

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2012-209468

(P2012-209468A)

(43) 公開日 平成24年10月25日(2012.10.25)

(51) Int.Cl.

H01L 21/3065 (2006.01)

F1

H01L 21/302 I01C

テーマコード(参考)

5F004

審査請求 未請求 請求項の数 59 OL (全 44 頁)

(21) 出願番号 特願2011-74875 (P2011-74875)
 (22) 出願日 平成23年3月30日(2011.3.30)

(71) 出願人 000219967
 東京エレクトロン株式会社
 東京都港区赤坂五丁目3番1号
 (74) 代理人 100086564
 弁理士 佐々木 聖孝
 (72) 発明者 山澤 陽平
 東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i
 zタワー 東京エレクトロン株式会社内
 Fターム(参考) 5F004 AA01 BA20

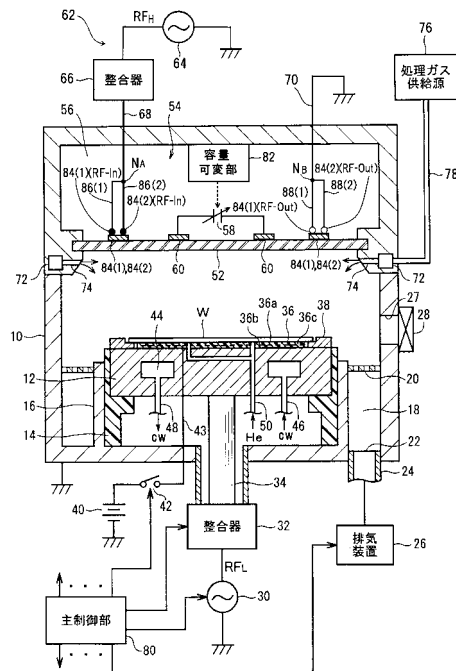
(54) 【発明の名称】 プラズマ処理装置

(57) 【要約】

【課題】誘導結合型のプラズマ処理装置においてRFアンテナ内の波長効果を十全に抑制しつつ、プラズマ密度分布を自在かつ精細に制御すること。

【解決手段】チャンバ10の天井または誘電体窓52の上には、チャンバ10内に誘導結合のプラズマを生成するための環状のRFアンテナ54が設けられている。このRFアンテナ54は、空間的には各々が半円の円弧状に形成されていて、電気的には高周波給電部62に対して並列に接続されている2つのコイルセグメント84(1)、84(2)からなる。さらに、誘電体窓52の上には、RFアンテナ54と電磁誘導により結合可能な可変コンデンサ58付きの環状のフローティングコイル60も設けられている。可変コンデンサ58は、主制御部80の制御の下で容量可変部82により一定範囲内で任意に変えられるようになっている。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

誘電体の窓を有する処理容器と、

前記処理容器内で被処理基板を保持する基板保持部と、

前記基板に所望のプラズマ処理を施すために、前記処理容器内に所望の処理ガスを供給する処理ガス供給部と、

前記処理容器内で誘導結合により処理ガスのプラズマを生成するために、空間的には前記誘電体窓の外で所定形状および所定サイズのループに沿って直列に配置され、電気的には並列に接続されている複数のコイルセグメントを有する R F アンテナと、

前記処理ガスの高周波放電に適した周波数の高周波電力を前記 R F アンテナに供給する高周波給電部と、

電気的にフローティング状態に置かれ、前記 R F アンテナと電磁誘導により結合可能な位置で前記処理容器の外に配置されるフローティングコイルと、

前記フローティングコイルのループ内に設けられるコンデンサと

を有するプラズマ処理装置。

【請求項 2】

前記複数のコイルセグメントは、全体で前記 R F アンテナのループの少なくとも一周またはその大部分を埋めるように直列に配置される、請求項 1 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 3】

前記複数のコイルセグメントの間で、各々の前記コイルセグメントの高周波入口端が別の前記コイルセグメントの高周波出口端と間隙を介して隣接し、各々の前記コイルセグメントの高周波出口端が別の前記コイルセグメントの高周波入口端と間隙を介して隣接する、請求項 1 または請求項 2 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 4】

前記間隙は全て前記 R F アンテナのループの周回方向で形成される、請求項 3 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 5】

前記間隙の少なくとも 1 つが前記 R F アンテナのループの周回方向と直交する方向で形成される、請求項 3 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 6】

前記複数のコイルセグメントは、全体で前記 R F アンテナのループ上を少なくとも一周する、請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 7】

前記複数のコイルセグメントのいずれも前記高周波の $1/4$ 波長よりも短い、請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 8】

前記複数のコイルセグメントは、おおよそ等しい自己インダクタンスを有する、請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 9】

前記複数のコイルセグメントをそれぞれ流れる電流の向きが前記 R F アンテナのループに沿って全部同じである、請求項 1 ~ 8 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 10】

前記複数のコイルセグメントをそれぞれ流れる電流の電流値がほぼ同じである、請求項 1 ~ 9 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 11】

前記 R F アンテナのループは、前記誘電体窓と平行である、請求項 1 ~ 10 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 12】

前記 R F アンテナのループは、前記基板保持部に保持される前記基板と同軸である、請求項 1 ~ 11 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

10

20

30

40

50

【請求項 13】

前記フローティングコイルは、前記RFアンテナと同軸に配置される、請求項1～12のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 14】

前記フローティングコイルは、同一の相互インダクタンスで各々の前記コイルセグメントと電磁的に結合される、請求項1～13のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 15】

前記フローティングコイルが、前記RFアンテナと同一の平面上に配置される、請求項1～14のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 16】

前記フローティングコイルが、前記誘電体窓に対して前記RFアンテナよりも距離を離して配置される、請求項1～14のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 17】

前記フローティングコイルが、径方向において前記RFアンテナの内側または外側のいずれかに配置される、請求項1～16のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 18】

前記フローティングコイルのループ形状は、前記RFアンテナのループ形状と相似である、請求項1～17のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 19】

前記フローティングコイルのループが、前記RFアンテナのループの1/3～3倍の口径を有する、請求項18に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 20】

前記フローティングコイルには、前記RFアンテナを流れる電流と周回方向で同じ向き
の電流が流れる、請求項9に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 21】

前記フローティングコイル内のコンデンサは、前記フローティングコイル内で直列共振
を起こすときの値よりも小さな値の静電容量を有する、請求項20に記載のプラズマ処理
装置。

【請求項 22】

前記フローティングコイルは、負値のリアクタンスを有する、請求項20または請求項
21に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 23】

前記フローティングコイルには、前記RFアンテナを流れる電流と周回方向で逆向きの
電流が流れる、請求項9に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 24】

前記フローティングコイル内のコンデンサは、前記フローティングコイル内で直列共振
を起こすときの値よりも大きな値の静電容量を有する、請求項23に記載のプラズマ処理
装置。

【請求項 25】

前記フローティングコイルは、正值のリアクタンスを有する、請求項23または請求項
24に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 26】

前記フローティングコイル内のコンデンサは可変コンデンサであり、その静電容量の可
変範囲には前記フローティングコイル内で直列共振を起こすときの値よりも小さな値が含
まれる、請求項1～19のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 27】

前記フローティングコイル内のコンデンサは可変コンデンサであり、その静電容量の可
変範囲には前記フローティングコイル内で直列共振を起こすときの値よりも小さい値と大
きい値が含まれる、請求項1～19のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 28】

10

20

30

40

50

前記フローティングコイル内のコンデンサは可変コンデンサであり、その静電容量の可変範囲には前記フローティングコイル内で直列共振を起こすときの値よりも大きい値が含まれる、請求項 1 ~ 19 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 29】

前記フローティングコイルを同軸に複数設ける、請求項 1 ~ 28 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 30】

誘電体の窓を有する処理容器と、

前記処理容器内で被処理基板を保持する基板保持部と、

前記基板に所望のプラズマ処理を施すために、前記処理容器内に所望の処理ガスを供給する処理ガス供給部と、

前記処理容器内で誘導結合により処理ガスのプラズマを生成するために、前記誘電体窓の外で径方向に間隔を開けてそれぞれ内側および外側に配置される内側および外側アンテナコイルと、

前記処理ガスの高周波放電に適した周波数の高周波電力を前記内側および外側アンテナコイルに供給する高周波給電部と、

電氣的にフローティング状態に置かれ、前記内側および外側アンテナコイルの少なくとも一方と電磁誘導により結合可能な位置で前記処理容器の外に配置されるフローティングコイルと、

前記フローティングコイルのループ内に設けられるコンデンサと

を具備し、

前記内側アンテナコイルが、単一または直列接続の内側コイルセグメントを有し、

前記外側アンテナコイルが、周回方向で分割されていて、電氣的に並列に接続されている複数の外側コイルセグメントを有する、

プラズマ処理装置。

【請求項 31】

前記内側コイルセグメントが、周回方向で少なくとも一周する、請求項 30 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 32】

前記内側コイルセグメントは、前記高周波の $1/4$ 波長よりも短い、請求項 30 または請求項 31 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 33】

前記複数の外側コイルセグメントは、全体で周回方向の一周またはその大部分を埋めるように空間的に直列に配置される、請求項 30 ~ 32 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 34】

前記複数の外側コイルセグメントの間で、各々の前記外側コイルセグメントの高周波入口端が別の前記外側コイルセグメントの高周波出口端と外側間隙を介して隣接し、各々の前記外側コイルセグメントの高周波出口端が別の前記外側コイルセグメントの高周波入口端と外側間隙を介して隣接する、請求項 30 ~ 33 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 35】

前記複数の外側コイルセグメントは、全体で周回方向に少なくとも一周する、請求項 30 ~ 34 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 36】

前記複数の外側コイルセグメントのいずれも前記高周波の $1/4$ 波長よりも短い、請求項 30 ~ 35 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 37】

前記複数の外側コイルセグメントは、おおよそ等しい自己インダクタンスを有する、請求項 30 ~ 36 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 38】

前記複数の外側コイルセグメントをそれぞれ流れる電流の向きが周回方向で全部同じである、請求項 30 ~ 37 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 39】

前記複数の外側コイルセグメントをそれぞれ流れる電流の電流量がほぼ同じである、請求項 30 ~ 38 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 40】

前記内側アンテナコイルを流れる電流の向きと、前記外側アンテナコイルを流れる電流の向きとが周回方向で同じである、請求項 30 ~ 39 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

10

【請求項 41】

前記内側アンテナコイルおよび前記外側アンテナコイルは、前記高周波給電部側の第 1 ノードと接地電位側の第 2 ノードとの間で電氣的に並列に接続されている、請求項 30 ~ 40 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 42】

前記第 1 ノードと前記第 2 ノードとの間で、前記内側コイルセグメントには内側インピーダンス調整部が電氣的に直列に接続され、前記複数の外側コイルセグメントのいずれにもインピーダンス調整部が電氣的に接続されていない、請求項 41 に記載のプラズマ処理装置。

20

【請求項 43】

前記第 1 ノードと前記第 2 ノードとの間で、前記複数の外側コイルセグメントには複数の外側個別インピーダンス調整部がそれぞれ電氣的に直列に接続され、前記内側コイルセグメントにはインピーダンス調整部が電氣的に接続されていない、請求項 41 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 44】

前記第 1 ノードと前記第 2 ノードとの間で、前記内側コイルセグメントには内側インピーダンス調整部が電氣的に直列に接続され、前記複数の外側コイルセグメントには複数の外側個別インピーダンス調整部がそれぞれ電氣的に直列に接続されている、請求項 41 に記載のプラズマ処理装置。

30

【請求項 45】

前記フローティングコイルは、径方向で前記内側アンテナコイルと前記外側アンテナコイルとの間に配置される、請求項 30 ~ 44 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 46】

前記フローティングコイルは、前記内側アンテナコイルと前記外側アンテナコイルの真ん中に配置される、請求項 45 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 47】

前記フローティングコイルは、径方向で前記内側アンテナコイルの内側もしくは前記外側アンテナコイルの外側に配置される、請求項 30 ~ 44 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

40

【請求項 48】

前記内側アンテナコイル、前記外側アンテナコイルおよび前記フローティングコイルは、同軸に配置されている、請求項 30 ~ 47 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 49】

前記フローティングコイルが、前記 RF アンテナと同一の平面上に配置される、請求項 30 ~ 48 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 50】

前記フローティングコイルが、前記誘電体窓に対して前記 RF アンテナよりも距離を離して配置される、請求項 30 ~ 48 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 51】

前記フローティングコイルには、前記内側および外側アンテナコイルをそれぞれ流れる

50

電流と周回方向で同じ向きの電流が流れる、請求項 40 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 52】

前記フローティングコイル内のコンデンサは、前記フローティングコイル内で直列共振を起こすときの値よりも小さな値の静電容量を有する、請求項 51 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 53】

前記フローティングコイルは、負値のリアクタンスを有する、請求項 51 または請求項 52 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 54】

前記フローティングコイルには、前記内側および外側アンテナコイルをそれぞれ流れる電流と周回方向で逆向きの電流が流れる、請求項 40 に記載のプラズマ処理装置。

10

【請求項 55】

前記フローティングコイル内のコンデンサは、前記フローティングコイル内で直列共振を起こすときの値よりも大きな値の静電容量を有する、請求項 54 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 56】

前記フローティングコイルは、正值のリアクタンスを有する、請求項 54 または請求項 55 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 57】

前記フローティングコイル内のコンデンサは可変コンデンサであり、その静電容量の可変範囲には前記フローティングコイル内で直列共振を起こすときの値よりも小さな値が含まれる、請求項 51 に記載のプラズマ処理装置。

20

【請求項 58】

前記フローティングコイル内のコンデンサは可変コンデンサであり、その静電容量の可変範囲には前記フローティングコイル内で直列共振を起こすときの値よりも大きい値が含まれる、請求項 54 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 59】

前記フローティングコイルを同軸に複数設ける、請求項 30 ~ 58 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は、被処理基板にプラズマ処理を施す技術に係り、特に誘導結合型のプラズマ処理装置に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体デバイスや FPD (Flat Panel Display) の製造プロセスにおけるエッチング、堆積、酸化、スパッタリング等の処理では、処理ガスに比較的低温で良好な反応を行わせるためにプラズマがよく利用されている。従来より、この種のプラズマ処理には、MHz 領域の高周波放電によるプラズマが多く用いられている。高周波放電によるプラズマは、より具体的(装置的)なプラズマ生成法として、容量結合型プラズマと誘導結合型プラズマとに大別される。

40

【0003】

一般に、誘導結合型のプラズマ処理装置は、処理容器の壁部の少なくとも一部(たとえば天井)を誘電体の窓で構成し、その誘電体窓の外に設けたコイル状の RF アンテナに高周波電力を供給する。処理容器は減圧可能な真空チャンバとして構成されており、チャンバ内の中央部に被処理基板(たとえば半導体ウエハ、ガラス基板等)が配置され、誘電体窓と基板との間に設定される処理空間に処理ガスが導入される。RF アンテナに流れる RF 電流によって、磁力線が誘電体窓を貫通してチャンバ内の処理空間を通過するような RF 磁界が RF アンテナの周りに発生し、この RF 磁界の時間的な変化によって処理空間内

50

で方位角方向に誘導電界が発生する。そして、この誘導電界によって方位角方向に加速された電子が処理ガスの分子や原子と電離衝突を起こし、ドーナツ状にプラズマが生成される。

【0004】

チャンバ内に大きな処理空間が設けられることによって、上記ドーナツ状のプラズマは効率よく四方（特に半径方向）に拡散し、基板上ではプラズマの密度がかなり均される。しかしながら、通常のRFアンテナを用いるだけでは、基板上に得られるプラズマ密度の均一性は大抵のプラズマプロセスにおいて不十分である。誘導結合型のプラズマ処理装置においても、基板上のプラズマ密度の均一性を向上させることは、プラズマプロセスの均一性・再現性ひいては製造歩留まりを左右することから、最重要課題の一つとなっており、これまでもこの関係の技術が幾つか提案されている。

10

【0005】

その中で、単一のRFアンテナを使用し、このRFアンテナの近くに受動アンテナを配置する技法（特許文献1）が知られている。この受動アンテナは、高周波電源から高周波電力の供給を受けない独立したコイルとして構成され、RFアンテナ（誘導性アンテナ）の発生する磁界に対して、受動アンテナのループ内の磁界強度を減少させると同時に受動アンテナのループ外近傍の磁界強度を増加させるように振る舞う。それによって、チャンバ内のプラズマ発生領域中のRF電磁界の半径方向分布が変更されるようになっている。

【0006】

また、径方向のプラズマ密度分布の均一性を向上させるために、RFアンテナを径方向で複数の円環状コイルに分割し、それらの円環状コイルを電氣的に並列接続する方式が知られている（たとえば特許文献2）。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特表2005-534150

【特許文献2】米国特許第6164241号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

上記特許文献1は、受動アンテナの存在によってRFアンテナ（誘導性アンテナ）の発生する磁界に影響を与え、それによってチャンバ内のプラズマ発生領域中のRF電磁界の半径方向分布を変更できることを教示しているが、受動アンテナの作用に関する考察・検証が不十分であり、受動アンテナを用いてプラズマ密度分布を自在かつ高精度に制御するための具体的な装置構成をイメージできてない。

30

【0009】

今日のプラズマプロセスは、基板の面積化とデバイスの微細化に伴って、より低圧で高密度かつ大口径のプラズマを必要としており、基板上のプロセスの均一性は以前にも増して困難な課題になっている。この点、誘導結合型のプラズマ処理装置は、RFアンテナに近接する誘電体窓の内側でプラズマをドーナツ状に生成し、このドーナツ状のプラズマを基板に向けて四方に拡散させるようにしているが、チャンバ内の圧力によってプラズマの拡散する形態が変化し、基板上のプラズマ密度分布が変わりやすい。さらには、RFアンテナに供給される高周波のパワーやチャンバ内に導入される処理ガスの流量等に応じてドーナツ状プラズマ内のプラズマ密度分布が変わることもある。したがって、プロセスレシピでプロセス条件が変更されても、基板上のプラズマプロセスの均一性を保てるように、RFアンテナ（誘導性アンテナ）の発生する磁界に補正をかけることができなければ、今日のプラズマ処理装置に要求される多様かつ高度なプロセス性能を適えることはできない。

40

【0010】

また、上記のような従来のRFアンテナ分割方式においては、高周波給電部よりRFア

50

ンテナに供給されるRF電流が、RFアンテナ内ではコイル径の小さい（つまりインピーダンスの小さい）内側のコイルには相対的に多く流れ、コイル径の大きい（つまりインピーダンスの大きい）外側のコイルには相対的に少ししか流れず、チャンバ内に生成されるプラズマの密度が径方向の中心部で高く周辺部で低くなりやすい。そこで、RFアンテナ内の各コイルにインピーダンス調整用のコンデンサを付加（接続）して、各コイルに分配するRF電流の分割比を調節するようにしている。

