



(10) **DE 11 2008 000 095 B4** 2014.07.17

(12)

## Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2008 000 095.6**  
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/EP2008/005991**  
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2009/012973**  
(86) PCT-Anmeldetag: **22.07.2008**  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **29.01.2009**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **17.07.2014**

(51) Int Cl.: **H01J 37/32 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:  
**60/951,392**                      **23.07.2007**      **US**

(73) Patentinhaber:  
**TRUMPF Hüttinger GmbH + Co. KG, 79111,  
Freiburg, DE**

(74) Vertreter:  
**Kohler Schmid Möbus Patentanwälte, 70565,  
Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:  
**Kirchmeier, Thomas, 79331, Teningen, DE; Glück,  
Michael, 79111, Freiburg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

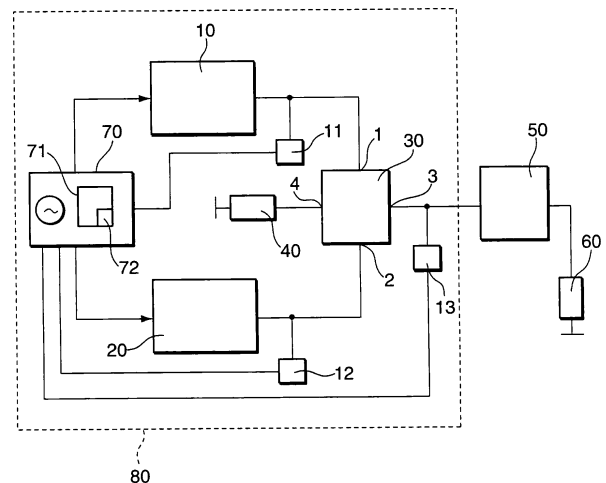
<b>DE</b>	<b>25 19 845</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2004 024 805</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>6 297 696</b>	<b>B1</b>
<b>US</b>	<b>4 490 684</b>	<b>A</b>
<b>US</b>	<b>4 656 434</b>	<b>A</b>
<b>US</b>	<b>5 222 246</b>	<b>A</b>
<b>EP</b>	<b>1 701 376</b>	<b>A1</b>
<b>EP</b>	<b>1 783 904</b>	<b>A1</b>

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Schutz von Hochfrequenzverstärkern einer Plasmaversorgungseinrichtung und Plasmaversorgungseinrichtung**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Schutz von Hochfrequenzverstärkern (10, 20) mit zumindest einem schaltenden Element einer Plasmaversorgungseinrichtung (80), die ein Hochfrequenzausgangssignal mit einer Leistung > 500 W und einer im Wesentlichen konstanten Grundfrequenz > 3 MHz an eine Plasmalast (60) liefert, mit den Schritten

- Ansteuern von zwei Hochfrequenzverstärkern (10, 20) mit zwei Ansteuersignalen gleicher Frequenz, die eine vorgegebene Phasenverschiebung zueinander aufweisen,
- Erzeugen von zwei Hochfrequenzquellsignalen mittels der Hochfrequenzverstärker (10, 20),
- Koppeln der Hochfrequenzquellsignale in einem Koppler (30) zu einem Hochfrequenzausgangssignal,
- Senden des Hochfrequenzausgangssignals an die Plasmalast (60),
- Messen von elektrischen Größen, die mit den von beiden Hochfrequenzverstärkern (10, 20) gesehene Lastimpedanzen in Beziehung stehen,
- Bestimmen, ob sich die Lastimpedanz eines der Hochfrequenzverstärker (10, 20) außerhalb eines vorgegebenen Bereichs befindet;
- Anpassen der Phasenverschiebung der beiden Ansteuersignale und damit der Phasenverschiebung der Hochfrequenzquellsignale zueinander, derart, dass keiner der

Hochfrequenzverstärker (10, 20) eine Lastimpedanz sieht, die sich außerhalb des vorgegebenen Bereichs befindet.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Schutz von Hochfrequenz(HF)-Verstärkern mit zumindest einem schaltenden Element einer Plasmaperversorgungseinrichtung, die ein Hochfrequenzausgangssignal mit einer Leistung  $> 500$  W und einer im Wesentlichen konstanten Grundfrequenz  $> 3$  MHz an eine Plasmalast liefert, wobei zwei Hochfrequenzverstärker mit zwei Ansteuersignalen gleicher Grundfrequenz, die eine vorgegebene Phasenverschiebung, insbesondere von  $90^\circ$ , zueinander aufweisen, angesteuert werden und zwei Hochfrequenzquellsignale erzeugen, die in einem Koppler zu dem Hochfrequenzausgangssignal gekoppelt werden, das an die Plasmalast gesendet wird.

**[0002]** Außerdem betrifft die Erfindung eine Plasmaperversorgungseinrichtung mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 11.

**[0003]** Bei einem Plasma handelt es sich um einen besonderen Aggregatzustand, der aus einem Gas erzeugt wird. Jedes Gas besteht grundsätzlich aus Atomen und/oder Molekülen. Bei einem Plasma ist dieses Gas zu einem Großteil ionisiert. Dies bedeutet, dass durch Zufuhr von Energie die Atome bzw. Moleküle in positive und negative Ladungsträger, also in Ionen und Elektronen, aufgespaltet werden. Ein Plasma eignet sich zur Bearbeitung von Werkstücken, da die elektrisch geladenen Teilchen chemisch hochgradig reaktiv und zudem durch elektrische Felder beeinflussbar sind. Die geladenen Teilchen können mittels eines elektrischen Feldes auf ein Werkstück beschleunigt werden, wo sie beim Aufprall einzelne Atome aus dem Werkstück herauslösen können. Die herausgelösten Atome können über Gasfluss abtransportiert werden (Ätzen) oder auf anderen Werkstücken als Beschichtung abgelagert werden (Herstellung von Dünnschichten). Anwendung findet eine solche Bearbeitung mittels eines Plasmas vor allem dann, wenn extrem dünne Schichten, insbesondere im Bereich weniger Atomlagen, bearbeitet werden sollen. Typische Anwendungen sind Halbleitertechnik (Beschichten, Ätzen, etc.), Flachbildschirme (ähnlich Halbleitertechnik), Solarzellen (ähnlich Halbleitertechnik), Architekturglasbeschichtung (Wärmeschutz, Blendschutz, etc.), Speichermedien (CD, DVD, Festplatten), dekorative Schichten (farbige Gläser, etc.) und Werkzeughärtung. Diese Anwendungen haben hohe Anforderungen an Genauigkeit und Prozessstabilität. Weiterhin kann ein Plasma auch zur Anregung von Lasern, insbesondere Gaslasern, dienen.

**[0004]** Um aus einem Gas ein Plasma zu generieren, muss ihm Energie zugeführt werden. Das kann auf unterschiedliche Weise, beispielsweise über Licht, Wärme, elektrische Energie, erfolgen. Ein Plasma zur Bearbeitung von Werkstücken wird ty-

pischerweise in einer Plasmakammer gezündet und aufrecht erhalten. Dazu wird in der Regel ein Edelgas, z. B. Argon, mit niedrigem Druck in die Plasmakammer geleitet. Über Elektroden und/oder Antennen wird das Gas einem elektrischen Feld ausgesetzt. Ein Plasma entsteht bzw. wird gezündet, wenn mehrere Bedingungen erfüllt sind. Zunächst muss eine geringe Anzahl von freien Ladungsträgern vorhanden sein, wobei zumeist die stets in sehr geringem Maß vorhandenen freien Elektronen genutzt werden. Die freien Ladungsträger werden durch das elektrische Feld so stark beschleunigt, dass sie beim Aufprall auf Atome oder Moleküle des Edelgases weitere Elektronen herauslösen, wodurch positiv geladene Ionen und weitere negativ geladene Elektronen entstehen. Die weiteren freien Ladungsträger werden wiederum beschleunigt und erzeugen beim Aufprall weitere Ionen und Elektronen. Es setzt ein Lawineneffekt ein. Der ständigen Erzeugung von Ionen und Elektronen wirken die Entladungen bei der Kollision dieser Teilchen mit der Wand der Plasmakammer oder anderen Gegenständen sowie die natürliche Rekombination entgegen, d. h., Elektronen werden von Ionen angezogen und rekombinieren zu elektrisch neutralen Atomen bzw. Molekülen. Deshalb muss einem gezündeten Plasma beständig Energie zugeführt werden, um dieses aufrecht zu erhalten.

**[0005]** Die Energiezufuhr kann über eine Gleichstrom-Versorgungseinrichtung oder eine Wechselstrom-Versorgungseinrichtung erfolgen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Wechselstrom-Versorgungseinrichtungen für Hochfrequenz (HF) mit einer Ausgangsfrequenz von  $> 3$  MHz.

**[0006]** Plasmen haben eine sehr dynamische Impedanz, die die gewünschte gleichmäßige HF-Leistungsversorgung schwierig macht. So wechselt während des Zündvorgangs die Impedanz von einem hohen Wert sehr schnell zu einem niedrigen Wert, während des Betriebes können negative Wirkwiderstände vorkommen, die bei steigender Spannung den Stromfluss vermindern, und es kann zu unerwünschten lokalen Entladungen (Arcs) kommen, die das zu bearbeitende Gut, die Plasmakammer oder die Elektroden schädigen können.

