

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4124836号
(P4124836)

(45) 発行日 平成20年7月23日(2008.7.23)

(24) 登録日 平成20年5月16日(2008.5.16)

(51) Int.Cl. F I
H05H 1/46 (2006.01) H05H 1/46 R
 H05H 1/46 A

請求項の数 32 (全 14 頁)

<p>(21) 出願番号 特願平8-49360 (22) 出願日 平成8年3月6日(1996.3.6) (65) 公開番号 特開平9-289100 (43) 公開日 平成9年11月4日(1997.11.4) 審査請求日 平成15年2月12日(2003.2.12) (31) 優先権主張番号 08/398426 (32) 優先日 平成7年3月6日(1995.3.6) (33) 優先権主張国 米国(US)</p>	<p>(73) 特許権者 390040660 アプライド マテリアルズ インコーポレイテッド APPLIED MATERIALS, INCORPORATED アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95054 サンタ クララ パウアーズ アベニュー 3050 (73) 特許権者 596031653 コムデル インコーポレイテッド アメリカ合衆国, マサチューセッツ州, グロウセスター, コンデリンロード 11 (74) 代理人 100088155 弁理士 長谷川 芳樹</p>
--	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 安定性向上のための技術と結合したRFプラズマ電源

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

プラズマにRF電力を供給するためのRF電源であって、

RF信号を受容する入力線と、前記RF信号から誘導される第1の出力信号を伝送する第1の出力線と、前記RF信号から誘導される第2の出力信号を伝送する第2の出力線と有するスプリッタと、

前記第1の出力信号を受容して、そこから第1の誘導信号を発生させる第1の分枝回路であって、前記第1の分枝回路は、第1の電力増幅器と第1の位相移動要素とを備え、前記第1の電力増幅器は出力線を有する、前記第1の分枝回路と、

前記第2の出力信号を受容して、そこから第2の誘導信号を発生させる第2の分枝回路であって、前記第2の分枝回路は、出力線を有する第2の電力増幅器を備える、前記第2の分枝回路と、

第1の入力と第2の入力とを備える結合器であって、前記第1の入力は前記第1の誘導信号を受容し、前記第2の入力は前記第2の誘導信号を受容し、前記結合器は前記第1の誘導信号と前記第2の誘導信号とを結合してそこから電力出力信号を作り出す、前記結合器と、
 を備え、

前記第1の位相移動要素は、該第1の電力増幅器の該出力線と該結合器の該第1の入力との間に接続され、該第1の電力増幅器から該結合器へと通過する信号に対して、該第2の電力増幅器から該結合器へ通過する信号と相対的に、第1の位相移動をもたらし、

10

20

前記第 1 の分枝回路及び第 2 の分枝回路は、前記第 2 の誘導信号に対する前記第 1 の誘導信号の総位相移動であって、 $s(360^\circ) + 360^\circ$ 及び $s(360^\circ) + 180^\circ$ のうちの一方に等しい該総位相移動を生成し、ここで、 s は正の値又は 0 の整数であり、前記総位相移動が $s(360^\circ) + 360^\circ$ である場合に、前記結合器が 0° 結合器であり、前記総位相移動が $s(360^\circ) + 180^\circ$ である場合に、前記結合器が 180° 結合器である、

R F 電源。

【請求項 2】

前記第 1 の位相移動が、プラズマへ電力を供給したときに、R F 電力の供給における発振による不安定性を防止するに充分である請求項 1 に記載の R F 電源。

10

【請求項 3】

前記第 1 の位相移動が、 $45^\circ + n(180^\circ)$ であり、 n は整数である請求項 1 に記載の R F 電源。

【請求項 4】

前記第 1 の位相移動が、 $90^\circ + n(180^\circ)$ であり、 n は整数である請求項 1 に記載の R F 電源。

【請求項 5】

前記第 1 の分枝回路が更に、該スプリッタの該第 1 の出力と該第 1 の電力増幅器との間に接続された第 2 の位相移動要素を備え、前記第 2 の位相移動要素は、前記第 1 の位相移動要素の前記第 1 の位相移動に加えられたときに、該第 1 の誘導信号は該第 2 の誘導信号に対して所定の位相関係を有するようになり、前記所定の位相関係は、該結合器の要求によって決定される、請求項 1 に記載の R F 電源。

20

【請求項 6】

前記第 1 の位相移動と第 2 の位相移動とにより、該第 1 の誘導信号が該第 2 の誘導信号と同調する請求項 5 に記載の R F 電源。

【請求項 7】

前記第 1 の位相移動が $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ であり、 n 及び m は整数であり、また、前記第 2 の位相移動は $270^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ であり、 k は整数である、請求項 6 に記載の R F 電源。

【請求項 8】

前記第 1 の位相移動と該第 2 の位相移動とにより、該第 1 の誘導信号が、該第 2 の誘導信号と 180° 位相がずれる請求項 5 に記載の R F 電源。

30

【請求項 9】

前記第 1 の位相移動が、 $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ であり、 n 及び m は整数であり、また、前記第 2 の位相移動は $90^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ であり、 k は整数である、請求項 8 に記載の R F 電源。