【0011】

この場合、高周波給電部の帰線またはアースライン側に、つまりRFアンテナの終端側にインピーダンス調整用のコンデンサを設けると、コイルの電位が接地電位より高くなることに起因して誘電体窓がプラズマからのイオンアタックにより損傷劣化する現象（スパッタ効果）を抑制することができる。しかしながら、RFアンテナのコイルがコンデンサを介して終端されることで、短絡共振線の長さが等価的に短くなり、コイル径（コイル長）の大きい外側コイルでRF入力端近くに電流の波節部を有する定在波が形成されやすくなる（いわゆる波長効果が発生しやすくなる）。このような波長効果が発生すると、周回方向および径方向のいずれにおいてもプラズマ密度分布の均一性を得るのが難しくなる。

10

【0012】

本発明は、上記のような従来技術に鑑みてなされたものであって、RFアンテナ内の波長効果を十全に抑制しつつ、電氣的にフローティング状態に置かれるコイルを用いてプラズマ密度分布を自在かつ精細に制御することができる誘導結合型のプラズマ処理装置を提供する。

20

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明の第1の観点におけるプラズマ処理装置は、誘電体の窓を有する処理容器と、前記処理容器内で被処理基板を保持する基板保持部と、前記基板に所望のプラズマ処理を施すために、前記処理容器内に所望の処理ガスを供給する処理ガス供給部と、前記処理容器内で誘導結合により処理ガスのプラズマを生成するために、前記誘電体窓の外に設けられ、空間的には所定形状および所定サイズのループに沿って直列に配置され、電氣的には並列に接続されている複数のコイルセグメントを有するRFアンテナと、前記処理ガスの高周波放電に適した周波数の高周波電力を前記RFアンテナに供給する高周波給電部と、電氣的にフローティング状態に置かれ、前記RFアンテナと電磁誘導により結合可能な位置で前記処理容器の外に配置されるフローティングコイルと、前記フローティングコイルのループ内に設けられるコンデンサとを有する。

30

【0014】

上記第1の観点によるプラズマ処理装置においては、高周波給電部よりRFアンテナに高周波電力を供給すると、RFアンテナを流れる高周波電流によってアンテナ導体の周りにRF磁界が発生し、処理容器内に処理ガスの高周波放電に供する誘導電界が生成される。ここで、RFアンテナは電氣的に並列に接続された複数のコイルセグメントで構成されているので、RFアンテナ内の波長効果や電圧降下はコイルセグメントの長さに依存する。したがって、個々のコイルセグメント内で波長効果を起こさないように、そして電圧降下があまり大きくなるないように、各コイル内の分割数またはコイルセグメントの長さを選定すればよい。RFアンテナ内の起磁力に関しては、各コイルを構成するコイルセグメントの自己インダクタンスをおおよそ等しくすることによって、コイル周回方向で一様または均一な高周波電流が流れるので、周回方向では常に均一なプラズマ密度分布を得ることができる。

40

【0015】

一方、RFアンテナの各コイルセグメントとフローティングコイルとの間の電磁誘導によってフローティングコイル内に誘導起電力が発生して誘導電流が流れる。このフローティングコイル内で流れる誘導電流も、処理容器内のプラズマ生成空間に誘導電界を形成して、処理ガスの高周波放電または誘導結合プラズマの生成に消極（マイナス）的もしくは積極（プラス）的に関与する。

50

【0016】

処理容器内で誘導結合により生成されるコアなプラズマ（ドーナツ状プラズマ）の密度分布に与えるフローティングコイルの作用は、RFアンテナとフローティングコイルとの相対的な位置関係に依存するだけでなく、フローティングコイル内に流れる電流の大きさや向きによっても大きく変わる。

【0017】

フローティングコイル内で流れる電流の電流値および位相（向き）は、フローティングコイルのループ内に発生する誘導起電力とループ内のインピーダンスとに依存する。このプラズマ処理装置では、フローティングコイルのループ内に設けられるコンデンサの静電容量によって、ループ内のインピーダンス、特にリアクタンスを調整し、ループ内の電流の大きさや向きを制御する。

10

【0018】

このようなコンデンサ付きのフローティングコイルを備えることにより、ドーナツ状プラズマ内のプラズマ密度分布を径方向において任意または多様に制御することができる。これによって、基板保持部上の基板の近傍でプラズマ密度分布を任意かつ精細に制御することが可能であり、プラズマプロセスの均一性の向上も容易に達成できる。

【0019】

また、本発明の第2の観点におけるプラズマ処理装置は、誘電体の窓を有する処理容器と、前記処理容器内で被処理基板を保持する基板保持部と、前記基板に所望のプラズマ処理を施すために、前記処理容器内に所望の処理ガスを供給する処理ガス供給部と、前記処理容器内で誘導結合により処理ガスのプラズマを生成するために、前記誘電体窓の外で径方向に間隔を開けてそれぞれ内側および外側に配置される内側および外側アンテナコイルと、前記処理ガスの高周波放電に適した周波数の高周波電力を前記内側および外側アンテナコイルに供給する高周波給電部と、電氣的にフローティング状態に置かれ、前記内側および外側アンテナコイルの少なくとも一方と電磁誘導により結合可能な位置で前記処理容器の外に配置されるフローティングコイルと、前記フローティングコイルのループ内に設けられるコンデンサとを具備し、前記内側アンテナコイルが、単一または直列接続の内側コイルセグメントを有し、前記外側アンテナコイルが、周回方向で分割されていて、電氣的に並列に接続されている複数の外側コイルセグメントを有する。

20

【0020】

上記第2の観点によるプラズマ処理装置においては、高周波給電部よりRFアンテナに高周波電力を供給すると、RFアンテナの内側アンテナコイルおよび外側アンテナコイルに分流してそれぞれ流れる高周波のアンテナ電流によってそれぞれのコイル導体の周りにRF磁界が発生し、処理容器内に処理ガスの高周波放電に供する誘導電界が生成される。ここで、RFアンテナの各アンテナコイルは電氣的に並列に接続された1つまたは複数のコイルセグメントで構成されているので、RFアンテナ内の波長効果や電圧降下はコイルセグメントの長さに依存する。したがって、個々のコイルセグメント内で波長効果を起こさないように、そして電圧降下があまり大きくならないように、各コイル内の分割数またはコイルセグメントの長さを選定すればよい。RFアンテナ内の起磁力に関しては、各コイルを構成するコイルセグメントの自己インダクタンスをおおよそ等しくすることによって、コイル周回方向で一様または均一な高周波電流が流れるので、周回方向では常に均一なプラズマ密度分布を得ることができる。

30

40

【0021】

一方、RFアンテナの各コイルセグメントとフローティングコイルとの間の電磁誘導によってフローティングコイル内に誘導起電力が発生して誘導電流が流れる。このフローティングコイル内で流れる誘導電流も、処理容器内のプラズマ生成空間に誘導電界を形成して、処理ガスの高周波放電または誘導結合プラズマの生成に消極（マイナス）的もしくは積極（プラス）的に関与する。

【0022】

処理容器内で誘導結合により生成されるコアなプラズマ（ドーナツ状プラズマ）の密度

50

分布に与えるフローティングコイルの作用は、RFアンテナとフローティングコイルとの相対的な位置関係に依存するだけでなく、フローティングコイル内に流れる電流の大きさや向きによっても大きく変わる。

【0023】

フローティングコイル内で流れる電流の電流値および位相（向き）は、フローティングコイルのループ内に発生する誘導起電力とループ内のインピーダンスとに依存する。このプラズマ処理装置では、フローティングコイルのループ内に設けられるコンデンサの静電容量によって、ループ内のインピーダンス、特にリアクタンスを調整し、ループ内の電流の大きさや向きを制御する。

【0024】

このようなコンデンサ付きのフローティングコイルを備えることにより、ドーナツ状プラズマ内のプラズマ密度分布を径方向において任意または多様に制御することができる。これによって、基板保持部上の基板の近傍でプラズマ密度分布を任意かつ精細に制御することが可能であり、プラズマプロセスの均一性の向上も容易に達成できる。

【発明の効果】

【0025】

本発明のプラズマ処理装置によれば、上記のような構成および作用により、誘導結合型のプラズマ処理装置においてRFアンテナ内の波長効果を十全に抑制しつつ、電氣的にフローティング状態に置かれるコイルを用いてプラズマ密度分布を自在かつ精細に制御することができる。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】本発明の第1の実施形態における誘導結合型プラズマ処理装置の構成を示す縦断面図である。

【図2】図1のプラズマ処理装置におけるRFアンテナおよびフローティングコイルの配置構成（レイアウト）および電氣的結線構成を示す斜視図である。

【図3】図1のプラズマ処理装置におけるRFアンテナおよびフローティングコイルの配置構成（レイアウト）および電氣的結線構成を示す略平面図である。

【図4】フローティングコイル内の可変コンデンサの静電容量を可変したときの作用を説明するためのモデル（基本構成）を示す図である。

【図5】フローティングコイル内の可変コンデンサの静電容量を可変したときにアンテナ電流と誘導電流の比が変化する特性を示す図である。

【図6】図4のモデルの一変形例を示す図である。

【図7】図4または図6のモデルにおいて相互インダクタンスと角周波数との積がフローティングコイルの半径に依存する特性を示す図である。

【図8】本発明の第2の実施形態における誘導結合型プラズマ処理装置の構成を示す縦断面図である。

【図9】図8のプラズマ処理装置におけるRFアンテナおよびフローティングコイルの配置構成（レイアウト）および電氣的結線構成を示す斜視図である。

【図10】図8のプラズマ処理装置におけるRFアンテナおよびフローティングコイルの配置構成（レイアウト）および電氣的結線構成を示す略平面図である。

【図11】一実施例によるフローティングコイルの構成を示す斜視図である。

【図12A】一実施例によるフローティングコイルの構成を示す斜視図である。

【図12B】図12Aのフローティングコイルにおける切れ目の構成を示す平面図である。

【図12C】図12Bの切れ目構造の一変形例を示す部分拡大平面図である。

【図13A】一実施例によるフローティングコイルの構成を示す図である。

【図13B】フローティングコイルにおけるコイル導体の断面形状を示す断面図である。

【図14】一実施例によるフローティングコイルの構成を示す斜視図である。

【図15】図14のフローティングコイルの一変形例を示す斜視図である。

10

20

30

40

50

【図 16】フローティングコイルに可変コンデンサを一体に作り込む一実施例を示す一部断面正面図である。

【図 17】コンデンサと直列接続および / または並列接続でスイッチを設ける構成を示す等価回路図である。

【図 18】図 16 の実施例の作用を説明するための要部の断面図である。

【図 19】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 20】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 21】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 22】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 23】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 24】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 25】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 26】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 27】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 28】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 29】RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する別の実施例を示す図である。

【図 30】3 系統のアンテナコイルに関する一実施例を示す図である。

【図 31】3 系統のアンテナコイルに関する別の実施例を示す図である。

【図 32】3 系統のアンテナコイルに関する一実施例を示す図である。

【図 33】3 系統のアンテナコイルに関する別の実施例を示す図である。

【図 34】3 系統のアンテナコイルに関する別の実施例を示す図である。

【図 35】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける一実施例を示す図である。

【図 36】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける別の実施例を示す図である。

【図 37】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける別の実施例を示す図である。

【図 38】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける別の実施例を示す図である。

【図 39】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける別の実施例を示す図である。

【図 40】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける別の実施例を示す図である。

【図 41】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける別の実施例を示す図である。

【図 42】フローティングコイルのループ内に固定コンデンサを設ける別の実施例を示す図である。

【図 43】RF アンテナにインピーダンス調整部を設けない実施例を示す図である。

【図 44】RF アンテナにインピーダンス調整部を設けない別の実施例を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 4 5】RF アンテナにインピーダンス調整部を設けない別の実施例を示す図である。

【図 4 6】RF アンテナにインピーダンス調整部を設けない別の実施例を示す図である。

【図 4 7】RF アンテナと高周波給電部の整合器との間にトランスを設ける構成例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0027】

以下、添付図を参照して本発明の好適な実施形態を説明する。

[実施形態 1]

【0028】

図 1 に本発明の第 1 の実施形態における誘導結合型プラズマ処理装置の構成を示す。図 2 および図 3 に、このプラズマ処理装置における RF アンテナおよびフローティングコイルの配置構成（レイアウト）および電気的結線構成を示す。

10

【0029】

この誘導結合型プラズマ処理装置は、平面コイル形の RF アンテナを用いる誘導結合型のプラズマエッチング装置として構成されており、たとえばアルミニウムまたはステンレス鋼等の金属製の円筒型真空チャンバ（処理容器）10 を有している。チャンバ 10 は、保安接地されている。

【0030】

先ず、この誘導結合型プラズマエッチング装置においてプラズマ生成に関係しない各部の構成を説明する。

20

【0031】

チャンバ 10 内の下部中央には、被処理基板としてたとえば半導体ウエハ W を載置する円板状のサセプタ 12 が高周波電極を兼ねる基板保持台として水平に配置されている。このサセプタ 12 は、たとえばアルミニウムからなり、チャンバ 10 の底から垂直上方に延びる絶縁性の筒状支持部 14 に支持されている。

【0032】

絶縁性筒状支持部 14 の外周に沿ってチャンバ 10 の底から垂直上方に延びる導電性の筒状支持部 16 とチャンバ 10 の内壁との間に環状の排気路 18 が形成され、この排気路 18 の上部または入口に環状のバツフル板 20 が取り付けられるとともに、底部に排気ポート 22 が設けられている。チャンバ 10 内のガスの流れをサセプタ 12 上の半導体ウエハ W に対して軸対象に均一にするためには、排気ポート 22 を円周方向に等間隔で複数設ける構成が好ましい。各排気ポート 22 には排気管 24 を介して排気装置 26 が接続されている。排気装置 26 は、ターボ分子ポンプなどの真空ポンプを有しており、チャンバ 10 内のプラズマ処理空間を所望の真空度まで減圧することができる。チャンバ 10 の側壁の外には、半導体ウエハ W の搬入出口 27 を開閉するゲートバルブ 28 が取り付けられている。

30

【0033】

サセプタ 12 には、RF バイアス用の高周波電源 30 が整合器 32 および給電棒 34 を介して電気的に接続されている。この高周波電源 30 は、半導体ウエハ W に引き込まれるイオンのエネルギーを制御するのに適した一定周波数（通常 13 . 56 MHz 以下）の高周波 RF_L を可変のパワーで出力できるようになっている。整合器 32 は、高周波電源 30 側のインピーダンスと負荷（主にサセプタ、プラズマ、チャンバ）側のインピーダンスとの間で整合をとるためのリアクタンス可変の整合回路を収容している。その整合回路の中に自己バイアス生成用のブロッキングコンデンサが含まれている。

40

【0034】

サセプタ 12 の上面には、半導体ウエハ W を静電吸着力で保持するための静電チャック 36 が設けられ、静電チャック 36 の半径方向外側に半導体ウエハ W の周囲を環状に囲むフォーカスリング 38 が設けられる。静電チャック 36 は導電膜からなる電極 36 a を一対の絶縁膜 36 b , 36 c の間に挟み込んだものであり、電極 36 a には高圧の直流電源 40 がスイッチ 42 および被覆線 43 を介して電気的に接続されている。直流電源 40 よ

50

り印加される高圧の直流電圧により、静電力で半導体ウエハWを静電チャック36上に吸着保持することができる。

【0035】

サセプタ12の内部には、たとえば円周方向に延びる環状の冷媒室44が設けられている。この冷媒室44には、チラーユニット(図示せず)より配管46, 48を介して所定温度の冷媒たとえば冷却水cwが循環供給される。冷却水cwの温度によって静電チャック36上の半導体ウエハWの処理中の温度を制御できる。これと関連して、伝熱ガス供給部(図示せず)からの伝熱ガスたとえばHeガスが、ガス供給管50を介して静電チャック36の上面と半導体ウエハWの裏面との間に供給される。また、半導体ウエハWのローディング/アンローディングのためにサセプタ12を垂直方向に貫通して上下移動可能なリフトピンおよびその昇降機構(図示せず)等も設けられている。

10

【0036】

次に、この誘導結合型プラズマエッチング装置においてプラズマ生成に関係する各部の構成を説明する。

【0037】

チャンバ10の天井または天板はサセプタ12から比較的大きな距離間隔を隔てて設けられており、この天板としてたとえば石英板からなる円形の誘電体窓52が気密に取り付けられている。この誘電体窓52の上には、チャンバ10内に誘導結合のプラズマを生成するための環状のRFアンテナ54を外部から電磁的に遮蔽して収容するアンテナ室56がチャンバ10と一体に設けられている。このRFアンテナ54の具体的な構成および作用は後に説明する。

20

【0038】

アンテナ室56内には、チャンバ10内の処理空間に生成される誘導結合プラズマの密度分布を径方向で可変制御するために、RFアンテナ54と電磁誘導により結合可能な可変コンデンサ58付きの環状のフローティングコイル60も設けられている。可変コンデンサ58は、主制御部80の制御の下で容量可変部82により一定範囲内で任意に可変されるようになっている。

【0039】

高周波給電部62は、高周波電源64、整合器66、高周波給電ライン68および帰線ライン70を有している。高周波給電ライン68は、整合器66の出力端子とRFアンテナ54のRF入口端とを電氣的に接続する。帰線ライン70は接地電位のアースラインであり、RFアンテナ54のRF出口端と電氣的に接地電位に保たれる接地電位部材(たとえばチャンバ10または他の部材)とを電氣的に接続する。

30

【0040】

高周波電源64は、誘導結合の高周波放電によるプラズマの生成に適した一定周波数(通常13.56MHz以上)の高周波RF_Hを可変のパワーで出力できるようになっている。整合器66は、高周波電源64側のインピーダンスと負荷(主にRFアンテナ、プラズマ)側のインピーダンスとの間で整合をとるためのリアクタンス可変の整合回路を収容している。

【0041】

チャンバ10内の処理空間に処理ガスを供給するための処理ガス供給部は、誘電体窓52より幾らか低い位置でチャンバ10の側壁の中(または外)に設けられる環状のマニホールまたはバッファ部72と、円周方向に等間隔でバッファ部72からプラズマ生成空間に臨む多数の側壁ガス吐出孔74と、処理ガス供給源76からバッファ部72まで延びるガス供給管78とを有している。処理ガス供給源76は、流量制御器および開閉弁(図示せず)を含んでいる。

