

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5524796号  
(P5524796)

(45) 発行日 平成26年6月18日 (2014. 6. 18)

(24) 登録日 平成26年4月18日 (2014. 4. 18)

(51) Int. Cl.

F I

GO 1 R 27/02 (2006. 01)

GO 1 R 27/02 A

GO 1 R 27/28 (2006. 01)

GO 1 R 27/28 Z

GO 1 R 35/00 (2006. 01)

GO 1 R 35/00 J

請求項の数 8 (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2010-221836 (P2010-221836)  
 (22) 出願日 平成22年9月30日 (2010. 9. 30)  
 (65) 公開番号 特開2012-78138 (P2012-78138A)  
 (43) 公開日 平成24年4月19日 (2012. 4. 19)  
 審査請求日 平成25年8月1日 (2013. 8. 1)

(73) 特許権者 000000262  
 株式会社ダイヘン  
 大阪府大阪市淀川区田川2丁目1番11号  
 (74) 代理人 100086380  
 弁理士 吉田 稔  
 (74) 代理人 100103078  
 弁理士 田中 達也  
 (74) 代理人 100115369  
 弁理士 仙波 司  
 (74) 代理人 100130650  
 弁理士 鈴木 泰光  
 (74) 代理人 100135389  
 弁理士 臼井 尚

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高周波測定装置、および、高周波測定装置の校正方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

プラズマ処理装置を含む負荷とこの負荷に高周波電力を供給する高周波電源装置との間に接続されて、当該接続点における高周波電圧および高周波電流を検出する高周波測定装置であって、

前記接続点における高周波電圧を検出する電圧検出手段と、

前記接続点における高周波電流を検出する電流検出手段と、

前記電圧検出手段によって検出された電圧値と前記電流検出手段によって検出された電流値とを校正する校正手段と、

前記校正手段によって校正された前記電圧値と電流値とに基づいて、前記接続点から負荷側を見たインピーダンスを算出するインピーダンス算出手段と、  
 を備えており、

前記校正手段は、

基本の3つの基準負荷に前記高周波測定装置をそれぞれ接続した時の前記インピーダンス算出手段によって算出された3つのインピーダンスと前記基本の3つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて算出された基本パラメータを用いて、前記検出された電圧値と電流値とを校正する第1校正手段と、

前記第1校正手段によって校正された電圧値と電流値とから算出されるインピーダンスをスミスチャート上で表示した場合に、全インピーダンスの範囲が複数に分割された範囲のうちのいずれの範囲に位置するかを判定する判定手段と、

10

20

前記判定手段によって前記インピーダンスが位置すると判定された範囲を囲む３つのインピーダンスをそれぞれ有する範囲別の３つの基準負荷に前記高周波測定装置をそれぞれ接続した時の前記インピーダンス算出手段によって算出された３つのインピーダンスと前記範囲別の３つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて算出された範囲別パラメータを用いて、前記第１校正手段によって校正された前記電圧値と電流値とをさらに校正する第２校正手段と、  
を備えている高周波測定装置。

【請求項２】

前記複数に分割された範囲は、スミスチャート上の特性インピーダンスを示す点を中心として、当該中心を通る直線で分割されている、請求項１に記載の高周波測定装置。

10

【請求項３】

前記複数に分割された範囲は、開放状態のインピーダンスを示す点を通る直線と、これに直交する直線とによって、４つに分割されている、請求項２に記載の高周波測定装置。

【請求項４】

前記判定手段は、前記第１校正手段によって校正された電圧値と電流値とから算出される反射係数の位相角に基づいて、いずれの範囲に位置するかを判定する、請求項２または３に記載の高周波測定装置。

【請求項５】

前記判定手段は判定結果を切り替えるタイミングにヒステリシス特性を持たせている、請求項１ないし４のいずれかに記載の高周波測定装置。

20

【請求項６】

前記基本の３つの基準負荷の内の１つの基準負荷、および、前記範囲別の３つの基準負荷の内の１つの基準負荷は、前記高周波測定装置の特性インピーダンスと同一のインピーダンスを有する負荷である、請求項１ないし５のいずれかに記載の高周波測定装置。

【請求項７】

プラズマ処理装置を含む測定対象負荷とこの負荷に高周波電力を供給する高周波電源装置との間に接続されて、当該接続点における高周波電圧および高周波電流を検出し、検出された電圧値と電流値とに基づいて、当該接続点から負荷側を見たインピーダンスを算出する高周波測定装置の前記電圧値と電流値の校正方法であって、

基本の３つの基準負荷に前記高周波測定装置をそれぞれ接続した時に算出された３つのインピーダンスと前記基本の３つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて、前記電圧値と電流値とを校正するための基本パラメータを算出して、前記高周波測定装置に設定する第１の工程と、

30

全インピーダンスの範囲を複数の範囲に分割した場合の各範囲を囲むそれぞれ３つのインピーダンスを有する３つの基準負荷にそれぞれ前記高周波測定装置を接続した時に算出された３つのインピーダンスと当該３つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて、前記基本パラメータを用いて校正された電圧値と電流値とをさらに校正するための範囲別パラメータをそれぞれの範囲毎に算出して、前記高周波測定装置に設定する第２の工程と、

前記高周波測定装置を前記測定対象負荷に接続して、検出された電圧値と電流値とを前記基本のパラメータおよび前記範囲別パラメータを用いて校正する第３の工程と、  
を備えている校正方法。

40

【請求項８】

前記第３の工程において用いられる前記範囲別パラメータは、前記基本のパラメータを用いて校正された電圧値と電流値とに基づいて算出されたインピーダンスが位置する範囲に対応する範囲別パラメータである、請求項７に記載の校正方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、高周波電圧および高周波電流を検出しインピーダンス等の高周波パラメータを算出することで測定する高周波測定装置、および、当該高周波測定装置の校正方法に関

50

する。

【背景技術】

【0002】

従来、高周波電源装置から出力される高周波電力をプラズマ処理装置に供給し、エッチング等の方法を用いて半導体ウェハや液晶基板等の被加工物を加工するプラズマ処理システムが開発されている。

【0003】

図11は、一般的なプラズマ処理システムの構成を示すブロック図である。

【0004】

プラズマ処理中にプラズマ処理装置400のインピーダンスは変動するので、当該プラズマ処理装置400の入力端で反射した反射波電力が高周波電源装置100を損傷する虞がある。したがって、プラズマ処理システムA100においては、一般に、高周波電源装置100とプラズマ処理装置400との間にインピーダンス整合装置200が設けられており、当該インピーダンス整合装置200がプラズマ処理装置400のインピーダンス変動に応じて整合動作を行っている。また、プラズマ処理中のプラズマ処理装置400のインピーダンスやプラズマ処理装置400の入力端における高周波電圧および高周波電流などの監視を行う必要がある。

【0005】

プラズマ処理装置400の監視は、プラズマ処理装置400の入力端に設けられた高周波測定装置300が測定する各種高周波パラメータを用いて行われる。また、インピーダンス整合装置200の整合動作は、インピーダンス整合装置200の内部に設けられた高周波測定装置(図示せず)が測定する各種高周波パラメータに基づく制御によって行われる。なお、以下では、高周波測定装置300を例として説明を行う。

【0006】

高周波測定装置300は、高周波電圧(以下、単に「電圧」という。)と高周波電流(以下、単に「電流」という。)を検出し、その検出値から電圧と電流の位相差(以下、単に「位相差」という。)を求めるとともに、電圧実効値 $V$ 、電流実効値 $I$ 、インピーダンス $Z = R + jX$ (測定点がプラズマ処理装置400の入力端近傍なので、プラズマ処理装置400のインピーダンスに相当する。)、反射係数の大きさ、プラズマ処理装置400に入力される進行波電力 $P_f$ 、インピーダンス不整合によりプラズマ処理装置400の入力端で反射される反射波電力 $P_r$ などの高周波パラメータを算出する。

【0007】

高周波測定装置300は、プラズマ処理装置400に電力を伝送するための棒状の導電体に容量結合させたコンデンサと当該導電体に磁気結合させたコイルとを有し、コンデンサによって電圧 $v = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t)$ を、また、コイルによって電流 $i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \theta)$ を検出する。また、高周波測定装置300は、検出した電圧 $v$ および電流 $i$ から電圧実効値 $V$ 、電流実効値 $I$ 、位相差 $\theta$ を求め、これらを用いて下記(1)~(5)式により上記の高周波パラメータを算出する。すなわち、高周波測定装置300は、電圧 $v$ と電流 $i$ を検出するセンサとそのセンサの検出値から上記の高周波パラメータを算出する演算処理回路を備えた、いわゆるRFセンサと呼ばれるものである。

【0008】

## 【数 1】

$$R = \frac{V}{I} \cos \theta \quad (1)$$

$$X = \frac{V}{I} \sin \theta \quad (2)$$

$$Z = R + jX$$

$$|\Gamma| = \sqrt{\left(\frac{R^2 + X^2 - 1}{(R + 1)^2 + X^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot X}{(R + 1)^2 + X^2}\right)^2} \quad (3)$$

$$P_f = \frac{V \cdot I \cdot \cos \theta}{1 - \Gamma^2} \quad (4)$$

$$P_r = P_f \cdot \Gamma^2 \quad (5)$$

10

## 【0009】

一般に、計測装置や測定装置のセンサの感度にはばらつきがあるので、当該センサで検出される検出値は正しい値と異なる。したがって、予め基準となる被測定物を測定して検出値を正しい値に換算する校正パラメータを取得しておき、実際の測定ではセンサの検出値を当該校正パラメータで正しい値に校正して出力する構成としている。