【請求項 10】

前記第 1 の位相移動要素が、所定の長さのケーブルのセグメントである請求項 5 に記載の R F 電源。

【請求項 11】

該第 2 の位相移動要素が、所定の長さのケーブルのセグメントである請求項 10 に記載の R F 電源。

40

【請求項 12】

該結合器が 0° 結合器である請求項 5 に記載の R F 電源。

【請求項 13】

該結合器が 180° 結合器である請求項 5 に記載の R F 電源。

【請求項 14】

前記第 2 の分枝回路が更に、該スプリッタの該第 2 の出力と該第 2 の電力増幅器との間に接続された第 2 の位相移動要素を備え、前記第 2 の位相移動要素によって該第 2 の誘導信号は該第 1 の誘導信号に対して所定の位相関係を有するようになり、前記所定の位相関係

50

係は、該結合器の要求によって決定される、請求項 1 に記載の R F 電源。

【請求項 1 5】

プラズマ処理装置であって、

プラズマ処理チャンバと、

該プラズマ処理チャンバへ電力を供給する R F 電源と、

前記 R F 電源に接続されて周波数 f_{RF} を有する R F 信号を供給する R F 信号生成器と

を備え、

前記 R F 電源が、

R F 信号を受容する入力線と、前記 R F 信号から与えられる第 1 の出力信号を伝送する第 1 の出力線と、前記 R F 信号から与えられる第 2 の出力信号を伝送する第 2 の出力線と有するスプリッタと、

前記第 1 の出力信号を受容して、そこから第 1 の誘導信号を発生させる第 1 の分枝回路であって、前記第 1 の分枝回路は、第 1 の電力増幅器と第 1 の位相移動要素とを備え、前記第 1 の電力増幅器は出力線を有する、前記第 1 の分枝回路と、

前記第 2 の出力信号を受容して、そこから第 2 の誘導信号を発生させる第 2 の分枝回路であって、前記第 2 の分枝回路は、出力線を有する第 2 の電力増幅器を備える、前記第 2 の分枝回路と、

第 1 の入力と第 2 の入力とを備える結合器であって、前記第 1 の入力は前記第 1 の誘導信号を受容し、前記第 2 の入力は前記第 2 の誘導信号を受容し、前記結合器は前記第 1 の誘導信号と前記第 2 の誘導信号とを結合してそこから電力出力信号を作り出す、前記結合器と、

を備え、

前記第 1 の位相移動要素は、該第 1 の電力増幅器の該出力線と該結合器の該第 1 の入力との間に接続され、該第 1 の電力増幅器から該結合器へと通過する信号に対して、該第 2 の電力増幅器から該結合器へ通過する信号と相対的に、第 1 の位相移動をもたらす、

前記第 1 の分枝回路及び第 2 の分枝回路は、周波数 f_{RF} で、前記第 2 の誘導信号に対する前記第 1 の誘導信号の総位相移動であって、 $s(360^\circ) + 360^\circ$ 及び $s(360^\circ) + 180^\circ$ のうちの一方に等しい該総位相移動を生成し、ここで、 s は正の値又は 0 の整数であり、

前記総位相移動が $s(360^\circ) + 360^\circ$ である場合に、前記結合器が 0° 結合器であり、前記総位相移動が $s(360^\circ) + 180^\circ$ である場合に、前記結合器が 180° 結合器である、

R F 電源である、

プラズマ処理装置。

【請求項 1 6】

前記第 1 の位相移動が、 $45^\circ + n(180^\circ)$ であり、 n は整数である請求項 1 5 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 1 7】

前記第 1 の位相移動が、 $90^\circ + n(180^\circ)$ であり、 n は整数である請求項 1 5 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 1 8】

前記第 1 の分枝回路が更に、該スプリッタの該第 1 の出力と該第 1 の電力増幅器との間に接続された第 2 の位相移動要素を備え、前記第 2 の位相移動要素は、前記第 1 の位相移動要素の前記第 1 の位相移動に加えられたときに、該第 1 の誘導信号が該第 2 の誘導信号に対して所定の位相関係を有するようにする第 2 の位相移動を生成し、前記所定の位相関係は、該結合器の要求によって決定される、請求項 1 5 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 1 9】

前記第 1 の位相移動と前記第 2 の位相移動とにより、該第 1 の誘導信号が該第 2 の誘導信号と同調する請求項 1 8 に記載のプラズマ処理装置。

10

20

30

40

50

【請求項 20】

前記第1の位相移動が $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ であり、 n 及び m は整数であり、また、前記第2の位相移動は $270^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ であり、 k は整数である、請求項18に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 21】

前記第1の位相移動と該第2の位相移動とにより、該第1の誘導信号が、該第2の誘導信号と 180° 位相がずれる請求項18に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 22】

前記第1の位相移動が、 $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ であり、 n 及び m は整数であり、また、前記第2の位相移動は $90^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ であり、 k は整数である、請求項21に記載のプラズマ処理装置。

10

【請求項 23】

前記第1の位相移動要素が、所定の長さのケーブルのセグメントである請求項18に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 24】

該第2の位相移動要素が、所定の長さのケーブルのセグメントである請求項23に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 25】

該結合器が 0° 結合器である請求項18に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 26】

該結合器が 180° 結合器である請求項18に記載のプラズマ処理装置。

20

【請求項 27】

プラズマ処理チャンバにおけるプラズマに RF 電力を供給する方法であって、
該 RF 信号を第1の出力信号と第2の出力信号とにスプリットさせるステップと、
該第1の出力信号を電力増幅して第1の増幅信号を発生させるステップと、
該第2の出力信号を電力増幅して第2の増幅信号を発生させるステップと、
前記第2の出力信号を増幅する前に、該第2の出力信号を該第1の出力信号に対して位相移動させるステップと、

