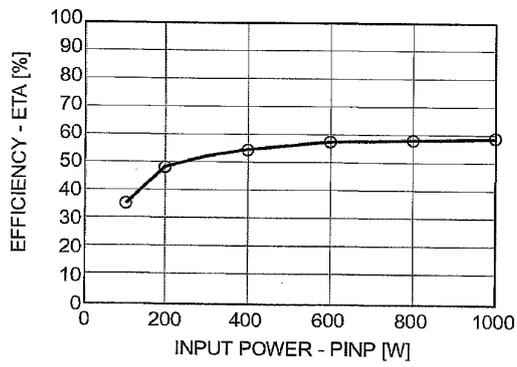


FIG. 8

14/14

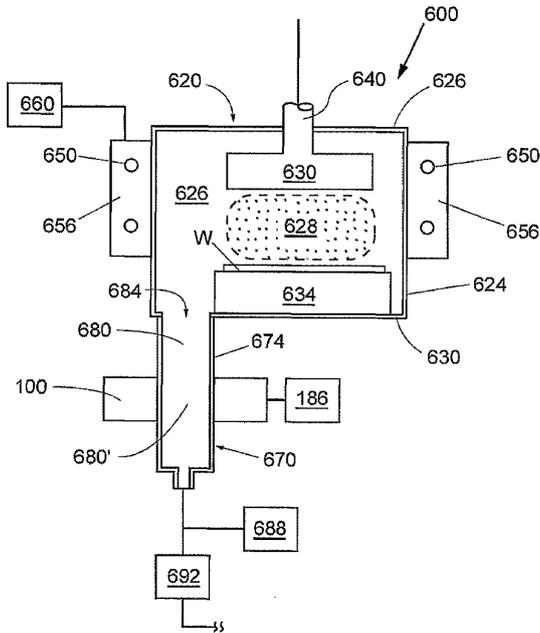


FIG. 9

## 【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US00/22020
<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> IPC(7) : H01T 28/00, C29F 1/02 US CL : 156/865, 688.1; 316/111.51, 111.81, 111.91; 361/234, 115 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 156/345, 688.1; 316/111.51, 111.81, 111.91; 361/234, 115 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EAST search terms: plasma, dust, cavity inductive, inductor, inductance, coil		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A, P	US 6,310,755 B1 (KHOLODENKO et al.) 30 October 2001 (30.10.2001), see entire document.	1-42
A	US 5,587,038 A (CECCHI et al.) 24 December 1996 (24.12.1996), see entire document.	1-42
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents:		
"A"	document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"B"	earlier document published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L"	document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the prior art date of another claimant or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O"	document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"Z" document member of the same patent family
"P"	document published prior to the international filing date but later than the priority date obtained	
Date of the actual completion of the international search 05 OCTOBER 2002	Date of mailing of the international search report 05 NOV 2002	
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 809-8280	Authorized officer <i>Shawn S. Hogg</i> WILSON LEE Telephone No. (703) 809-8428	

## フロントページの続き

(81) 指定国 AP(GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW

(特許庁注：以下のものは登録商標)

## テフロン

(72) 発明者 キュオン、ビル・エイチ  
アメリカ合衆国、アリゾナ州 8 5 2 8 4、テムペ、イースト・サンバースト・レーン 1 0 2 0

(72) 発明者 イェブティク、ヨバン  
アメリカ合衆国、ウィスコンシン州 5 3 2 2 5、ミラワウキー、イノベーション・ドライブ 1  
0 4 3 7

(72) 発明者 アントレイ、サム  
アメリカ合衆国、アリゾナ州 8 5 2 1 2、メサ、サウス・グリーンウッド・サークル 3 1 2 9

(72) 発明者 ストラング、エリック・ジェイ  
アメリカ合衆国、アリゾナ州 8 5 2 4 8、チャンドラー、ウェスト・オリオレ・ウェイ 1 0 8  
1

F ターム(参考) 4D002 AA22 AC10 BA02 BA07 CA13 EA02  
4G075 AA03 AA30 AA37 BA05 BA08 BC04 BC06 CA03 CA15 CA42  
DA02 EB01 EC06 EC30 EE02 FB02 FB12 FC11 FC15