## 【0010】

20

高周波測定装置300が検出した電圧 $v$ および電流 $i$ の校正では、例えば、SOLT (Short-Open-Load-Thru) 校正が用いられる。SOLT校正では、まず、インピーダンスの真値があらかじめ特定された基準負荷に高周波測定装置300を接続し、高周波測定装置300によってインピーダンスを測定する。基準負荷としては、測定系の特性インピーダンス(測定のために高周波を伝送する伝送線路の特性インピーダンス。一般には50又は75)を有するダミーロード、開放状態のインピーダンス(無限大)、および、短絡状態のインピーダンス(ゼロ)にそれぞれ近いインピーダンスを有するダミーロードが用いられる。次に、高周波測定装置300によって測定された各基準負荷のインピーダンスと各基準負荷のインピーダンスの真値とから、電圧 $v$ および電流 $i$ を校正するための校正パラメータを算出して、高周波測定装置300のメモリ(図示せず)に記録する。実際の測定では、検出された電圧 $v$ および電流 $i$ を、メモリに記録されている校正パラメータで校正してから、各種高周波パラメータを算出する。

30

## 【0011】

高周波測定装置300のメモリに記録されている校正パラメータは、極限值である開放状態のインピーダンス(無限大)および短絡状態のインピーダンス(ゼロ)にそれぞれ近いインピーダンスと特性インピーダンスとに基づいて算出されているので、インピーダンスの極めて広い範囲で校正を行うことができる。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0012】

40

【特許文献1】特開2007-163308号公報

【特許文献2】特開2004-309132号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0013】

しかしながら、上記の校正パラメータはインピーダンスの極めて広い範囲で校正を行うことができるように求められたものなので、当該校正パラメータによる校正の精度は十分高いものではない。すなわち、上記校正パラメータは、インピーダンスの極めて広い範囲で低い精度で校正を行うことができるものとなっている。しかし、実際にプラズマ処理装置400の監視に高周波測定装置300の測定値を用いる場合、校正の精度が高いことが

50

求められる。

【0014】

例えば、プラズマ処理装置400はプラズマ処理を行っているときに高熱を発するので、プラズマ処理装置400の近くに配置される高周波測定装置300の周囲の温度も高くなる。温度が異なると抵抗成分が変化するので、校正を行ったときの周囲の温度と実際に測定を行うときの周囲の温度とが異なると、校正の精度が低下する。このことを考慮すると、高い精度で校正を行っておく必要がある。

【0015】

また、プラズマ処理中において、検出された電圧 $v$ と電流 $i$ の位相差は、 $(1/2)$ に近い値となることが多い。したがって、位相差のわずかな誤差でも $\cos$ の変化率は大きくなり、インピーダンスの抵抗成分 $R$ や進行波電力 $P_f$ の測定値に大きな影響を与える(上記(1)、(4)式参照)。したがって、位相差の誤差を抑制するために、高い精度で校正を行う必要がある。

【0016】

また、高周波測定装置300の測定値を、Eチャックコントローラなどに用いる場合がある。Eチャックコントローラは、プラズマ処理装置400のチャンバー内でウエハを固定するための静電チャックの強さを、測定された電流値および電圧値に基づいて制御する。したがって、測定された電流値および電圧値の誤差を極めて小さい範囲に抑える必要があり、機差特性も最小限におさえなければならない。そのため、高周波測定装置300の検出値の校正は、精度を高くする必要がある。

【0017】

本発明は上記した事情のもとで考え出されたものであって、高周波測定装置によって検出された電圧および電流を高い精度で校正する方法、および、当該校正を行うことができる高周波測定装置を提供することをその目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0018】

上記課題を解決するため、本発明では、次の技術的手段を講じている。

【0019】

本発明の第1の側面によって提供される高周波測定装置は、プラズマ処理装置を含む負荷とこの負荷に高周波電力を供給する高周波電源装置との間に接続されて、当該接続点における高周波電圧および高周波電流を検出する高周波測定装置であって、前記接続点における高周波電圧を検出する電圧検出手段と、前記接続点における高周波電流を検出する電流検出手段と、前記電圧検出手段によって検出された電圧値と前記電流検出手段によって検出された電流値とを校正する校正手段と、前記校正手段によって校正された前記電圧値と電流値とに基づいて、前記接続点から負荷側を見たインピーダンスを算出するインピーダンス算出手段とを備えており、前記校正手段は、基本の3つの基準負荷に前記高周波測定装置をそれぞれ接続した時の前記インピーダンス算出手段によって算出された3つのインピーダンスと前記基本の3つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて算出された基本パラメータを用いて、前記検出された電圧値と電流値とを校正する第1校正手段と、前記第1校正手段によって校正された電圧値と電流値とから算出されるインピーダンスをスミスチャート上で表示した場合に、全インピーダンスの範囲が複数に分割された範囲のうちのいずれの範囲に位置するかを判定する判定手段と、前記判定手段によって前記インピーダンスが位置すると判定された範囲を囲む3つのインピーダンスをそれぞれ有する範囲別の3つの基準負荷に前記高周波測定装置をそれぞれ接続した時の前記インピーダンス算出手段によって算出された3つのインピーダンスと前記範囲別の3つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて算出された範囲別パラメータを用いて、前記第1校正手段によって校正された前記電圧値と電流値とをさらに校正する第2校正手段とを備えている。

【0020】

なお、高周波測定装置には、プラズマ処理装置に接続されて当該プラズマ処理装置を監視するために高周波パラメータを測定する高周波測定装置や、インピーダンス整合装置の

内部に設けられて整合動作を制御するために高周波パラメータを測定する高周波測定装置などがある。また、検出された電圧値と電流値は、例えば、デジタル変換された電圧値と電流値や、電圧実効値と電流実効値、電圧最大値と電流最大値などである。

【0021】

本発明の好ましい実施の形態においては、前記複数に分割された範囲は、スミスチャート上の特性インピーダンスを示す点を中心として、当該中心を通る直線で分割されている。

【0022】

本発明の好ましい実施の形態においては、前記複数に分割された範囲は、開放状態のインピーダンスを示す点を通る直線と、これに直交する直線とによって、4つに分割されている。

10

【0023】

本発明の好ましい実施の形態においては、前記判定手段は、前記第1校正手段によって校正された電圧値と電流値とから算出される反射係数の位相角に基づいて、いずれの範囲に位置するかを判定する。

【0024】

本発明の好ましい実施の形態においては、前記判定手段は判定結果を切り替えるタイミングにヒステリシス特性を持たせている。

【0025】

本発明の好ましい実施の形態においては、前記基本の3つの基準負荷の内の1つの基準負荷、および、前記範囲別の3つの基準負荷の内の1つの基準負荷は、前記高周波測定装置の特性インピーダンスと同一のインピーダンスを有する負荷である。

20

【0026】

本発明の第2の側面によって提供される校正方法は、プラズマ処理装置を含む測定対象負荷とこの負荷に高周波電力を供給する高周波電源装置との間に接続されて、当該接続点における高周波電圧および高周波電流を検出し、検出された電圧値と電流値とに基づいて、当該接続点から負荷側を見たインピーダンスを算出する高周波測定装置の前記電圧値と電流値の校正方法であって、基本の3つの基準負荷に前記高周波測定装置をそれぞれ接続した時に算出された3つのインピーダンスと前記基本の3つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて、前記電圧値と電流値とを校正するための基本パラメータを算出して、前記高周波測定装置に設定する第1の工程と、全インピーダンスの範囲を複数の範囲に分割した場合の各範囲を囲むそれぞれ3つのインピーダンスを有する3つの基準負荷にそれぞれ前記高周波測定装置を接続した時に算出された3つのインピーダンスと当該3つの基準負荷のインピーダンスとに基づいて、前記基本パラメータを用いて校正された電圧値と電流値とをさらに校正するための範囲別パラメータをそれぞれの範囲毎に算出して、前記高周波測定装置に設定する第2の工程と、前記高周波測定装置を前記測定対象負荷に接続して、検出された電圧値と電流値とを前記基本のパラメータおよび前記範囲別パラメータを用いて校正する第3の工程とを備えている。

30

【0027】

本発明の好ましい実施の形態においては、前記第3の工程において用いられる前記範囲別パラメータは、前記基本のパラメータを用いて校正された電圧値と電流値とに基づいて算出されたインピーダンスが位置する範囲に対応する範囲別パラメータである。

40

【発明の効果】

【0028】

本発明によれば、校正された電圧値と電流値とに基づいて、接続点から負荷側を見たインピーダンスが算出される。まず、基本の3つの基準負荷に基づいて算出された基本パラメータによって、測定対象の負荷を接続して検出した電圧値と電流値とが校正され、インピーダンスが算出される。次に、当該算出されたインピーダンスがいずれの範囲に位置するかが判定され、判定された範囲に対応する範囲別パラメータによってさらに校正される。

50

## 【 0 0 2 9 】

範囲別パラメータは基本パラメータより狭いインピーダンスの範囲でのみ校正を行うためのものなので、インピーダンスが当該範囲に入っている場合は、範囲別パラメータによる校正の精度が十分高いものになる。したがって、検出された電圧値と電流値とを高い精度で校正することができる。

## 【 0 0 3 0 】

本発明のその他の特徴および利点は、添付図面を参照して以下に行う詳細な説明によって、より明らかとなる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 3 1 】

10

【図 1】本発明に係る校正方法の考え方を説明するための図である。

【図 2】第 1 実施形態に係る高周波測定装置を用いたプラズマ処理システムの構成を説明するためのブロック図である。

【図 3】第 1 実施形態に係る高周波測定装置の内部構成を説明するためのブロック図である。

【図 4】基本校正パラメータおよび象限別校正パラメータを説明するための図である。

【図 5】基本校正パラメータの各要素を算出するために行う、基準負荷のインピーダンスの測定方法を説明するための図である。

【図 6】スミスチャート上の点を反射係数の実数部分と虚数部分の座標として表した図である。

20

【図 7】第 1 実施形態に係る高周波測定装置の校正の手順を説明するためのフローチャートである。

【図 8】第 2 実施形態に係る高周波測定装置の校正方法の考え方を説明するための図である。

【図 9】第 2 実施形態に係る高周波測定装置の象限判定部で行われる判定の処理を説明するためのフローチャートである。

【図 10】スミスチャート上の範囲を複数の範囲に分割する他の例を示している。

【図 11】一般的なプラズマ処理システムの構成を示すブロック図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【 0 0 3 2 】

