



(11)

**EP 2 020 672 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des  
Hinweises auf die Patenterteilung:  
**06.05.2020 Patentblatt 2020/19**

(51) Int Cl.:  
**H01J 27/16** <sup>(2006.01)</sup> **F03H 1/00** <sup>(2006.01)</sup>

(21) Anmeldenummer: **08013495.0**

(22) Anmeldetag: **26.07.2008**

(54) **Hochfrequenzgenerator für Ionen- und Elektronenquellen**

High frequency generator for ion and electron sources

Générateur haute fréquence pour sources d'ions et d'électrons

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**DE FR GB IT**

(30) Priorität: **02.08.2007 DE 102007036592**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**04.02.2009 Patentblatt 2009/06**

(73) Patentinhaber: **ArianeGroup GmbH**  
**82024 Taufkirchen (DE)**

(72) Erfinder:  
• **Kadernoschka, Werner**  
**82110 Germering (DE)**  
• **Lebeda, Anton**  
**85579 Neubiberg (DE)**  
• **Müller, Johann**  
**81929 München (DE)**

• **Weis, Stefan**  
**35781 Weilburg (DE)**  
• **Killinger, Rainer, Dr.**  
**45569 Recklinghausen (DE)**

(74) Vertreter: **Schicker, Silvia et al**  
**Wuesthoff & Wuesthoff**  
**Patentanwälte PartG mbB**  
**Schweigerstraße 2**  
**81541 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**DE-C1- 19 948 229 US-A- 4 507 588**  
**US-A1- 2003 215 373 US-A1- 2007 114 945**

• **Paul Horowitz, Winfried Hill: "The Art of Electronics, Second Edition", 1989, Cambridge University Press, Cambridge, UK ISBN: 0-521-37095-7 pages 644-646,**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**EP 2 020 672 B1**

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Einkopplung von Ionisationsenergie in eine induktiv oder induktiv-kapazitiv angeregte Ionen- oder Elektronenquelle.

**[0002]** Bei einem Ionentriebwerk befindet sich ein hochfrequent anzuregendes Plasma innerhalb eines isolierten Gefäßes, des sog. Entladungsgefäßes. Um das Entladungsgefäß ist eine Koppelspule zur Einspeisung einer zur Plasma-Anregung notwendigen Hochfrequenz-Energie gewickelt. Das Plasma befindet sich damit innerhalb der Koppelspule. Kommt es durch Zustandsänderungen, z.B. Änderungen der Dichte oder Leitfähigkeit, des Plasmas zu Impedanzänderungen, so bewirken diese Verstimmungen des Resonanzkreises.

**[0003]** Bei Hochfrequenzgeneratoren, die mit einer festen Frequenz, z.B. 13,56 MHz, betrieben werden, muss die sich durch Plasmazustände ändernde Impedanz eines den Hochfrequenzgenerator mit der Koppelspule verbindenden Einkoppelnetzwerks einstellende Fehlanpassung durch ein manuelles Nachbestimmen eines Impedanzanpassungsnetzwerks (sog. Matchbox) oder einen Stellantrieb kompensiert werden. Die Kompensation hat zur Folge, dass die Kapazität eines Kondensators des Impedanzanpassungsnetzwerks in ihrer Größe, z.B. durch Oberflächenveränderung, geeignet justiert wird oder die Induktivität einer Spule des Impedanzanpassungsnetzwerks durch das Einfahren eines Ferrites verändert wird. Die Impedanzanpassung über ein Impedanzanpassungsnetzwerk kann meist nicht sehr schnell und nur über einen kleinen Frequenz-Lastbereich optimal nachjustiert werden. Nicht schnell bedeutet, dass eine Nachjustierung im Bereich von Sekunden liegen kann. Hierdurch treten in den Impedanzanpassungsnetzwerken zum Teil erhebliche Verlustleistungen auf.

**[0004]** Die Druckschrift DE 199 48 229 C1 offenbart eine Hochfrequenz-Ionenquelle mit einem Hochfrequenzgenerator, der mit einem PLL-Regelkreis ausgestattet ist, und mit einer Hochfrequenzspule, wobei die Hochfrequenzspule mit einem Kondensator einen Serien- oder Parallel-Resonanzkreis bildet.