**[0007]** Daher müssen Versorgungseinrichtungen für Plasmen (Plasmaperversorgungseinrichtungen) für eine hohe Ausgangsleistung und eine hohe reflektierte Leistung ausgelegt sein. EP 1 701 376 A1 hat gezeigt, dass sich derartige Plasmaperversorgungseinrichtungen vorteilhaft durch kleinere Hochfrequenzverstärker realisieren lassen, deren Ausgangsleistungen durch einen Koppler, vorzugsweise durch einen 3-dB-Hybridkoppler (hybrid coupler, Lange coupler) gekoppelt werden. Dazu werden die zwei Hochfrequenzverstärker an zwei Tore (ports) des Hybridkopplers, im Folgenden Tor 1 und Tor 2 genannt, angeschlossen. Die Hochfrequenzverstärker

werden so angesteuert, dass ihre Hochfrequenzsignale gleicher Grundfrequenz eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  zueinander haben. An einem dritten Tor des Hybridkopplers liegt das erste der beiden Hochfrequenzsignale um  $45^\circ$  nachlaufend und das zweite um  $45^\circ$  voreilend an. An einem vierten Tor des Hybridkopplers liegt das erste der beiden Hochfrequenzsignale um  $45^\circ$  voreilend und das zweite um  $45^\circ$  nachlaufend an. Durch Phasenverschiebung der beiden erzeugten Hochfrequenzsignale um  $90^\circ$  addieren sich diese am dritten Tor durch konstruktive Überlagerung (constructive superposition), während sie sich am vierten Tor auslöschen (destructive superposition). Somit benötigen die Hochfrequenzverstärker vor dem Koppler jeweils nur die halbe Leistung des erforderlichen Hochfrequenzausgangssignals. Eine Kaskadierung von derartigen Kopplerstufen ist möglich, um Hochfrequenzverstärker mit noch weniger Ursprungsleistung einsetzen zu können oder eine noch höhere Leistung des Hochfrequenzausgangssignals zu erzielen.

**[0008]** Das vierte Tor des Hybridkopplers wird üblicherweise mit einem Abschlusswiderstand der Systemnennimpedanz (oftmals  $50 \Omega$ ) abgeschlossen. Wie in EP 1 701 376 A1 beschrieben, wird an diesem Tor nur dann ein Hochfrequenzsignal erwartet, wenn ein von der Plasmalast reflektiertes Hochfrequenzsignal wiederum an den Hochfrequenzverstärkern reflektiert wird.

**[0009]** Bei Fehlanpassung infolge unterschiedlicher Impedanzen von Plasmaversorgungseinrichtung und Plasmalast kommt es zur teilweisen oder vollständigen Reflexion der von der Plasmaversorgungseinrichtung gelieferten Leistung. Eine Impedanzanpassschaltung (matchbox) kann in bestimmten Bereichen die Impedanz der Plasmalast transformieren und der Ausgangsimpedanz der Plasmaversorgungseinrichtung anpassen. Wird der Transformationsbereich der Anpassschaltung überschritten oder kann die Regelung der Impedanzanpassschaltung einer schnellen Impedanzänderung des Plasmas nicht folgen, so wird nicht die gesamte von der Plasmaversorgungseinrichtung gelieferte Leistung in dem Plasma absorbiert, sondern es findet wieder Reflexion statt.

**[0010]** Ein von der Plasmalast reflektiertes Hochfrequenzsignal läuft über eine eventuell vorhandene Anpassschaltung zurück zum Tor 3 des Hybridkopplers, wird hier in zwei Teile aufgespalten und über die Tore 1 und 2 in Richtung der Hochfrequenzverstärker der Plasmaversorgungseinrichtung zurückgesendet. Dabei erfahren die beiden Teile des reflektierten Hochfrequenzsignals im Hybridkoppler wieder eine gleiche Phasenverzögerung um  $45^\circ$  beim Weg von Tor 3 nach Tor 1 bzw. einen gleichen Phasenvorlauf um  $45^\circ$  beim Weg von Tor 3 nach Tor 2. Das hat zur Folge, dass sich an beiden Ausgängen der beiden Hochfrequenzverstärker die hinlaufenden und reflektier-

ten Hochfrequenzsignale um  $180^\circ$  verschieden überlagern. Findet beispielsweise am Ausgang des ersten Hochfrequenzverstärkers eine maximal konstruktive Überlagerung von hinlaufendem und reflektiertem Hochfrequenzsignal statt, so wird diese Überlagerung am Ausgang des zweiten Hochfrequenzverstärkers maximal destruktiv sein. Ist die Überlagerung am ersten Hochfrequenzverstärker so, dass das Strommaximum dem Spannungsmaximum in der Zeit vorauseilt, der Hochfrequenzverstärker also eine kapazitive Impedanz als Lastimpedanz sieht, so wird am zweiten Hochfrequenzverstärker das Spannungsmaximum dem Strommaximum in der Zeit vorauseilen, dieser sieht also eine induktive Lastimpedanz.

**[0011]** Die beiden Hochfrequenzverstärker können beispielsweise durch einen gemeinsamen Ansteuersignalgenerator angesteuert werden. Dieser Ansteuersignalgenerator kann für die Hochfrequenz-Signale an seinen beiden Ausgängen eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  aufweisen. Die beiden Hochfrequenzverstärker können auch von einem gemeinsamen Hochfrequenztreibersender angesteuert werden, dessen Ausgangssignal beispielsweise über einen zweiten Hybridkoppler aufgespalten wird.

**[0012]** Plasmaversorgungseinrichtungen mit zwei Hochfrequenzverstärkern lassen sich auch mit Kopplern mit anderen Phasenverschiebungscharakteristiken aufbauen. Die oben genannten Eigenschaften/Vorteile erhält man jedoch nur, wenn die Phasenverschiebung bei  $90^\circ$  oder in der Nähe davon liegt. Einen phasenverschiebenden Koppler kann man beispielsweise auch mit Hilfe eines  $0^\circ$ -Kopplers (Wilkinson coupler) und entsprechenden Phasenverzögerungsgliedern, beispielsweise Phasenleitungen, realisieren.

**[0013]** Eine der häufigsten Schaltungsvarianten von Hochfrequenzverstärkern in Plasmastromversorgungen ist ein Klasse-D-Verstärker mit einer Schaltbrücke. Eine Schaltbrücke weist zumindest zwei schaltende Elemente, wie z. B. MOSFETs, auf, die in Serie geschaltet sind; der Verbindungspunkt der schaltenden Elemente stellt den Mittelpunkt der Schaltbrücke dar. Der Mittelpunkt des Brückenweiges wird durch die zwei Schaltelemente (im Folgenden auch als schaltende Elemente oder Schalter bezeichnet) abwechselnd an den positiven oder negativen Pol einer Leistungsgleichstromversorgung geschaltet. Die abwechselnde Steuerung der beiden Schaltelemente sowie der Schaltelemente eines eventuell vorhandenen zweiten Brückenweigs erfolgt durch den Ansteuersignalgenerator, der einen Oszillator, der die Frequenz des Ausgangssignals bestimmt, und weitere Bauelemente wie Inverter, Phasenschieber und Signalformer enthalten kann.

**[0014]** Eine Vollbrückenschaltung besteht aus zwei Brückenweigen (Halbbrücken), deren Mittelpunkte

mit der gewünschten Frequenz jeweils gegensinnig an den positiven und negativen Pol der Gleichspannungsversorgung geschaltet werden. Die Wechselstromlast wird zwischen diesen beiden Mittelpunkten angeordnet. Ein zusätzlicher Kondensator zur Befreiung des Ausgangssignals von einem Gleichspannungsanteil ist nicht notwendig.

**[0015]** Um Schaltverluste zu vermeiden, sollte es zum Zeitpunkt des Einschaltens der einzelnen Schaltelemente einer Vollbrücke keine nennenswerte Spannungsdifferenz zwischen den beiden Leistungselektroden (im allgemeinen Drain und Source des jeweiligen MOSFETs) geben. Dieses Schaltverhalten wird als Null-Volt-Schalten bezeichnet. Man erreicht dies, indem die Schaltbrücke auf eine Lastimpedanz mit induktivem Charakter arbeitet. Dies bedeutet, dass die Schaltbrücke, also der Hochfrequenzverstärker, eine induktiv absorptive Lastimpedanz sieht. Die Selbstinduktion einer Primärwicklung eines Leistungsübertragers, welche an den Mittelpunkt der Schaltbrücke angeschlossen ist, kann dafür ausgenutzt werden. Bei der zunächst einseitigen Unterbrechung des Stromflusses durch die Primärwicklung wird eine Spannung induziert. Bei geeigneter Dimensionierung der Bauelemente und Berücksichtigung ihrer parasitären Eigenschaften sowie bei richtiger Wahl der Schalt/Wartezeit ist das Potential an diesem augenblicklich nicht mit der Leistungsgleichstromversorgung verbundenen Ende der Primärwicklung genauso hoch wie das Potential an demjenigen Anschluss der Gleichspannungsquelle, der nun mit dieser Halbbrücke diesem Ende der Primärwicklung zugeschaltet werden soll.