30

以下、本発明の実施の形態を、プラズマ処理装置の監視に用いられる高周波測定装置の場合を例として、添付図面を参照して具体的に説明する。

## 【 0 0 3 3 】

図 1 は、本発明に係る校正方法の考え方を説明するための図であり、スミスチャート上の各インピーダンスの位置を示すための図である。

## 【 0 0 3 4 】

同図 ( a ) の点 A , B , C はそれぞれ、特性インピーダンスである 50 Ω、開放状態のインピーダンス ( 無限大 ) に近いインピーダンス、短絡状態のインピーダンス ( ゼロ ) に近いインピーダンスの位置を示している。点 A , B , C のインピーダンスを基準として算出された校正パラメータは、点 A , B , C で囲まれた範囲 D、すなわち、スミスチャート上のほぼ全てのインピーダンスの範囲で校正を行うことができる。しかし、当該校正パラメータの精度は低く、特に抵抗成分が小さいインピーダンスに対する精度は低くなる。つまり、当該校正パラメータは、広いインピーダンスの範囲で精度の低い校正を行うためのものである。

40

## 【 0 0 3 5 】

校正パラメータを算出するための基準となる点で囲まれた範囲を狭くすれば、当該範囲のインピーダンスに対する精度が高く、その他の範囲のインピーダンスに対する精度が低い校正パラメータを算出することができる。

## 【 0 0 3 6 】

同図 ( b ) の点 E は、抵抗成分がゼロで誘導性のリアクタンス成分が 50 Ω のインピー

50

ダンスに近いインピーダンスの位置を示している。なお、点 A , B は、同図 ( a ) における点 A , B と同一である。点 A , B , E のインピーダンスを基準として算出された校正パラメータは、点 A , B , E で囲まれた範囲  $D_1$  のインピーダンスの範囲で精度の高い校正を行うことができるが、その他の範囲のインピーダンスに対する精度は低い。同様に、点 A , C , E のインピーダンスを基準として算出された校正パラメータは、点 A , C , E で囲まれた範囲  $D_2$  のインピーダンスの範囲で精度の高い校正を行うことができ、点 A , C , F (点 F は、抵抗成分がゼロで容量性のリアクタンス成分が 50 のインピーダンスに近いインピーダンスの位置を示す。) のインピーダンスを基準として算出された校正パラメータは、点 A , C , F で囲まれた範囲  $D_3$  のインピーダンスの範囲で精度の高い校正を行うことができ、点 A , B , F のインピーダンスを基準として算出された校正パラメータは、点 A , B , F で囲まれた範囲  $D_4$  のインピーダンスの範囲で精度の高い校正を行うことができる。

10

#### 【 0 0 3 7 】

本発明は、低精度だが広いインピーダンスの範囲で校正可能な校正パラメータで校正を行って、校正されたインピーダンスがスミスチャート上のどの範囲に位置するかを判断し、当該インピーダンスが位置する範囲で高精度に校正可能な校正パラメータを用いてさらに校正を行うという、多段階の校正を行うものである。

#### 【 0 0 3 8 】

本実施形態では、スミスチャート上の範囲を、図 1 ( b ) に示す 4 つの範囲  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  に分ける場合について説明する。以下では、範囲  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  をそれぞれ、スミスチャートの第 1 象限、第 2 象限、第 3 象限、第 4 象限と記載する。

20

#### 【 0 0 3 9 】

図 2 は、第 1 実施形態に係る高周波測定装置を用いたプラズマ処理システムの構成を説明するためのブロック図である。

#### 【 0 0 4 0 】

プラズマ処理システム A は、半導体ウェハや液晶基板などの被加工物に対して高周波電力を供給して、例えばプラズマエッチングといった加工処理を行うものである。同図に示すようにプラズマ処理システム A は、高周波電源装置 1、インピーダンス整合装置 2、高周波測定装置 3、およびプラズマ処理装置 4 を備えている。高周波電源装置 1 には、例えば同軸ケーブルからなる伝送線路を介してインピーダンス整合装置 2 が接続され、インピーダンス整合装置 2 には、例えば棒状の銅などからなる伝送線路 5 を介してプラズマ処理装置 4 が接続されている。高周波測定装置 3 は伝送線路 5 上に設置されている。なお、プラズマ処理システム A は、特性インピーダンスが 50 系として構成されている。

30

#### 【 0 0 4 1 】

高周波電源装置 1 は、高周波電力を供給するものであって、例えば数百 k H z 以上の周波数を有する高周波電力を出力することができる電源装置である。

#### 【 0 0 4 2 】

インピーダンス整合装置 2 は、高周波電源装置 1 とプラズマ処理装置 4 とのインピーダンスを整合させるものである。インピーダンス整合装置 2 は、図示しない可変リアクタンス素子 (例えば、可変キャパシタ、可変インダクタ等) を備えており、可変リアクタンス素子のリアクタンスを変化させることでインピーダンスを変化させる。インピーダンス整合装置 2 は、インピーダンス整合装置 2 の入力端 a から負荷側を見たインピーダンスが特性インピーダンスとなるように、インピーダンス整合装置 2 の出力端 b から負荷側を見たインピーダンスを変換する。

40

#### 【 0 0 4 3 】

なお、インピーダンス整合装置 2 内部の電源側には、図示しない高周波測定装置が設けられている。当該高周波測定装置はインピーダンス整合装置 2 の入力端 a から負荷側を見たインピーダンスを測定するものであり、インピーダンス整合装置 2 は測定されたインピーダンスが特性インピーダンスになるように、可変リアクタンス素子のリアクタンスを変化させる。

50



## 【 0 0 4 4 】

プラズマ処理装置 4 は、半導体ウェハや液晶基板等の被加工物をエッチングや C V D 等の方法を用いて加工するための装置である。なお、図示しないが、プラズマ処理装置 4 は、プラズマを発生させるための窒素ガスやアルゴンガスなどの所定のガスを封入するための容器（チャンバー）と、高周波電源装置 1 からの高周波電力を容器内のガスに供給するための一対の電極を備えている。

## 【 0 0 4 5 】

高周波測定装置 3 は、プラズマ処理中のプラズマ処理装置 4 の状態を監視するために、プラズマ処理装置 4 のインピーダンスや、プラズマ処理装置 4 の入力端 c における高周波電圧、高周波電流、反射係数、進行波電力、および反射波電力などの高周波パラメータを測定する、いわゆる R F センサである。なお、測定されるインピーダンスは高周波電圧および高周波電流を検出する点（測定点）から負荷側を見たインピーダンスであるが、測定点がプラズマ処理装置 4 の入力端 c 近傍なので、プラズマ処理装置 4 のインピーダンスに相当する。

10

## 【 0 0 4 6 】

図 3 は、高周波測定装置 3 の内部構成を説明するためのブロック図である。

## 【 0 0 4 7 】

同図に示すように、高周波測定装置 3 は、カレントトランス部 3 1、電流用変換回路 3 2、コンデンサ部 3 3、電圧用変換回路 3 4、実効値算出回路 3 5、3 6、位相差検出回路 3 7、校正回路 3 8、およびインピーダンス算出回路 3 9 を備えている。

20

## 【 0 0 4 8 】

カレントトランス部 3 1 は、伝送線路 5 に流れる高周波電流に応じた電流を検出するものであり、検出した電流を電流用変換回路 3 2 に出力する。電流用変換回路 3 2 は、入力された電流をデジタル信号である電流信号 i に変換して、実効値算出回路 3 5 および位相差検出回路 3 7 に出力する。コンデンサ部 3 3 は、伝送線路 5 に生じる高周波電圧に応じた電圧を検出するものであり、検出した電圧を電圧用変換回路 3 4 に出力する。電圧用変換回路 3 4 は、入力された電圧をデジタル信号である電圧信号 v に変換して、実効値算出回路 3 6 および位相差検出回路 3 7 に出力する。

## 【 0 0 4 9 】

実効値算出回路 3 5 は、電流実効値を算出するものである。実効値算出回路 3 5 は、電流用変換回路 3 2 より入力される電流信号 i から電流実効値 I を算出して、校正回路 3 8 に出力する。実効値算出回路 3 6 は、電圧実効値を算出するものである。実効値算出回路 3 6 は、電圧用変換回路 3 4 より入力される電圧信号 v から電圧実効値 V を算出して、校正回路 3 8 に出力する。位相差検出回路 3 7 は、電流と電圧の位相差を検出するものである。位相差検出回路 3 7 は、電流用変換回路 3 2 より入力される電流信号 i と電圧用変換回路 3 4 より入力される電圧信号 v とから位相差 を算出して、校正回路 3 8 に出力する。

30

## 【 0 0 5 0 】

校正回路 3 8 は、電流実効値 I、電圧実効値 V、および位相差 の校正を行うものである。校正回路 3 8 は、実効値算出回路 3 5 より入力される電流実効値 I、実効値算出回路 3 6 より入力される電圧実効値 V、および位相差検出回路 3 7 より入力される位相差 を校正して、校正後の電流実効値 I'、電圧実効値 V'、および位相差 ' をインピーダンス算出回路 3 9 に出力する。

40

## 【 0 0 5 1 】

校正回路 3 8 は、ベクトル変換部 3 8 1、第 1 校正部 3 8 2、ベクトル逆変換部 3 8 3、反射係數位相角算出部 3 8 4、象限判定部 3 8 5、第 2 校正部 3 8 6、およびベクトル逆変換部 3 8 7 を備えており、ベクトルである電流および電圧に対して 2 段階で校正を行う。

## 【 0 0 5 2 】

ベクトル変換部 3 8 1 は、入力される電流実効値 I、電圧実効値 V、および位相差 か

50

ら、ベクトルである電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  を算出して第 1 校正部 382 に出力する。電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  は、電流信号  $I_0$  の位相を基準（実数軸、虚数部 0）として、 $I_0 = I + j0$ 、 $V_0 = V \cos + jV \sin$  で算出される。

#### 【0053】

第 1 校正部 382 は、図示しないメモリに記録されている基本校正パラメータ  $X$  を用いて、ベクトル変換部 381 から入力される電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  に第 1 段階の校正（以下では、「基本校正」とする。）を行い、基本校正後の電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  をベクトル逆変換部 383 および第 2 校正部 386 に出力する。