該第2の増幅信号を該第1の増幅信号に対して位相移動させて、位相移動信号を発生させるステップであって、 $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ の位相移動を導き、 n 及び m は整数であり、また、該第2の出力信号を該第1の出力信号に対して位相移動させる前記ステップが、 $270^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ の位相移動を導き、 k は整数であり、前記第2の出力信号を該第1の出力信号に対して位相移動させる前記ステップと、該第2の増幅信号を該第1の増幅信号に対して位相移動させて位相移動信号を発生させる該ステップとが、前記位相移動信号を前記第1の増幅信号に同調させる、該ステップと、

30

該第1の増幅信号と該位相移動信号とを結合して、そこから電力出力信号を発生させるステップと、

前記プラズマ処理チャンバにおける前記プラズマに前記電力出力信号を供給するステップと、

40

を有する方法。

【請求項 28】

プラズマ処理チャンバにおけるプラズマに RF 電力を供給する方法であって、
該 RF 信号を第1の出力信号と第2の出力信号とにスプリットさせるステップと、
該第1の出力信号を電力増幅して第1の増幅信号を発生させるステップと、
該第2の出力信号を電力増幅して第2の増幅信号を発生させるステップと、
該第2の増幅信号を該第1の増幅信号に対して位相移動させて、位相移動信号を発生させるステップと、

前記第2の出力信号を増幅する前に、該第2の出力信号を該第1の出力信号に対して位相移動させるステップであって、該第2の出力信号を該第1の出力信号に対して位相移動

50

させるステップと、該第2の増幅信号を該第1の増幅信号に対して位相移動させて位相移動信号を発生させるステップとにより、該位相移動信号が該第1の増幅信号に対して180°位相がずれることになる該ステップと、

該第1の増幅信号と該位相移動信号とを結合して、そこから電力出力信号を発生させるステップであって、該結合することが、前記第1の増幅信号又は前記位相移動信号の一方の位相を180°移動する、該ステップと、

前記プラズマ処理チャンバにおける前記プラズマに前記電力出力信号を供給するステップと、
を有する方法。

【請求項29】

該第2の増幅信号を該第1の増幅信号に対して位相移動させて、位相移動信号を発生させるステップが、 $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ の位相移動を導き、 n 及び m は整数であり、また、該第2の出力信号を該第1の出力信号に対して位相移動させるステップが、 $90^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ の位相移動を導き、 k は整数である、請求項28に記載の方法。

【請求項30】

該第2の増幅信号を該第1の増幅信号に対して位相移動させて、位相移動信号を発生させるステップが、所定の長さを有するケーブルのセグメントを用いて前記位相移動を行う工程を有する請求項27又は28に記載の方法。

【請求項31】

該第2の出力信号を該第1の出力信号に対して位相移動させるステップが、第2の所定の長さを有するケーブルの第2のセグメントを用いて前記位相移動を行う工程を有する請求項30に記載の方法。

【請求項32】

請求項1記載のRF電源と、
プラズマチャンバであって、前記RF電源によって該プラズマチャンバに前記電力出力信号を供給することを可能とするように前記RF電源が接続された該プラズマチャンバと、
を備える、RFプラズマシステム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、プラズマ処理チャンバに用いられる等のRF電源に関する。

【0002】

【従来の技術】

RF励起プラズマチャンバでは、RF電源とプラズマとの間に発振現象(oscillation phenomenon)を示すことがある。RF励起プラズマシステムでは、プラズマのインピーダンスは迅速に変化することがある。プラズマへ供給された電力が変化すれば、インピーダンスも変化する。同様に、負荷インピーダンスの変化が生じれば、RF電源の出力電力が変化するだろう。これらの変化が協同して、急速な「脱走」のシナリオあるいは発振を生じることとなる。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

発振は、RF信号の振幅変調として認識することができ、これは、RF電源が急速インピーダンス(そして即ち急速出力電力)のエクスカージョンに応答するような様式による動作周波数よりも低い周波数であれば、ほぼ、どの周波数においても生じ得る。進行電力又は反射保護制御ループ(reflected protection control loop)によって、「脱走」の環境が制限され妨げられれば、そのループ対応周波数で発振が生じるだろう。「脱走」の環境が、RF電源の電力増幅器の蓄積エネルギーの一時的な空乏を生じさせるだけであるならば、もっと高い周波数で発振を生じさせることができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 4 】

【課題を解決するための手段】

R F 電源の新しい構成は、急速に変化する非線形インピーダンスに対しての電源の対応の方法を変えている。この新たな構成の電源は、50 オーム実部(50 ohms real)の抵抗の完全整合点に近い単位から、最大進行電力を使用可能にする。このことが、プラズマインピーダンスが変化した際に、電源からの供給電力が高くなることを防止するため、相互作用による発振が開始することはない。

【 0 0 0 5 】

概説的に、1つの特徴としては、本発明は、スプリッタ(splitter)と、2つの分枝回路と、結合器(combiner)とを備えるR F 電源である。スプリッタは、R F 信号を受容する入力線と、R F 信号から誘導される第1の出力信号を伝送する第1の出力線と、R F 信号から誘導される第2の出力信号を伝送する第2の出力線とを有している。第1の分枝回路は、第1の出力信号を受容して、そこから第1の誘導信号を発生させる。第2の分枝回路は、第2の出力信号を受容して、そこから第1の誘導信号を発生させる。第1の分枝回路は、第1の電力増幅器と、位相移動要素とを有している。第2の分枝回路は、第2の電力増幅器を有している。第1の誘導信号を受容する第1の入力と第2の誘導信号を受容する第2の入力とを有する結合器は、この第1の誘導信号と第2の誘導信号とを結合させて出力信号を発生させる。位相移動要素は、第1の電力増幅器の出力線と結合器の第1の出力との間に接続されて、第1の電力増幅器から結合器へと通過する信号における位相移動を第2の電力増幅器から結合器へと通過する信号と相対的に行う。