**[0005]** Die Druckschrift US 2007/114945 A1 offenbart eine Hochfrequenz-Ionenquelle mit einem Hochfrequenzgenerator, der mit einem PLL-Regelkreis ausgestattet ist, und mit einer Hochfrequenzspule, wobei die Hochfrequenzspule über ein Impedanznetzwerk mit dem Hochfrequenzgenerator verbunden ist.

**[0006]** Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung zur Einkopplung von Ionisationsenergie in eine induktiv oder induktiv-kapazitiv angeregte Ionen- oder Elektronenquelle für den Einsatz in einem Ionentriebwerk anzugeben, welche die oben aufgeführten Nachteile nicht aufweist.

**[0007]** Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Patentanspruches 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen ergeben sich aus den abhängigen Patentansprüchen.

**[0008]** Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Ein-

kopplung von Ionisationsenergie in eine induktiv oder induktiv-kapazitiv angeregte Ionen- oder Elektronenquelle umfasst: ein Entladungsgefäß für ein zu ionisierendes Gas, wie z.B. Xe, Kr, Ar, Ne, He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Cs oder Hg; einer um das Entladungsgefäß gewickelten Koppelspule zur Einspeisung einer zur Plasma-Anregung notwendigen Hochfrequenz-Energie; einen mit der Koppelspule elektrisch gekoppelten Koppelkondensator; und einen mit der Koppelspule elektronisch gekoppelten Hochfrequenzgenerator, der zusammen mit dem zumindest einen Koppelkondensator einen Resonanzkreis ausbildet, wobei der Hochfrequenzgenerator eine PLL-Regelungsvorrichtung zur automatischen Impedanzanpassung des Resonanzkreises aufweist, so dass der Resonanzkreis mit einer Resonanzfrequenz betreibbar ist. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass der zumindest eine Koppelkondensator und die Koppelspule über einen Transformator an den Hochfrequenzgenerator angeschlossen sind, wobei der Transformator primärseitig kapazitiv mit dem Hochfrequenzgenerator gekoppelt ist und sekundärseitig mit dem zumindest einen Koppelkondensator und der Koppelspule den Resonanzkreis bildet. Dies ist beispielsweise für den Fall zweckmäßig, dass sehr große Impedanzanpassungen erforderlich sind.

**[0009]** Die Koppelspule wird an den Hochfrequenzgenerator angeschlossen und bildet mit dem Koppelkondensator des Hochfrequenzgenerators einen Serien- oder Parallelresonanzkreis.

**[0010]** Die erfindungsgemäße Vorrichtung korrigiert Phasenfehler von Strom und Spannung in der Leistungsstufe des Hochfrequenzgenerators durch selbsttätiges Nachführen von Frequenz und Phase der Resonanzfrequenz des Lastkreises. Das Regelprinzip beruht darin, dass die PLL-Regelschaltung kontinuierlich die Phasenlage des sinusförmigen Hochfrequenzausgangsstroms und die Phasenlage der Generatorausgangsspannung über einen digitalen Phasendetektor vergleicht und einen auftretenden Phasenfehler durch Nachstellen der Generatorfrequenz über einen spannungskontrollierten Oszillator (VCO) auf die Frequenz des Resonanzkreises nachstimmt bis der Phasenfehler Null vorliegt. Da die Reaktionszeit der PLL-Regelungsvorrichtung sehr kurz ist (je nach Auslegung < 100 µsec) kommt es auch bei schnellen Änderungen der Resonanzfrequenzen zu keinen länger anhaltenden Phasenfehlern. Die Anpassung des Hochfrequenzgenerators an den Verbraucher erfolgt dadurch mit höchstmöglichem Wirkungsgrad. Durch die sehr schnelle Frequenznachführung und den Phasenabgleich mittels des digitalen Phasenkomparators sorgt die PLL-Regelungsvorrichtung dafür, dass Strom und Spannung immer in Phase sind und damit die maximale Leistung über die Koppelspule in das Plasma eingekoppelt werden kann. Dies kann dabei ohne mechanische Bewegung oder auf andere Weise erfolgen. Die erfindungsgemäße Vorrichtung zeichnet sich durch ihre Einfachheit und große Flexibilität und die Verwendbarkeit über einen großen Frequenzbereich aus.