#### 【0054】

基本校正パラメータ  $X$  は、精度は低いが広いインピーダンスの範囲で校正を行うことができる校正パラメータであり、3つの基準負荷に基づいて算出されて、メモリに記録されている。以下に、基本校正パラメータ  $X$  を算出する方法について説明する。

#### 【0055】

ベクトル変換部 381 から出力される電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  と、伝送線路 5 に流れる高周波電流および伝送線路 5 に生じる高周波電圧との関係を 2 端子対回路に置き換えると、電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  を電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  に校正する基本校正パラメータ  $X$  を、図 4（a）に示す 2 次元のベクトル行列と考えることができる。

#### 【0056】

高周波測定装置 3 を 3 つの基準負荷に接続して、それぞれ高周波測定装置 3 でインピーダンスを測定し、これらのインピーダンス測定値と 3 つの基準負荷のインピーダンスの真値とから基本校正パラメータ  $X$  の各要素  $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{21}$ 、 $X_{22}$  を算出することができる。なお、当該算出を行うためには、基準となる電圧値と電流値の絶対値が必要となる。電圧値と電流値の絶対値を基準値として利用するには、精度の高い電力測定値が必要となる。精度の高い電力測定値を測定するには、反射電力が 0 となる負荷を接続して測定するのが最もよい。したがって、本実施形態では、反射電力 0 を実現するために、特性インピーダンスと同一のインピーダンス（すなわち、50）を有する負荷を基準負荷の 1 つに選定している。なお、上述したように、基準負荷の 1 つを特性インピーダンスを有する負荷としているのは精度の高い電力測定値を測定するためであるので、電力測定値を高い精度で測定できるのであれば、特性インピーダンス以外の負荷を用いるようにしてもよい。

#### 【0057】

実際に基準負荷に高周波測定装置 3 を接続して基準負荷のインピーダンスを測定した場合、高周波測定装置 3 は基準負荷の入力端でのインピーダンスを測定することができず、測定されたインピーダンスには高周波測定装置 3 自体のインピーダンスも含まれることになる。したがって、基準負荷のみのインピーダンスを真値として基本校正パラメータ  $X$  を算出することはできない。本実施形態では、接続された負荷に高周波測定装置 3 を含めた全体を基準負荷とみなして、当該基準負荷のインピーダンスをインピーダンスアナライザで測定し、当該測定値を基準負荷の真値として基本校正パラメータ  $X$  を算出する。

#### 【0058】

なお、基準負荷のうちの 2 つは、できるだけ広いインピーダンスの範囲を含めるために、開放状態のインピーダンスおよび短絡状態のインピーダンスにそれぞれ近いインピーダンスを有する負荷とすることが望ましい。一方、基準負荷として開放状態または短絡状態に近すぎるインピーダンスを有する負荷を用いた場合、高周波測定装置 3 によって検出される電圧値または電流値の一方が他方に比べ極めて小さい値の場合、それをデジタル変換する AD コンバータの解像度によっては量子化誤差が大きく影響する場合がある。この場合、基本校正パラメータ  $X$  の各要素  $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{21}$ 、 $X_{22}$  を適切に算出することができない。したがって、本実施形態では、反射係数の大きさが例えば 0.9 以下である負荷を基準負荷としている。

#### 【0059】

図 5 は、基本校正パラメータ  $X$  の各要素  $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{21}$ 、 $X_{22}$  を算出するために行う、基準負荷のインピーダンスの測定方法を説明するための図である。

## 【 0 0 6 0 】

当該測定は、同図に示すように、高周波測定装置 3 の出力端 c にダミーロード 6 を接続し、高周波測定装置 3 の入力端 b にインピーダンスアナライザ 7 を接続して行われる。なお、処理中のプラズマ処理装置 4 を実際に測定する場合と測定環境をそろえるために、基準負荷のインピーダンスの測定は、高周波測定装置 3 内部の部品や周囲温度を所定の温度に保って行われる。

## 【 0 0 6 1 】

ダミーロード 6 は、所定の基準負荷を再現するための負荷装置であり、高周波測定装置 3 の入力端 b から負荷側を見たインピーダンス、すなわちダミーロード 6 および高周波測定装置 3 全体のインピーダンスを所定の基準負荷のインピーダンスにする。ダミーロード 6 は、図示しない可変リアクタンス素子（例えば、可変キャパシタ、可変インダクタ等）のリアクタンスを変化させることでインピーダンスを変化させる。ダミーロード 6 は、特性インピーダンス（50）を有する基準負荷と、開放状態のインピーダンスおよび短絡状態のインピーダンスにそれぞれ近く反射係数が 0.9 以下である 2 つの基準負荷とを、所定の基準負荷として再現できるようにあらかじめ設定されている。なお、ダミーロード 6 を接続して設定を切り替えることで 3 つの所定の基準負荷を再現する代わりに、所定の基準負荷を再現するための 3 つの負荷を順に接続するようにしてもよい。

## 【 0 0 6 2 】

インピーダンスアナライザ 7 は、インピーダンスを測定するものであり、高周波測定装置 3 の入力端 b から負荷側を見たインピーダンス、すなわち基準負荷のインピーダンスを測定する。

## 【 0 0 6 3 】

基本校正パラメータ X の算出のための基準負荷のインピーダンスの測定は、各基準負荷を再現してインピーダンスアナライザ 7 と高周波測定装置 3 とでそれぞれインピーダンスを測定することで行われる。なお、高周波測定装置 3 が測定するインピーダンスの真値を得る方法があれば、インピーダンスアナライザ 7 を用いなくてもよい。

## 【 0 0 6 4 】

高周波測定装置 3 によって測定される 3 つの基準負荷のインピーダンス測定値と、当該 3 つの基準負荷のインピーダンスの真値とから、基本校正パラメータ X の各要素  $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{21}$ 、 $X_{22}$  を算出することができる。算出された基本校正パラメータ X を用いて、図 4 (a) より、電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  を基本校正後の電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  に変換することができる。すなわち、図 4 (a) より導かれる下記 (6)、(7) 式より、基本校正後の電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  を算出することができる。

## 【 0 0 6 5 】

## 【数 2】

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ -I_1 \end{bmatrix}$$

$$V_0 = X_{11} \cdot I_0 - X_{12} \cdot I_1$$

$$V_1 = X_{21} \cdot I_0 - X_{22} \cdot I_1$$

$$I_1 = \frac{X_{11}}{X_{12}} \cdot I_0 - \frac{1}{X_{12}} \cdot V_0 \quad (6)$$

$$V_1 = \frac{(X_{12} \cdot X_{21} - X_{11} \cdot X_{22})}{X_{12}} \cdot I_0 + \frac{X_{22}}{X_{12}} \cdot V_0 \quad (7)$$

## 【 0 0 6 6 】

図 3 に戻って、ベクトル逆変換部 383 は、第 1 校正部 382 から入力される基本校正

後の電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  から、基本校正後の電流実効値  $I_1'$ 、電圧実効値  $V_1'$ 、および位相差  $\phi_1'$  を算出して、反射係數位相角算出部 384 に出力する。

【0067】

反射係數位相角算出部 384 は、ベクトル逆変換部 383 から入力される基本校正後の電流実効値  $I_1'$ 、電圧実効値  $V_1'$ 、および位相差  $\phi_1'$  から、反射係数の位相角  $\phi$  を算出して、象限判定部 385 に出力する。反射係數位相角算出部 384 は、電流実効値  $I_1'$ 、電圧実効値  $V_1'$ 、および位相差  $\phi_1'$  から、上記(1)式および(2)式に基づいて、インピーダンス  $Z (= R + j \cdot X)$  の抵抗成分  $R$  およびリアクタンス成分  $X$  を算出し、下記(8)式に基づいて、反射係数の位相角  $\phi$  を算出する。なお、 $r$ 、 $i$  はそれぞれ反射係数  $\Gamma (= r + j \cdot i)$  の実数部分および虚数部分である。

【0068】

【数3】

$$\begin{aligned}\Gamma_r &= \frac{R^2 + X^2 - 1}{(R + 1)^2 + X^2} \\ \Gamma_i &= \frac{2 \cdot X}{(R + 1)^2 + X^2} \\ \phi &= \arctan\left(\frac{\Gamma_i}{\Gamma_r}\right) \quad (8)\end{aligned}$$

【0069】

象限判定部 385 は、反射係數位相角算出部 384 から入力される反射係数の位相角に基づいて、プラズマ処理装置 4 のインピーダンスがスミスチャート上のどの象限に位置するかを判定し、判定結果を第2校正部 386 に出力する。スミスチャート上の点は、特性インピーダンスの位置を原点とすると、反射係数の実数部分  $r$  と虚数部分  $i$  の座標として表される。

【0070】

図6は、スミスチャート上の点を反射係数の実数部分  $r$  と虚数部分  $i$  の座標として表した図であり、一般的に、ポーラチャートと呼ばれる場合がある。なお、以下では、この場合でもスミスチャートと記載している。同図において、 $u$  軸は反射係数の実数軸であり、 $v$  軸は反射係数の虚数軸である。反射係数  $\Gamma (= r + j \cdot i)$  の点  $G$  は、 $u$  軸(実数軸)の成分が  $r$  で、 $v$  軸(虚数軸)の成分が  $i$  である点として表される。また、点  $G$  と原点  $A$  とを結ぶ線分の長さが反射係数の大きさ  $|\Gamma| = \sqrt{r^2 + i^2}$  を示し、点  $G$  と原点  $A$  とを結ぶ線分が  $u$  軸の正の方向となす角度が反射係数の位相角  $\phi = \arctan(i/r)$  を示す。したがって、反射係数の位相角  $\phi$  によって、インピーダンスがスミスチャートのいずれの象限に位置するか判定することができる。