**[0016]** Dagegen ist eine Lastimpedanz mit kapazitivem Charakter (der HF-Verstärker sieht eine kapazitiv absorptive Lastimpedanz) für die Schaltbrücke ungünstig, da der Mittelpunkt beim Vorgang des Umschaltens sein vorheriges Potential behält und damit am nun einschaltenden Element eine Spannungsdifferenz bis hin zur Spannung der Leistungsgleichstromversorgung anliegt.

**[0017]** Es kann unter bestimmten Reflexionsbedingungen sogar vorkommen, dass einer der Hochfrequenzverstärker dem anderen Leistung zuführt; die Lastimpedanz, die dieser Hochfrequenzverstärker, dem Leistung zugeführt wird, sieht, hat einen negativen Wirkwiderstand, damit wird die Ausgangsleistung dieses Hochfrequenzverstärkers negativ. Der Hochfrequenzverstärker wird quasi „gefüttert“. Dies bedeutet, dass der „gefütterte“ Hochfrequenzverstärker eine emmissive Lastimpedanz, die induktiv oder kapazitiv sein kann, sieht.

**[0018]** In Abhängigkeit der Betriebszustände und der Spezifikationen der Bauteile der Hochfrequenzverstärker, also wie nahe diese mit der Versorgungsspannung an der Spezifikationsgrenze betrie-

ben werden, wie gut gekühlt wird, wie schnell der Normalbetrieb (Schaltbetrieb) der schaltenden Elemente des HF-Verstärkers beendet/abgebrochen werden kann, wie gut Null-Volt-Schalten realisiert werden muss, ergibt sich ein zulässiger Betriebsbereich. Wenn also die Lastimpedanz in einem von den Bauteilspezifikationen und Betriebszuständen der HF-Verstärker abhängigen Betriebsbereich liegt, können die HF-Verstärker betrieben werden, ohne dass eine Beschädigung oder Zerstörung zu befürchten ist. Dabei können auch gewisse (induktive) emmissive Lastimpedanzen zulässig sein. Lastimpedanzen außerhalb des zulässigen Lastimpedanzbereichs sollten vermieden werden.

**[0019]** US 6,297,696 B1 offenbart, dass von der Last reflektierte Leistung die Impedanz an Tor 4 eines Kopplers steuert. Die Ausgangsimpedanz ist fast ausschließlich von der Impedanz an Tor 4 abhängig (wenn die Verstärker gleich sind). Gibt es eine Reflexion, wird daher die Abschlussimpedanz an Tor 4 so weit verändert, dass sie der Lastimpedanz entspricht. Dann vermindert sich die Reflexion durch bessere Anpassung.

**[0020]** Aus der US 4,656,434 A ist es bekannt, ein Eingangssignal mit einem Splitter zu teilen und zwei Verstärkern zuzuführen. Die Leistungen der Verstärker werden mit einem Hybridkoppler gekoppelt und einer Last zugeführt. Bei Fehlanpassung erfolgt eine Rückführung der Leistung von Tor 4 an ein Isolations-Tor des Splitters mit einer Dämpfung und/oder Phasenverschiebung, um ungleiche Auslastung der beiden Verstärker zu verhindern. Einer der Verstärker wird, wenn er durch Fehlanpassung mehr belastet wird, weniger angesteuert.

**[0021]** Aus der US 5,222,246 und US 4,490,684 A ist es bekannt, ein zu verstärkendes Signal in zwei Komponenten gleicher Amplitude aufzuteilen und jede Komponente in einem Verstärkerpfad zu verstärken. In einem phasensensitiven Koppler werden die verstärkten Komponenten zusammen geführt, wobei ein Summensignal und ein Differenzsignal, die von der Phasendifferenz der verstärkten Komponenten abhängen, gebildet werden. Aus dem Differenzsignal wird ein Steuersignal für einen Phasenschieber in einem der Verstärkerpfade gewonnen.

**[0022]** Aus der DE 10 2004 024 805 A1 ist ein Verfahren zur Regelung der Ausgangsleistung einer HF-Verstärkeranordnung bekannt. Mittels zweier Hochfrequenzquellen werden Hochfrequenzsignale erzeugt, die in einem Koppler phasenabhängig gekoppelt werden. Die Ausgangsleistung des Kopplers wird einer Plasmalast zugeführt. Die zur Plasmalast gelieferte und von dieser reflektierte Leistung wird erfasst und einer Regelanordnung zugeführt, die ein Phasenschieberglied ansteuert, welches mit einer der Hochfrequenzquellen in Verbindung steht.

**[0023]** Die DE 25 19 845 A1 offenbart eine Anordnung, bei der die Ausgangsleistung zweier Hochfrequenzverstärker mittels eines Kopplers gekoppelt wird. Die Eingangsimpedanzen des Kopplers werden erfasst und ausgehend von der erfassten Eingangsimpedanz wird die Versorgungsspannung der Hochfrequenzverstärker geregelt.

**[0024]** Die EP 1 783 904 A1 offenbart ein Verfahren zum Steuern und/oder Regeln der Ausgangsleistung einer HF-Plasmaversorgungseinrichtung. Es werden HF-Leistungssignale mittels jeweils eines HF-Generators erzeugt. Diese Signale werden in Abhängigkeit der Phasenlage der Leistungssignale gekoppelt. Die gekoppelte HF-Leistung wird wiederum aufgeteilt auf eine einer Plasmalast zuzuführende Plasmaleistung und eine einer Ausgleichslast zuzuführende Ausgleichsleistung. Die Pegel und/oder Phasenlage der HF-Leistungssignale werden derart geregelt, dass für Plasmaleistungen im Bereich zwischen einer vorgegebenen unteren Leistungsgrenze und einer vorgegebenen Nennleistung ein unwesentlicher Teil der gekoppelten HF-Leistung die Ausgleichsleistung darstellt.

**[0025]** Es ist Aufgabe der Erfindung, die Hochfrequenzverstärker einer Plasmaversorgungseinrichtung mit Koppler so zu betreiben, dass diese vor einer ungünstigen Lastimpedanz geschützt werden.

**[0026]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Insbesondere werden Hochfrequenz-Betriebsparameter, die sich beim Versorgen einer Plasmalast durch eine Plasmaversorgungseinrichtung mit zwei Hochfrequenzverstärkern an deren Ausgängen einstellen, angepasst, indem zwei Ansteuersignale gleicher Grundfrequenz, die insbesondere eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  zueinander aufweisen, erzeugt werden, um zwei Hochfrequenzquellsignale mit einer vorgegebenen Phasenverschiebung mit Hilfe der HF-Verstärker zu erzeugen, die in einem Koppler zu einem Hochfrequenzausgangssignal gekoppelt werden, das an die Plasmalast gesendet wird, wobei elektrische Größen, die mit den Lastimpedanzen der beiden Hochfrequenzverstärker in Beziehung stehen ermittelt werden, und eine zusätzliche Verschiebung der Phasen der beiden Ansteuersignale durchgeführt wird und damit die Phasenverschiebung der Hochfrequenzquellsignale zueinander so angepasst wird, dass keiner der Hochfrequenzverstärker eine ungünstige Lastimpedanz sieht. Durch die Anpassung der Phasenverschiebung kann eine zu große Belastung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker vermieden oder vermindert werden. Der Bereich, in dem die zulässigen Lastimpedanzen liegen dürfen, kann anhand der Bauteilspezifikationen und den Betriebszuständen der HF-Verstärker festgelegt werden. Die Anpassung der Phasenverschiebung erfolgt vorzugsweise so, dass die von beiden HF-Ver-

stärkern gesehenen Lastimpedanzen in den zulässigen Bereich zurück geführt werden.

**[0027]** Der Charakter der Last(impedanz), insbesondere deren Phasenwinkel, kann bestimmt werden. Dafür kann der jeweilige Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung an den Ausgängen der Hochfrequenzverstärker gemessen bzw. bestimmt werden. Insbesondere können Momentanwerte des HF-Stroms und der HF-Spannung gemessen und daraus die Amplitude von HF-Strom und HF-Spannung sowie die Phasenbeziehung ermittelt werden. Es genügt auch die Bestimmung des Phasenwinkels des Hochfrequenzausgangssignals am Ausgang eines Hochfrequenzverstärkers oder am dritten Tor des Hybridkopplers, da die beiden Phasenwinkel an den Ausgängen der Hochfrequenzverstärker in einer festen Beziehung zueinander, beispielsweise von  $\pm 90^\circ$ , stehen. Statt der Ermittlung der Impedanz aus Hochfrequenzstrom und Hochfrequenzspannung kann auch der komplexe Reflexionsfaktor aus dem zur Plasmalast laufenden und dem von der Plasmalast kommenden Hochfrequenzsignal oder aus mindestens einem Hochfrequenzquellsignal und einem zu dem betreffenden HF-Verstärker reflektierten Hochfrequenzsignal bestimmt werden. Insbesondere können deren Momentanwerte erfasst werden und daraus die Amplitude und Phasenbeziehung ermittelt werden. Indirektere Bestimmungen der Phasenwinkel setzen die Messung von VSWR, Spannung, Leistung, Strom an je mindestens einem Tor des Hybridkopplers bzw. dem Ausgang eines Hochfrequenzverstärkers voraus. Die komplexen Werte der Impedanz  $Z$  und die komplexen Reflexionsfaktoren  $r$  lassen sich mit Hilfe der Beziehung  $r = (Z - 1) / (Z + 1)$  ineinander überführen.