**[0011]** Die erfindungsgemäße Vorgehensweise zur

optimalen Impedanz- und Leistungsanpassung besteht somit darin, die von dem Hochfrequenzgenerator abgegebene Leistung über einen PLL-Regelkreis (PLL = Phase Locked Loop), auf Resonanz und Phasenfehler Null abzugleichen und an das Plasma zu übertragen. Die Übertragung der Leistung mit einem Phasenfehler Null bedeutet, dass Strom und Spannung in dem Resonanzkreis in Phase liegen und damit keine Blindströme fließen. Somit können auch keine Blindleistungsverluste auftreten, wodurch Schaltverluste nahezu eliminiert sind.

**[0012]** Zur Durchführung der automatischen Impedanzanpassung des Resonanzkreises werden Strom und Spannung in dem Resonanzkreis erfasst und der PLL-Regelungsvorrichtung als Regelgrößen zugeführt.

**[0013]** Der Hochfrequenzgenerator zeichnet sich dadurch aus, dass ein Betrieb bei Resonanz und optimalem Phasenabgleich möglich ist. Durch die PLL-Regelungsvorrichtung fließen nur sinusförmige Ströme, sowohl in dem Hochfrequenzgenerator als auch im Resonanzkreis und damit in der Koppelspule. Der sinusförmige Strom erlaubt einen hohen Wirkungsgrad des Hochfrequenzgenerators und beträgt daher auch bei hohen Betriebsfrequenzen, d.h. Frequenzen oberhalb von 0,5 MHz, zwischen 90 und 95 %.

**[0014]** Eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator mit PLL-Regelung arbeitet immer auf der Resonanzfrequenz des Einkoppelnetzwerkes der Ionen- oder Elektronenquelle. Das Einkoppelnetzwerk der Erfindung ist durch den Resonanzkreis aus Koppelspule und Koppelkondensator gebildet. Dies bedeutet, der Hochfrequenzgenerator folgt allen Frequenzänderungen unabhängig von einer Frequenzverstimmung und einer Frequenzbandbreiten-Kreisgüte phasengenau durch die PLL-Regelung. Die Leistungsanpassung des Hochfrequenzgenerators erfolgt im Mikrosekunden-Bereich und führt durch den exakten Phasenabgleich von Strom und Spannung in Schaltelementen des Hochfrequenzgenerators und dem Resonanzkreis zu einem nahezu verlustfreien Schalten und einer optimalen Leistungseinkopplung in das Plasma.

**[0015]** Eine erfindungsgemäße Vorrichtung eignet sich deshalb besonders für die Hochfrequenzenergieversorgung von Ionenquellen (TWK) und Elektronenquellen (NTR) mit induktiver Anregung und für Anwendungen, bei denen es auf geringsten Energieverbrauch ankommt.

**[0016]** Gemäß einer Ausführungsform wird durch die PLL-Regelungsvorrichtung eine Frequenz- und/oder Phasenregelung zur Impedanzanpassung des Resonanzkreises durchgeführt. Die Leistungsregelung des Hochfrequenzgenerators ist durch Einstellung einer Eingangsgleichspannung und eines Eingangsstroms des Hochfrequenzgenerators vornehmbar. Der Hochfrequenzgenerator zeichnet sich somit dadurch aus, dass er aus einer in Spannungs- und Stromstärke steuerbaren Gleichspannungsquelle eine hochfrequente Ausgangsspannung erzeugt. Diese Wechselspannungsquelle wird unter Einbeziehung der für eine induktive Einkopplung notwendigen Koppelspule und des zusätzlichen Koppel-

kondensators zu einem Resonanzkreis verschaltet.

**[0017]** Der Hochfrequenzgenerator der erfindungsgemäßen Vorrichtung ohne Zwischenschaltung eines Impedanzanpassungsnetzwerks, einer sog. Matchbox, mit der Koppelspule verbunden. Die Ankopplung des Hochfrequenzgenerators mit PLL-Regelung erlaubt es dennoch, über einen großen Leistungs- und Frequenzbereich, die elektrische Energie direkt in das Plasma der Ionen- oder Elektronenquelle einzukoppeln.