【0071】

象限判定部 385 は、反射係數位相角算出部 384 から入力される反射係数の位相角が  $0 < \phi < (\pi/2)$  の場合、インピーダンスがスミスチャートの第1象限に位置すると判定する。また、 $(\pi/2) < \phi < \pi$  の場合、インピーダンスがスミスチャートの第2象限に位置し、 $\pi < \phi < (3\pi/2)$  の場合、インピーダンスがスミスチャートの第3象限に位置し、 $(3\pi/2) < \phi < 2\pi$  の場合、インピーダンスがスミスチャートの第4象限に位置すると判定する。なお、反射係數位相角算出部 384 から入力される反射係数の位相角  $\phi$  は、基本校正後の電流実効値  $I_1'$ 、電圧実効値  $V_1'$ 、および位相差  $\phi_1'$  から算出されるので、精度はあまり高くない。しかし、インピーダンスがスミスチャート上のいずれの象限に位置するかを判定するために用いることができる程度の精度は備えている。

【0072】

第2校正部 386 は、メモリに記録されている象限別校正パラメータ  $X'$  を用いて、第

10

20

30

40

50

1 校正部 382 から入力される電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  に第 2 段階の校正（以下では、「象限別校正」とする。）を行い、象限別校正後の電流信号  $I_2$  および電圧信号  $V_2$  をベクトル逆変換部 387 に出力する。メモリには象限別校正パラメータ  $X'$  として、4 つの校正パラメータ、すなわち、第 1 象限で精度の高い校正を行うことができる第 1 象限校正パラメータ  $X_1$ 、第 2 象限で精度の高い校正を行うことができる第 2 象限校正パラメータ  $X_2$ 、第 3 象限で精度の高い校正を行うことができる第 3 象限校正パラメータ  $X_3$ 、第 4 象限で精度の高い校正を行うことができる第 4 象限校正パラメータ  $X_4$  が記録されている。第 2 校正部 386 は、象限判定部 385 から入力される判定結果に基づいて、象限別校正パラメータ  $X'$  として使用する校正パラメータを決定する。すなわち、判定結果が第 1 象限の場合、第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  が象限別校正パラメータ  $X'$  として使用される。また、判定結果が第 2 象限の場合は第 2 象限校正パラメータ  $X_2$  が、判定結果が第 3 象限の場合は第 3 象限校正パラメータ  $X_3$  が、判定結果が第 4 象限の場合は第 4 象限校正パラメータ  $X_4$  が、象限別校正パラメータ  $X'$  として使用される。

10

#### 【0073】

各象限校正パラメータ  $X_1 \sim X_4$  は、それぞれ 3 つの基準負荷に基づいて算出されて、メモリに記録されている。各象限校正パラメータ  $X_1 \sim X_4$  を算出する方法も、上記基本校正パラメータ  $X$  を算出する方法と同様である。

#### 【0074】

上記と同様に、第 1 校正部 382 から出力される電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  と、伝送線路 5 に流れる高周波電流および伝送線路 5 に生じる高周波電圧との関係を 2 端子対回路に置き換えると、電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  を電流信号  $I_2$  および電圧信号  $V_2$  に校正する象限別校正パラメータ  $X'$  を、図 4 (b) に示す右側の 2 次元のベクトル行列と考えることができる。なお、図 4 (b) 全体としては、電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  を 2 次元のベクトル行列である基本校正パラメータ  $X$  および象限別校正パラメータ  $X'$  によって変換して象限別校正後の電流信号  $I_2$  および電圧信号  $V_2$  を出力する校正回路 38 を示している。

20

#### 【0075】

象限別校正パラメータ  $X'$ （各象限校正パラメータ  $X_1 \sim X_4$ ）の各要素  $X'_{11}$ 、 $X'_{12}$ 、 $X'_{21}$ 、 $X'_{22}$  も、上記と同様に、3 つの基準負荷を再現したときにそれぞれ高周波測定装置 3 によって測定される基準負荷のインピーダンス測定値と、当該 3 つの基準負荷のインピーダンスの真値とから算出される。

30

#### 【0076】

なお、3 つの基準負荷の内の 1 つは、上記と同様に特性インピーダンス（50）を有する負荷とする必要がある。第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  の場合、残り 2 つの基準負荷は、第 1 象限を囲むように、開放状態のインピーダンスに近いインピーダンスと、抵抗成分がゼロで誘導性のリアクタンス成分が 50 のインピーダンスに近いインピーダンスとが用いられる（図 1 (b) 参照）。第 2 象限校正パラメータ  $X_2$  の場合、第 2 象限を囲むように、短絡状態のインピーダンスに近いインピーダンスと、抵抗成分がゼロで誘導性のリアクタンス成分が 50 のインピーダンスに近いインピーダンスとが用いられる。第 3 象限校正パラメータ  $X_3$  の場合、第 3 象限を囲むように、短絡状態のインピーダンスに近いインピーダンスと、抵抗成分がゼロで容量性のリアクタンス成分が 50 のインピーダンスに近いインピーダンスとが用いられる。第 4 象限校正パラメータ  $X_4$  の場合、第 4 象限を囲むように、開放状態のインピーダンスに近いインピーダンスと、抵抗成分がゼロで容量性のリアクタンス成分が 50 のインピーダンスに近いインピーダンスとが用いられる。

40

#### 【0077】

象限別校正パラメータ  $X'$  を用いて、図 4 (b) より、電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  を象限別校正後の電流信号  $I_2$  および電圧信号  $V_2$  に変換することができる。すなわち、図 4 (b) より導かれる下記 (9)、(10) 式より、象限別校正後の電流信号  $I_2$  および電圧信号  $V_2$  を算出することができる。

50

【 0 0 7 8 】

【 数 4 】

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_{11} & X'_{12} \\ X'_{21} & X'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

$$V_1 = X'_{11} \cdot I_1 - X'_{12} \cdot I_2$$

$$V_2 = X'_{21} \cdot I_1 - X'_{22} \cdot I_2$$

$$I_2 = \frac{X'_{11}}{X'_{12}} \cdot I_1 - \frac{1}{X'_{12}} \cdot V_1 \quad (9)$$

10

$$V_2 = \frac{(X'_{12} \cdot X'_{21} - X'_{11} \cdot X'_{22})}{X'_{12}} \cdot I_1 + \frac{X'_{22}}{X'_{12}} \cdot V_1 \quad (10)$$

【 0 0 7 9 】

プラズマ処理装置 4 のインピーダンスが変動すると、反射係數位相角算出部 3 8 4 が算出する反射係數位相角 も変動する。インピーダンスがスミスチャート上の他の象限に移動した場合、象限判定部 3 8 5 から入力される判定結果も切り替わり、第 2 校正部 3 8 6 で使用される象限別校正パラメータ  $X'$  も切り替わる。すなわち、第 2 校正部 3 8 6 は、象限別校正パラメータ  $X'$  として使用する校正パラメータを、測定しているインピーダンスに追従して、対応する象限で精度の高い校正を行うことができる校正パラメータに切り替える。

20

【 0 0 8 0 】

図 3 に戻って、ベクトル逆変換部 3 8 7 は、第 2 校正部 3 8 6 から入力される象限別校正後の電流信号  $I_2$  および電圧信号  $V_2$  から、校正後の電流実効値  $I'$ 、電圧実効値  $V'$ 、および位相差  $\theta'$  を算出して出力する。

【 0 0 8 1 】

インピーダンス算出回路 3 9 は、インピーダンスを算出するものである。インピーダンス算出回路 3 9 は、校正回路 3 8 より入力される校正後の電流実効値  $I'$ 、電圧実効値  $V'$ 、および位相差  $\theta'$  から、上記 (1) ~ (3) 式により、インピーダンス  $Z$  を算出して出力する。なお、高周波測定装置 3 は、進行波電力  $P_f$  や反射波電力  $P_r$  などの高周波パラメータも算出して出力するが、同図においてはこれらを算出する構成の記載を省略している。

30

【 0 0 8 2 】

次に、高周波測定装置 3 の校正を行う手順について、図 7 に示すフローチャートを参照して説明する。

【 0 0 8 3 】

図 7 は、高周波測定装置 3 の校正の手順を説明するためのフローチャートである。当該フローチャートは、高周波測定装置 3 でプラズマ処理装置 4 のインピーダンスを測定する場合の、検出された電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  の校正を行う処理手順を示している。

40

【 0 0 8 4 】

まず、高周波測定装置 3 にダミーロード 6 とインピーダンスアナライザ 7 とを接続して (図 5 参照)、ダミーロード 6 によって基本校正パラメータ  $X$  算出のための基準負荷の再現を行い、インピーダンスアナライザ 7 と高周波測定装置 3 とでそれぞれインピーダンスを測定する (S 1)。なお、当該基準負荷は 3 つ設定されているので、それぞれの基準負荷を再現して、それぞれインピーダンスアナライザ 7 と高周波測定装置 3 とでインピーダンスを測定する。当該基準負荷は、特性インピーダンス (50 ) を有する基準負荷と、開放状態のインピーダンスおよび短絡状態のインピーダンスにそれぞれ近く反射係数が 0.9 以下である 2 つの基準負荷としている。

50

## 【 0 0 8 5 】

ステップ S 1 でインピーダンスアナライザ 7 と高周波測定装置 3 によって測定された、3 つの基準負荷のそれぞれのインピーダンスから、基本校正パラメータ  $X$  を算出して、高周波測定装置 3 の図示しないメモリに記録する ( S 2 )。本実施形態では、高周波測定装置 3 の図示しない演算回路が、インピーダンス算出回路 3 9 で算出されるインピーダンスとインピーダンスアナライザ 7 から入力されるインピーダンスとをメモリに記録しておき、3 つの基準負荷を測定した後に基本校正パラメータ  $X$  の各要素を算出してメモリに記録する。なお、基本校正パラメータ  $X$  の算出は高周波測定装置 3 の演算回路が行う場合に限定されず、例えば、作業者が別途行うようにしてもよい。この場合、作業者が高周波測定装置 3 の図示しない入力手段で基本校正パラメータ  $X$  を入力することで、メモリに記録すればよい。