40

【0042】

主制御部80は、たとえばマイクロコンピュータを含み、このプラズマエッチング装置内の各部たとえば排気装置26、高周波電源30, 64、整合器32, 66、静電チャック用のスイッチ42、処理ガス供給源76、容量可変部82、チラーユニット(図示せず)

50

)、伝熱ガス供給部(図示せず)等の個々の動作および装置全体の動作(シーケンス)を制御する。

【0043】

この誘導結合型プラズマエッチング装置において、エッチングを行なうには、先ずゲートバルブ28を開状態にして加工対象の半導体ウエハWをチャンバ10内に搬入して、静電チャック36の上に載置する。次に、ゲートバルブ28を閉めてから、処理ガス供給源76よりガス供給管78、バッファ部72および側壁ガス吐出孔74を介してエッチングガス(一般に混合ガス)を所定の流量および流量比でチャンバ10内に導入し、排気装置26によりチャンバ10内の圧力を設定値にする。さらに、高周波給電部62の高周波電源64をオンにしてプラズマ生成用の高周波 RF_H を所定の RF パワーで出力させ、整合器66、 RF 給電ライン68および帰線ライン70を介して RF アンテナ54に高周波 RF_H の電流を供給する。一方、高周波電源30をオンにしてイオン引き込み制御用の高周波 RF_L を所定の RF パワーで出力させ、この高周波 RF_L を整合器32および給電棒34を介してサセプタ12に印加する。また、伝熱ガス供給部より静電チャック36と半導体ウエハWとの間の接触界面に伝熱ガス(Heガス)を供給するとともに、スイッチ42をオンにして静電チャック36の静電吸着力により伝熱ガスを上記接触界面に閉じ込める。

10

【0044】

チャンバ10内において、側壁ガス吐出孔74より吐出されたエッチングガスは、誘電体窓52の下の処理空間に拡散する。 RF アンテナ54の後述する各コイルセグメントを流れる高周波 RF_H の電流およびフローティングコイル60を流れる誘導電流によって発生する磁力線(磁束)が誘電体窓52を貫通してチャンバ10内の処理空間(プラズマ生成空間)を横切り、処理空間内で方位角方向の誘導電界が発生する。この誘導電界によって方位角方向に加速された電子がエッチングガスの分子や原子と電離衝突を起こし、ドーナツ状のプラズマが生成される。

20

【0045】

このドーナツ状プラズマのラジカルやイオンは広い処理空間で四方に拡散し、ラジカルは等方的に降り注ぐようにして、イオンは直流バイアスに引っぱられるようにして、半導体ウエハWの上面(被処理面)に供給される。こうして半導体ウエハWの被処理面にプラズマの活性種が化学反応と物理反応をもたらし、被加工膜が所望のパターンにエッチングされる。

30

【0046】

ここで「ドーナツ状のプラズマ」とは、チャンバ10の径方向内側(中心部)にプラズマが立たず径方向外側にのみプラズマが立つような厳密にリング状のプラズマに限定されず、むしろチャンバ10の径方向内側より径方向外側のプラズマの体積または密度が大きいことを意味する。また、処理ガスに用いるガスの種類やチャンバ10内の圧力の値等の条件によっては、ここで云う「ドーナツ状のプラズマ」にならない場合もある。

【0047】

この誘導結合型プラズマエッチング装置は、 RF アンテナ54を以下に説明するような特殊な空間的レイアウトおよび電氣的接続構成にするとともに、サセプタ12近傍のプラズマ密度分布を径方向で任意に制御するために、プロセスレシピで設定される所定のプロセスパラメータ(たとえば圧力、 RF パワー、ガス流量等)に応じて主制御部80が容量可変部82によりフローティングコイル60のループ内に設けられる可変コンデンサ58の静電容量を可変するようにしている。

40

[RF アンテナおよびフローティングコイルの基本構成および作用]

【0048】

図2および図3に、このプラズマ処理装置における RF アンテナおよびフローティングコイルの配置構成(レイアウト)および電氣的結線構成を示す。

【0049】

RF アンテナ54は、好ましくは周回方向で分割されている複数(たとえば2つ)のコ

50

イルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) からなる。これら 2 つのコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) は、空間的には、各々が半円の円弧状に形成されていて、周回方向の一周またはその大部分を埋めるように直列に配置されている。より詳しくは、R F アンテナ 5 4 の一周のループ内において、第 1 のコイルセグメント 8 4 (1) の R F 入口端 8 4 (1) (RF-In) と第 2 のコイルセグメント 8 4 (2) の R F 出口端 8 4 (2) (RF-Out) とが周回方向で間隙 G_{84} を介して相対向または隣接し、第 1 のコイルセグメント 8 4 (1) の R F 出口端 8 4 (1) (RF-Out) と第 2 のコイルセグメント 8 4 (2) の R F 入口端 8 4 (2) (RF-In) とが周回方向で別の間隙 G_{84} を介して相対向または隣接している。

【 0 0 5 0 】

そして、これらのコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) は、電気的には、それぞれの一方の端つまり R F 入口端 8 4 (1) (RF-In) , 8 4 (2) (RF-In) が上方に延びる接続導体 8 6 (1) , 8 6 (2) および高周波入口側のノード N_A を介して高周波給電部 6 2 からの R F 給電ライン 6 8 に接続され、それぞれの他方の端つまり R F 出口端 8 4 (1) (RF-Out) , 8 4 (2) (RF-Out) が上方に延びる接続導体 8 8 (1) , 8 8 (2) および高周波出口側のノード N_B を介してアースライン 7 0 に接続されている。アンテナ室 5 6 内で上記のように R F アンテナ 5 4 の上方に延びる接続導体 8 6 (1) , 8 6 (2) , 8 8 (1) , 8 8 (2) は、誘電体窓 5 2 から十分な距離を隔てて (相当高い位置で) 横方向の分岐線または渡り線を形成しており、各コイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) に対する電磁的な影響を少なくしている。

【 0 0 5 1 】

このように、高周波給電部 6 2 からの R F 給電ライン 6 8 と接地電位部材へのアースライン 7 0 との間で、またはノード N_A とノード N_B との間で、R F アンテナ 5 4 を構成する 2 つのコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) 同士が互いに電気的に並列に接続されている。そして、これらのコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) をそれぞれ流れる高周波のアンテナ電流の向きが周回方向で同じになるように、ノード N_A とノード N_B との間で R F アンテナ 5 4 内の各部が結線されている。

【 0 0 5 2 】

この実施形態では、好ましい一形態として、R F アンテナ 5 4 を構成する 2 つのコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) がおおよそ等しい自己インダクタンスを有している。通常は、それらのコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) が線材、線径および線長を同じにすることによって、自己インダクタンス同一性ないし近似性の要件が満たされる。

【 0 0 5 3 】

フローティングコイル 6 0 は、電気的にフローティング状態に置かれ、R F アンテナ 5 4 の内側に配置されている。ここで、本発明における電気的なフローティング状態とは、電源およびグラウンド (接地電位) のいずれからも電気的に浮遊または分離している状態であり、周囲の導体とは電荷または電流のやりとりが全然または殆どなく、専ら電磁誘導により当該物体で電流が流れ得る状態をいう。

【 0 0 5 4 】

また、フローティングコイル 6 0 は、基本的な構造として、両端が切れ目または間隙 G_{60} を挟んで開放した単巻コイル (または複巻コイル) からなり、その切れ目 G_{60} に可変コンデンサ 5 8 を設けている。フローティングコイル 6 0 のコイル導体の材質は、導電率の高い金属、たとえば銀メッキを施した銅が好ましい。

【 0 0 5 5 】

可変コンデンサ 5 8 は、後述するように、たとえばバリコンまたはバリキャップのような市販の汎用タイプでもよく、あるいはフローティングコイル 6 0 に一体に作り込まれる特注品または一品製作品でもよい。容量可変部 8 2 は、可変コンデンサ 5 8 の静電容量を典型的にはメカニカル的な駆動機構または電気的な駆動回路により可変制御するようになっている。

【 0 0 5 6 】

この実施形態においては、R F アンテナ 5 4 とフローティングコイル 6 0 の両者が、互いに相似なループ形状 (図示の例は円環形状) を有することと、いずれも誘電体窓 5 2 の

10

20

30

40

50

上に載って配置されることと、互いに同軸に配置されることが好ましい。

【0057】

なお、本発明において「同軸」とは、軸対称の形状を有する複数の物体間でそれぞれの中心軸線が互いに重なっている位置関係であり、複数のコイル間に関してはそれぞれのコイル面が軸方向で互いにオフセットしている場合だけでなく同一面上で一致している場合（同心状の位置関係）も含む。

【0058】

この実施形態の誘導結合型プラズマエッチング装置においては、高周波給電部62より供給される高周波のアンテナ電流がRFアンテナ54内の各部を流れるとともに、フローティングコイル60内に誘導電流が流れることにより、RFアンテナ54を構成するコイルセグメント84(1)、84(2)の周りにはアンペールの法則にしたがってループ状に分布する高周波数の交流磁界が発生し、誘電体窓52の下には比較的内奥（下方）の領域でも処理空間を半径方向に横断する磁力線が形成される。

10

【0059】

ここで、処理空間における磁束密度の半径方向（水平）成分は、チャンバ10の中心と周辺部では高周波電流の大きさに関係なく常に零であり、その中間の何処かで極大になる。高周波数の交流磁界によって生成される方位角方向の誘導電界の強度分布も、径方向において磁束密度と同様の分布を示す。つまり、径方向において、ドーナツ状プラズマ内の電子密度分布は、マクロ的にはRFアンテナ54（コイルセグメント84(1)、84(2)）およびフローティングコイル60内の電流分布にほぼ対応する。

20

【0060】

ここで、RFアンテナ54内では、上記のように、コイルセグメント64(1)、64(2)はおおよそ等しい自己インダクタンス（つまりおおよそ等しいインピーダンス）を有し、かつ電氣的に並列に接続されている。これにより、プラズマ励起時には、第1のコイルセグメント84(1)の半周ループと、第2のコイルセグメント84(2)の半周ループとで常に同じ大きさのアンテナ電流 I_{RF} が流れ、RFアンテナ54の全体つまり1周のループ内で均一なアンテナ電流 I_{RF} が流れる。また、フローティングコイル60内ではその1周のループ内で常に同じ大きさの誘導電流 I_{IND} が流れる。

【0061】

したがって、チャンバ10の誘電体窓52の下（内側）に生成されるドーナツ状プラズマにおいては、RFアンテナ54（コイルセグメント84(1)、84(2)）およびフローティングコイル60のそれぞれの直下の位置付近で電流密度（つまりプラズマ密度）が突出して高くなる（極大になる）。このように、ドーナツ状プラズマ内の電流密度分布は径方向で均一ではなく凹凸のプロファイルとなる。しかし、チャンバ10内の処理空間でプラズマが四方に拡散することによって、サセプタ12の近傍つまり基板W上ではプラズマの密度がかなり均される。

30

【0062】

この実施形態においては、RFアンテナ54（コイルセグメント84(1)、84(2)）およびフローティングコイル60において一様または均一なアンテナ電流 I_{RF} および誘導電流 I_{IND} がそれぞれのループ内を流れるので、周回方向では常にドーナツ状プラズマ内はもちろんサセプタ12の近傍つまり基板W上でも略均一なプラズマ密度分布が得られる。

40

【0063】

また、径方向においては、主制御部80の制御の下で容量可変部82により可変コンデンサ58の静電容量を可変調整することにより、フローティングコイル60内で流れる誘導電流 I_{IND} の向きおよび電流量を任意に制御することができる。これによって、フローティングコイル60の直下付近で生成されるプラズマの密度を任意に制御し、ひいてはドーナツ状プラズマが処理空間で四方（特に径方向）に拡散する結果として得られるサセプタ12近傍のプラズマ密度分布を径方向で任意または多様に制御することができる。フローティングコイル60の作用については後に詳細に説明する。

【0064】

50

この実施形態においては、電氣的に並列接続される複数のコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) により R F アンテナ 5 4 が構成されているので、R F アンテナ 5 4 内の波長効果や電圧降下は個々のコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) 毎にその長さに依存する。したがって、個々のコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) 内で波長効果を起こさないように、そして電圧降下があまり大きくならないように、各々のコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) の長さを選定することによって、R F アンテナ 5 4 内の波長効果や電圧降下の問題を全て解決することができる。波長効果の防止に関しては、各コイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) の長さを高周波 R F_H の 1 / 4 波長よりも短く (より好ましくは十分短く) することが望ましい。

【 0 0 6 5 】

このように、この実施形態の R F アンテナ 5 4 は、波長効果が起こり難いだけでなく、アンテナ内に生じる電位差 (電圧降下) が小さいので、R F アンテナ 5 4 とプラズマとの容量結合によって誘電体窓 5 2 の各部に入射するイオン衝撃のばらつきを小さくすることができる。これによって、誘電体窓 5 2 の一部が局所的または集中的に削れるといった望ましくない現象を低減できるという効果も得られる。

【 0 0 6 6 】

プラズマ生成に対するフローティングコイル 6 0 の作用、特に可変コンデンサ 5 8 の静電容量を可変したときの作用は、図 4 に示すようなシンプルなモデル (基本構成) について考察すると理解しやすい。この実施形態において複数 (2 つ) のコイルセグメント 8 4 (1) , 8 4 (2) からなる R F アンテナ 5 4 は、誘導結合のプラズマを生成する作用に関しては、図示のような同一口径の円環状単巻きコイル [5 4] と等価である。

【 0 0 6 7 】

図 4 のモデルにおいて、高周波電源 6 4 より R F アンテナ 5 4 に一定周波数 f の高周波 R F_H を供給して、R F アンテナ 5 4 にアンテナ電流 I_{RF} を流したとき、電磁誘導によりフローティングコイル 6 0 内に生じる起電力つまり誘導起電力 V_{IND} はファラデーの法則から次の式 (1) で表わされる。

$$V_{IND} = - d / dt = - i M I_{RF} \quad \dots (1)$$

【 0 0 6 8 】

ここで、 ω は角周波数 ($\omega = 2 \pi f$)、 M は R F アンテナ 5 4 とフローティングコイル 6 0 との間の相互インダクタンスである。なお、上記の式 (1) では、フローティングコイル 6 0 とプラズマとの間の相互インダクタンスは相対的に小さいので無視している。

【 0 0 6 9 】

この誘導起電力 V_{IND} によりフローティングコイル 6 0 内で流れる電流 (誘導電流) I_{IND} は、次の式 (2) で表わされる。

$$I_{IND} = V_{IND} / Z_{60} = - i M I_{RF} / \{ R_{60} + i (L_{60} \omega - 1 / C_{58}) \} \quad \dots (2)$$

【 0 0 7 0 】

ここで、 Z_{60} はフローティングコイル 6 0 のインピーダンス、 R_{60} はフローティングコイル 6 0 の抵抗 (プラズマに吸収されるパワーに起因する抵抗成分も含む)、 L_{60} はフローティングコイル 7 0 の自己インダクタンス、そして C_{58} は可変コンデンサ 5 8 の静電容量である。

【 0 0 7 1 】

フローティングコイル 6 0 の一般的な材質および構造、ならびに通常の使用形態では、 $| R_{60} | \ll | L_{60} \omega - 1 / C_{58} |$ であるから、誘導電流 I_{IND} は次の近似式 (3) で表わされる。

$$I_{IND} \approx - M I_{RF} / (L_{60} \omega - 1 / C_{58}) \quad \dots (3)$$

【 0 0 7 2 】

この式 (3) は、可変コンデンサ 5 8 の静電容量 C_{58} に応じてフローティングコイル 6 0 内で流れる誘導電流 I_{IND} の向きが周回方向で変わることを意味する。すなわち、フローティングコイル 6 0 内で直列共振が起きるときの可変コンデンサ 5 8 の静電容量 C_{58} の値を C_R とすると、 C_{58} が C_R よりも大きい場合は、 $L_{60} \omega > 1 / C_{58}$ となつて、つまりフローテ

10

20

30

40

50

リングコイル60内のリアクタンス ($L_{60} - 1/C_{58}$) が正の値となって、フローティングコイル60内には負極性 (アンテナ電流 I_{RF} と周回方向で逆向き) の誘導電流 I_{IND} が流れる。しかし、 C_{58} が C_R よりも小さい場合は、 $L_{60} < 1/C_{58}$ となって、つまりフローティングコイル60内のリアクタンス ($L_{60} - 1/C_{58}$) が負の値となって、フローティングコイル60内には正極性 (RFアンテナ54を流れる電流 I_{RF} と周回方向で同じ向き) の誘導電流 I_{IND} が流れる。この特性を図5のグラフ (プロット図) に示す。

【0073】

図5のグラフにおいて、横軸は、可変コンデンサ58の静電容量 C_{58} であり、20 pF から 1000 pF まで連続的に変化させている。縦軸は、誘導電流 I_{RF} とアンテナ電流 I_{RF} の比 (I_{IND}/I_{RF}) であり、RFアンテナ54を流れるアンテナ電流 I_{RF} に対して何倍の誘導電流 I_{IND} がフローティングコイル60内に流れるのかを表わしている。電流比 (I_{IND}/I_{RF}) が正の値のときは、誘導電流 I_{RF} が周回方向でアンテナ電流 I_{RF} と同じ向きに流れる。反対に、電流比 (I_{IND}/I_{RF}) が負の値のときは、誘導電流 I_{IND} が周回方向でアンテナ電流 I_{RF} と逆向きに流れる。なお、このグラフの計算例では、 $f(\omega/2\pi) = 13.56$ MHz、 $M = 350$ nH、 $L_{60} = 580$ nHとしている。この場合、フローティングコイル60内で直列共振を起こす静電容量 C_{58} の値 C_R は、 $L_{60} = 1/C_R$ の共振条件から、 $C_R = 230$ pF である。

【0074】

図5に示すように、可変コンデンサ58の静電容量 C_{58} が 20 pF のときは、誘導電流 I_{IND} は零に近い正の値になる。 C_{58} の値を 20 pF から増やしていくと、誘導電流 I_{IND} は正の向き (アンテナ電流 I_{RF} と同じ向き) で漸次的に増大し、やがてアンテナ電流 I_{RF} を凌駕し、そこからは指数関数的に増大し、直列共振を起こす静電容量値 C_R の直前で最大になる。そして、 C_{58} の値が C_R を超えると、とたんに誘導電流 I_{IND} が負の向き (アンテナ電流 I_{RF} と逆向き) で大きな電流になる。さらに C_{58} の値を増やしていくと、誘導電流 I_{IND} は負の向きを保ったまま対数関数的に小さくなり、最終的にはアンテナ電流 I_{RF} よりも絶対的に小さな値 I_S に漸近する。ここで、飽和値 I_S は $I_S = MI_{RF}/L_{60}$ であり、上記の例 ($M = 350$ nH、 $L_{60} = 580$ nH) では $I_S = 0.6 I_{RF}$ である。