【 0 0 0 6 】

概説的に、1つの特徴としては、本発明は、上述の電源を用いて、電力をプラズマ処理チャンバへと供給している。

【 0 0 0 7 】

好ましい具体例では、以下の特徴を有している。電力がプラズマへと供給された際のR F 電源の発振による不安定性を防止するためには、第1の増幅器の出力において位相移動があれば充分である。更に具体的には、位相移動はおよそ $90^\circ + n(180^\circ)$ であり、 n は整数で、 0° 結合器が用いられると仮定する。第1の分枝回路は更に、スプリッタの第1の出力と第1の電力増幅器との間に接続された第2の位相移動要素を有している。この第2の位相移動要素は、第2の位相移動を生じさせるが、これが、第1番目に述べた位相移動要素の位相移動へ加えられた時に、第2の誘導信号に対して所定の位相関係を有するような第1の誘導信号を生じさせる。この所定の位相関係は、結合器の要求項目によって決定される。 0° 電力結合器及びスプリッタを用いた場合は、第1番目に述べた位相移動及び第2番目の位相移動によって、第1の誘導信号が第2の誘導信号と同調ようになる。例えば、第1番目に述べた位相移動はおよそ $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ であり、 n 及び m は整数、また、第2の位相移動はおよそ $270^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ であり、 k は整数である。 180° 結合器と 0° スプリッタを用いた場合は、第1番目に述べた位相移動及び第2の位相移動により、第1の誘導信号は第2の誘導信号に対して 180° 位相がずれるようになる。例えば、第1番目に述べた位相移動はおよそ $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ であり、 n 及び m は整数、また、第2の位相移動はおよそ $270^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ であり、 k は整数である。

【 0 0 0 8 】

また、好ましい具体例では、位相移動要素は、所定の長さを有するケーブルのセグメントである。

【 0 0 0 9 】

概説的に、また1つの特徴においては、本発明は、R F 信号を増幅する方法である。この方法は、以下のステップを有している：R F 信号を第1の出力信号と第2の出力信号とに分割するステップと；第1の出力信号の電力を増幅して、第1の増幅電力を生じさせるステップと；第1の出力信号の電力を増幅して、第1の増幅電力を生じさせるステップと；第2の増幅信号を第1の増幅信号に対して位相移動させて、位相移動信号を生じさせるス

10

20

30

40

50

トップと；第1の増幅信号と位相移動信号とを結合させて電力出力信号を生じさせるステップと。

【0010】

本発明は、実施が容易であり、また、特に、プラズマチャンバ内のプラズマへ電力を供給するRF電力供給器においてしばしば生じる発振の問題を解決する。

【0011】

その他の利点及び特徴は、下記の好ましい具体例によって更に明らかになるであろう。

【0012】

【発明の実施の形態】

図1に示されるように、半導体デバイスの製造に用いることもできる典型的なRF処理システムの基本要素は、RF電源2と、プラズマチャンバ4と、RF整合回路6とを有している。RF電源は、同軸ケーブル8を介してプラズマチャンバへとRF電力信号を供給して、プラズマを発生させる。このケーブルは、整合回路を介して、プラズマチャンバ内部のプラズマ発生要素（例えばコイル又は電極）に接続されるが、この整合回路は、プラズマ発生要素の近くのチャンバに適正に載置されていることが好ましい。整合回路はプラズマチャンバのインピーダンスを、RF電源の出力インピーダンスと典型的には50オームである同軸ケーブルのインピーダンスとに整合させる。電源の出力に認められるインピーダンスが50オーム(50 ohms real)と全く等しい（即ち、完全に抵抗的である）場合にチャンバ内のプラズマへ移動される電力が最大になる。同軸ケーブルを通じた電源に認められるインピーダンスがこのシステムの特性インピーダンス、例えば50オーム、でない場合は、不整合が生じて、チャンバへと送られる電力の一部が電源へと反射し返される。

【0013】

従来からのデザインの整合回路は、所望の整合の条件を実現するよう調整可能な、可変リアクティブ要素(variable reactive element)を有している。整合回路を包含するユニットの内部に配置される検出回路10が、整合回路における電圧及び電流をモニタし、整合回路が最適な整合条件を実現したかどうかを決定する。この事は、典型的には、整合回路の入力電流及び入力電圧をサンプリングしてこれらから入力インピーダンスを決定することによってなされる。検出回路は、整合が最適ではないことを検知したときには、整合回路内部のリアクティブ要素を変化させて回路を最適な整合状態に移すための信号を発生させる。