**[0028]** Es kann auch die Gleichstromleistungsaufnahme der beiden Hochfrequenzverstärker gemessen und ihr Verhältnis zueinander zum Schätzen oder Bestimmen der Lastimpedanzen mit herangezogen werden.

**[0029]** Wird nun ein ungünstiger Phasenwinkel für einen der Hochfrequenzverstärker detektiert, d. h. ein Phasenwinkel, der auf ein Verlassen des zulässigen Lastimpedanzbereichs hindeutet, wird die Ansteuerung der beiden Hochfrequenzverstärker durch eine zusätzliche Phasenverschiebung in einer Weise verändert, dass die von der Plasmalast zum Hochfrequenzverstärker reflektierte Hochfrequenzleistung keine oder eine geringere Belastung, insbesondere einen geringeren kapazitiven oder emissiven Charakter der Lastimpedanz für den betreffenden Hochfrequenzverstärker darstellt.

**[0030]** Die Phasenverschiebung kann in mindestens einem der Ansteuersignale erfolgen. Dies resultiert in einer Phasenverschiebung des zugeordneten Hochfrequenzquellsignals.

**[0031]** Eine solche Phasenverschiebung der beiden erzeugten Hochfrequenzquellsignale gegeneinander hat drei Folgen: Erstens wird der Koppler nicht mehr die maximale Hochfrequenzleistung an die Plasmalast senden, sondern es wird ein Teil der Hochfrequenzleistung am Tor 4 erscheinen und im Abschlusswiderstand absorbiert werden. Zweitens weicht die Phase des Hochfrequenzgangssignals um den halben Wert der zusätzlichen Phasenverschiebung von seiner ursprünglichen Phasenlage ab. Drittens wird bei geeigneter Wahl der zusätzlichen Phasenverschiebung das von der Plasmalast reflektierte Hochfrequenzsignal einen solchen Phasenwinkel zum erzeugten Hochfrequenzquellsignal des vorher gefährdeten Verstärkers haben, dass nunmehr der kapazitive oder emissive Charakter der Impedanz seiner Last vermindert oder beseitigt ist.

**[0032]** Die Leistungen der beiden erzeugten Hochfrequenzquellsignale können ebenfalls geregelt werden. Dadurch kann die Hochfrequenzleistung konstant gehalten werden.

**[0033]** Dabei kann gleichzeitig mit der Anpassung der Phasenverschiebung eine Leistungsregelung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker erfolgen. Weiterhin kann der Ansteuersignalgenerator die Leistung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker steuern oder regeln. Der Ansteuersignalgenerator kann in Abhängigkeit von der Anpassung der Phasenverschiebung die Leistung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker steuern oder regeln.

**[0034]** Ein Wert für die Anpassung der Phasenverschiebung kann einer Tabelle entnommen werden. Dabei können in der Tabelle Messwerte der Phasenwinkel der Lastimpedanzen unterschiedlichen (zusätzlichen) Phasenverschiebungen zugeordnet sein.

**[0035]** Alternativ ist es denkbar, dass der Wert für die Anpassung der Phasenverschiebung selbstlernend bestimmt wird. Somit erfolgt mit der Zeit eine immer besser werdende Anpassung der Phasenverschiebung der Ansteuersignale, so dass die HF-Verstärker zuverlässig geschützt werden.

**[0036]** Die Aufgabe der Erfindung wird weiter durch eine Plasmaversorgungseinrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 11 gelöst. Die Plasmaversorgungseinrichtung weist einen Ansteuersignalgenerator, der die beiden Hochfrequenzverstärker beispielsweise um  $90^\circ$  gegeneinander phasenverschoben ansteuert, und einen Koppler, beispielsweise einen Hybridkoppler, auf, an dessen erstes und zweites Tor die Ausgänge der beiden Hochfrequenzverstärker angeschlossen sind, und an dessen drittes Tor eine Plasmalast zumindest mittelbar, z. B. über eine Impedanzanpassschaltung, angeschlossen ist, wobei zumindest eine Messeinrichtung zum Bestimmen von elektrischen Größen, die mit den Lastimpedan-

zen der Hochfrequenzverstärker in Beziehung stehen, vorhanden ist. Weiter ist eine Einrichtung für eine zusätzliche Phasenverschiebung der beiden erzeugten Hochfrequenzquellsignale zueinander, insbesondere in Abhängigkeit von den Lastimpedanzen der Hochfrequenzverstärker vorgesehen. Diese Einrichtung für die zusätzliche Phasenverschiebung kann ebenfalls im Ansteuersignalgenerator realisiert sein.

**[0037]** Bevorzugte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

**[0038]** Die Aktivierung und die Wahl der Größe der zusätzlichen Phasenverschiebung können mit Hilfe einer digitalen Signalverarbeitungseinheit erfolgen; diese Signalverarbeitungseinheit kann einen digitalen Signalprozessor enthalten; diese Signalverarbeitungseinheit kann im Ansteuersignalgenerator enthalten sein. Für die Einstellung der zusätzlichen Phasenverschiebung können die Messwerte anhand einer Tabelle ausgewertet und so die zusätzliche Phasenverschiebung gewählt werden. Der Algorithmus oder die Tabelle, die die zusätzliche Phasenverschiebung wählen, können selbstlernend sein. Die zusätzliche Phasenverschiebung kann Teil einer Regelschleife sein.

**[0039]** Ebenso kann der Ansteuersignalgenerator, insbesondere in Abhängigkeit von der zusätzlichen Phasenverschiebung die Leistung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker steuern oder regeln, um beispielsweise die Hochfrequenzleistung konstant zu halten.

**[0040]** Die Hochfrequenzquellsignale können mit einem Hybridkoppler gekoppelt werden. Alternativ ist es denkbar, eines der Hochfrequenzquellsignale über eine Umwegleitung, beispielsweise eine  $90^\circ$ -Umwegleitung, zu führen und die Signale dann mit einem Koppler, beispielsweise einem  $0^\circ$ -Koppler, zu koppeln.

**[0041]** Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, anhand der Figuren der Zeichnung, die erfindungswesentliche Einzelheiten zeigen, und aus den Ansprüchen. Die einzelnen Merkmale können je einzeln für sich oder zu mehreren in beliebiger Kombination bei einer Variante der Erfindung verwirklicht sein.

**[0042]** Bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung schematisch dargestellt und werden nachfolgend mit Bezug zu den Figuren der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigt:

**[0043]** Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Plasmaversorgungseinrichtung;

[0044] Fig. 2a–Fig. 2c zeitliche Verläufe verschiedener HF-Spannungen und HF-Ströme an den Toren eines Hybridkopplers ohne zusätzliche Phasenverschiebung;

[0045] Fig. 3a–Fig. 3c zeitliche Verläufe verschiedener HF-Spannungen und HF-Ströme an den Toren eines Hybridkopplers mit zusätzlicher Phasenverschiebung der Ansteuersignale der HF-Verstärker;

[0046] Fig. 4a eine erste Darstellung zulässiger Lastimpedanzbereiche in einem Smith-Diagramm;

[0047] Fig. 4b eine erste Darstellung zulässiger Impedanzbereiche in der komplexen Impedanzebene;

[0048] Fig. 5a eine zweite Darstellung eines zulässigen Lastimpedanzbereichs in einem Smith-Diagramm;

[0049] Fig. 5b eine zweite Darstellung eines zulässigen Impedanzbereichs in der komplexen Impedanzebene;

[0050] Fig. 6a eine dritte Darstellung eines zulässigen Impedanzbereichs in einem Smith-Diagramm;

[0051] Fig. 6b eine dritte Darstellung eines zulässigen Impedanzbereichs in der komplexen Impedanzebene.

[0052] Gleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet.

[0053] Fig. 1 ist eine schematische Darstellung einer Plasmaversorgungseinrichtung **80**, die zwei Hochfrequenzverstärker **10**, **20** mit jeweils zumindest einem schaltenden Element, einen Hybridkoppler **30** mit vier Toren 1, 2, 3, 4, einen Abschlusswiderstand **40** sowie einen Ansteuersignalgenerator **70** aufweist. An den Ausgang der Plasmaversorgungseinrichtung **80**, der mit Tor 3 in Verbindung steht, ist eine Impedanzanpassungsschaltung **50** und an diese die hier nur als Impedanz dargestellte Plasmalast **60** angeschlossen.

[0054] Die beiden Hochfrequenzverstärker **10**, **20** sind an die Tore 1 bzw. 2 angeschlossen und liefern je ein Hochfrequenzquellsignal an den Hybridkoppler **30**, wobei der Hochfrequenzverstärker **10** so angesteuert wird, dass sein Signal gegenüber dem der Hochfrequenzverstärker **20** in der Phase um  $90^\circ$  vorseilt.

[0055] Die beiden Hochfrequenzverstärker **10**, **20** werden um  $90^\circ$  phasenverschoben von dem Ansteuersignalgenerator **70** angesteuert. Zu diesem Zweck ist in dem Ansteuersignalgenerator **70** ein erster Phasenverschieber **71** realisiert.