【0075】

フローティングコイル60の作用の中で特に重要な点は、可変コンデンサ58の静電容量 C_{58} の値に応じて誘導電流 I_{IND} の流れる向きが変わり、それによってチャンバ10内で生成されるドーナツ状プラズマ内のプラズマ密度分布に与える影響 (作用効果) が全く違ってくることである。

【0076】

すなわち、フローティングコイル60内で誘導電流 I_{IND} が周回方向でアンテナ電流 I_{RF} と逆向きに流れるときは、そのコイル導体の直下位置付近で誘導磁界の強度ないしは誘導結合プラズマの密度を局所的に低減する作用効果が得られ、誘導電流 I_{IND} の電流値が大きいほどそのプラズマ密度低減効果の度合いが増す。

【0077】

これに対して、フローティングコイル60内で誘導電流 I_{IND} が周回方向でアンテナ電流 I_{RF} と同じ向きに流れるときは、そのコイル導体の直下位置付近で誘導磁界の強度ないしは誘導結合プラズマの密度を局所的に増強する作用効果が得られ、誘導電流 I_{IND} の電流値が大きいほどそのプラズマ密度増強効果の度合いが増す。

【0078】

したがって、可変コンデンサ58の静電容量 C_{58} を可変することにより、フローティングコイル60を所定位置に固定した状態の下で、チャンバ10内で生成されるドーナツ状プラズマ内のプラズマ密度分布を自在に制御し、ひいてはドーナツ状プラズマが処理空間で四方 (特に径方向) に拡散する結果として得られるサセプタ12近傍のプラズマ密度分布を径方向で任意または多様に制御することができる。

【0079】

さらには、上記のようにアンテナ電流 I_{RF} と周回方向で同じ向きの誘導電流 I_{IND} をフロ

10

20

30

40

50

ーティングコイル60内で流すことにより、RFアンテナ54だけでなくフローティングコイル60にも誘導結合プラズマの生成に積極的またはプラスに作用させる場合の効果として、RFパワー供給効率を向上させる面もある。すなわち、誘導結合プラズマの生成を増強する方向にフローティングコイル60を作用させる場合は、RFアンテナ54側の負担が軽くなり、RFアンテナ54に供給する高周波電流 I_{RF} の電流量を低減することができる。それによって、高周波給電システムの各部（特に整合器66、高周波給電導体68等）で生じる高周波RF_Hのパワー損失を低減することができる。

【0080】

上述した図4のモデルはRFアンテナ54の径方向内側にフローティングコイル60を配置しているが、図6に示すようにRFアンテナ54の径方向外側にフローティングコイル60を配置する構成でも作用は同じである。すなわち、相互インダクタンスMが同じであれば、フローティングコイル60がRFアンテナ54の内側であっても外側であっても、フローティングコイル60には同じ向きおよび同じ大きさの誘導電流 I_{IND} が流れる。

10

【0081】

もっとも、フローティングコイル60がRFアンテナ54から遠く離れていると、相互インダクタンスMは小さくなり、フローティングコイル60内に励起される誘導起電力 V_{IND} が弱く（低く）なる。しかし、そのような場合でも、可変コンデンサ58の静電容量 C_{58} を調整してフローティングコイル60内で直列共振の状態ないしはそれに近い状態をつくることにより、実用上十分な大きさの誘導電流 I_{IND} を得ることは可能である。

【0082】

ただし、フローティングコイル60内で直列共振状態またはそれに近い状態が起きるときは、上記の近似式(3)は当てはまらず、次の近似式(4)が当てはまる。

20

$$I_{IND} = iM I_{RF} / R_{60} \quad \dots (4)$$

【0083】

この式(4)からわかるように、フローティングコイル60内で直列共振状態またはそれに近い状態が起きる場合は、誘導電流 I_{IND} がアンテナ電流 I_{RF} に対して90°前後の位相差をもつ。このような場合、相互インダクタンスMが小さすぎると、つまり式(4)の係数 (M / R_{60}) が小さすぎると、実用に適さない。したがって、この係数 (M / R_{60}) が1より大きいこと、つまり次の条件式(5)が満たされることが必要である。

$$M > R_{60} \quad \text{または} \quad 2 \pi f M > R_{60} \quad \dots (5)$$

30

【0084】

ここで、右辺の R_{60} は上記のようにフローティングコイル60の抵抗であり、そのコイル導体の抵抗 R_{60C} とプラズマ側のパワー吸収に相当する抵抗 R_{60P} との和 $(R_{60C} + R_{60P})$ であるが、おおよそ前者 (R_{60C}) が支配的であり、設計上は後者 (R_{60P}) を無視できる。

【0085】

理論的には、RFアンテナ54およびフローティングコイル60が図4または図6のような円環状単巻きコイルであって、両者の半径がそれぞれ a 、 b 、両者間の距離が d であるとすると、相互インダクタンスMは次の式(6)で表わされる。

【数 1】

$$M_{12} = \mu_0 \sqrt{ab} \left(\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right) \dots (6)$$

$$\text{ただし、 } k = \frac{4ab}{(a+b)^2 + d^2}$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

10

【0086】

一例として、同一平面上に半径 50 mm の RF アンテナ 54 と半径 r のフローティングコイル 60 を同軸に配置した場合、上記の式 (6) より求められる相互インダクタンス M と角周波数 ω との積 $M\omega$ は図 7 に示すような特性でフローティングコイル 60 の半径 r に依存する。ただし、 $f = 13.56 \text{ MHz}$ としている。

20

【0087】

フローティングコイル 60 の抵抗 R の典型的な値として $R = 1 \text{ } (\Omega)$ と見積もると、図 7 から $r < \text{約 } 150 \text{ mm}$ 、つまりフローティングコイル 60 の半径 r が RF アンテナ 54 の半径 (50 mm) の約 3 倍以内であれば、 $M\omega > 1$ つまり上記の条件式 (5) が満たされる。

【0088】

なお、図 7 の特性は、フローティングコイル 60 が径方向において RF アンテナ 54 の外側にあることを仮定している。フローティングコイル 60 が径方向において RF アンテナ 54 の内側にある場合は両者の関係が逆になり、アンテナ 54 の半径 (50 mm) がフローティングコイル 60 の半径 r の約 3 倍以下であれば、 $M\omega > 1$ つまり上記の条件式 (5) が成立する。見方を変えれば、フローティングコイル 60 の半径 r が RF アンテナ 54 の半径の約 1/3 倍以上あれば、 $M\omega > 1$ つまり上記の条件式 (5) が満たされる。

30

[実施形態 2]

【0089】

次に、図 8 ~ 図 10 につき、本発明の第 2 の実施形態を説明する。

【0090】

図 8 にこの第 2 の実施形態における誘導結合型プラズマエッチング装置の構成を示し、図 9 および図 10 にこの第 2 の実施形態における RF アンテナ 54 およびフローティングコイル 70 の配置構成 (レイアウト) および電気的結線構成を示す。図中、上述した第 1 の実施形態の装置 (図 1) と同様の構成または機能を有する部分には同一の符号を附している。

40

【0091】

この第 2 の実施形態においては、RF アンテナ 54 が、半径の異なる円環状の内側アンテナコイル 54₁ および外側アンテナコイル 54₂ を有している。ここで、外側アンテナコイル 54₂ は、上述した第 1 の実施形態における RF アンテナ 54 に相当する構成、つまり空間的には円環状の 1 周ループに沿って直列に配置され、電気的には並列に接続されている複数たとえば 2 つのコイルセグメント 84 (1) , 84 (2) を有し、径方向においてチャンバ 10 の側壁寄りに位置している。

【0092】

50

内側アンテナコイル 54_i は、フローティングコイル 60 よりも小さな口径を有する単一の円形コイルセグメント 90 からなり、フローティングコイル 60 および外側アンテナコイル 54_o と同一平面上（誘電体窓 52 の上）で同軸に配置されている。この内側コイルセグメント 90 は、単体で周回方向の一周またはその大部分を埋めるように環状に延びており、その両端 90 (RF-In), 90 (RF-out) が周回方向で内側間隙 G₉₀ を介して相対向または隣接している。内側コイルセグメント 90 の一方の端つまり RF 入口端部 90 (RF-In) は、上方に延びる接続導体 92 および高周波入口側のノード N_A を介して高周波給電部 62 からの RF 給電ライン 68 に接続されている。内側コイルセグメント 90 の他方の端つまり RF 出口端 90 (RF-Out) は、上方に延びる接続導体 94 および高周波出口側のノード N_C を介してアースライン 70 に接続されている。そして、ノード N_B とノード N_C との間には、インピーダンス調整部としての可変コンデンサ 96 が接続（挿入）されている。

10

【0093】

一例として、被処理基板である半導体ウエハ W の口径が 300 mm である場合、内側アンテナコイル 54_i、フローティングコイル 60 および外側アンテナコイル 54_o の口径はそれぞれ 100 mm、200 mm および 300 mm に選ばれる。

【0094】

このように内側アンテナコイル 54_i（コイルセグメント 90）、外側アンテナコイル 54_o（コイルセグメント 84(1), 84(2)）およびフローティングコイル 60 の三者が互いに相似なコイル形状を有し、フローティングコイル 60 が内側アンテナコイル 54_i と外側アンテナコイル 54_o の真ん中に同軸に配置される構成によれば、後述するように RF アンテナ 54（内側アンテナコイル 54_i / 外側アンテナコイル 54_o）におけるアンテナ内分配電流のバランスの制御とフローティングコイル 60 内で流れる誘導電流 I_{IND} の向きおよび大きさ（電流量）の制御とをそれぞれ独立に行うことができる。

20

【0095】

このような独立制御を行える主たる理由は、フローティングコイル 60 と内側アンテナコイル 54_i との間の相互インダクタンスを M_i とし、フローティングコイル 60 と外側アンテナコイル 54_o との間の相互インダクタンスを M_o とすると、M_i = M_o の関係があるためである。

【0096】

内側アンテナコイル 54_i および外側アンテナコイル 54_o にアンテナ内分配電流 I_{RFi}, I_{RFo} がそれぞれ流れるときに、フローティングコイル 60 内に生じる誘導起電力 V_{IND} は、重ね合わせの理により、内側アンテナコイル 54_i を内側のアンテナ内分配電流 I_{RFi} が流れるときにフローティングコイル 60 内に生じる誘導起電力と、外側アンテナコイル 54_o を外側のアンテナ内分配電流 I_{RFo} が流れるときにフローティングコイル 60 内に生じる誘導起電力とを足し合わせたものになる。ここで、それぞれの相互インダクタンス M_i, M_o が等しいとすれば、上記の式(1), (2), (3)より、フローティングコイル 60 に生じる誘導起電力ひいては誘導電流 I_{IND} は、アンテナ内分配電流 I_{RFi}, I_{RFo} の比 (I_{RFi} / I_{RFo}) には関係なく、それらの和 (I_{RFi} + I_{RFo}) に依存することがわかる。

30

【0097】

また、フローティングコイル 60 は、内側アンテナコイル 54_i と外側アンテナコイル 54_o の中間（好ましくは真ん中）に、つまり両アンテナコイル 54_i, 54_o のどちらにも近接して配置されるので、相互インダクタンス M_i, M_o の双方を大きくすることができる。

40

【0098】

この第2の実施形態においては、RF アンテナ 54 内で内側および外側アンテナコイル 54_i, 54_o をそれぞれ流れるアンテナ電流 I_{RFi}, I_{RFo} のバランス（比）を任意に調整するために、ノード N_A とノード N_C との間で、内側アンテナコイル 54_i とは並列に接続され、外側アンテナコイル 54_o とは直列に接続される可変コンデンサ 96 を設け、主制御部 80 の制御の下で容量制御部 82 により可変コンデンサ 96 の静電容量 C₉₆ を可変で

50

きるようにしている。

【0099】

すなわち、内側アンテナコイル54_iのインピーダンスを Z_i 、外側アンテナコイル54_oと可変コンデンサ96の合成インピーダンスを Z_o とすると、アンテナ内分配電流 I_{RFi} 、 I_{RFo} のバランス(比)は次の式(7)のようにそれらのインピーダンスの比で決まり、フローティングコイル60内で流れる誘導電流 I_{IND} には影響しない。

$$I_{RFi} : I_{RFo} = (1 / Z_i) : (1 / Z_o) \quad \dots \dots (7)$$

【0100】

この実施形態では、高周波給電部62からRFアンテナ54に供給される高周波電流が内側アンテナコイル54_iと外側アンテナコイル54_oとに分かれて流れる。ここで、可変コンデンサ96の静電容量 C_{96} を可変することにより、外側アンテナコイル54_oおよび可変コンデンサ96の合成インピーダンス Z_o を可変し、ひいては内側アンテナ電流 I_{RFi} と外側アンテナ電流 I_{RFo} との間の分配比を調節することができる。

10

【0101】

より詳細には、内側アンテナコイル54_iを流れる内側アンテナ電流 I_{RFi} と外側アンテナコイル54_oを流れる外側アンテナ電流 I_{RFo} は、通常は周回方向で同じ向きに設定される。そのためには、合成インピーダンス Z_o の虚数成分つまり合成リアクタンス X_o が正の値になる領域で外側コンデンサ96の静電容量 C_{96} を可変すればよい。この場合、 $X_o > 0$ の領域内で C_{96} の値を小さくするほど、合成リアクタンス X_o の値が小さくなって、外側アンテナ電流 I_{RFo} の電流量が相対的に大きくなり、そのぶん内側アンテナ電流 I_{RFi} の電流量が相対的に小さくなる。反対に、 $X_o < 0$ の領域内で C_{96} の値を大きくするほど、合成リアクタンス X_o の値が大きくなって、外側アンテナ電流 I_{RFo} の電流量が相対的に小さくなり、そのぶん内側アンテナ電流 I_{RFi} の電流量が相対的に大きくなる。

20

【0102】

このように、この実施形態の誘導結合型プラズマエッチング装置においては、コンデンサ96の静電容量 C_{96} を可変することにより、内側アンテナコイル54_i(コイルセグメント90)を流れる内側アンテナ電流 I_{RFi} と外側アンテナコイル54_o(コイルセグメント84(1)、84(2))を流れる外側アンテナ電流 I_{RFo} とのバランスを任意に制御し、ひいては内側アンテナコイル54_iおよび外側アンテナコイル54_oのそれぞれの直下位置付近における誘導結合プラズマ密度のバランスを任意に制御することができる。さらに、両アンテナ電流 I_{RFi} 、 I_{RFo} のバランスに影響されることなく、コンデンサ58の静電容量 C_{58} を可変することにより、中間のフローティングコイル60を流れる誘導電流 I_{IND} の電流量を任意に調節し、ひいてはフローティングコイル60の直下位置付近における誘導結合プラズマ密度のバランスを任意に制御することができる。これによって、サセプタ12近傍のプラズマ密度を径方向で一層多様かつ精細に制御することが可能であり、サセプタ12近傍のプラズマ密度分布を径方向で均一化することも一層高精度に行える。

30

【0103】

また、この実施形態においては、高周波給電部62の整合器66に直接接続されているのは内側アンテナコイル54_i(コイルセグメント90)および外側アンテナコイル54_o(コイルセグメント84(1)、84(2))だけであり、整合器66から直接見える負荷抵抗はこれらのアンテナコイル54_i(90)、54_o(90、84(1)、84(2))の抵抗成分のみである。フローティングコイル60で消費されるパワー(プラズマに吸収されるパワーも含む)に相当する抵抗成分は、結果的にアンテナコイル54_i、54_o(90、84(1)、84(2))の抵抗成分に直列接続で加わることになる。このように、フローティングコイル60を用いることにより、RFコイル54の見掛け上の負荷抵抗成分が増大するので、高周波給電部62における高周波電力の損失を低減し、プラズマ生成効率を向上させることができる。

40

【0104】

なお、フローティングコイル60の配置に関して、上述した実施形態では、フローティングコイル60の効き目(プラズマ密度増強作用またはプラズマ密度低減作用)を最大化

50

するように、フローティングコイル60をRFアンテナ54と同一平面上(典型的には誘電体窓52上)に配置した。しかし、フローティングコイル60の効き目を弱めた方が望ましい場合もある。

【0105】

たとえば、図5から見てとれるように、フローティングコイル60に逆向きの誘導電流 I_{IND} を流す場合はその電流値が0にはならず、フローティングコイル60の効き目(プラズマ密度低減作用)が強すぎることがあり得る。そのような場合は、フローティングコイル60を天板の誘電体窓52から(つまりプラズマ領域から)上方にたとえば10mm~20mm程度離して配置することにより、フローティングコイル60の強すぎる効果を適度に弱めることができる。これにより、可変コンデンサ58により誘導電流 I_{IND} の電流量を調整してプラズマ密度分布を調整する際に、丁度平坦なプロファイルになるような領域をコンデンサ58の静電容量 C_{58} の可変範囲に含めることができる。

10

【0106】

また、フローティングコイル60に正方向の誘導電流 I_{IND} を流す場合であっても、可変コンデンサ58の静電容量 C_{58} の可変範囲の下限が比較的大きな値である場合は、正方向であっても誘導電流 I_{IND} の電流値を0に近い値まで調整することができなくなる。このような場合にも、フローティングコイル60を誘電体窓52から上方に離して、フローティングコイル60の効き目を適度に弱める技法を好適に採ることができる。

【0107】

このようにフローティングコイル60の高さ位置または誘電体窓との距離間隔を変えることにより、フローティングコイル60の効き目加減を調節することができる。したがって、好適な一実施例として、フローティングコイル60の高さ位置を任意に可変する機構を備えることもできる。

20

[フローティングコイルの構造に関する実施例1]

【0108】

次に、図11~図15を参照して、本発明の誘導結合型プラズマ処理装置においてフローティングコイル60内の可変コンデンサ58に市販品のコンデンサ素子を用いる場合の実施例を説明する。

【0109】

図11に示す実施例は、フローティングコイル60に1つの切れ目 G_{60} を形成し、この場所に市販品の2端子型コンデンサ58を取り付ける。この実施例における特徴は、フローティングコイル60のコイル導体とコンデンサ58のパッケージ本体の端子とを結ぶ接続端子100a, 100bをコイル導体より上方(好ましくは垂直上方)に立てている構成にある。

30

【0110】

上記のようにフローティングコイル60に大きな誘導電流 I_{IND} を流す場合は、大電流を流せる大きなサイズの可変コンデンサ58が用いられる。ところが、コンデンサ58のサイズが大きいと、切れ目 G_{60} のサイズも大きくなり、フローティングコイル60のループ上で切れ目 G_{60} の箇所がフローティングコイル60の電磁界的な作用上無視できない特異点になり得る。