【0014】

RF励起チャンバにおいて、RF電源とプラズマとの間に生じる発振現象については、まだ完全に解明されてはいないが、その一部はRF電源の進行電力を変調する非線形プラズマインピーダンスによって生じることを、我々は示してきた。上記に指摘したように、RF励起プラズマシステムにおいては、プラズマのインピーダンスが急速に変化し、また、プラズマへ供給される電力が変化した際にもこれがプラズマのインピーダンスを変化させる。そして、電源の負荷インピーダンスにおけるこれら上記の変化によって、RF電源の出力電力を変化させることになる。電力の関数としてのプラズマインピーダンス非線形性の傾斜が、RF電源に固有な形にある場合は、プラズマインピーダンスが変化することにより、これに対応して電源の出力電力も上昇し、急速な「脱走」のシナリオを生じさせるだろう。この環境に対しての制御は、典型的なRF電源の進行電力ループ又は不整合保護回路だけであり、これは最終的には、そのループ時間定数に従って応答し、電源出力に引き入れ返す。そして、プラズマインピーダンスは始点に戻り、プロセスが再度開始して、電力/インピーダンス発振を持続させる。また、この発振は、「脱走」状態を支持するために供給可能な瞬時エネルギーの量を制限する電源の要素に蓄積された、エネルギーの量によって決まる周波数で、生じ得ることとなる。

【0015】

電源において認められるプラズマ非線形性の位相及び傾斜が重要な因子であるため、発振の存在は、プラズマ-電源間の同軸ケーブルの長さ（即ち、電氣的長さ）の関数である。このことは、実験において、チャンバのためのRFシステムが特定のケーブル長さでだけ

10

20

30

40

50

安定であるということで、繰り返し示されてきた。望ましくないことに、安定したRF動作に必要なケーブル長さはRF整合回路網の関数であり、プラズマインピーダンスの性質の関数であり、また、電源の性質の関数である。従って、最適な長さはシステム間で一定ではない。この事により、製造の環境において問題を引き起こす。

【0016】

上述の発振の問題を解決する電源のデザインの内部構造を説明する前に、まず、本発明が排除する不安定性を、何が生じさせるのかを、更に詳しく理解することが有用である。この最後に、RF電源20の基本構造を示す図2を参照することとする。電源20は、RF信号を発生させるRF信号ソース22と、チャンパ内にプラズマを発生させるために要するレベルまでRF信号を増幅する電力増幅器24とを有している。この図及び残りの図においては、プラズマチャンパ内のプラズマは、負荷、 Z_L 、としてモデル化されている。この最もシンプルな形態では、電力増幅器24は、シングルステージのRFトランジスタ電力増幅器である。進行電力、 P_{FWD} 、は、負荷 Z_L に入射する電力として定義される。このようなシステムに対しては、 Z_L に対する進行電力の典型的な性質は、図3(a)のスミス図表に与えられる。

10

【0017】

背景としては、スミス図表は、RF伝送線回路を解析するために、いわゆる当業者間で広く用いられている便利な道具である。簡単に言えば、これは、反射係数面（即ち - 面）における規格化抵抗及びリアクタンスのグラフプロットである。反射係数、 Γ 、は、特性インピーダンス Z_0 を有するロスの小さな伝送線が終了するところにある負荷 Z_L での反射電圧の複素振幅と入射電圧の複素振幅との比で定義される。

20

【0018】

これは数学的に、以下のように表現される：

【数1】

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = |\Gamma| e^{j\theta_r} = \Gamma_r + j\Gamma_i$$

30

ここで、 $j = (-1)^{1/2}$ である。その例が図3(b)に示されているスミス図表は、 Γ_r - 空間のプロットであり、水平軸が Γ_r を与え、垂直軸が Γ_i を与える。規格化負荷 Z_L / Z_0 と称されるもう一つの有用な量は、以下に等しく：

【数2】

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = r + jx$$

40

スミス図表にプロットされた場合の r の異なる値は、 $\Gamma_i = 0$ 軸に沿って配置される中心をそれぞれ有し、且つ全てが $\Gamma_r = 1, 0, 0^\circ$ を通過する、半径の異なる円の一群として示されている。スミス図表にプロットされた場合の x の異なる値は、 $\Gamma_r = 1$ の線に沿って配置される中心をそれぞれ有し、且つ全てが $\Gamma_i = 1, 0$ を通過する、半径の異なる円の別の一群として示されている。従って、スミス図表によれば、反射係数に対する負荷インピー

50

ダンスを図から非常に簡単に読み取ることができ、その逆も同様である。じきに明らかになることであろうが、電力増幅器に認められるインピーダンスに対して遅れ線や位相移動器が持つ効果を迅速に決定することも容易になる。

【 0 0 1 9 】

この背景をもって、図 3 (a) に示されている電力カーブに戻ることにする。スミス図表の中心は、伝送線特性インピーダンスと電力供給出力インピーダンス Z_0 に等しく、このケースでは 50 オーム実部 (50 ohms real) である。縦軸は、 Z -面 (Z -面とも称する) に垂直であるが、これは P_{FWD} 軸である。負荷インピーダンス Z_L の関数としての進行電力 P_{FWD} のプロットは、図示されるように、略傾斜した、比較的平坦な面 50 である。 $Z_L = Z_0$ である整合点では、電力増幅器により与えられる進行電力は、52 で標識されるように示され、即ち、 P_{FWD} 軸は電力カーブ 50 と交差する。実際、 Z_L が 50 オーム実部 (50 ohm real) のインピーダンスの値から一定の方向に遠ざかる場合に、進行電力は著しく増加する。この特性は、前述したような不安定な状態を導き得る。

10

【 0 0 2 0 】

プラズマ処理チャンバに典型的に用いられるような高い電力レベルを実現させるためには、マルチステージの RF 増幅器を並列に結合させることがしばしば必要になる。図 4 には、2 ステージに係る従来からの並列の構成の例を例示する。図示のように、2 つの別々の増幅器 60 a 及び 60 b が、電力スプリッタ 62 及び電力結合器 64 を用いて接続されている (電力スプリッタ及び電力結合器の設計及び動作の説明は、標準的なハンドブック、例えば、Single-Sideband Systems and circuit, Ed. Williams E. Sabin and Edger O. Scoenke, McGraw-Hill Book Company, 425 ~ 447 頁、等を参照) 。