10

## 【 0 0 8 6 】

次に、ダミーロード 6 によって第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  算出のための基準負荷の再現を行い、インピーダンスアナライザ 7 と高周波測定装置 3 とでそれぞれインピーダンスを測定する ( S 3 )。なお、当該基準負荷は 3 つ設定されているので、それぞれの基準負荷を再現して、それぞれインピーダンスアナライザ 7 と高周波測定装置 3 とでインピーダンスを測定する。当該基準負荷は、特性インピーダンス ( 5 0 ) を有する基準負荷と、開放状態のインピーダンスおよび抵抗成分がゼロで誘導性のリアクタンス成分が 5 0 のインピーダンスにそれぞれ近く反射係数が 0 . 9 以下である 2 つの基準負荷としている。

## 【 0 0 8 7 】

20

ステップ S 3 でインピーダンスアナライザ 7 と高周波測定装置 3 によって測定された、3 つの基準負荷のそれぞれのインピーダンスから、第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  を算出して、高周波測定装置 3 のメモリに記録する ( S 4 )。本実施形態では、高周波測定装置 3 の演算回路が、インピーダンス算出回路 3 9 で算出されるインピーダンスとインピーダンスアナライザ 7 から入力されるインピーダンスとをメモリに記録しておき、3 つの基準負荷を測定した後に第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  の各要素を算出してメモリに記録する。なお、第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  の算出は高周波測定装置 3 の演算回路が行う場合に限定されず、例えば、作業者が別途行うようにしてもよい。この場合、作業者が高周波測定装置 3 の図示しない入力手段で第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  を入力することで、メモリに記録すればよい。

30

## 【 0 0 8 8 】

ステップ S 3 および S 4 と同様にして、ステップ S 5 および S 6 で第 2 象限校正パラメータ  $X_2$  を算出してメモリに記録し、ステップ S 7 および S 8 で第 3 象限校正パラメータ  $X_3$  を算出してメモリに記録し、ステップ S 9 および S 1 0 で第 4 象限校正パラメータ  $X_4$  を算出してメモリに記録する。

## 【 0 0 8 9 】

次に、高周波測定装置 3 を実際に使用されるプラズマ処理システム A に設置して ( 図 2 参照 )、実際にプラズマ処理を行っているときのプラズマ処理装置 4 のインピーダンスを測定する ( S 1 1 )。このとき、高周波測定装置 3 は、基本校正後の電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  に基づいて算出された反射係数の位相角  $\theta$  によって象限別校正パラメータ  $X'$  として用いる校正パラメータを決定する。そして、高周波測定装置 3 は、電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  をメモリに記録された基本校正パラメータ  $X$  および象限別校正パラメータ  $X'$  で校正して、象限別校正後の電流信号  $I_2$  および電圧信号  $V_2$  に基づく電流実効値  $I'$ 、電圧実効値  $V'$ 、および位相差  $\phi$  からインピーダンス  $Z$  を算出する。象限別校正パラメータ  $X'$  による校正の精度は十分高いものなので、電流信号  $I_0$  および電圧信号  $V_0$  を高い精度で校正することができる。したがって、高周波測定装置 3 によって測定された電流実効値  $I'$ 、電圧実効値  $V'$ 、およびインピーダンス  $Z$  は、精度が高く信用できるものである。

40

## 【 0 0 9 0 】

なお、上記校正の処理手順は、高周波測定装置 3 のメモリに基本校正パラメータ  $X$  およ

50

び各象限校正パラメータ  $X_1 \sim X_4$  が記録されていない場合の処理手順である。ステップ  $S1 \sim S10$  については毎行なう必要はなく、1 度行ってメモリに基本校正パラメータ  $X$  および各象限校正パラメータ  $X_1 \sim X_4$  を記録しておけばよい。この処理は、高周波測定装置 3 の製造時に、製造メーカーが行っておいてもよい。

#### 【0091】

上記のように、本発明においては、2 段階の校正が行われる。すなわち、まず、低精度だが広いインピーダンスの範囲で校正可能な基本校正パラメータ  $X$  で校正が行われる。次に、高精度だが狭いインピーダンスの範囲で校正可能な象限別校正パラメータ  $X'$  で校正が行われる。基本校正パラメータ  $X$  による校正後の電流信号  $I_1$  および電圧信号  $V_1$  に基づいて、測定対象のインピーダンスがスミスチャート上のどの象限に位置するかが判定され、該当する象限のみを高精度で校正することができる校正パラメータが、象限別校正パラメータ  $X'$  として用いられる。したがって、検出された電圧および電流を高い精度で校正することができる。

10

#### 【0092】

なお、上記実施形態（以下、「第 1 実施形態」とする。）では、象限判定部 385 は、反射係數位相角算出部 384 が算出する反射係數位相角  $\theta$  に応じて、測定対象のインピーダンスがどの象限に位置するかの判定を行うので、当該インピーダンスが 2 つの象限の境界線をまたいで頻繁に変動すると、第 2 校正部 386 で使用される象限別校正パラメータ  $X'$  が頻繁に切り替えられることになる。これを改善するために、以下に説明する第 2 実施形態では、象限判定部 385 による判定にヒステリシス特性を持たせている。

20

#### 【0093】

以下、図 8 および図 9 を参照して、第 2 実施形態に係る高周波測定装置について説明する。

#### 【0094】

図 8 は、第 2 実施形態に係る高周波測定装置の校正方法の考え方を説明するための図であり、象限の切換を説明するための図である。

#### 【0095】

同図において、範囲  $D_1$  は第 1 象限の範囲を示しており、点  $G_1$  は測定対象のインピーダンスの位置を示している。このとき、測定対象の反射係数の位相角  $\theta_1$  は、 $0 < \theta_1 < (1/2)$  なので、インピーダンスは第 1 象限である範囲  $D_1$  に位置している。したがって、第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  が象限別校正パラメータ  $X'$  として使用されて象限別校正が行われる。次に、測定対象のインピーダンスの位置が点  $G_2$  に移動した場合、測定対象の反射係数の位相角  $\theta_2$  は  $(1/2) < \theta_2 < \pi$  なので、インピーダンスは第 2 象限である範囲  $D_2$  に位置している。しかし、本実施形態では、同図に示す範囲  $D_1'$  を範囲  $D_1$  に加えた範囲を拡大された第 1 象限とし、インピーダンスの位置がこの拡大された第 1 象限である範囲  $(D_1 + D_1')$  に位置している間、すなわち、位相角  $\theta$  が、 $-\pi < \theta < (1/2) + \pi$  を満たしている間は、象限別校正パラメータ  $X'$  の切換を行わないようにしている。したがって、インピーダンスは第 2 象限に位置しているが、第 1 象限校正パラメータ  $X_1$  が象限別校正パラメータ  $X'$  として使用されて象限別校正が行われる。次に、測定対象のインピーダンスの位置が点  $G_3$  に移動した場合、測定対象の反射係数の位相角  $\theta_3$  は  $(1/2) + \pi < \theta_3 < 3\pi/2$  なので、インピーダンスは拡大された第 1 象限である範囲  $(D_1 + D_1')$  に位置せず、第 2 象限である範囲  $D_2$  に位置している。したがって、第 2 象限校正パラメータ  $X_2$  が象限別校正パラメータ  $X'$  として使用されて象限別校正が行われる。

30

40

#### 【0096】

第 2 実施形態に係る高周波測定装置 3' の内部構成は、図 3 に示す高周波測定装置 3 と共通する。高周波測定装置 3' は、象限判定部 385 で行われる判定の処理方法が、第 1 実施形態に係る高周波測定装置 3 と異なる。

#### 【0097】

図 9 は、第 2 実施形態における象限判定部 385 で行われる判定の処理を説明するため

50



のフローチャートである。当該判定処理は、反射係數位相角算出部 384 から反射係數位相角 が入力された時に開始される。

【0098】

まず、反射係數位相角算出部 384 から入力される反射係數位相角 が取得される (S21)。次に、前回の判定でインピーダンスが位置していると判定された象限の拡大された象限の範囲内に測定対象のインピーダンスが位置しているか否かが判別される (S22)。当該判別は、反射係數位相角 が拡大された象限の範囲を示す所定の角度範囲内か否かで判別される。すなわち、前回の判定で第 1 象限と判定された場合は  $-\frac{1}{2} < (\frac{1}{2})$  であるか否か、前回の判定で第 2 象限と判定された場合は  $(\frac{1}{2}) < +$  であるか否か、前回の判定で第 3 象限と判定された場合は  $-\frac{3}{2} < (\frac{3}{2})$  であるか否か、前回の判定で第 4 象限と判定された場合は  $(\frac{3}{2}) < 2$  であるか否かで判別される。は  $0 < (\frac{1}{4})$  の範囲で、測定対象に応じて予め設定されている。を大きな値に設定した場合、拡大された象限が大きくなるので、象限別校正パラメータ  $X'$  の頻繁な切り替えを抑制する効果が大きくなる。しかし、象限別校正パラメータ  $X'$  を切り替えないことにより、校正の精度が低下する。一方、を小さな値に設定した場合、より適切な象限別校正パラメータ  $X'$  を用いることにより、校正の精度が高くなる。しかし、象限別校正パラメータ  $X'$  の頻繁な切り替えを抑制する効果が小さくなる。なお、象限の判定が初めての場合、前回判定された象限がないので、ステップ S24 に進んで象限の判定が行われる。

【0099】

ステップ S22 において、測定対象のインピーダンスが拡大された象限の範囲内に位置していると判別された場合 (S22: YES)、象限が変更されず、判定結果が当該象限であるとして第 2 校正部 386 に出力され (S23)、判定処理が終了される。

【0100】

一方、ステップ S22 において、測定対象のインピーダンスが拡大された象限の範囲内に位置していないと判別された場合 (S22: NO)、測定対象のインピーダンスがどの象限に位置するかが判定されて、当該判定結果が第 2 校正部 386 に出力され (S24)、判定処理が終了される。当該判定は、第 1 実施形態の象限判定部 385 で行われる判定と同様に、反射係數位相角 に基づいて行われる。