40

【0111】

この実施例では、上記のようにコンデンサ接続導体100a, 100bを垂直上方に延ばしてコンデンサ本体をコイル導体よりも一段上方に(プラズマ側から一段遠く離して)配置するので、コンデンサ本体がプラズマ側から見え難い構造、つまりマスキングされる構造になっている。

【0112】

図12Aおよび図12Bに示す別の実施例では、フローティングコイル60の切れ目 G_{60} をコイル周回方向に対して(またはコイル半径方向に対して)一定の角度(たとえば45°)で斜めに形成している。そして、切れ目 G_{60} を介して相対向するコイル導体の両

50

開放端部にそれぞれ設けられる一対のコンデンサ給電ポイント（コンデンサ接続導体 100a, 100b の基端の位置）102a, 102b がコイル中心 O を通る半径方向の直線 F 上に位置するように構成している。かかる構成により、プラズマ側からは、切れ目 G_{60} の箇所が見え難くなって、フローティングコイル 60 のコイル導体が周回方向であたかも連続しているように見える。

【0113】

一変形例として、フローティングコイル 60 の切れ目 G_{60} を、斜め一直線ではなく、図 12C に示すような入れ子構造を可能とする斜め形状にすることも可能である。

【0114】

図 13A に示す別の実施例では、フローティングコイル 60 の切れ目 G_{60} がコイル導体をコイル半径方向に対して斜めに切りながら延びているだけでなく、縦方向（コイル軸方向）に対しても斜めに切りながら延びている構成が特徴的である。かかる構成により、プラズマ側からは切れ目 G_{60} の箇所が一層見え難くなり、周回方向におけるフローティングコイル 60 のコイル導体の擬似的連続性が更に向上する。

10

【0115】

なお、フローティングコイル 60 のコイル導体の断面形状は任意であり、たとえば図 13B に示すように三角、四角または円のいずれであってもよい。

【0116】

図 14 に、フローティングコイル 60 の切れ目 G_{60} に起因する特異点の存在を解消または抑制するのに有効な別の実施例を示す。この実施例では、フローティングコイル 60 に周回方向に一定の間隔を置いて複数個たとえば 3 個の可変コンデンサ 58 を設けている。

20

【0117】

元々、誘導結合型プラズマ処理装置は、RF アンテナの直下では径方向に不均一に（ドーナツ状）にプラズマを生成し、それを拡散させてサセプタ側の基板上に均一なプラズマが得られるように設計されるものである。周回方向でドーナツ状プラズマ内のプラズマ密度に不均一な箇所がある場合にも、当然に拡散による平滑化が起きるが、径方向に比べると周回方向では平滑化に必要な拡散距離が長いため、平滑化または均一化し難い傾向がある。

【0118】

この点に関しては、図 14 に示すように、不連続点を周回方向に一定間隔で複数設けると、平滑化に必要な拡散距離が短くなる。たとえば、図示のようにフローティングコイル 60 に 120° 間隔で 3 個の切れ目 G_{60} を設けると、周回方向でプラズマの拡散に必要な距離は円周の $1/3$ になり、平滑化ないし均一化しやすくなる。

30

【0119】

図 15 の実施例は、図 14 の実施例の一変形例であり、フローティングコイル 60 にダミーの切れ目 G_{60}' を形成し、このダミーの切れ目 G_{60}' にダミーのコンデンサ電極 104 およびダミーのコンデンサ接続導体 106 を設ける構成を特徴とする。ダミーの切れ目 G_{60}' は、可変コンデンサ 58 を取り付けるための本来の切れ目 G_{60} と全く同じ構造でよく、全部の切れ目（ G_{60} , G_{60}' ）が周回方向で等間隔に配置されるように、本来の切れ目 G_{60} と混在して所定位置に 1 つまたは複数設けられる。ダミーのコンデンサ電極 104 は、一枚の導体板（たとえば銅板）で構成されてよい。ダミーのコンデンサ接続導体 106 も、本物のコンデンサ接続導体 100a, 100b と同様の材質および形状に作られてよい。

40

【0120】

図 14 の実施例ではフローティングコイル 60 に電氣的に直列接続で複数の可変コンデンサ 58 を設けるのに対して、図 15 の実施例は 1 個のコンデンサ 58 で済むという特徴がある。

[フローティングコイルの構造に関する実施例 2]

【0121】

50

次に、図 16 ~ 図 18 を参照して、可変コンデンサ 58 を構造体としてフローティングコイル 60 に一体に作り込む一実施例を示す。

【0122】

図 16 に示すように、この実施例では、切れ目 G_{60} に隣接する一方のコイル導体端部 60a の上には、同じ厚みを有する板状またはシート状の誘電体 108 および固定接点導体 110 が固着される。ここで、固定接点導体 110 は、誘電体 108 よりも切れ目 G_{60} から遠い位置に配置される。また、反対側で切れ目 G_{60} に隣接する他方のコイル導体端部 60b の上には、誘電体 108 および固定接点導体 110 と同じ厚みを有する板状またはシート状の固定接点導体 112 が固着される。可動電極 114 は、面一に並べられた固定接点導体 110、誘電体 108 および固定接点導体 112 の上面を摺動してコイル周回方向に移動できるようになっている。なお、フローティングコイル 60 の周回方向は、厳密には円弧であるが、局所的に切れ目 G_{60} の場所付近に限ってみれば、直線方向とみなしてよい。したがって、可動電極 114 が直線的に移動しても、フローティングコイル 60 の上から横に外れることはない。

10

【0123】

容量可変部 82 において、可動電極 114 を摺動させるためのスライド機構 116 は、たとえばボールネジ機構からなり、一定の位置で水平に延びる送りネジ 118 を回転駆動するためのステッピングモータ 120 と、送りネジ 118 と螺合するナット部（図示せず）を有し、送りネジ 118 の回転によってその軸方向に水平移動するスライダ本体 122 と、このスライダ本体 122 と可動電極 114 とを結合する圧縮コイルバネ 124 および鉛直方向で摺動可能に嵌合する一对の円筒体 126、128 とで構成されている。ここで、外側の円筒体 126 はスライダ本体 122 に固定され、内側の円筒体 128 は可動電極 114 に固定されている。圧縮コイルバネ 124 は、弾性力によって可動電極 114 を固定接点導体 110、誘電体 108 および固定接点導体 112 に押し付ける。容量制御部 130 は、ステッピングモータ 120 の回転方向および回転量を通じて可動電極 114 のスライド位置を制御する。

20

【0124】

この実施例では、切れ目 G_{60} を挟む一对のコイル導体端部 60e、60f の間に、図 17 のような等価回路で表される可変コンデンサ 58、第 1 のスイッチ S_1 および第 2 のスイッチ S_2 が作り込まれている。ここで、第 1 のスイッチ S_1 は可変コンデンサ 58 と電氣的に直列に接続される開閉器であり、第 2 のスイッチ S_2 は可変コンデンサ 58 と電氣的に並列に接続される開閉器である。

30

【0125】

より詳細には、可変コンデンサ 58 は、一方のコイル導体端部 60a と誘電体 108 と可動電極 114 とスライド機構 116 とによって構成されている。第 1 および第 2 のスイッチ S_1 、 S_2 は、固定接点導体 110、112 と可動電極 114 とスライド機構 116 とによって構成されている。

【0126】

ここで、図 18 につき、この実施例における作用を説明する。

【0127】

先ず、図 18 の (a) に示すように、可動電極 114 を、片側のコイル導体端部 60b 上の固定接点導体 112 のみに接触し、反対側のコイル端部 60a 上の固定接点導体 110 および誘電体 108 のいずれとも接触しない位置に移動させる。この位置では、スイッチ S_1 、 S_2 のいずれも開 (OFF) 状態であり、フローティングコイル 60 の切れ目 G_{60} は電氣的に完全にオープン (遮断) 状態になる。したがって、フローティングコイル 60 には誘導電流に I_{IND} が一切流れず、実質的にフローティングコイル 60 が無い場合と同じになる。

40

【0128】

次に、図 18 の (b) に示すように、可動電極 114 を、片側のコイル導体端部 60b 上の固定接点導体 112 に接触し、反対側のコイル導体端部 60a 上では誘電体 108 に

50

は接触し、固定接点導体 110 には接触しない位置に移動させる。この位置では、スイッチ S_2 は開 (OFF) 状態のままで、スイッチ S_1 が閉 (ON) 状態になり、可変コンデンサ 58 が有意のキャパシタンスをもって機能 (通電) する。

【0129】

この可変コンデンサ 58 の静電容量は、可動電極 114 を固定接点導体 112 に向って移動させるほど大きくなり、図 18 の (c) に示すように可動電極 114 が誘電体 108 の上面全体を覆う位置まで移動させたときに最大になる。

【0130】

そして、可動電極 114 を更に前進移動させて、図 18 の (d) に示すように固定接点導体 110 の上まで移動させると、両側の固定接点導体 110, 112 同士が可動電極 114 を介して短絡し、スイッチ S_1 も閉 (ON) 状態になる。すなわち、切れ目 G_{60} が短絡状態になり、フローティングコイル 60 はコイル導体の両端が閉じたリングになる。

【0131】

なお、図 17 のように可変コンデンサ 58 と直列および / または並列にスイッチ S_1 , S_2 を接続する構成は、市販品のコンデンサ素子を用いる実施例 (図 11 ~ 図 15) においても実現できる。また、直列接続のスイッチ S_1 は、フローティングコイル 60 のループ内で可変コンデンサ 58 とは別の切れ目に設けられてもよい。

[RF アンテナおよびフローティングコイルのレイアウトに関する他の実施例または変形例]

【0132】

図 19 ~ 図 29 に、RF アンテナ 54 およびフローティングコイル 60 のレイアウトに関する他の実施例または変形例を示す。

【0133】

上記第 2 の実施形態では、フローティングコイル 60 を径方向において内側アンテナコイル 54_i と外側アンテナコイル 54_o との間 (好ましくは真ん中) に配置した。別の実施例として、図 19 に示すようにフローティングコイル 60 を内側アンテナコイル 54_i の径方向内側に配置する構成、あるいは図 20 に示すようにフローティングコイル 60 を外側アンテナコイル 54_o の径方向外側に配置する構成も可能である。

【0134】

さらには、口径の異なる複数のフローティングコイルを同軸に配置することも可能である。たとえば、図 21 に示すように、内側アンテナコイル 54_i の径方向内側に小サイズの口径を有するフローティングコイル 60_i を配置し、内側アンテナコイル 54_i と外側アンテナコイル 54_o との間に中サイズの口径を有するフローティングコイル 60_m を配置し、外側アンテナコイル 54_o の径方向外側に大サイズの口径を有するフローティングコイル 60_o を配置してもよい。この場合も、フローティングコイル 60_i , 60_m , 60_o のループ内に個別の可変コンデンサ 58_i , 58_m , 58_o がそれぞれ設けられる。あるいは、図 22 に示すように、2 つ (内側および外側) のアンテナコイル 54_i , 54_o の間に口径の異なる複数 (たとえば 2 つ) のフローティングコイル 60_i , 60_o を配置する構成も可能である。

【0135】

RF アンテナ 54 に付加するインピーダンス調整部については、図 23 に示すように、高周波入口側のノード N_A と高周波出口側のノード N_C との間に、外側アンテナコイル 54_o と直列に接続される可変コンデンサ 96 を設けるだけでなく、内側アンテナコイル 54_i と直列に接続される固定コンデンサ 132 を設けることにより、内側および外側アンテナ電流 I_{RFi} , I_{RFO} 間のバランス調整の可変範囲を大きくすることができる。図 24 に示すように、固定コンデンサ 132 を可変コンデンサ 134 に置き換えてもよい。

【0136】

逆に、図 25 に示すように、ノード N_A とノード N_C との間に、内側アンテナコイル 54_i と直列に接続される可変コンデンサ 134 を設け、外側アンテナコイル 54_o と直列に接

10

20

30

40

50

続されるインピーダンス調整部を一切設けない構成も可能である。あるいは、内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o をそれぞれ流れる内側および外側アンテナ電流 I_{RF_i} 、 I_{RF_o} 間のバランス調整の可変範囲を大きくするために、図26に示すように、ノード N_A とノード N_C との間に、内側アンテナコイル 54_i と直列に接続される可変コンデンサ134を設けるとともに、外側アンテナコイル 54_o と直列に接続される固定コンデンサ136を設けることもできる。

【0137】

図27に示すように、RFアンテナ54の終端側で、つまりノード N_C とアースライン70との間（あるいはアースライン70上）にRFアンテナ54内のすべてのコイルセグメント90、84(1)、84(2)と電氣的に直列に接続される出側の共通インピーダンス調整部（たとえばコンデンサ）138を好適に備えることができる。この出側（終端）の共通インピーダンス調整部138は、通常は固定コンデンサであってよいが、可変コンデンサであってよい。

10

【0138】

この出側（終端）共通インピーダンス調整部138は、RFアンテナ54の全体のインピーダンスを調整する機能を有するだけでなく、コンデンサを用いる場合はRFアンテナ54の全体の電位を接地電位から直流的に引き上げて、天板または誘電体窓52が蒙るイオンパッタを抑制する機能を有する。このような共通インピーダンス調整部138は、上述した他の実施例または変形例（図19～図26）にも適用可能である。

【0139】

図28に示すように、内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o をそれぞれ流れる内側および外側アンテナ電流 I_{RF_i} 、 I_{RF_o} 間のバランスを調整するためのインピーダンス調整部（可変コンデンサ96）を高周波入口側のノード N_A とノード N_D との間に設けることも可能である。ここで、ノード N_A は内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o 間のノードであり、ノード N_D はコイルセグメント84(1)、84(2)間のノードである。

20

【0140】

また、図29に示すように、周回方向におけるプラズマ密度分布の偏りを防止するために、内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o 内の切れ目 G_{90} 、 G_{84} およびフローティングコイル60内の切れ目 G_{60} のそれぞれの位置を周回方向において相互にずらす構成を好適に採ることができる。

30

[3系統のアンテナコイルに関する実施例]

【0141】

図30に、RFアンテナ54を口径の異なる3系統のアンテナコイル 55_i 、 55_m 、 55_o によって構成する一実施例を示す。このRFアンテナ54において、最も小さな口径を有する内側アンテナコイル 55_i および中間の口径を有する中間アンテナコイル 55_m は、上記第2の実施形態における内側アンテナコイル 54_i および外側アンテナコイル 54_o に対応する構成をそれぞれ有している。この実施例において最も大きな口径を有する外側のアンテナコイル 55_o は、周回方向で分割されている3つの外側コイルセグメント140(1)、140(2)、140(3)からなる。これら3系統のアンテナコイル 55_i 、 55_m 、 55_o は、好ましくは相似のループ形状（図示の例は円環形状）を有し、同一平面上（誘電体窓52上）で同軸（同心状）に配置される。

40

【0142】

一例として、被処理基板である半導体ウエハWの口径が300mmである場合、内側、中間および外側アンテナコイル 55_i 、 55_m 、 55_o の口径はそれぞれ100mm、300mmおよび500mmに選ばれる。

【0143】

外側アンテナコイル 55_o を構成する3つの外側コイルセグメント140(1)、140(2)、140(3)は、空間的には、各々が約1/3周の円弧状に形成されていて、全体で周回方向の一周またはその大部分を埋めるように直列に配置されている。より詳しくは、外

50

側アンテナコイル 140 の一周ループ内において、第 1 の外側コイルセグメント 140 (1) の RF 入口端 140 (1) (RF-In) と第 3 の外側コイルセグメント 140 (3) の RF 出口端 140 (3) (RF-Out) とが周回方向で外側間隙 G_{140} を介して相対向または隣接し、第 1 の外側コイルセグメント 140 (1) の RF 出口端 140 (1) (RF-Out) と第 2 の外側コイルセグメント 140 (2) の RF 入口端 140 (2) (RF-In) とが周回方向で別の外側間隙 G_{140} を介して相対向または隣接し、第 2 の外側コイルセグメント 140 (2) の RF 出口端 140 (2) (RF-Out) と第 3 の外側コイルセグメント 140 (3) の RF 入口端 140 (3) (RF-In) とが周回方向で別の外側間隙 G_{140} を介して相対向または隣接している。

【0144】

このように、高周波給電部 62 の RF 給電ライン 68 とアースライン 70 との間で、または高周波入口側のノード N_A と高周波出口側のノード N_C との間で、中間アンテナコイル 55_m を構成する 2 つの中間コイルセグメント 84 (1), 84 (2) 同士が互いに電氣的に並列に接続されるとともに、外側アンテナコイル 140 を構成する 3 つの外側コイルセグメント 140 (1), 140 (2), 140 (3) 同士が互いに電氣的に並列に接続され、さらには内側アンテナコイル 55_i を単体で構成する内側コイルセグメント 90 もそれらの中間コイルセグメント 84 (1), 84 (2) および外側コイルセグメント 140 (1), 140 (2), 140 (3) と電氣的に並列に接続されている。そして、中間コイルセグメント 84 (1), 84 (2) をそれぞれ流れる中間アンテナ電流 I_{RFm} の向きが周回方向で同じになり、外側コイルセグメント 140 (1), 140 (2), 140 (3) をそれぞれ流れる外側アンテナ電流 I_{RFo} の向きが周回方向で全部同じになるように、RF アンテナ 54 内の各部が結線されている。

【0145】

この実施例では、好ましい一形態として、中間アンテナコイル 55_m を構成する 2 つの中間コイルセグメント 84 (1), 84 (2) がおおよそ等しい自己インダクタンスを有し、外側アンテナコイル 54_o を構成する 3 つの外側コイルセグメント 140 (1), 140 (2), 140 (3) がおおよそ等しい自己インダクタンスを有している。これにより、中間アンテナコイル 55_m の一周ループ内つまり中間コイルセグメント 84 (1), 84 (2) に一様または均一な中間アンテナ電流 I_{RFm} が流れ、外側アンテナコイル 55_o の一周ループ内つまり外側コイルセグメント 140 (1), 140 (2), 140 (3) に一様または均一な外側アンテナ電流 I_{RFo} が流れるようになっている。

【0146】

この実施例においては、RF アンテナ 54 のコイル結線構造に重要な特徴がある。すなわち、高周波給電部 62 の高周波給電ライン 68 からアースライン 70 まで各々の高周波伝送路を一筆書きで廻った場合に、中間アンテナコイル 55_m を通るときの向き (図 30 では反時計回り) が内側アンテナコイル 55_i および外側アンテナコイル 55_o を通るときの向き (図 30 では時計回り) と周回方向で逆になるという構成になっている。そして、このような逆方向結線の下で、中間アンテナコイル 55_m を流れる中間アンテナ電流 I_{RFm} が内側および外側アンテナコイル 55_i, 55_o をそれぞれ流れる内側および外側アンテナ電流 I_{RFi} , I_{RFo} と周回方向で同じ向きになるように、可変コンデンサ 96 の静電容量 C_{96} が所定の範囲内で可変ないし選定されるようになっている。