**[0018]** Der Resonanzkreis, der aus Koppelspule und Koppelkondensator gebildet ist, kann wahlweise als Serien- oder Parallel-Resonanzkreis ausgebildet sein. Die Impedanzanpassung erfolgt dabei dadurch, dass die Koppelspule sowie konstruktive Koppelkapazitäten zwischen dem Plasma und dem Entladungsgefäß und entsprechender Zuleitungen zu dem Serien- oder Parallel-/Resonanzkreis einbezogen werden, wobei eine automatische Frequenz- und Phasenregelung durch den PLL-geregelten Hochfrequenzgenerator erfolgt.

**[0019]** In einer weiteren Ausführungsform kann die Koppelspule über eine Mittelpunktanzapfung verfügen, an welche der Hochfrequenzgenerator angeschlossen ist. Dies erlaubt die Kühlung der Koppelspule durch Zuführung eines Kühlmediums ohne die Zwischenschaltung von Isolatoren, da die Spulenden der Koppelspule auf einem Bezugspotential liegen. Als Kühlmedium wird vorzugsweise Wasser verwendet. Als Bezugspotential kann beispielsweise das Massepotential dienen.

**[0020]** In einer weiteren Ausführungsform kann die Koppelspule zwischen zwei oder mehreren Koppelkondensatoren angeordnet sein. Zweckmäßig ist dabei, wenn der sich bildende Resonanzkreis eine Resonanzfrequenz bildet, welche innerhalb der sog. Lockfrequenz der PLL-Regelvorrichtung liegt. Der Hochfrequenzgenerator führt die Frequenz z.B. mittels eines spannungsgesteuerten Oszillators (VCO = Voltage Controlled Oscillator) und einem digitalen Phasenvergleich von Strom und Spannung im Resonanzkreis so lange nach, bis der Phasenfehler Null wird.

**[0021]** Zweckmäßigerweise ist eine Vorrichtung zur Erfassung von Strom und Spannung in dem Resonanzkreis vorgesehen, welche mit der PLL-Regelungsvorrichtung gekoppelt ist, um dieser den gemessenen Strom und die gemessene Spannung als Regelgrößen zuzuführen.

**[0022]** Eine weitere Ausführungsform der Erfindung sieht vor, dass der zumindest eine Koppelkondensator in dem Hochfrequenzgenerator oder außerhalb von diesem (als externes Bauelement) angeordnet ist.

**[0023]** Ferner kann vorgesehen sein, dass die Koppelspule einseitig geerdet oder isoliert zu einem Massepotential betrieben wird.

**[0024]** Eine weitere Ausführungsform sieht vor, dass die Koppelspule und das Plasma einen Transformator ausbilden, wobei das Plasma eine Sekundärwicklung des Transformators darstellt.

**[0025]** Der Hochfrequenzgenerator umfasst eine Leistungsstufe, die wahlweise als eine der nachfolgend

aufgeführten Varianten ausgebildet sein kann: Halbbrücken-Klasse-D-Endstufe; Vollbrücken-Klasse-D-Endstufe; Push-Pull-Endstufe; Endstufe der Klasse E; Endstufe der Klasse F; Endstufe der Klasse C. Die Auswahl, welche Leistungsstufe in dem Hochfrequenzgenerator vorgesehen wird, hängt im Wesentlichen von dem geforderten Frequenz- und Leistungsbereich ab. Die Impedanzanpassung an den Einkoppelresonanzkreis erfolgt in allen Fällen über eine Frequenz-Phasenregelung mittels der PLL-Regelungsvorrichtung.