20

【 0 0 2 1 】

電力スプリッタ 62 は、RF ソースから RF 信号 P_{IN} を受容して、そこから、電力の等しい 2 つの同一の信号を発生する。増幅器 60 a 及び 60 b のそれぞれは、電力スプリッタ 62 からの信号の対応する一方を増幅する。そして、これらの増幅器の出力は、電力結合器 64 に接続されて、電力増幅器 60 a の出力電力及び 60 b の出力電力の合計と等しい電力を有する出力信号を発生させる。

【 0 0 2 2 】

ここに説明される具体例では、電力結合器 64 は、逆に動作される点を除いて、電力スプリッタ 62 と同じタイプのデバイスである。即ち、電力結合器の入力線は電力スプリッタの出力線となり、また、電力結合器の出力線は電力スプリッタの入力線となる。また、これらのデバイスは、第 3 のポートに接続された電力抵抗器 R_1 を有している。電力結合器は、電力抵抗器 R_1 に吸収されるあらゆる増幅度又は位相不均衡で、2 つの入力信号を等しく結合する。図 4 では、電力スプリッタ 62 及び電力結合器 64 は、 0° (degree) デバイスである。即ち、これら 2 つの線に現れている信号は、相互に同調している。また、 180° デバイスも商業的に入手可能である。しかし、用いるタイプに関係なく、電力増幅器 60 a の出力に認められるインピーダンスは、電力増幅器 60 b に認められるインピーダンスと同一である。従って、 0° デバイス又は 180° デバイスを用いた場合は、増幅器 60 a と 60 b の進行電力対 Z_L 特性は、図 3 に示されるシングルステージと同じである。従って、プラズマインピーダンスの変化によって一方の増幅器の電力出力が増加するならば、他方の増幅器の電力も増加する。

30

40

【 0 0 2 3 】

RF 増幅器をこの方法で結合すれば上述した RF 電源 - プラズマの相互作用による発振を生じさせることが、知られていた。プラズマインピーダンスがある方向に変化したときに双方の分枝において進行電力が増加し得るため、発振が開始してしまう。

【 0 0 2 4 】

図 5 の回路で示される変形を行うことにより、不安定となる可能性が完全に排除される。この変形回路は、位相移動要素 72 及び 74 が、増幅器 60 a の前後に付加されている点を除けば、図 4 の回路と同じである。更に具体的には、ここに説明される具体例では、 $270^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ の位相移動要素 72 が電力増幅器 60 a の前に

50

付加され、 $90^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ 位相移動要素 74 が電力増幅器 60 a に付加されている。ここで、 n 、 m 及び k は整数であり、いかなる正の値又はゼロをとることができる。位相移動要素 74 は、電力増幅器 60 a に認められるインピーダンスを、電力増幅器 60 b に認められるインピーダンスに関して回転させる。位相移動要素 72 は、下側の分枝からの入力信号と同調する信号を電力結合器 64 の入力において発生させる（即ち、これら 2 つの入力の間の位相差が 360° の整数倍となる）に十分な位相移動を、上側の分枝に加える。

【0025】

位相移動要素を、代わりに、電力増幅器 60 b の前に挿入することも可能であることに注意すべきである。そのケースでは、 $90^\circ + n(180^\circ) + m(360^\circ)$ の位相移動を導入することが、電力結合器 64 の入力における位相に求められることを満たす上で必要である。

【0026】

位相移動要素 60 a 及び 60 b は、適当な長さを有するケーブル（例えば、約 30" の長さを有するケーブルは 13.56 MHz の信号に対して 90° の位相移動を生じさせる）の部分を用いることにより、簡単に実施可能である。

【0027】

図 5 の構成では、 Z_L が厳密に 50 オーム実部 (50 ohms real) である場合は、電力増幅器 60 a 及び 60 b の双方は、50 オーム実部 (50 ohms real) の負荷インピーダンスを与えるだろう。しかし、 Z_L が 50 オーム実部 (50 ohms real) ではない場合は（即ち、システムが完全な整合状態から離れてしまったならば）、電力増幅器 60 a は、電力増幅器 60 b に認められるインピーダンスと $1/4$ 波長（即ち 90° ）だけ位相がずれたインピーダンスを現すであろう。更に重要なことに、電力増幅器 60 a の電力カーブも、電力増幅器 60 b の電力カーブに比べて $1/4$ 波長だけ位相がずれているだろう。換言すれば、図 3 に示されているような電力増幅器 60 b の電力カーブを仮定すれば、電力増幅器 60 a の電力カーブは、電力軸の回りに 180° （即ち 90° を 2 回）回転されたものであろう。ここで、インピーダンスが整合状態から遠ざかる変化があっても、これが 2 つの電力増幅器の電力出力を増加させないだろう。プラスインピーダンスの変化によって電力増幅器 60 b の出力電力が増加した場合は、電力増幅器 60 a の出力が減少するだろう。このことは、出力増幅器の出力が増幅器の電源の電流又は電圧の能力に制限されない限り、通常のクラス A、B 及び C の電力増幅器全ての特徴である。換言すれば、一方の電力増幅器が、他方の電力増幅器の不安定になる可能性のある応答を、補償する傾向を有するだろう。