【0147】

すなわち、中間アンテナコイル 55_m と可変コンデンサ 96 とからなる直列回路が直列共振を起こすときの静電容量も小さな領域 (それらの合成リアクタンスつまり中間合成リアクタンス X_m が負の値になる領域) で、可変コンデンサ 96 の静電容量 C_{96} が可変ないし選定される。これにより、中間アンテナコイル 55_m を流れる中間アンテナ電流 I_{RFm} が内側アンテナコイル 55_i および外側アンテナコイル 55_o をそれぞれ流れる内側アンテナ電流 I_{RFi} および外側アンテナ電流 I_{RFo} と周回方向で同じ向きになる。しかも、中間アンテナ電流 I_{RFm} の電流量を略ゼロから徐々に増大させることも可能であり、たとえば内側および外側アンテナ電流 I_{RFi} , I_{RFo} の 1/10 以下に選定することができる。

【0148】

そして、このように中間アンテナ電流 I_{RFm} を内側および外側アンテナ電流 I_{RFi} , I_{RFo}

10

20

30

40

50

。に比して十分小さな（たとえば $1/10$ 以下の）電流量に制御することによって、チャンバ 10 内の直下に生成されるドーナツ状プラズマ内のプラズマ密度を良好に均一化できることが実験で確かめられている。

【0149】

これは、中間アンテナコイル 55_m が無い場合でも、内側および外側アンテナコイル 55_i 、 55_o のそれぞれの直下位置付近で生成されたプラズマが径方向において拡散するので、両アンテナコイル 55_i 、 55_o の中間の領域でも相当の密度でプラズマが存在するためである。そこで、両アンテナコイル 55_i 、 55_o とは別にその中間に位置する中間アンテナコイル 55_m に少量の電流 I_{RFm} を両アンテナコイル 55_i 、 55_o でそれぞれ流れる電流 I_{RFi} 、 I_{RFo} と周回方向で同じ向きに流すと、中間アンテナコイル 55_m の直下位置付近で誘導結合プラズマの生成が程良く増強され、径方向におけるプラズマ密度の均一性が向上する。

10

【0150】

この実施例では、中間アンテナコイル 55_m を流れる中間アンテナ電流 I_{RFm} の電流量を相当小さな値に制御できるように、上記のように中間アンテナコイル 55 を逆方向に結線し、可変コンデンサ 96 の静電容量 C_{96} を中間合成リアクタンス X_m が負の値になる領域で可変するようにしている。この場合、 $X_m < 0$ の領域内で C_{96} の値を小さくするほど、中間合成リアクタンス X_m の絶対値が大きくなって、中間アンテナ電流 I_{RFm} の電流量は小さくなる（ゼロに近づく）。反対に、 $X_m < 0$ の領域内で C_{96} の値を大きくするほど、中間合成リアクタンス X_m の絶対値が小さくなって、中間アンテナ電流 I_{RFm} の電流量は大きくなる。

20

【0151】

もっとも、必要に応じて、可変コンデンサ 96 の静電容量 C_{96} を中間合成リアクタンス X_m が正の値になる領域で可変することも可能である。この場合、中間アンテナコイル 55_m 内で流れる中間アンテナ電流 I_{RFm} は内側および外側アンテナコイル 55_i 、 55_o 内でそれぞれ流れる内側および外側アンテナ電流 I_{RFi} 、 I_{RFo} と周回方向で逆の向きになる。これは、中間アンテナコイル 55_m の直下付近でプラズマ密度を意図的に低減したい場合に有用である。

【0152】

加えて、この実施例では、内側アンテナコイル 55_i と中間アンテナコイル 55_m との間（好ましくは真ん中）に比較的小さな口径を有する内側フローティングコイル 60_i を配置し、中間アンテナコイル 55_m と外側アンテナコイル 55_o との間（好ましくは真ん中）に比較的大きな口径を有する外側フローティングコイル 60_o を配置している。これら内側および外側フローティングコイル 60_i 、 60_o は、好ましくはアンテナコイル 55_i 、 55_m 、 55_o と相似のループ形状（図示の例は円環形状）を有し、同軸または同心状に配置される。上記のように内側、中間および外側アンテナコイル 55_i 、 55_m 、 55_o の口径がそれぞれ 100 mm 、 300 mm および 500 mm である場合、フローティングコイル 60_i 、 60_o の口径は 200 mm 、 400 mm にそれぞれ選ばれる。

30

【0153】

内側および外側フローティングコイル 60_i 、 60_o のループ内には可変コンデンサ 58_i 、 58_o が設けられる。各可変コンデンサ 58_i 、 58_o の静電容量 C_{58i} 、 C_{58o} を調節することにより、各フローティングコイル 60_i 、 60_o にそれぞれ流れる誘導電流 I_{INDi} 、 I_{INDo} の電流量を適度（通常少なめ）に制御して、各フローティングコイル 60_i 、 60_o の直下付近におけるプラズマ密度を微調整することができる。これにより、径方向におけるプラズマ密度分布制御の精度を一層向上させることができる。

40

【0154】

なお、内側フローティングコイル 60_i においては、主として内側および中間アンテナコイル 55_i 、 55_m からの磁場の変化に応じた誘導起電力が発生するため、そのループ内に流れる誘導電流 I_{INDi} は内側および中間アンテナ電流 I_{RFi} 、 I_{RFm} に多く依存する。同様に、外側フローティングコイル 60_o のループ内に流れる誘導電流 I_{INDo} は中間および

50

外側アンテナ電流 I_{RFm} , I_{RFo} に多く依存する。このようなフローティングコイルの両隣のアンテナコイルに対する依存性または連動性は、それら両隣のアンテナコイル間の領域におけるプラズマ密度の落ち込みを補完するフローティングコイルの作用からすれば、不都合なことではなく、むしろ望ましい特性といえる。

【0155】

図31～図34に、この実施例の変形例を幾つか示す。図31に示す構成例は、上記実施例(図30)において外側フローティングコイル60を削除した構成に相当し、1つのフローティングコイル60を内側アンテナコイル55_iと中間アンテナコイル55_mとの間に配置する。図示省略するが、1つのフローティングコイル60を中間アンテナコイル55_mと外側アンテナコイル55_oとの間に配置する構成も可能である。

10

【0156】

図32に示す構成例は、上記実施例(図30)において外側アンテナコイル55_oの外側に更に第4(最外周)のフローティングコイル60_pを配置する。図33の構成例は、図32の構成例(図31)において口径の大きい外側および最外周フローティングコイル60_o, 60_pのループ内に可変コンデンサ58_o, 58_pに加えて固定コンデンサ142, 144をそれぞれ設ける。

【0157】

図34の構成例は、RFアンテナ54において、内側アンテナコイル55_iおよび外側アンテナコイル55_oに対して中間アンテナコイル58_mを同じ方向(順方向)で結線する。すなわち、高周波入口側のノードN_Aから高周波出口側のノードN_Cまで各々の高周波伝送路を一筆書きで廻った場合に、中間アンテナコイル55_iを通るときの向きが内側アンテナコイル55_iおよび外側アンテナコイル55_oを通るときの向きと周回方向で同じ(図34ではいずれも時計回り)になるような結線構造としている。

20

【0158】

この場合、可変コンデンサ96の静電容量C₉₆を中間合成リアクタンスX_mが正になる領域で可変するとき、中間アンテナ電流I_{RFm}を内側アンテナ電流I_{RFi}および外側アンテナ電流I_{RFo}と周回方向で同じ向きで可変することができる。すなわち、X_m>0の領域内でC₉₆の値を小さくするほど、中間合成リアクタンスX_mの値が小さくなって、中間アンテナ電流I_{RFm}が増大する。反対に、X_m>0の領域内でC₉₆の値を大きくするほど、中間合成リアクタンスX_mの値が大きくなって、中間アンテナ電流I_{RFm}が減少する。もっとも、C₉₆の値を限りなく大きくしても、中間合成リアクタンスX_mの値は中間アンテナコイル54_mの誘導性リアクタンス以下には下がらないので、中間アンテナ電流I_{RFm}の電流量を可及的に小さくする(ゼロに近づける)ことはできない。したがって、通常の使い方では、中間アンテナ電流I_{RFm}を内側および外側アンテナ電流I_{RFi}, I_{RFo}の1/10以下の電流値で制御することは困難である。

30

【0159】

一方で、この構成例においては、可変コンデンサ96の静電容量C₉₆を中間合成リアクタンスX_mが負になる領域で可変することも可能である。その場合、中間アンテナ電流I_{RFm}の流れる向きは内側および外側アンテナ電流I_{RFi}, I_{RFo}の流れる向きと周回方向で逆になる。これは、中間アンテナコイル54_m中の直下付近でプラズマ密度を意図的に低減したい場合に有用である。

40

【0160】

いずれの場合でも、内側および外側フローティングコイル60_i, 60_oも備えているので、可変コンデンサ58_i, 58_o, 96, 134の静電容量C_{58i}, C_{58o}, C₉₆, C₁₃₄を適宜調整することにより、全体として径方向におけるプラズマ密度分布を任意に制御することができる。

【0161】

また、図示省略するが、上記2系統のアンテナコイルの実施例(図19～図29)におけるインピーダンス調整用可変コンデンサ(96, 132, 134, 136)の接続形態および使用形態はこの3系統のアンテナコイルの実施例にも全て適用できる。

50

【フローティングコイル内に固定コンデンサを設ける実施例】

【0162】

図35に、内側および外側フローティングコイル $60_i, 60_o$ のループ内に固定コンデンサ $150_i, 150_o$ をそれぞれ設ける実施例を示す。この実施例における内側および外側フローティングコイル $60_i, 60_o$ は、好ましくは円環状の単巻きコイルであり、RFアンテナ54の内側および外側アンテナコイル $54_i, 54_o$ にそれぞれ可及的に近接して配置される。たとえば、内側および外側アンテナコイル $54_i, 54_o$ の口径がそれぞれ100mm, 300mmである場合、フローティングコイル $60_i, 60_o$ の口径はそれぞれ80mm, 320mmに選ばれる。

10

【0163】

この実施例において、フローティングコイル $60_i, 60_o$ を誘導結合プラズマの生成に積極的に作用させる場合は、内側および外側アンテナコイル $54_i, 54_o$ をそれぞれ流れる内側および外側アンテナ電流 I_{RFi}, I_{RFo} と周回方向で同じ向きに適度な大きさ（たとえば I_{RFi}, I_{RFo} の数倍）の内側および外側誘導電流 I_{INDi}, I_{INDo} がフローティングコイル $60_i, 60_o$ 内でそれぞれ流れるように、固定コンデンサ $150_i, 150_o$ の静電容量 C_{150i}, C_{150o} を選定する。すなわち、固定コンデンサ $150_i, 150_o$ の静電容量 C_{150i}, C_{150o} は、フローティングコイル $60_i, 60_o$ 内でそれぞれ直列共振を起こす静電容量よりは小さくてその付近の値に選定される。これによって、各フローティングコイル $60_i, 60_o$ は、単巻き（1ターン）の円環状コイルであっても、誘導結合プラズマ生成のアシスト効果に関して複巻き（複数ターン）の円環状コイルあるいはスパイラルコイルと見掛け上同等の働きをすることができる。

20

【0164】

このような固定コンデンサ $150_i, 150_o$ 付きの単巻き円環状のフローティングコイル $60_i, 60_o$ は、製作（特にコンデンサの作り込み）が容易であり、RFアンテナ54周りの組み立てやメンテナンスにも有利である。また、フローティングコイル $60_i, 60_o$ のループ内に結線箇所や接続用導体も無いので、パワーロスが少ないことや、電磁気的な作用面において周回方向の均一性がよいこと等の利点がある。

【0165】

なお、上述した第1の実施形態のプラズマ処理装置（図1）においても、フローティングコイル60内に設けられた可変コンデンサ58を固定コンデンサ150に置き換えることはもちろん可能である。

30

【0166】

図36～図43に、この実施例の変形例を幾つか示す。図36に示すように、高周波入口側のノード N_A と高周波出口側のノード N_C との間で、内側アンテナコイル 54_i と直列に接続される可変コンデンサ134をインピーダンス調整部として好適に設けることができる。この点に関して、図35の構成例では、ノード N_A とノード N_C との間で、外側アンテナコイル 54_o と直列に接続される可変コンデンサ96をインピーダンス調整部として設けている。

【0167】

さらに、図37に示すように、高周波出口側のノード N_C とアースライン70との間（あるいはアースライン70上）に出側の共通インピーダンス調整部（たとえばコンデンサ）138を好適に設けることができる。

40

【0168】

また、図38に示すように、内側および外側アンテナコイル $54_i, 54_o$ をそれぞれ流れる内側および外側アンテナ電流 I_{RFi}, I_{RFo} 間のバランス調整の可変範囲を大きくするために、ノード N_A とノード N_C との間に、外側アンテナコイル 54_o と直列に接続される可変コンデンサ96を設けるとともに、内側アンテナコイル 54_i と直列に接続される固定コンデンサ132を設けることもできる。

【0169】

50

図39に示すように、方位角方向におけるプラズマ密度分布の偏りを低減するために、フローティングコイル 60_i 、 60_o のループ内にそれぞれ設けられる固定コンデンサ 150_i 、 150_o の位置（つまり切れ目の位置）を周回方向においてずらす構成を好適に採ることができる。この場合、図40に示すように、外側フローティングコイル 60_o のループ内に複数（たとえば2つ）の固定コンデンサ 150_o を等間隔または点対称に設けることにより、偏りを一層効果的に低減することができる。

【0170】

また、図41に示すように、径方向中間部におけるプラズマ密度の制御性を高めるために、内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o の間（好ましくは真ん中）に可変コンデンサ 58_m 付きの中間フローティングコイル 60_m を設けることもできる。

10

【0171】

あるいは、中間フローティングコイル 60_m を設ける代わりに、図42に示すように、内側フローティングコイル 60_i のループ内に可変コンデンサ 58 を設け、外側アンテナコイル 54_o のループ内に固定コンデンサ 150_o を設けることもできる。

【0172】

なお、フローティングコイル 60 のループ内に設けられる固定コンデンサ 150 は、市販のコンデンサであってもよく、あるいはフローティングコイル 60 の切れ目 G_{60} をそのまま固定コンデンサ 150 の電極間ギャップとして利用してもよい。その場合、切れ目 G_{60} に誘電体のフィルムを挿入してもよい。

20

[RFアンテナにインピーダンス調整部を設けない実施例]

【0173】

図43に、RFアンテナ 54 の内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o にそれぞれ可及的に近接して可変コンデンサ 58_i 、 58_o 付きの内側および外側フローティングコイル 60_i 、 60_o を配置する構成を示す。これは、図35の構成例において、固定コンデンサ 150_i 、 150_o を可変コンデンサ 58_i 、 58_o にそれぞれ置き換える構成に相当する。かかる構成においては、可変コンデンサ 58_i 、 58_o の静電容量 C_{58i} 、 C_{58o} を調整して、フローティングコイル 60_i 、 60_o 内でそれぞれ流れる内側および外側誘導電流 I_{INDi} 、 I_{INDo} のバランスを制御することができる。このことにより、内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o 内でそれぞれ流れる内側および外側アンテナ電流 I_{RFi} 、 I_{RFo} のバランスを制御するためのインピーダンス調整部（可変コンデンサ 96 、 134 ）が不要となる。

30

【0174】

さらに、この実施例においては、図44に示すように、内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o の間（好ましくは真ん中）に可変コンデンサ 58_m 付きの中間フローティングコイル 60_m を設けることもできる。

【0175】

上記実施形態では、RFアンテナ 54 内で複数（たとえば内側および外側）のアンテナコイル 54_i 、 54_o を電氣的に並列に接続した。しかし、図45に示すように、これら複数（内側および外側）のアンテナコイル 54_i 、 54_o を電氣的に直列に接続する構成も可能である。この場合、径方向におけるプラズマ密度分布の制御は、主として可変コンデンサ 58_i 、 58_o 付きの内側および外側フローティングコイル 60_i 、 60_o が担うことになる。すなわち、可変コンデンサ 58_i 、 58_o の静電容量 C_{58i} 、 C_{58o} を調整することにより、径方向におけるプラズマ密度分布を任意に制御することができる。なお、この構成例においては、RFアンテナ 54 の全長が長くなるが、内側アンテナコイル 54_i と外側アンテナコイル 54_o との間でコイルセグメントの数（分割数）が変化するので、波長効果は抑制される。

40

【0176】

さらに、この実施例においては、図46に示すように、内側および外側アンテナコイル 54_i 、 54_o の間（好ましくは真ん中）に可変コンデンサ 58_m 付きの中間フローティン

50

グコイル 60_m を追加することにより、径方向の中間部においてもプラズマ密度を任意かつ精細に制御することができる。

[他の実施形態または変形例]

【 0177 】

本発明における RF アンテナを構成するコイルのループ形状は円形に限るものではなく、図示省略するが、四角形あるいは三角形などであってもよい。また、各アンテナコイル（ループ）を構成する複数のコイルセグメントの間で形状や自己インピーダンスが多少異なってもよい。

【 0178 】

本発明において、RF アンテナに付加可能なインピーダンス調整部は、上述したような固定コンデンサまたは可変コンデンサに限定されるものではなく、たとえばコイルまたはインダクタであってもよく、あるいはコンデンサとインダクタを含むものであってもよく、さらには抵抗素子を含んでもよい。

【 0179 】

図 47 に、高周波給電部 62 の整合器 66 と RF アンテナ 54 との間にトランス 160 を設ける構成例を示す。このトランス 160 の一次巻線は整合器 66 の出力端子に電氣的に接続され、二次巻線は RF アンテナ 54 の入口側の第 1 ノード N_A に電氣的に接続されている。トランス 160 の好ましい形態として、一次巻線の巻数を二次巻線の巻数よりも多くすることにより、整合器 66 からトランス 160 に流れる電流（一次電流） I_1 をトランス 160 から RF アンテナ 54 に流れる電流（二次電流） I_2 よりも少なくすることができる。別な見方をすれば、一次電流 I_1 の電流量を増やさずに、RF アンテナ 54 に供給する二次電流 I_2 の電流量を増やすことができる。また、トランス 160 の二次側でタップ切換を行うことにより、二次電流 I_2 を可変することも可能である。