**[0026]** Als Endstufen für den Hochfrequenzgenerator werden vorzugsweise Klasse-D- und Klasse-E-Endstufen verwendet, welche sich durch einen maximalen Stromflusswinkel von  $180^\circ$  in den Schaltelementen der Endstufen (mit Bipolar- oder MOSFET-Transistoren) auszeichnen. Werden Klasse-D-Endstufen ohne PLL-Regelung im Zusammenhang mit Resonanzkreisen eingesetzt, so kommt es schon bei kleinsten Frequenz-Phasenverstimlungen, abhängig von der Kreisgüte des Resonanzkreises, zu erheblichen Blindströmen, sowohl kapazitiven oder induktiven Charakters, je nach Richtung der Phasen-Frequenzverstimmung. Die Folge davon sind sehr hohe Strombelastungen der Endstufe und demzufolge hohe Verluste in den Endstufen und Koppelnetzwerken. Die Verluste treten in Form von Blindstromverlusten auf. Sie führen zu einem starken Absinken der zum Verbraucher übertragenen Leistung. Durch den Einsatz der PLL-Regelung werden die erwähnten Probleme, d.h. Phasenfehler in den Endstufen, auch bei Klasse-D-, Klasse-E- und Klasse-F-Endstufen vollständig vermieden. Der Einsatz der PLL-Regelung ermöglicht die volle Performanzausnutzung dieser Endstufentypen, d.h. einen Stromflusswinkel von  $180^\circ$ .

**[0027]** Durch den Hochfrequenzgenerator ist eine Resonanzfrequenz im Bereich von 0,5 MHz bis 30 MHz einstellbar. Die in den Hochfrequenzgenerator eingekoppelte Leistung liegt im Bereich von 1 W bis 10 kW. Die an den Hochfrequenzgenerator gekoppelte Lastimpedanz liegt in einem Bereich von 0,1 Ohm bis 1 Ohm oder in einem Bereich von 1 Ohm bis 50 Ohm.

**[0028]** In einer weiteren Ausgestaltung weist das Entladungsgefäß der erfindungsgemäßen Vorrichtung einen Gaseinlass und einen gegenüberliegend angeordneten Auslass mit zumindest zwei Extraktionsgittern mit jeweils einer Multilochmaske auf, welche als elektrische Linse zur Fokussierung der zu extrahierenden Ionenstrahlen dient. Die Extraktion erfolgt durch ein elektrisches Feld, das an die Extraktionsgitter anlegbar ist. Das Entladungsgefäß ist aus einem nichtleitenden Material mit geringen Hochfrequenzverlusten gebildet, wie z.B. Quarz, Keramik, Vespel oder Bor-Nitrid. Das Entladegefäß dient als Entladerraum für das zu ionisierende Gas.

**[0029]** Die Koppelspule umfasst gemäß einer weiteren Ausführungsform eine einlagige oder eine mehrlagige oder eine bifilare Wicklung. Dabei ist die Koppelspule um das Entladungsgefäß oder innerhalb des Entladungsgefäßes angeordnet. Die Koppelspule ist zylindrisch, kegelförmig, sphärisch oder teilkonisch mit zylindrischem Über-

gangskörper um das Entladungsgefäß gewickelt.

**[0030]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Figuren näher erläutert. Es zeigen:

- |    |         |                                                                                                                                                              |
|----|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5  | Fig. 1  | eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Einkopplung von Ionisationsenergie in eine Ionen- oder Elektronenquelle;               |
| 10 | Fig. 2  | ein elektrisches Ersatzschaltbild der erfindungsgemäßen Vorrichtung;                                                                                         |
|    | Fig. 3  | ein vereinfachtes erfindungsgemäßes Ersatzschaltbild der erfindungsgemäßen Vorrichtung;                                                                      |
| 15 | Fig. 4  | ein Prinzipschaltbild einer als Halbbrücke ausgeführten Endstufe eines Hochfrequenzgenerators mit einem Serienresonanzkreis;                                 |
| 20 | Fig. 5  | ein Prinzipschaltbild einer als Vollbrücke ausgestalteten Endstufe eines Hochfrequenzgenerators mit einem Serienresonanzkreis;                               |
| 25 | Fig. 6  | eine schematische Darstellung der in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung notwendigen Komponenten;                                                            |
| 30 | Fig. 7  | die zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung an einem Ausgang des Hochfrequenzgenerators;                                                                  |
| 35 | Fig. 8  | ein elektrisches Schaltbild zweier möglicher Ankopplungen von Koppelspulen an einen Hochfrequenzgenerator;                                                   |
| 40 | Fig. 9  | eine beispielhafte Darstellung der Ankopplung einer Koppelspule über einen Zusatz-Transformator an den Hochfrequenzgenerator;                                |
| 45 | Fig. 10 | eine Darstellung von Frequenzbandbreite und Resonanzkreisgüte bzw. Frequenzverstimmung sowie Phasengang einer Ionenquelle bei verschiedenen Plasmazuständen; |
| 50 | Fig. 11 | ein elektrisches Ersatzschaltbild einer Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator, der eine Klasse-D-Halbbrücke mit PLL-Regelung aufweist;                 |
| 55 | Fig. 12 | ein elektrisches Ersatzschaltbild einer Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator, der eine Klasse-D-Vollbrücke mit PLL-Regelung aufweist;                 |
|    | Fig. 13 | ein elektrisches Ersatzschaltbild einer Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator,                                                                         |