【0101】

第 2 実施形態においては、測定対象のインピーダンスが変動して他の象限に移動した場合でも、当該インピーダンスが拡大された象限の範囲内にある間は、象限判定部 385 から出力される判定結果が変更されないため、第 2 校正部 386 で使用される象限別校正パラメータ  $X'$  の切換えが行われない。したがって、測定対象のインピーダンスが 2 つの象限の境界線をまたいで頻繁に変動する場合でも、第 2 校正部 386 で使用される象限別校正パラメータ  $X'$  が頻繁に切り替えられることを抑制することができる。

【0102】

なお、上記第 1 および第 2 実施形態では、反射係数の位相角 が  $0 \sim (\frac{1}{2})$  の場合 (第 1 象限)、 $(\frac{1}{2}) \sim$  の場合 (第 2 象限)、 $\sim (\frac{3}{2})$  の場合 (第 3 象限)、 $(\frac{3}{2}) \sim 2$  の場合 (第 4 象限) の 4 つの範囲に分けた場合について説明したが、これに限られない。各範囲の境界をどのように設定してもよいし、各範囲の大きさが等しくなくても構わない。また、4 分割に限定されるわけでもない。例えば、各象限をさらに 2 つの範囲に分けて 8 つの範囲に分けてもよいし、第 1 象限と第 2 象限とを合わせた範囲と第 3 象限と第 4 象限とを合わせた範囲の 2 つの範囲に分けてもよい。範囲の数が多くなるほど各範囲の大きさが小さくなるので校正の精度が高くなるが、メモリに記録させる校正パラメータの数が多くなるので、校正パラメータの記録のための作業量も増加する。

【0103】

上記第 1 および第 2 実施形態では、反射係数の位相角 で範囲を分割した場合について説明したが、これに限られない。例えば、反射係数の大きさ  $|$  で範囲を分割するよう

にしてもよい。

#### 【 0 1 0 4 】

図 10 は、位相角  $\theta$  で 4 つの範囲に分割した各範囲を、反射係数の大きさ  $| \Gamma |$  でさらに 2 つの範囲に分割した例を示している。この場合、反射係數位相角算出部 384 が反射係数の大きさ  $| \Gamma |$  も算出して出力し、象限判定部 385 が反射係数の位相角  $\theta$  による判定と、反射係数の大きさ  $| \Gamma |$  による判定 ( $| \Gamma | > \Gamma_1$  か否かの判定) とで、インピーダンスがどの範囲に位置するかを判定するようにすればよい。なお、各範囲の校正パラメータを事前に算出してメモリに記録しておく必要がある。例えば、第 1 象限のうち  $| \Gamma | < \Gamma_1$  の範囲を範囲  $D_{11}$ 、 $| \Gamma | > \Gamma_1$  の範囲を範囲  $D_{12}$  とすると、インピーダンスが範囲  $D_{11}$  に位置する場合のための校正パラメータを点 A, B', E' のインピーダンスを基準として算出し、インピーダンスが範囲  $D_{12}$  に位置する場合のための校正パラメータを点 A, B, E のインピーダンスを基準として算出して、それぞれ記録しておく必要がある。なお、範囲  $D_{12}$  に位置する場合のための校正パラメータは第 1 象限の全範囲の場合の校正パラメータと共通するので、象限毎に分割した場合と校正の精度は変わらない。しかし、インピーダンスが範囲  $D_{11}$  に位置する場合に、より高い精度で校正を行うことができる。

10

#### 【 0 1 0 5 】

なお、反射係数の位相角  $\theta$  で範囲を分割するのではなく、例えば、抵抗値やリアクタンスで分割するようにしてもよいし、スミスチャートを水平線や垂直線で分割するようにしてもよい。

#### 【 0 1 0 6 】

20

本発明に係る高周波測定装置、および、高周波測定装置の校正方法は、上述した実施形態に限定されるものではない。また、本発明に係る高周波測定装置の各部の具体的な構成は、種々に設計変更自在である。

#### 【 符号の説明 】

#### 【 0 1 0 7 】

A プラズマ処理システム

1 高周波電源装置

2 インピーダンス整合装置

3 高周波測定装置

31 カレントトランス部 (電流検出手段)

30

32 電流用変換回路 (電流検出手段)

33 コンデンサ部 (電圧検出手段)

34 電圧用変換回路 (電圧検出手段)

35 実効値算出回路

36 実効値算出回路

37 位相差検出回路

38 校正回路

381 ベクトル変換部

382 第 1 校正部

383 ベクトル逆変換部

40

384 反射係數位相角算出部

385 象限判定部 (判定手段)

386 第 2 校正部

387 ベクトル逆変換部

39 インピーダンス算出回路

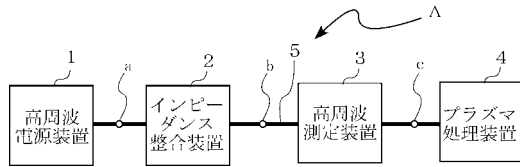
4 プラズマ処理装置

5 伝送線路

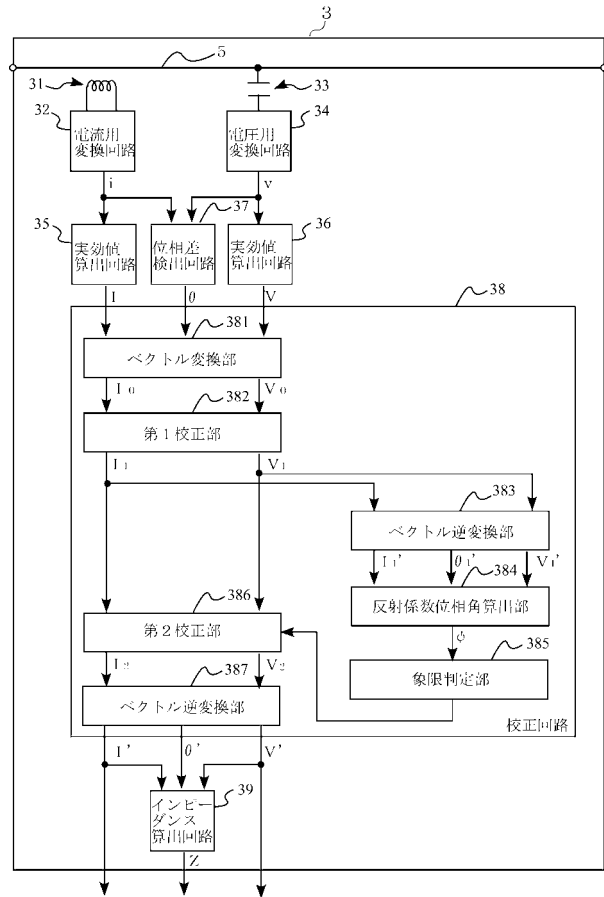
6 ダミーロード

7 インピーダンスアナライザ

【図 2】

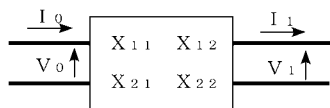


【図 3】

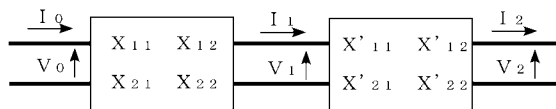


【図 4】

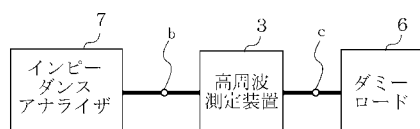
(a)



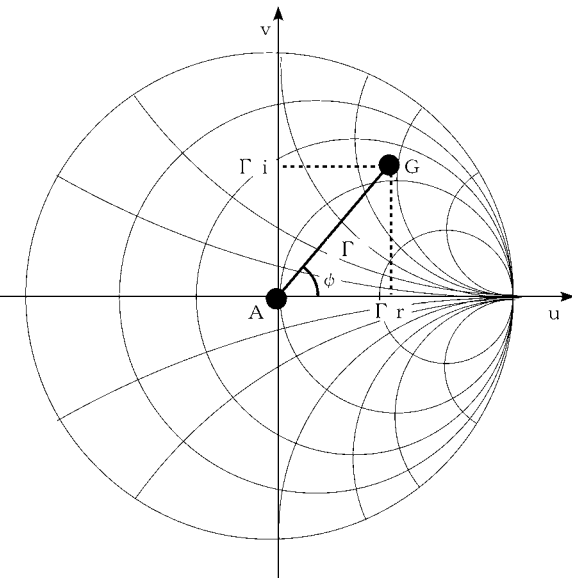
(b)