【0028】

電力結合器 64 は、以下の方法で、電源の安定化を更に促進する。2 つの電力増幅器 60 a 及び 60 b が、等しい振幅を有する信号を発生させて、同調し、即ち等しい進行電力を有するときは、電力結合器 64 はこれら 2 つの信号を結合して、2 つの電力増幅器の進行電力の合計である全進行電力を有する出力信号を作り出す。電力結合器 64 へ至る 2 つの入力信号が同調し且つ等しい振幅を有するので、電力抵抗器 R_1 は電力を損失させない。しかし、2 つの電力増幅器がバランスしていない信号を発生している場合は、電力抵抗器 R_1 がこの振幅の不均衡を吸収するだろう。

【0029】

位相移動要素 74 及び電力結合器 64 の正味の効果は、図 6 に示されているように、そこに現れている進行電力対 Z_L 特性を作り出す。その結果得られた電源の電力カーブは、最適整合点のところ又はその近くで最大値 80 を示している。しかし、用いられる電力増幅器の特性によっては、最大値は実際に整合点に配置されないこともある。それでも、得られる電力カーブは最適整合点の近傍に形状を有しているだろうことから、最適整合点から遠ざかるいかなる動きも電源の電力出力を著しく増加させることがない（即ち、前に見られたタイプの不安定さを生じさせるほど大きくは増加しない）。実に、この技術は、上述の電源 - プラズマ相互作用発振の問題を完全に解決することが立証されている。

【0030】

10

20

30

40

50

図5の構成は、この目的を達成する構成だけではない。重要なことは、一方の電力増幅器の出力のところで、十分な位相移動を加えていることである。2つの電力増幅器のステージの出力で認められるインピーダンスに限っては、この技術は、前述のタイプの不安定さを排除するように機能する。換言すれば、電力増幅器60bの出力における位相移動は、 90° である必要はない。この電力増幅器が、他方の電力増幅器に応じて生じ得る不安定さを補償するのであれば、どの量でもよい。この量は、用いられている特定の電力増幅器及び特定の構成に対して、実験的に決定できる。位相移動要素72によって与えられる第2の位相移動は、 0° 結合器の入力のところで存在する要求、即ち、相互に同調しなければならないことを、容易に満たしている。

【0031】

更に、この技術は、2つ以上のステージを有する電源に用いられてもよい。2以上の電源が用いられた場合は、これらを2つのグループに分け、各グループを、上述のような2ステージの構成の単一の電力増幅器として取り扱うことが可能である。あるいは、電力増幅器は、別々に取り扱われてもよい。例えば、図7に示されるように4つの電力増幅器がある場合は、これらの電力増幅器のうちの3つの出力のところにはそれぞれ、 45° 、 90° 及び 135° の位相移動要素を用いることが可能である。これらの位相移動要素は、その隣に対して一方の電力増幅器から 90° だけ、電力カーブを回転させるように動作する。

【0032】

一般的には、 x ステージ(x は典型的には偶数の整数である)が用いられている場合は、 $r(180^\circ/x)$ の位相移動要素を用いる1つのアプローチがある。ここで、 r はステージを特定し、 $r=1, 2, \dots, x$ である。

【0033】

図8に示される別の具体例では、 180° 電力結合器65が用いられている。このケースでは、前述の $270^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ の位相移動要素の代わりに、 $90^\circ + n(180^\circ) + k(360^\circ)$ の位相移動要素が電力増幅器60aの前に用いられている。 180° 電力結合器の入力に到達する信号が、位相が 180° ずれていなければならないため、これが必要である。

【0034】

また、異なるデザインの、それぞれが他方の増幅器の電力カーブを補償する電力カーブを有している、2つの電力増幅器を用いることも可能である。

【0035】

ここ説明されている具体例で用いられる典型的な電力レベルは、 13.56 MHz で 1 kW である。しかし、この技術は、プラズマチャンバ内で用いられるだろうあらゆる周波数(例えばRF)及び電力レベルで機能する。

【0036】

上述の具体例に対して、電力スプリッタの出力と電力増幅器の入力の間、又は、電力増幅器の出力と結合器の入力との間に、何か接続があれば、それは典型的には信号に位相移動を導入するだろう。この導入された位相移動の量は、回路の長さによって小さくもなれば大きくもなるだろう。従って、図には、全ての分枝の全ての増幅器の入力及び出力の両方に位相移動要素があることが暗黙である。しかし、説明を簡単にし、且つ、重要な位相移動の相対差を強調するため、これらは示されない。

【0037】

【発明の効果】

以上説明してきたように、本発明の電源では、プラズマインピーダンスが変化した際に、電源からの供給電力の増加が防止されるため、相互作用による発振が開始することはない。