der eine Klasse-E-Endstufe mit PLL-Regelung aufweist;

Fig. 14 ein elektrisches Ersatzschaltbild einer Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator, der eine Klasse-D-Halbbrücke mit PLL-Regelung und zusätzlicher transformatorischer Aufwärtsanpassung aufweist; und

Fig. 15 eine schematische Darstellung einer Impedanztransformation am Ausgang des Hochfrequenzgenerators.

**[0031]** Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Einkopplung von Ionisationsenergie in eine Ionen- oder Elektronenquelle. Ein Gastank 1, in dem ein zu ionisierendes Gas unter hohem Druck bevorratet ist, ist über eine Leitung mit einem Füll- und Abflussbereich 2 gekoppelt. Der Füll- und Abflussbereich 2 ist über eine weitere Leitung mit einer Flusssteuereinheit 3 gekoppelt. Diese weist zwei Ausgänge auf. Ein erster Ausgang ist mit einem Einlass 6 eines Entladungsgefäßes 4 zur Ionisation des Gases verbunden. Ein zweiter Ausgang der Flusssteuereinheit 3 ist mit einem Neutralisator 10 verbunden. Das Entladungsgefäß 4 besteht aus einem nichtleitenden Material, das nur geringe Hochfrequenz (HF)-Verluste aufweist. Das Entladungsgefäß 4 kann beispielsweise aus Quarz, einer Keramik, Vespel oder Bor-Nitrid bestehen. Das Entladungsgefäß 4 dient als Entladerraum für das zu ionisierende Gas, z.B. Xe, Kr, Ar, Ne, He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Cs oder Hg.

**[0032]** An dem Einlass 6 des Entladungsgefäßes 4 befinden sich ein Isolator 14 sowie ein Flussbegrenzer 15. Um einen zylinderförmigen Abschnitt des Entladungsgefäßes 4, der mit dem Einlass 6 gekoppelt ist, ist eine Koppelspule 5 angeordnet. Die Koppelspule 5 kann aus einer einlagigen, mehrlagigen oder bifilaren Wicklung bestehen, welche sowohl um als auch innerhalb des Entladungsgefäßes gewickelt ist. Die Form der Wicklung der Koppelspule ist dabei beliebig. Sie kann zylindrisch, kegelförmig, sphärisch oder teilkonisch mit zylindrischem Übergangskörper sein. Das Entladungsgefäß 4 mit der dieses umgebenden Koppelspule 5 sowie der Neutralisator 10 sind von einem Triebwerksgehäuse 21 umgeben.

**[0033]** Die Koppelspule 5 ist mit einem Hochfrequenzgenerator 16 verbunden, der aus einer in Spannung und Stromstärke steuerbaren Gleichspannungsquelle eine hochfrequente Ausgangsspannung erzeugt. Zusammen mit einem in dem Hochfrequenzgenerator 16 vorgesehenen Koppelkondensator (nicht dargestellt) bildet die Koppelspule 5 einen Resonanzkreis aus. Der Hochfrequenzgenerator, der eine Feldeinkopplung auf induktiver bzw. kombinierter induktiver und kapazitiver Basis vornehmen kann, ist für einen Einsatz im Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 30 MHz geeignet. Dabei lässt sich ein Wirkungsgrad des Hochfrequenzgenerators erreichen, der im Bereich zwischen 90 und 95 % liegt.