[0056] Der Hybridkoppler **30** verzögert das Hochfrequenzquellsignal des Hochfrequenzverstärkers **10** auf dem Weg von Tor 1 nach Tor 3 um einen Phasenwinkel von  $45^\circ$ , während er das Hochfrequenzquellsignal des Hochfrequenzverstärkers **20** auf dem Weg von Tor 2 nach Tor 3 um  $45^\circ$  vorseilen lässt. Dadurch liegen an Tor 3 beide erzeugten Hochfrequenzsignale konstruktiv überlagert an.

[0057] Beim Weg zum Tor 4 liegen umgekehrte Verhältnisse vor. Der Hybridkoppler **30** lässt das Hochfrequenzquellsignal des Hochfrequenzverstärkers **10** auf dem Weg von Tor 1 nach Tor 4 um  $45^\circ$  vorseilen, während er das Hochfrequenzquellsignal des Hochfrequenzverstärkers **20** auf dem Weg von Tor 2 nach Tor 4 um  $45^\circ$  verzögert.

[0058] Dadurch liegen an Tor 4 beide erzeugten Hochfrequenzquellsignale destruktiv überlagert an und löschen sich damit aus.

[0059] Eventuell von der Plasmalast **60** bzw. der Impedanzanpassungsschaltung **50** reflektierte Hochfrequenzsignale kommen zum Tor 3 des Richtkopplers **30** zurück, werden dort aufgeteilt und über die beiden Tore 1, 2 in Richtung der beiden Hochfrequenzverstärker **10**, **20** gesendet.

[0060] Messeinrichtungen **11**, **12**, **13** ermitteln Messwerte, aus denen im Ansteuersignalgenerator **70**, insbesondere in einer Phasenangepasseinrichtung **72**, die im Ausführungsbeispiel im ersten Phasenschieber **71** integriert ist, eine Anpassung der Phasenverschiebung bzw. zusätzliche Phasenverschiebung der Ansteuersignale ermittelt wird. Über die Messeinrichtung **13** kann auch die Ist-Leistung erfasst werden, anhand derer im Ansteuersignalgenerator **70** die Ansteuersignale so verändert werden, dass eine Anpassung an eine Soll-Leistung erfolgt.

[0061] Fig. 2a–Fig. 2c zeigen die zeitlichen Verläufe verschiedener Hochfrequenzspannungen und der resultierenden Hochfrequenzströme an den Toren 1 bis 3 des Hybridkopplers **30** über zwei Perioden  $T$  der Grundfrequenz. Der Reflexionskoeffizient  $|\Gamma|$  beträgt 1, die gesamte durch die Zuleitungen zur Impedanzanpassungsschaltung **50** und zur Plasmalast **60** sowie durch diese Einheiten selbst verursachte Phasenverschiebung  $\phi$  am Tor 3 des Hybridkopplers **30** ist im Ausführungsbeispiel  $60^\circ$ .

[0062] Fig. 2a zeigt die Verhältnisse am Tor 1 des Hybridkopplers **30**. Die Hochfrequenzspannung **110** ist die Spannung des vom Hochfrequenzverstärker **10** erzeugten Hochfrequenzquellsignals. Fig. 2b zeigt die Verhältnisse am Tor 2 des Hybridkopplers **30**. Die Hochfrequenzspannung **210** ist die Spannung des vom Hochfrequenzverstärker **20** erzeugten Hochfrequenzsignals. Fig. 3c zeigt die Hochfrequenzspannung **310** des zur Plasmalast laufenden

Hochfrequenz Ausgangssignals am Tor 3. Gegenüber der Hochfrequenzspannung **110** ist die Hochfrequenzspannung **310** um  $45^\circ$  verzögert, gegenüber der Hochfrequenzspannung **210** ist die Hochfrequenzspannung **310** um  $45^\circ$  voreilend. Diese zeitlichen Versätze, mit denen die Hochfrequenzquellsignale in den Hochfrequenzverstärkern **10**, **20** erzeugt werden, kompensieren die Phasenverzögerung bzw. Phasenvoreilung, die die erzeugten Hochfrequenzquellsignale im Hybridkoppler erfahren. Somit ist die Hochfrequenzspannung **310** die Überlagerung der Hochfrequenzspannungen **110** und **210**; die Amplitude der Hochfrequenzspannung **310** ist mal so groß wie die der Hochfrequenzspannungen **110** und **210**, die resultierende Leistung des Hochfrequenz Ausgangssignals also doppelt so groß.

**[0063]** Die Hochfrequenzspannung **320** in **Fig. 2c** ist die Hochfrequenzspannung des von der Plasmalast reflektierten Hochfrequenzsignals an Tor 3 des Hybridkopplers **30**. Wegen des Reflexionsfaktors  $|\Gamma|$  ist deren Amplitude genauso groß wie die der Hochfrequenzspannung **310**. Die Hochfrequenzspannung **320** des reflektierten Hochfrequenzsignals ist gegenüber der Hochfrequenzspannung **310** des zur Plasmalast laufenden Hochfrequenzsignals um einen Phasenwinkel von  $60^\circ$  voreilend. Die beiden Hochfrequenzspannungen **310** und **320** überlagern sich zur resultierenden Hochfrequenzspannung **330**. Der aus den beiden Hochfrequenzspannungen **310**, **320** resultierende Hochfrequenzstrom ist mit **340** bezeichnet. Für den Hochfrequenzstrom **340** gibt die Hochfrequenzspannung **310** des zur Plasmalast laufenden Hochfrequenzsignals einen positiven Beitrag, während die Hochfrequenzspannung **320** des reflektierten Hochfrequenzsignals einen negativen Beitrag liefert.

**[0064]** Das von der Plasmalast reflektierte Hochfrequenzsignal mit der Hochfrequenzspannung **320** an Tor 3 bildet nach Aufteilung durch den Hybridkoppler **30** am Tor 1 die Hochfrequenzspannung **120** in **Fig. 2a** und am Tor 2 die Hochfrequenzspannung **220** in **Fig. 2b**. Die aufgespalteten Hochfrequenzsignale eilen auf dem Rückweg durch den Hybridkoppler von Tor 3 nach Tor 1 bzw. von Tor 3 nach Tor 2 um denselben Phasenwinkel nach bzw. vor, wie auch die von den Hochfrequenzverstärkern **10**, **20** erzeugten vorwärtslaufenden Hochfrequenzquellsignale; die Hochfrequenzspannung **120** an Tor 1 ist gegenüber der Hochfrequenzspannung **320** an Tor 3 um  $45^\circ$  verzögert, die Hochfrequenzspannung **220** an Tor 2 eilt gegenüber der Hochfrequenzspannung **320** an Tor 3 um  $45^\circ$  voraus. Die resultierende Hochfrequenzspannung **130** sowie der resultierende Hochfrequenzstrom **140** an Tor 1 sind in **Fig. 2a**, die resultierende Hochfrequenzspannung **230** sowie der resultierende Hochfrequenzstrom **240** an Tor 2 sind in **Fig. 2b** dargestellt.

**[0065]** Wie aus **Fig. 2a** ersichtlich ist, eilt der resultierende Hochfrequenzstrom **140** der resultierenden Hochfrequenzspannung **130** voraus; der Hochfrequenzverstärker **10** sieht eine Lastimpedanz mit kapazitivem Charakter (eine kapazitive Lastimpedanz). In **Fig. 2b** ist der resultierende Hochfrequenzstrom **240** gegenüber der resultierenden Hochfrequenzspannung **230** verzögert; der Hochfrequenzverstärker **20** sieht also eine Lastimpedanz mit induktivem Charakter (eine induktive Lastimpedanz).

**[0066]** Um den ungünstigen kapazitiven Charakter der Lastimpedanz für der Hochfrequenzverstärker **10** zu vermeiden, wird erfindungsgemäß der Hochfrequenzverstärker **10** durch den Ansteuersignalgenerator **70** um eine zusätzliche Phasenverschiebung von  $90^\circ$  verzögert angesteuert, wie in den Teilbildern der **Fig. 3** zu sehen ist. Der Reflexionskoeffizient  $|\Gamma|$  von 1 sowie die durch die Komponenten der Plasmaversorgungseinrichtung **80** sowie die Impedanzanpassungsschaltung **50** und Plasmalast **60** verursachte Phasenverschiebung  $\varphi$  von  $60^\circ$  wurden beibehalten. In **Fig. 3c** ist zu erkennen, dass die Hochfrequenzspannung **310** des Hochfrequenz Ausgangssignals um  $1/\sqrt{2}$ , die entsprechende Hochfrequenzleistung also um die Hälfte abgenommen hat. Die andere Hälfte der Hochfrequenzleistung wird nun am Tor 4 des Hybridkopplers **30** ausgegeben und im Abschlusswiderstand **40** absorbiert. Der Charakter der Lastimpedanz für den Hochfrequenzverstärker **20** ist immer noch induktiv, wie man am nachlaufenden Hochfrequenzstrom **240** gegenüber der erzeugten Hochfrequenzspannung **230** in **Fig. 3b** erkennen kann. Wie aus **Fig. 3a** ersichtlich ist, sieht auch der Hochfrequenzverstärker **10** nun eine Lastimpedanz mit induktivem Charakter, denn auch hier läuft der Hochfrequenzstrom **140** der erzeugten Hochfrequenzspannung **130** nach.