【 0180 】

上述した実施形態における誘導結合型プラズマエッチング装置の構成は一例であり、プラズマ生成機構の各部はもちろん、プラズマ生成に直接関係しない各部の構成も種々の変形が可能である。

【 0181 】

たとえば、RF アンテナの基本形態として、平面型以外のタイプたとえばドーム型等も可能である。処理ガス供給部においてチャンバ 10 内に天井から処理ガスを導入する構成も可能であり、サセプタ 12 に直流バイアス制御用の高周波 RF_L を印加しない形態も可能である。

【 0182 】

さらに、本発明による誘導結合型のプラズマ処理装置またはプラズマ処理方法は、プラズマエッチングの技術分野に限定されず、プラズマ CVD、プラズマ酸化、プラズマ窒化、スパッタリングなどの他のプラズマプロセスにも適用可能である。また、本発明における被処理基板は半導体ウエハに限るものではなく、フラットパネルディスプレイ用の各種基板や、フォトマスク、CD 基板、プリント基板等も可能である。

【 符号の説明 】

【 0183 】

- 10 チャンバ
- 12 サセプタ
- 26 排気装置
- 52 誘電体窓
- 54 RF アンテナ
- 54_i , 55_i 内側アンテナコイル
- 54_o , 55_o 外側アンテナコイル
- 55_m 中間アンテナコイル
- 58 , 58_i , 58_m , 58_o 可変コンデンサ

10

20

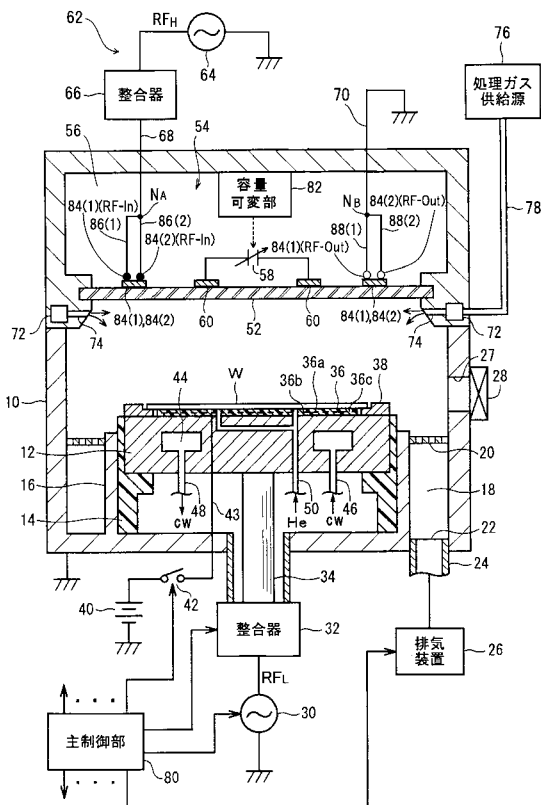
30

40

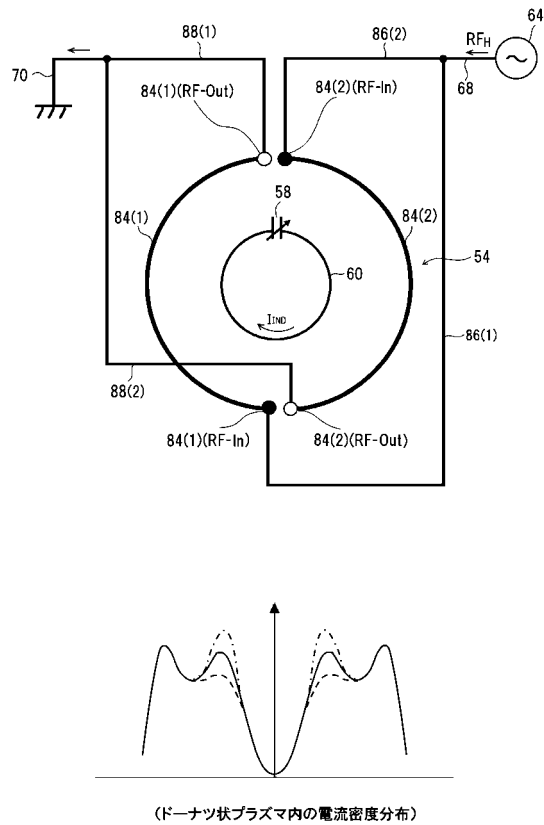
50

- 6 2 高周波給電部
- 6 4 (プラズマ生成用)高周波電源
- 7 6 処理ガス供給源
- 8 0 主制御部
- 8 2 容量可変部
- 9 6 , 1 3 4 インピターダンス可変部(可変コンデンサ)
- 1 5 0 , 1 5 0_i , 1 5 0_o 固定コンデンサ

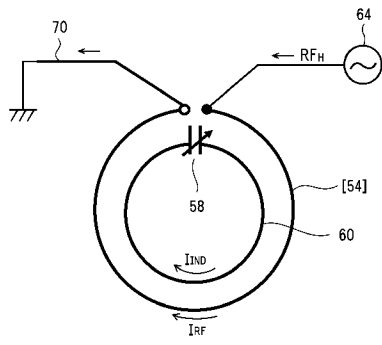
【 図 1 】



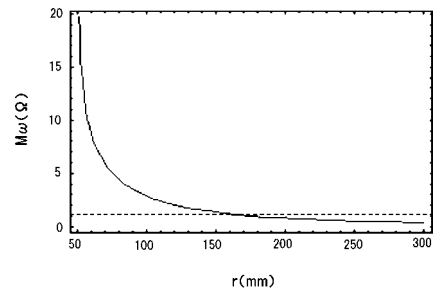
【 図 3 】



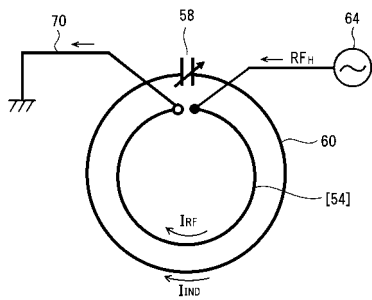
【 図 4 】



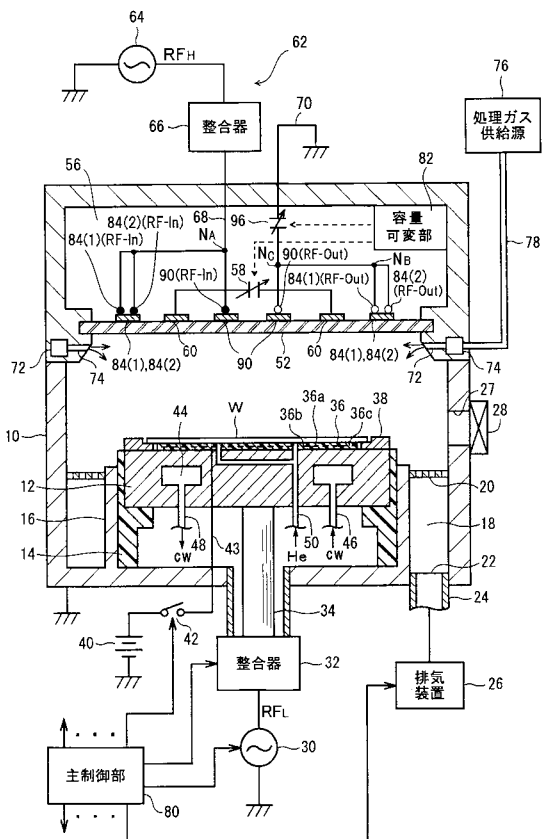
【 図 7 】



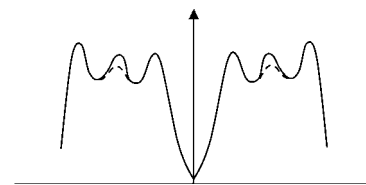
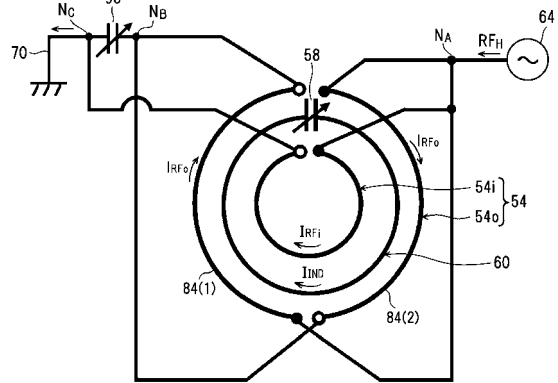
【 図 6 】



【 図 8 】

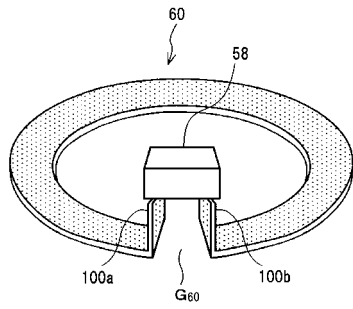


【 図 10 】

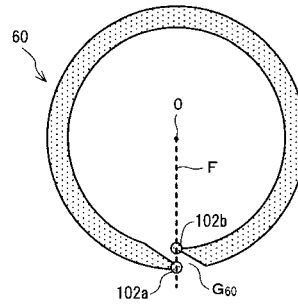


(ドーナツ状プラズマ内の電流密度分布)