**[0034]** An einem Auslass 7 des Entladungsgefäßes 4 sind zumindest zwei, bevorzugt zwei oder drei, Extraktionsgitter 8 angeordnet, die jeweils zumindest eine Multilochmaske aufweisen. Die Extraktionsgitter 8 dienen als elektrische Linse zur Fokussierung der zu extrahierenden Ionenstrahlen. Die Extraktion erfolgt durch ein elektrisches Feld, das an die Extraktionsgitter 8 angelegt wird. Zu diesem Zweck sind die Extraktionsgitter 8 mit einem Beschleuniger 18 und einer Plasmaaufnahme 17 (auch Plasma Holder genannt) verbunden, die unterschiedliche Potentiale aufweisen. Während die Plasmaaufnahme 17 die Funktion einer Anode hat und eine Spannung von +1200 V erzeugt, stellt der Beschleuniger 18 eine Spannung von -250 V bereit. An die Extraktionsgitter ist ferner ein Verzögerer 19 angeschlossen. Mit dem Bezugszeichen 9 ist die Richtung des Ausstoßes des positiv geladenen Ionenstrahls e<sup>+</sup> aus dem Extraktionsgitter 8 gekennzeichnet. Der positiv geladene Ionenstrahl wird am Ausgang des Entladungsgefäßes 4 mittels negativ geladener Elektronen kompensiert, um eine elektrische Aufladung der Vorrichtung zu verhindern. Mit dem Bezugszeichen 13 ist die Ausstoßrichtung von Elektronen e<sup>-</sup> gekennzeichnet, wobei diese aus dem Neutralisator 10 ausgestoßen werden.

**[0035]** Der Neutralisator 10 umfasst eine Kathodenheizung 11 sowie eine Neutralisationseinheit 12. Eine Elektrode der Kathodenheizung 11 ist mit einer Elektrode der Neutralisationseinheit 12 verbunden. Eine jeweils andere Elektrode der Kathodenheizung 11 und der Neutralisationseinheit 12 ist mit dem Neutralisator 10 gekoppelt. Zwischen den Elektroden der Kathodenheizung 10 besteht beispielsweise ein Potentialunterschied von 9 V, während zwischen den Elektroden der Neutralisationseinheit 12 ein Potentialunterschied von 15 V besteht.

**[0036]** Ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild der Erfindung ist in Fig. 2 dargestellt. In dem elektrischen Ersatzschaltbild wird das neben der erfindungsgemäßen Vorrichtung das in dem Entladungsgefäß befindliche Plasma berücksichtigt. Die Koppelspule 5 und das Plasma arbeiten im vereinfachten Sinne wie ein Transformator (Bezugszeichen 36), wobei das Plasma einer Sekundärwicklung 37 des Transformators 36 entspricht. Die Primärwicklung wird durch die Koppelspule 5 gebildet. Die Widerstände 35 und 38 repräsentieren Leitungswiderstände. Mit dem Bezugszeichen 22 ist der Koppelkondensator gekennzeichnet, der mit der Koppelspule 5 den Resonanzkreis ausbildet. In dem Resonanzkreis sind parasitäre Bauelemente (Widerstand 35 und Kondensator 46) enthalten. Der parasitäre Kondensator 46 repräsentiert z.B. Kapazitäten eines (Koaxial-)kabels und von Ausgangstransistoren. Bei kurzen Leitungslängen und Frequenzen unterhalb von 3 MHz kann die Kapazität des parasitären Kondensators 46 vernachlässigt werden. Ein Hochfrequenzgenerator 16 ist mit der speisenden Spannungsquelle verbunden, so dass die Eingangsspannung U<sub>in</sub> und der Eingangsstrom J<sub>in</sub> anliegen. Ausgangsseitig ist der Hochfrequenzgenerator 16 an den Koppelkondensator 22 angeschlossen. Der

Hochfrequenzgenerator ist in den Figuren auch mit RFG (Radio Frequency Generator) gekennzeichnet.