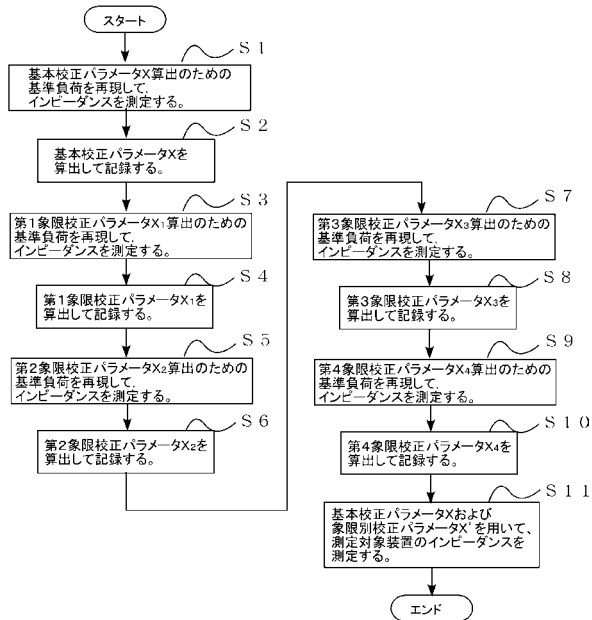
【図 5】



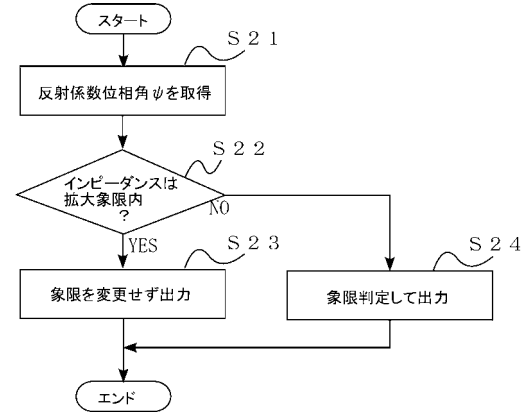
【図 6】



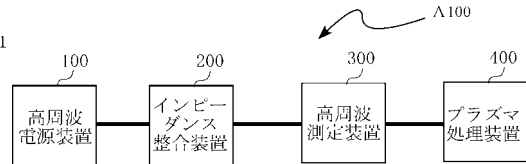
【図 7】



【図 9】

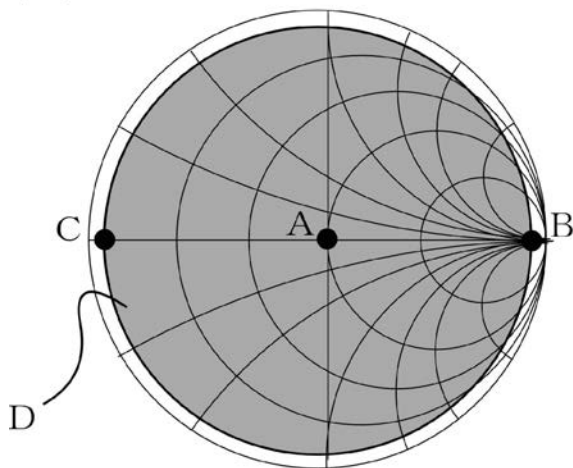


【図 11】

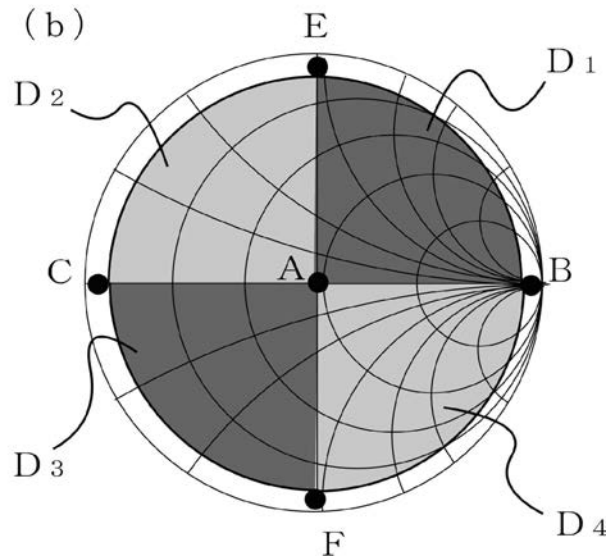


【図 1】

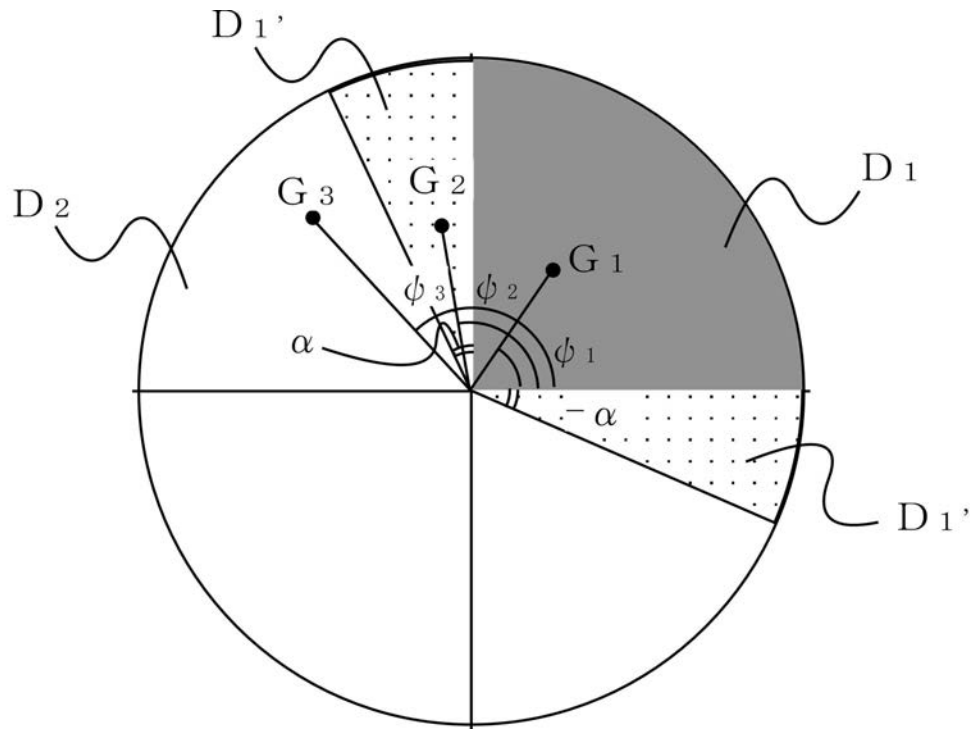
(a)



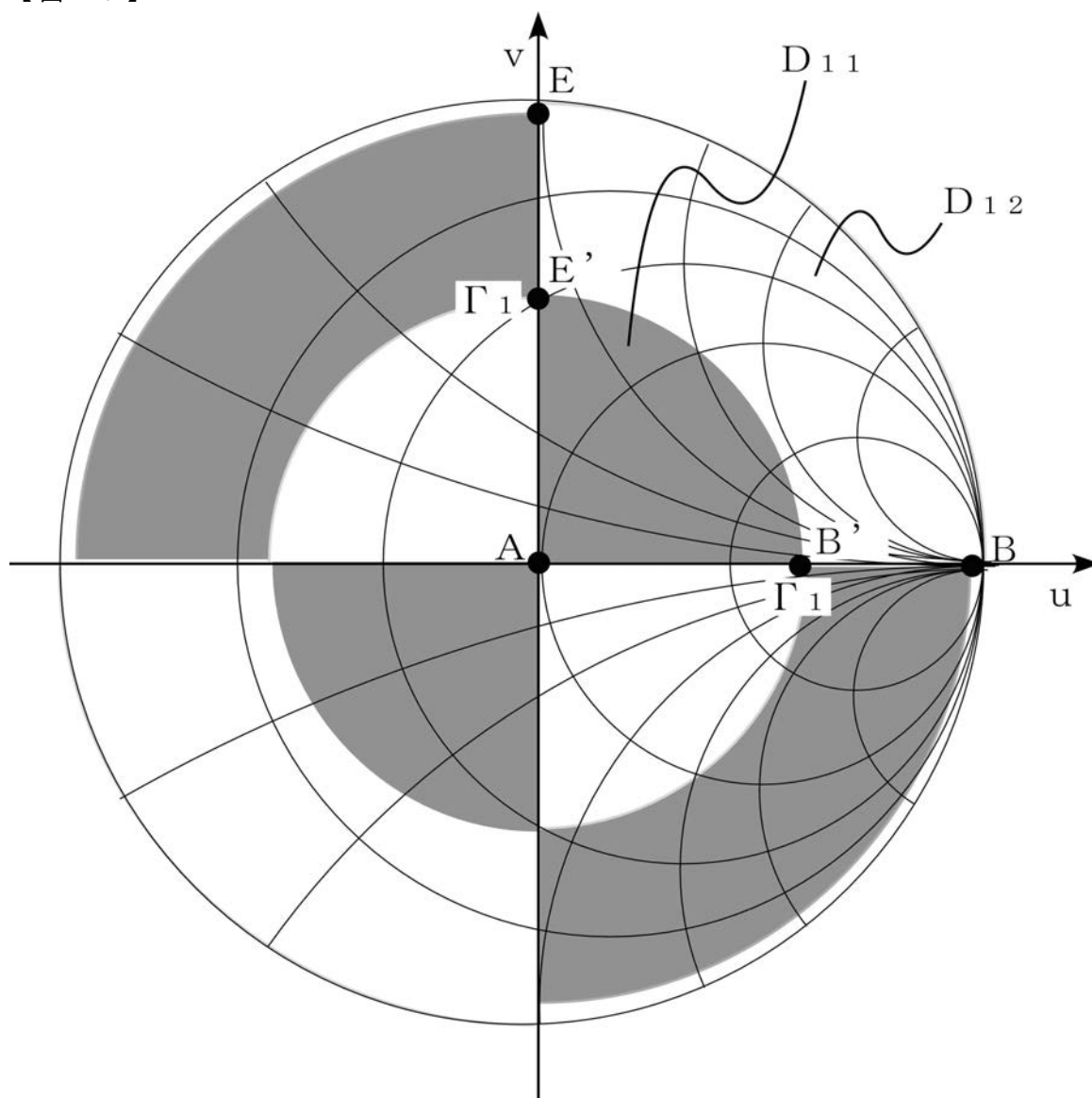
(b)



【図 8】



【図 10】



---

フロントページの続き

(72)発明者 田中 良平  
大阪市淀川区田川 2 丁目 1 番 1 1 号 株式会社ダイヘン内

審査官 神谷 健一

(56)参考文献 特開平 4 - 8 3 1 7 6 ( J P , A )  
特開平 7 - 5 5 8 6 0 ( J P , A )  
特開 2 0 0 1 - 7 4 7 9 5 ( J P , A )  
特開 2 0 0 4 - 3 0 9 1 3 2 ( J P , A )  
特開 2 0 0 4 - 3 5 4 0 9 4 ( J P , A )  
特開 2 0 0 7 - 1 6 3 3 0 8 ( J P , A )  
特開 2 0 0 9 - 2 0 6 3 4 6 ( J P , A )  
特開 2 0 1 1 - 1 9 6 9 3 2 ( J P , A )  
特開 2 0 1 1 - 2 0 2 9 7 3 ( J P , A )  
4-6. R F 領域での校正と補正, インピーダンス測定ハンドブック, 日本, アジレント・テクノロジー株式会社, 2 0 0 3 年 1 1 月, 4-13~4-19, U R L , <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000JA.pdf>

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)  
G 0 1 R 2 7 / 0 0 - 2 7 / 3 2  
G 0 1 R 3 5 / 0 0