【0038】

従って、RF電力供給器においてしばしば生じる発振の問題を解決することが可能となる。

10

20

30

40

50

【図面の簡単な説明】

【図1】RFプラズマシステムのブロック線図である。

【図2】典型的なシングルステージRFトランジスタ電力増幅器及び負荷のブロック線図である。

【図3】(a)は典型的なRFトランジスタ増幅器の進行電力出力対負荷のインピーダンスのグラフであり、(b)はスミス図表である。

【図4】従来から用いられる典型的な高出力RF電源のブロック線図である。

【図5】本発明に従って構成されるRF電源のブロック線図である。

【図6】図4の電源に関する進行電力の出力の等高線図である

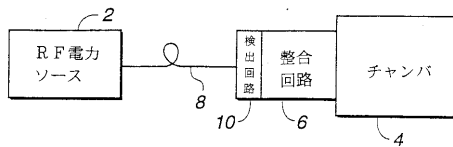
【図7】4つの電力増幅器を用いた、本発明の具体例のブロック線図である。

【図8】180°電力結合器を用いた別の具体例のブロック線図である。

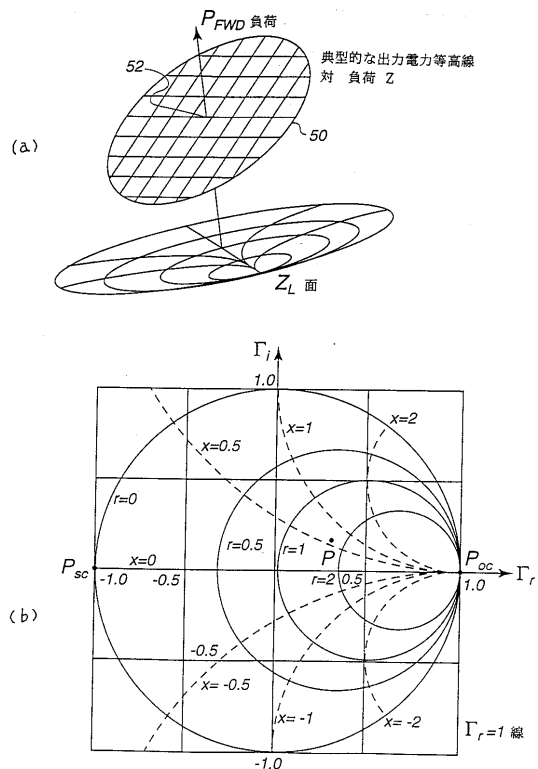
【符号の説明】

2...RF電源、4...プラズマチャンバ、6...RF整合回路、8...同軸ケーブル、10...検出回路、20...RF電源、22...RF信号ソース、24...電力増幅器、50...電力カーブ、60a, 60b...増幅器、62...電力スプリッタ、64, 65...電力結合器、72, 74...位相移動要素、80...最大値。

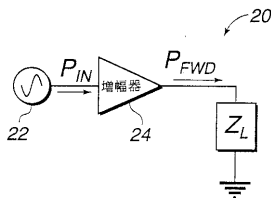
【図1】



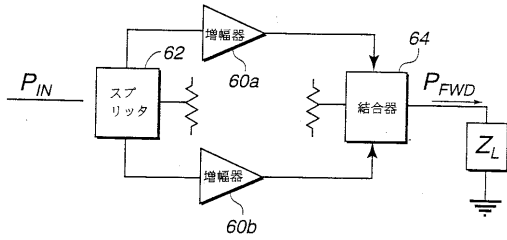
【図3】



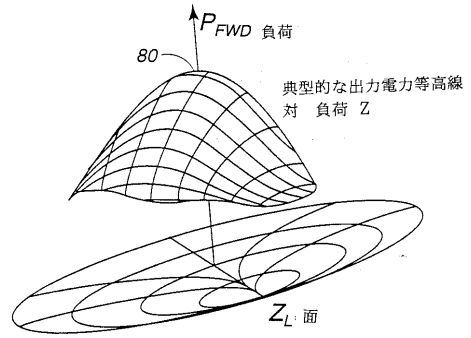
【図2】



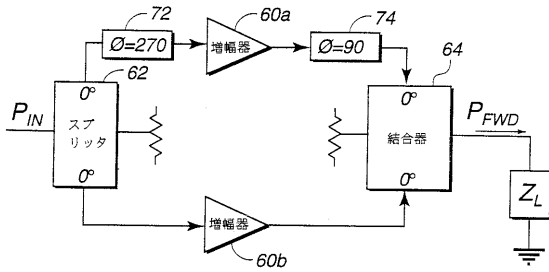
【図4】



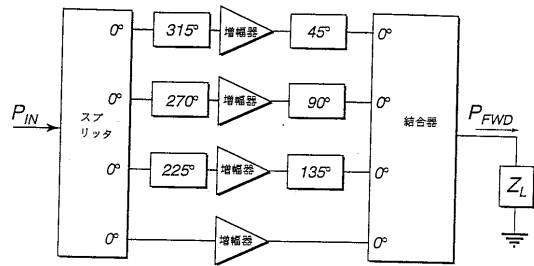
【図6】



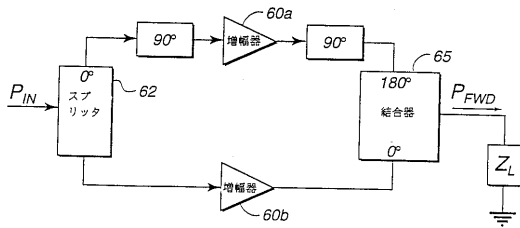
【図5】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(74)代理人 100089978

弁理士 塩田 辰也

(74)代理人 100092657

弁理士 寺崎 史朗

(74)代理人 100094318

弁理士 山田 行一

(72)発明者 ブラッドリー オー． スティムソン

アメリカ合衆国， カリフォルニア州 94040， マウンテン ヴュー， ドューイ プレイ
ス 1105

(72)発明者 ポール ダブリュー． ランメル

アメリカ合衆国， マサチューセッツ州 01902， リン， ビーコン ヒルズ コート 5
8

審査官 中塚 直樹

(56)参考文献 特開平06-268466(JP,A)

特開平04-057406(JP,A)

特開平04-346829(JP,A)

特表平05-500547(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl.，DB名)

H05H 1/46