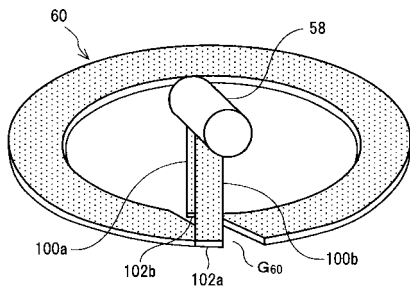
【図 1 1】



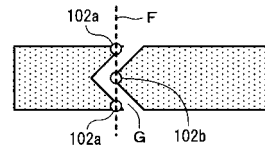
【図 1 2 B】



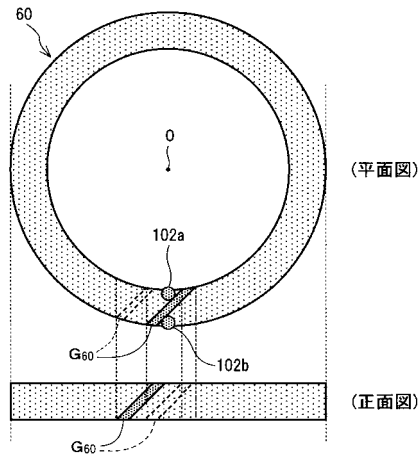
【図 1 2 A】



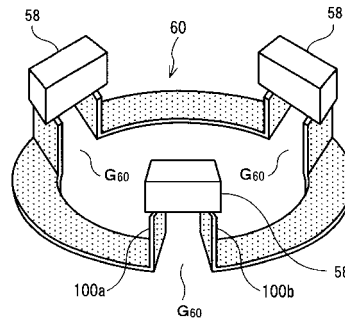
【図 1 2 C】



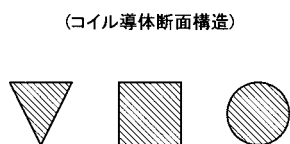
【図 1 3 A】



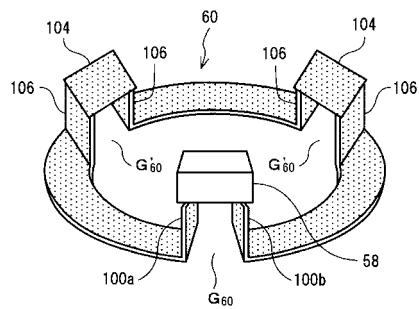
【図 1 4】



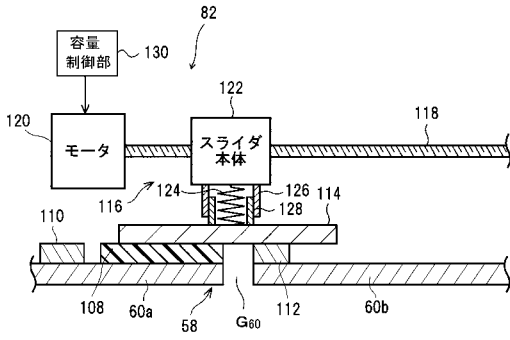
【図 1 3 B】



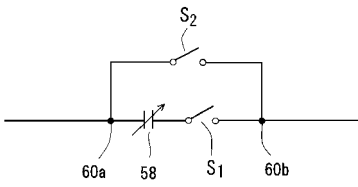
【図 1 5】



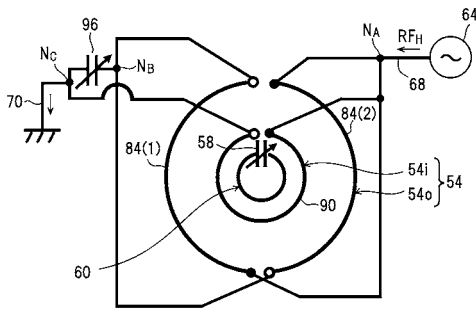
【 図 1 6 】



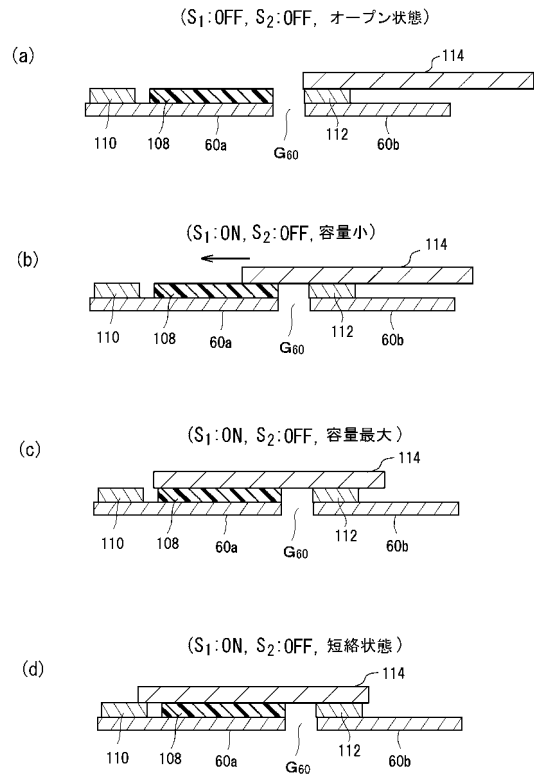
【 図 1 7 】



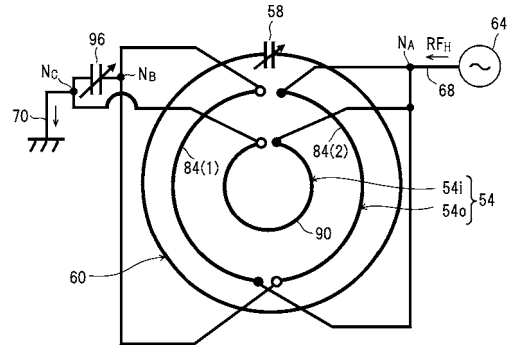
【 図 1 9 】



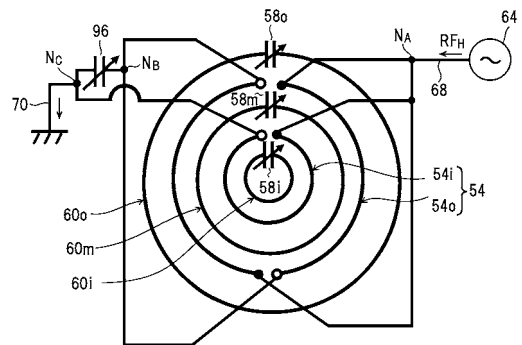
【 図 1 8 】



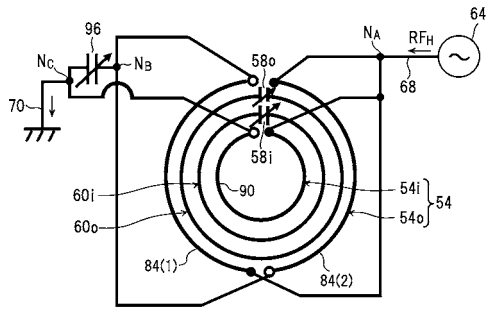
【 図 2 0 】



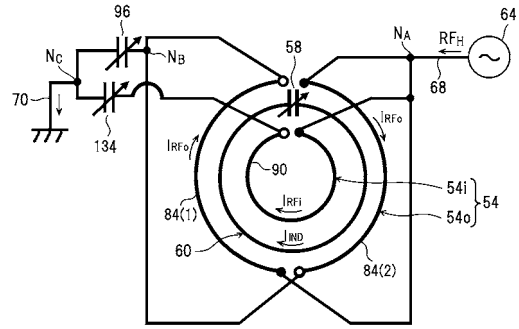
【 図 2 1 】



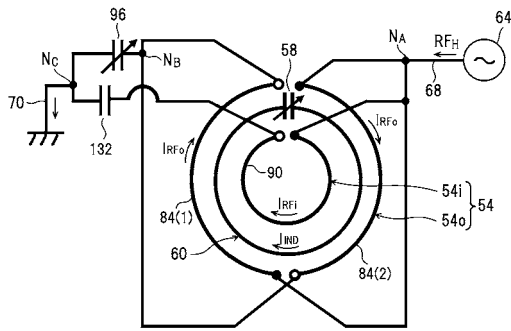
【 図 2 2 】



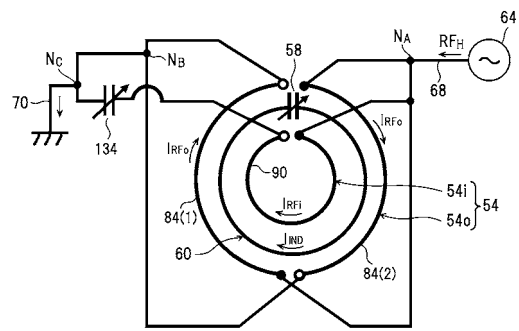
【 図 2 4 】



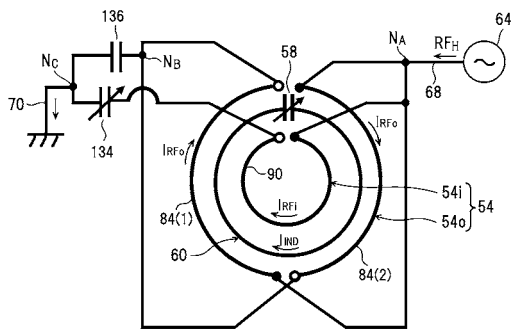
【 図 2 3 】



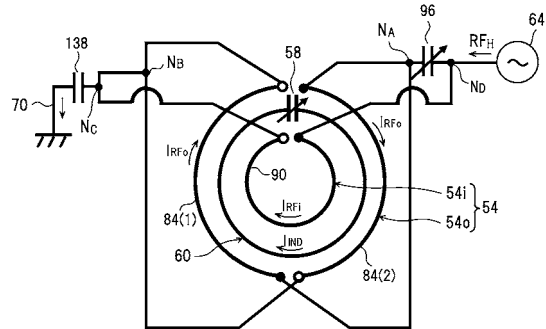
【 図 2 5 】



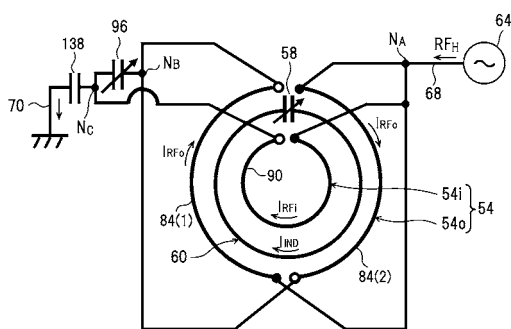
【 図 2 6 】



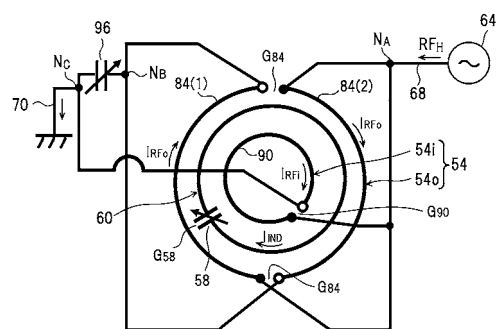
【 図 2 8 】



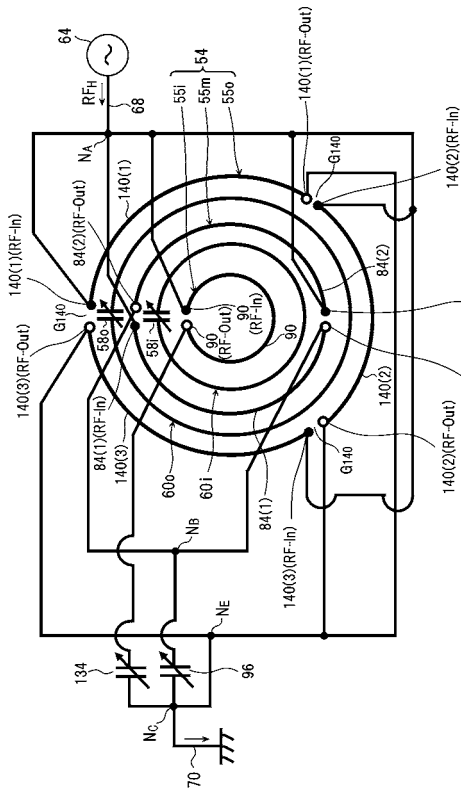
【 図 2 7 】



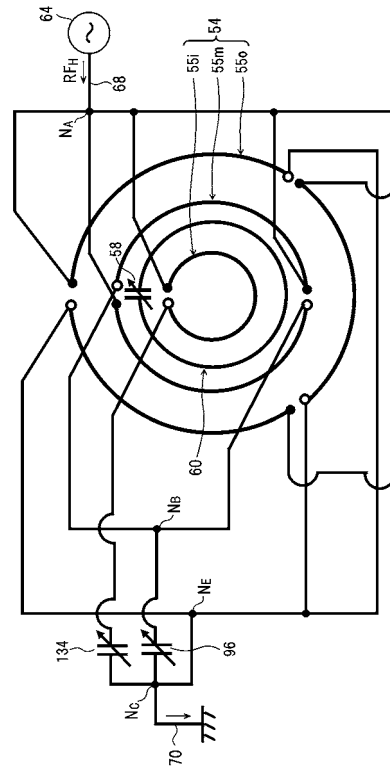
【 図 2 9 】



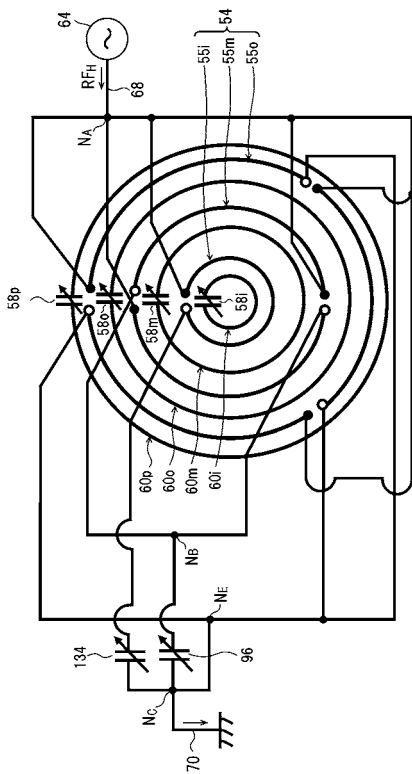
【図 3 0】



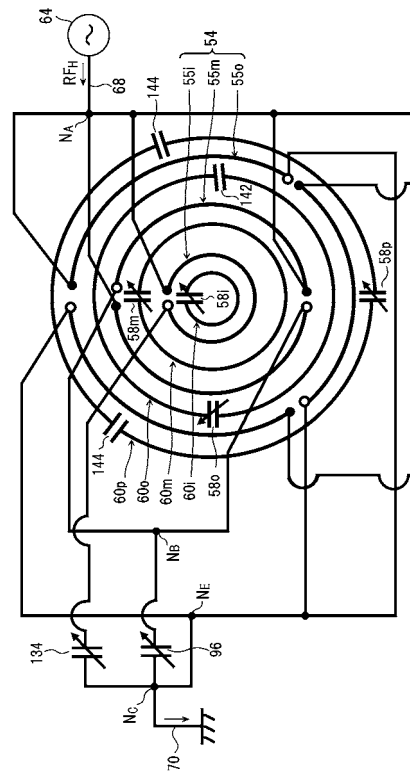
【図 3 1】



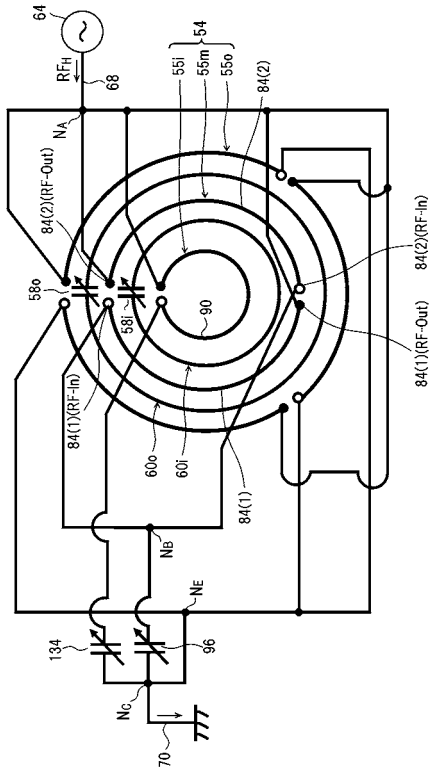
【図 3 2】



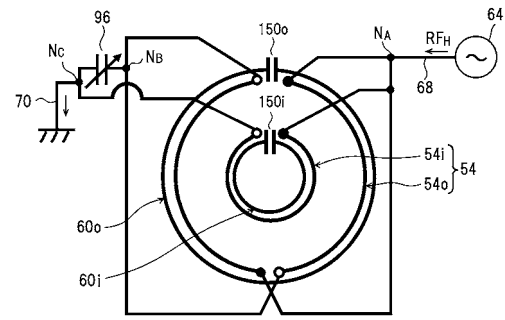
【図 3 3】



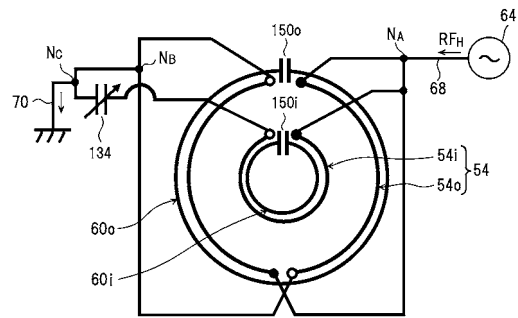
【 図 3 4 】



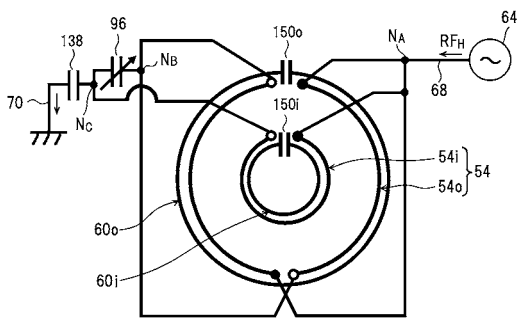
【 図 3 5 】



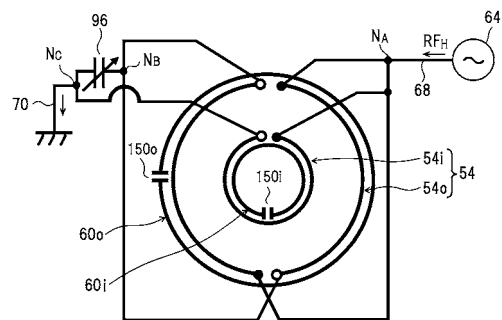
【 図 3 6 】



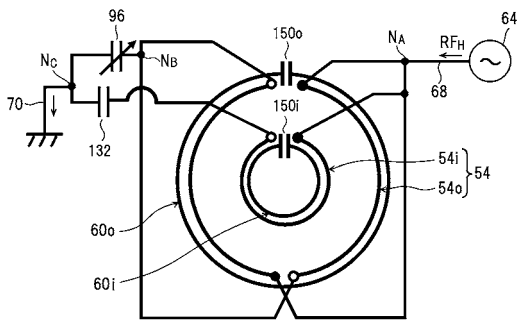
【 図 3 7 】



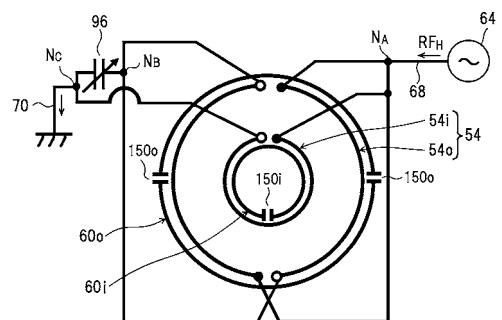
【 図 3 9 】



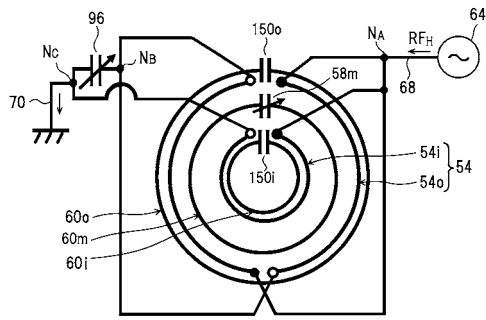
【 図 3 8 】



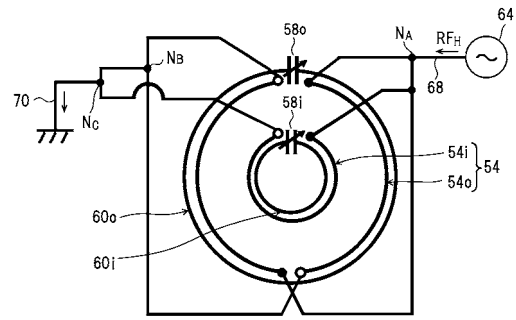
【 図 4 0 】



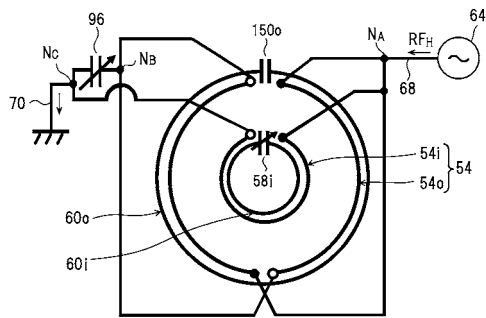
【図41】



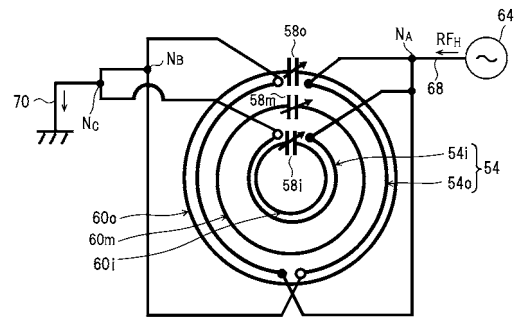
【図43】



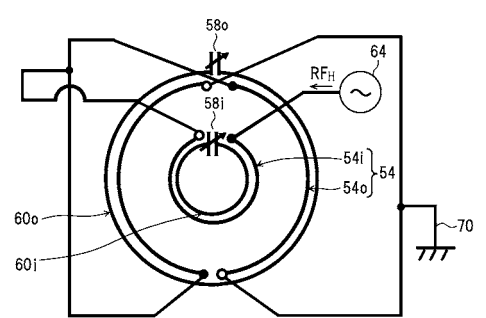
【図42】



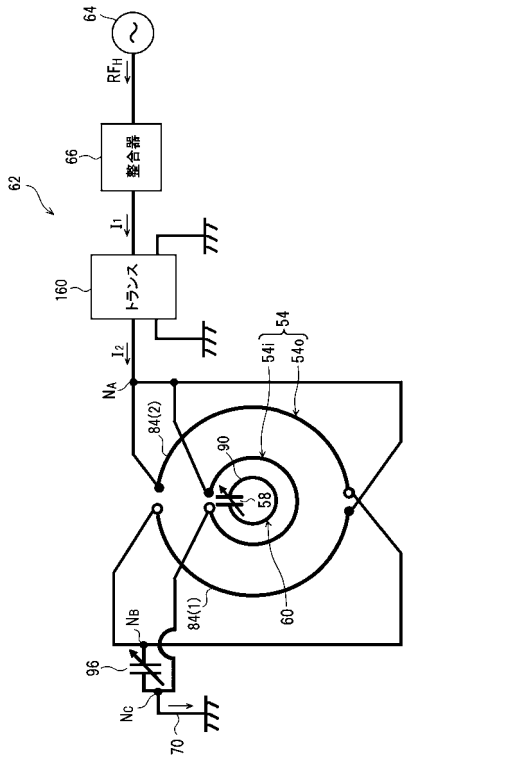
【図44】



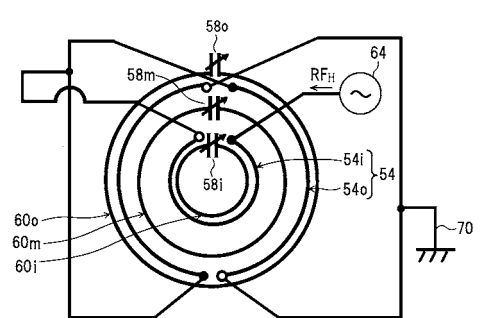
【図45】



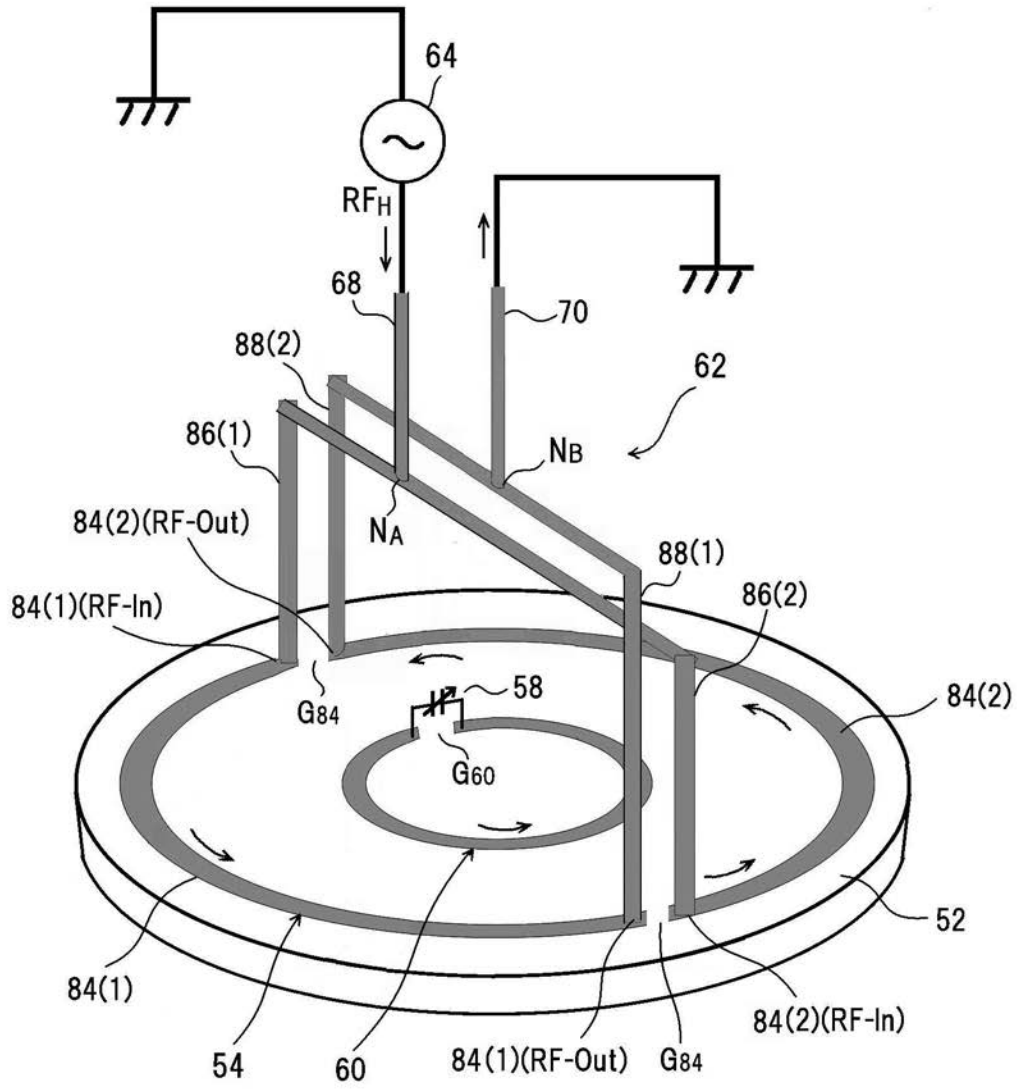
【図47】



【図46】



【 図 2 】



【 図 5 】