**[0067]** **Fig. 4a** zeigt ein Smith-Diagramm. Mit Kreisen sind zulässige Lastimpedanzbereiche **500**, **501** exemplarisch dargestellt. In der **Fig. 4b** sind entsprechende Bereiche **502**, **503** in einer Darstellung in der komplexen Impedanzebene gezeigt. Die Darstellungen in beiden **Fig. 4a**, **Fig. 4b** sind auf die Systemimpedanz  $Z_0$  normiert.

**[0068]** Die Bereiche **500**, **502** geben einen Arbeitsbereich, der bei konservativem Betrieb, also z. B. bei nicht ausgenutzter Betriebsspannungsspezifikation der schaltenden Elemente der HF-Verstärker, möglich wäre. Die Bereiche **501**, **503** geben einen Arbeitsbereich für Verstärker, die an den Grenzen ihrer Spezifikationen betrieben werden, an.

**[0069]** Die Bereiche **500**, **502** gehen sogar in den emissiven Lastimpedanzbereich über (außerhalb des Smith-Kreises, linke Halbebene), beide bleiben immer induktiv (obere Kreishälfte bzw. obere Halbebene).



**[0070]** Die Bereiche sind gleichermaßen im Smith-Diagramm und in der komplexen Impedanzebene definierbar und ineinander überführbar. Die Konstruktionsregeln für bestimmte Geometrien können sich für die beiden Diagramme jedoch unterscheiden.

**[0071]** Um zu ermitteln, ob eine Lastimpedanz in einem definierten Bereich liegt oder außerhalb, sind unterschiedliche Messungen denkbar.

**[0072]** Der Winkel zwischen zur Plasmalast laufender Hochfrequenzleistung und von der Last reflektierter Hochfrequenzleistung gibt den Winkel im Smith-Diagramm. Der Winkel zwischen Hochfrequenzspannung und Hochfrequenzstrom gibt den Winkel in der komplexen Impedanzebene.

**[0073]** Die HF-Leistungen laufen hin und (die reflektierte) zurück; sie lassen sich mit Richtkopplern unabhängig voneinander messen.

**[0074]** Die Messung (des Momentanwerts) des hin- und zurücklaufenden HF-(Leistungs-)Signals gibt einen Radius im Smith-Diagramm. Ist er null, gibt es keine Reflexion (Mittelpunkt des Smith-Diagramms), ist er eins, ist die Reflexion 100% (Außenrand des Smith-Diagramms). Eine größere rücklaufende als hinlaufende Leistung wird durch einen Punkt außerhalb des großen Kreises **504** repräsentiert. Für die Position im Smith-Diagramm ist außer dem Reflexionsfaktor eine weitere Information, nämlich die Phase notwendig. Der Phasenwinkel (und damit der Lastimpedanz) zwischen hin- und rücklaufender Leistung ist die Phase um den Mittelpunkt.

**[0075]** Bei einer Spannungs-/Stromwertmessung (wieder der Momentanwerte) kann man nicht mehr zwischen vor- und zurücklaufender Spannungswelle und vor- und zurücklaufender Stromwelle unterscheiden; sie überlagern sich additiv (Spannung) bzw. subtraktiv (Strom). Die Messung von Strom- und Spannungsamplitude definiert einen Radius um den Ursprung in der komplexen Impedanzebene, in den Extremfällen also Kurzschluss (keine Spannung mehr, Widerstand = 0, Ursprung) und Leerlauf (kein Strom mehr, im Unendlichen). Den Phasenwinkel (und damit den Phasenwinkel der Lastimpedanz) bekommt man ebenfalls mit zusätzlicher Messung der Phase.

**[0076]** Beide Methoden (Vorwärts-/Rückwärtsleistung, Spannung/Strom) sind äquivalent und durch die Transformation  $r = (Z - 1)/(Z + 1)$  [r komplexer Reflexionsfaktor für das Smith-Diagramm, Z komplexer Widerstand für die Impedanzebene] miteinander verbunden. Jede Messung mit der einen Methode lässt sich in Werte der anderen umrechnen.

**[0077]** Fig. 5a, Fig. 5b zeigen zulässige Lastimpedanzbereiche **601**, **603** mit alternativ gewählter geometrischer Form. Der Bereich **601** kann durch eine

Transformation in den Bereich **603** überführt werden und umgekehrt. Für die Erfindung ist es unerheblich, in welcher Darstellung die zulässigen Lastimpedanzbereiche definiert werden. Die Fig. 6a, Fig. 6b zeigen zulässige Lastimpedanzbereiche **701**, **703**, wobei der Bereich **701** vorgegeben wurde und der Bereich **703** durch eine Transformation des Bereichs **701** entstand.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Schutz von Hochfrequenzverstärkern (**10**, **20**) mit zumindest einem schaltenden Element einer Plasmaversorgungseinrichtung (**80**), die ein Hochfrequenzausgangssignal mit einer Leistung > 500 W und einer im Wesentlichen konstanten Grundfrequenz > 3 MHz an eine Plasmalast (**60**) liefert, mit den Schritten

- Ansteuern von zwei Hochfrequenzverstärkern (**10**, **20**) mit zwei Ansteuersignalen gleicher Frequenz, die eine vorgegebene Phasenverschiebung zueinander aufweisen,

- Erzeugen von zwei Hochfrequenzquellsignalen mittels der Hochfrequenzverstärker (**10**, **20**),

- Koppeln der Hochfrequenzquellsignale in einem Koppler (**30**) zu einem Hochfrequenzausgangssignal,
- Senden des Hochfrequenzausgangssignals an die Plasmalast (**60**),

- Messen von elektrischen Größen, die mit den von beiden Hochfrequenzverstärkern (**10**, **20**) gesehenen Lastimpedanzen in Beziehung stehen,

- Bestimmen, ob sich die Lastimpedanz eines der Hochfrequenzverstärker (**10**, **20**) außerhalb eines vorgegebenen Bereichs befindet;

- Anpassen der Phasenverschiebung der beiden Ansteuersignale und damit der Phasenverschiebung der Hochfrequenzquellsignale zueinander, derart, dass keiner der Hochfrequenzverstärker (**10**, **20**) eine Lastimpedanz sieht, die sich außerhalb des vorgegebenen Bereichs befindet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Phasenwinkel der von zumindest einem Hochfrequenzverstärker (**10**, **20**) gesehenen Lastimpedanz oder eine dazu in Beziehung stehende Größe bestimmt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass an mindestens einem Tor des Kopplers (**30**) oder am Ausgang zumindest eines Hochfrequenzverstärkers (**10**, **20**) jeweils der Momentanwert des zur Plasmalast (**60**) laufenden und von der Plasmalast (**60**) reflektierten Hochfrequenzsignals oder dazu in Beziehung stehender Signale oder der Momentanwert der Hochfrequenzspannung und des Hochfrequenzstroms ermittelt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Bestimmung der durch die Hochfrequenzverstärker (**10**,

**20)** gesehenen Lastimpedanz die Gleichstromleistungsaufnahme zu Hilfe genommen wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zusätzliche Phasenverschiebung in mindestens einem der Ansteuersignale erfolgt.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass gleichzeitig mit der Anpassung der Phasenverschiebung eine Leistungsregelung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker (**10, 20**) erfolgt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Ansteuersignalgenerator (**70**) die Leistung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker (**10, 20**) steuert oder regelt.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Ansteuersignalgenerator (**70**) in Abhängigkeit von der Anpassung der Phasenverschiebung die Leistung mindestens eines der Hochfrequenzverstärker (**10, 20**) steuert oder regelt.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Wert für die Anpassung der Phasenverschiebung einer Tabelle entnommen wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wert für die Anpassung der Phasenverschiebung selbstlernend bestimmt wird.

11. Plasmaversorgungseinrichtung (**80**) zur Erzeugung einer Ausgangsleistung  $> 500$  W bei einer im Wesentlichen konstanten Grundfrequenz  $> 3$  MHz, die ein Hochfrequenzausgangssignal an eine Plasmalast (**60**) liefert, von der zumindest bei Fehlanpassung reflektierte Leistung an die Plasmaversorgungseinrichtung zurück geleitet wird, wobei die Plasmaversorgungseinrichtung einen Ansteuersignalgenerator (**70**) und einen ersten Phasenschieber (**71**) aufweist, der zwei jeweils zumindest ein schaltendes Element aufweisende Hochfrequenzverstärker (**10, 20**) mit einer vorgegebenen Phasenverschiebung ansteuert, und weiter einen Koppler (**30**) aufweist, an dessen erstes und zweites Tor (1, 2) die Ausgänge der beiden Hochfrequenzverstärker (**10, 20**) angeschlossen sind, und an dessen drittes Tor (3) eine Plasmalast (**60**) zumindest mittelbar angeschlossen ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- zumindest eine Messeinrichtung (**11, 12, 13**) zum Bestimmen wenigstens einer elektrischen Größe, die mit den Lastimpedanzen der Hochfrequenzverstärker (**10, 20**) in Beziehung steht, vorgesehen ist,
- eine Phasenanpasseinrichtung (**72**) vorgesehen ist, die mit dem Ansteuersignalgenerator (**70**) zusam-

menarbeitet und die Phasenverschiebung der Ansteuersignale der Hochfrequenzverstärker (**10, 20**) und damit der beiden Hochfrequenzquellsignale zueinander in Abhängigkeit von der durch die Messeinrichtung (**11, 12, 13**) bestimmten Größe anpasst.

12. Plasmaversorgungseinrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Phasenanpasseinrichtung (**72**) in den ersten Phasenschieber (**71**) integriert ist.

13. Plasmaversorgungseinrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Phasenanpasseinrichtung als zweiter Phasenschieber ausgebildet ist.

14. Plasmaversorgungseinrichtung nach einem der Ansprüche 11–13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Phasenschieber (**71**) und/oder die Phasenanpasseinrichtung (**72**) im Ansteuersignalgenerator (**70**) ausgebildet sind.

15. Plasmaversorgungseinrichtung nach einem der Ansprüche 11–14, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Ansteuersignalgenerator (**70**) eine digitale Schaltung, insbesondere einen digitalen Signalprozessor, aufweist.

16. Plasmaversorgungseinrichtung nach einem der Ansprüche 11–15, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Koppler als Hybridkoppler ausgebildet ist.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

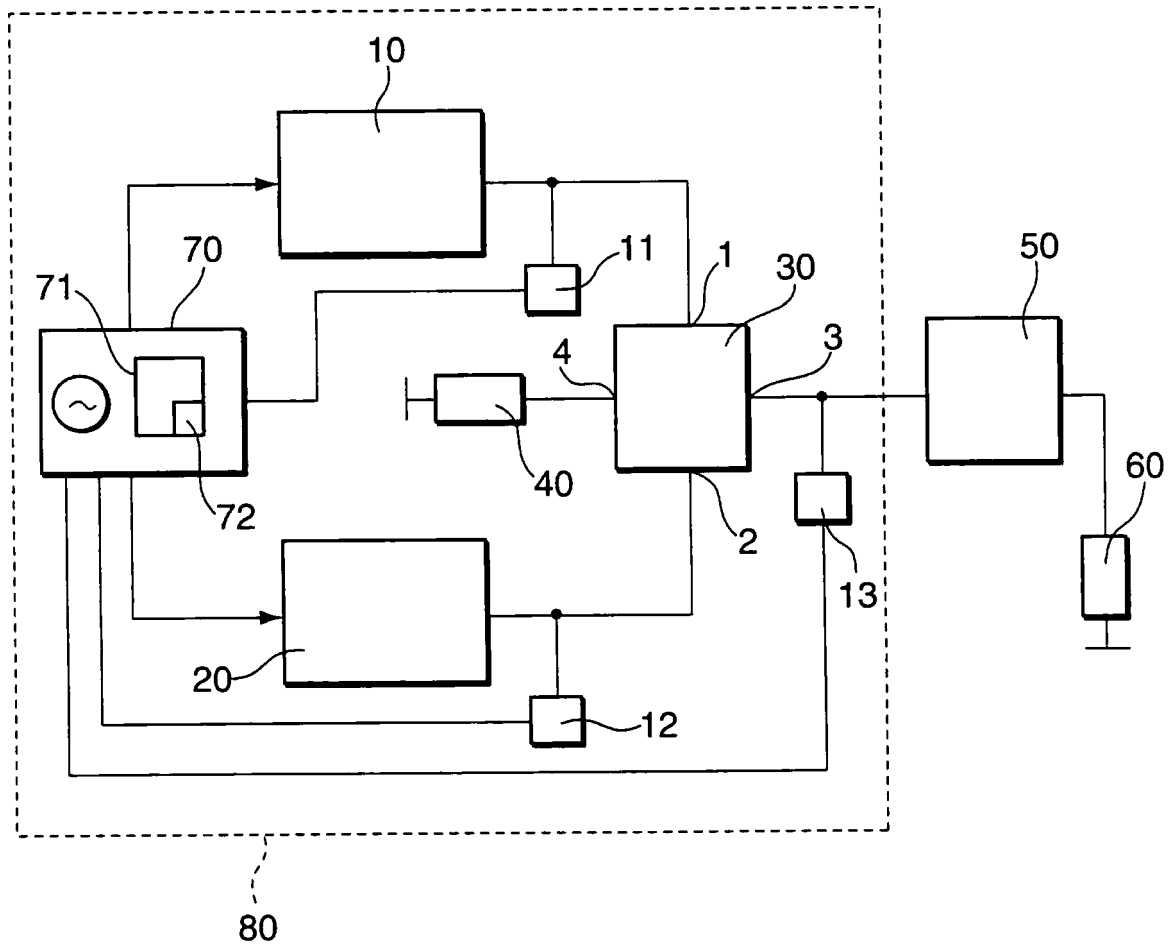


Fig. 1

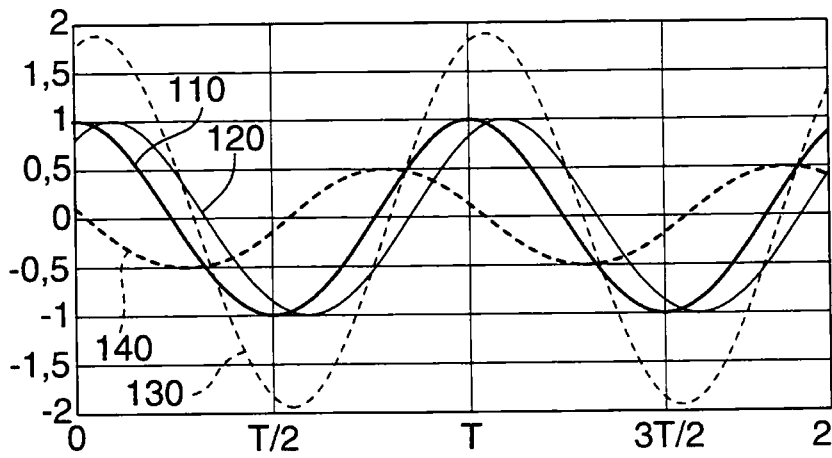


Fig. 2a

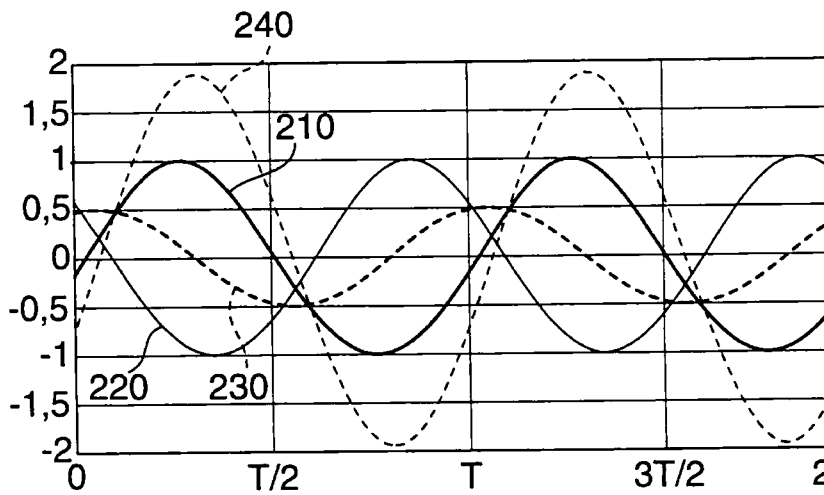


Fig. 2b

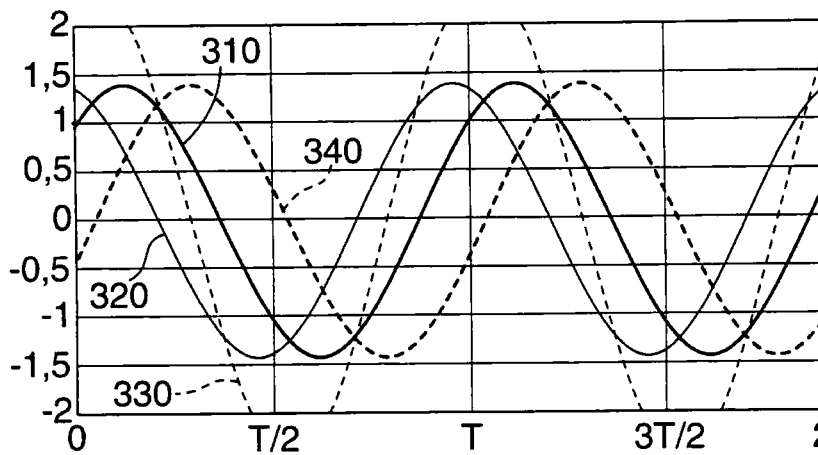


Fig. 2c

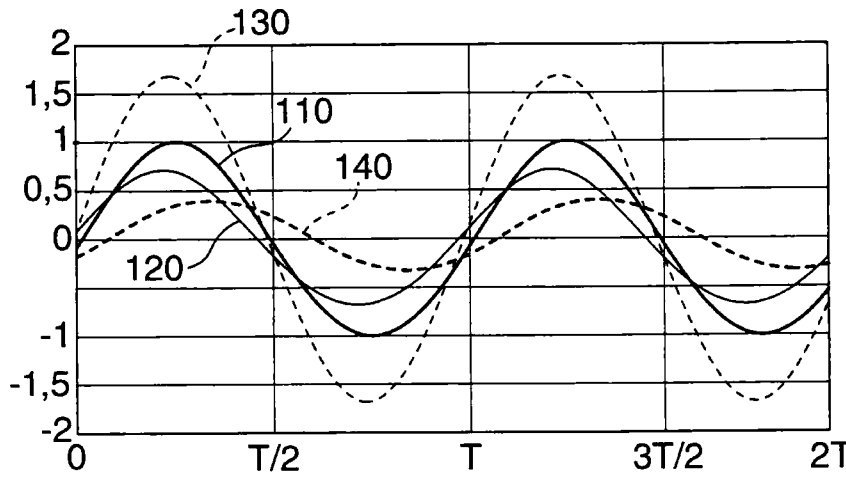


Fig. 3a

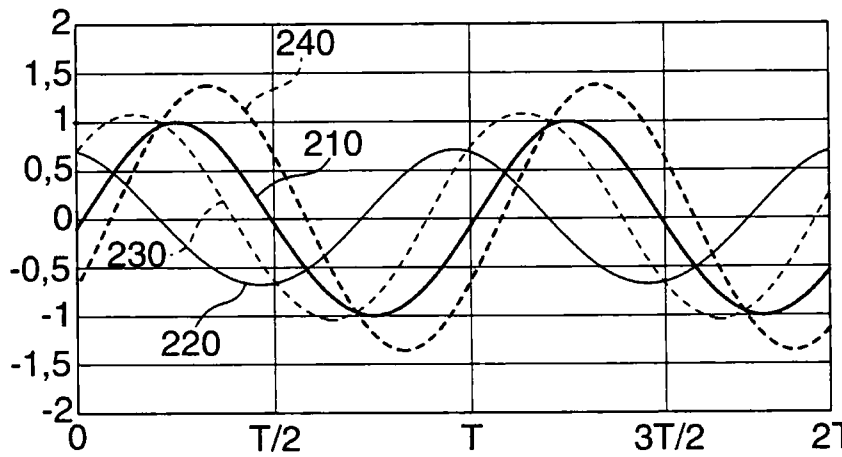


Fig. 3b

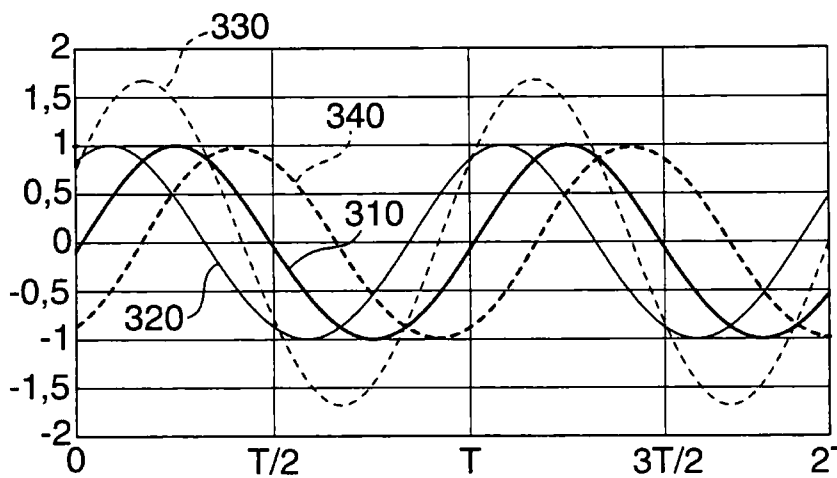


Fig. 3c

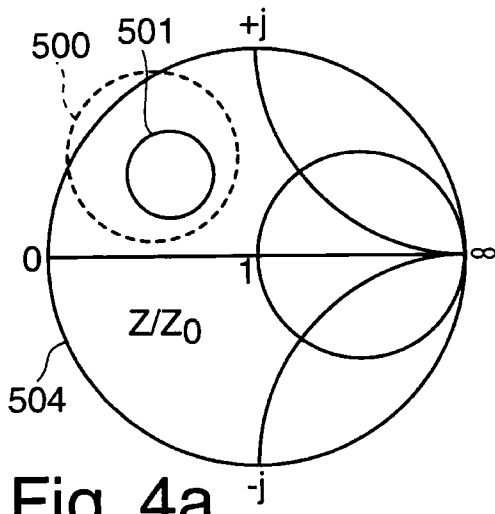


Fig. 4a

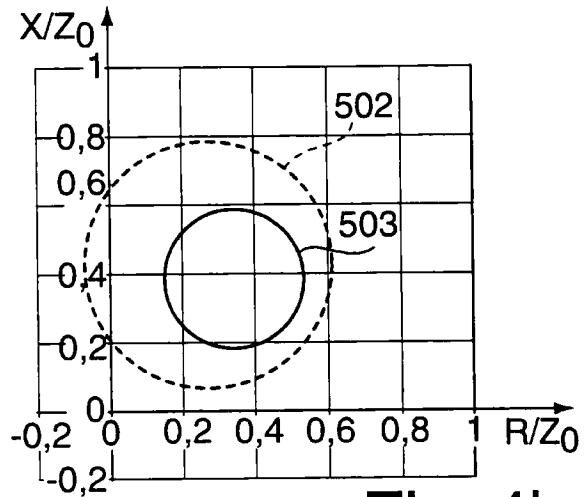


Fig. 4b

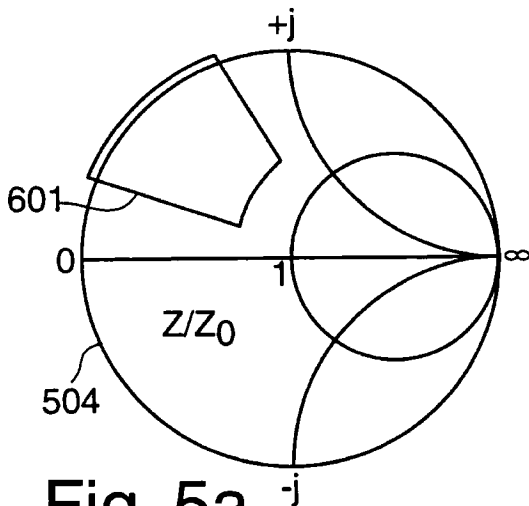


Fig. 5a

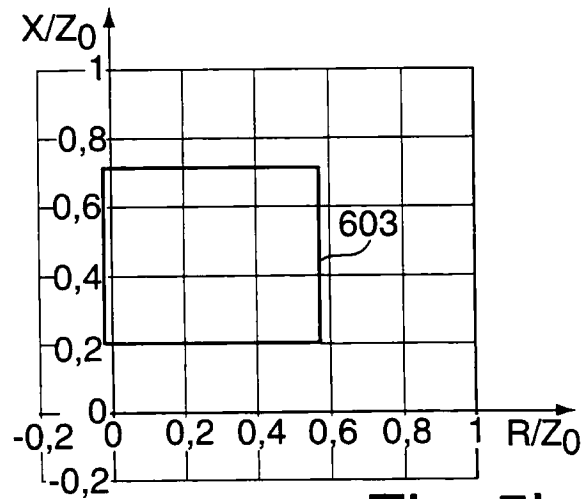


Fig. 5b

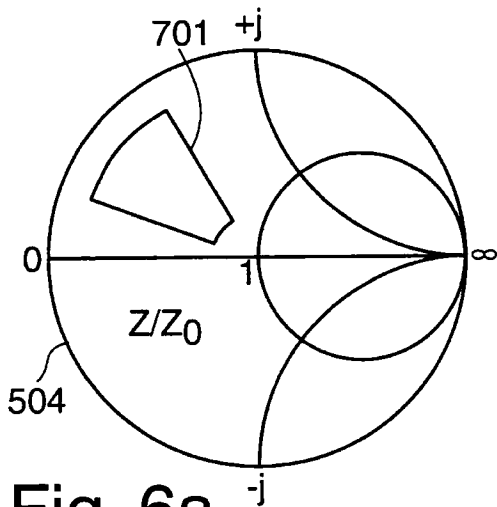


Fig. 6a

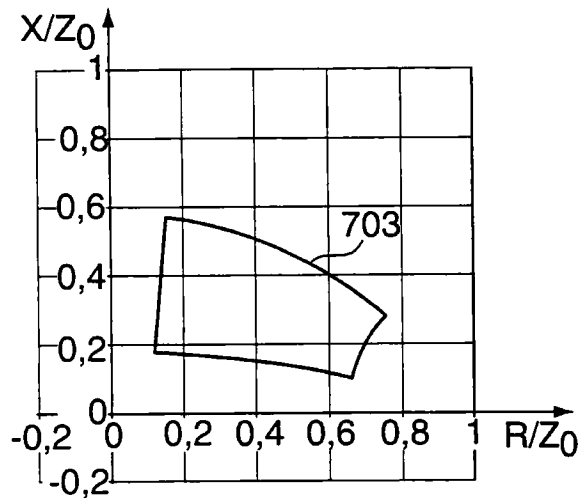


Fig. 6b