**[0037]** Fig. 3 zeigt ein vereinfachtes Ersatzschaltbild der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Der Hochfrequenzgenerator 16 ist mit der speisenden Spannungsquelle verbunden, so dass die Eingangsspannung  $U_{in}$  und der Eingangsstrom  $I_{in}$  anliegen. Ausgangsseitig ist der Hochfrequenzgenerator 16 über den Koppelkondensator 22 seriell mit der Koppelspule 5 verbunden. Der Widerstand 35 repräsentiert einen Leitungswiderstand. Vereinfacht ausgedrückt, bedeutet dies, dass die Koppelspule 5, welche üblicherweise um das Entladungsgefäß gewickelt ist, mit dem Koppelkondensator zu einem Serien- oder Parallelresonanzkreis verschaltet ist.

**[0038]** Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung der in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung notwendigen Komponenten. Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass der Hochfrequenzgenerator 16 aus einer in Spannungs- und Stromstärke steuerbaren Gleichspannungsquelle (Energieversorgung 33) eine hochfrequente Ausgangsspannung erzeugt. Der Hochfrequenzgenerator 16 wird unter Einbeziehung der für die induktive Einkopplung notwendigen Koppelspule 5 und eines zusätzlichen Resonanzkondensators, dem sog. Koppelkondensator 22, zu einem Resonanzkreis verschaltet. Zur optimalen Impedanz- und Leistungsanpassung wird die von dem Hochfrequenzgenerator 16 erzeugte Leistung über einen frequenz- und phasengeführten Regelkreis, auf Resonanz und Phasenfehler Null abgeglichen, übertragen. Dies kann beispielsweise den zeitlichen Verläufen von Strom und Spannung am Ausgang des Hochfrequenzgenerators der Fig. 7 entnommen werden. Die obere (Rechteck-)Kurve bildet die Spannung  $U$ , die mittlere (Sinus-)Kurve den Strom  $I$  und die untere die Ansteuerung der Endstufe ab. In der oberen Abbildung ist zusätzlich der Strom dargestellt um die Phasengleichheit zu verdeutlichen. Phasenfehler Null bedeutet, dass Strom und Spannung in dem Resonanzkreis in Phase liegen und somit keine Blindströme fließen. Damit können keine Blindleistungsverluste auftreten, wodurch Schaltverluste nahezu eliminiert sind. Durch den Betrieb bei Resonanz und optimalem Phasenabgleich, hergestellt durch eine PLL-Regelungsvorrichtung, fließen nur sinusförmige Ströme sowohl in den Schaltelementen des Hochfrequenzgenerators 16 als auch im Resonanzkreis und damit in der Koppelspule 5. Der sinusförmige Strom erlaubt das Schalten von Schaltelementen im StromNulldurchgang. Damit ist ein hoher Wirkungsgrad im Bereich von 90 bis 95 % erzielbar.

**[0039]** Der Regelkreis wird, wie bereits erläutert, durch die Koppelspule 5 und die Koppelkapazität 22 gebildet, die im Ausführungsbeispiel der Fig. 6 im Inneren des Hochfrequenzgenerators 16 angeordnet ist. In einer alternativen, nicht dargestellten Ausführungsform, könnte der Koppelkondensator 22 auch als externes Bauteil ausgebildet sein. In dem Resonanzkreis sind ferner zwei Widerstände 35 und 40 verschaltet, welche Leitungswiderstände repräsentieren. Der Koppelkondensator 22 ist

über eine Leitung mit einer Leistungsstufe (Endstufe) 24 gekoppelt, wobei der in dieser Leitung fließende Strom mit einer Strommesseinrichtung 23 erfasst wird. Die Endstufe 24 ist beispielhaft als Klasse-D-Endstufe ausgebildet und wird von einer Ansteuerschaltung 25 angesteuert, welche ein Flip-Flop 47 und Treiberstufen 48, 49 umfasst. Die Treiberstufen 48, 49 treiben über Transformatoren Endstufen 52, 53 der Endstufe 24. Die Ansteuerschaltung 25 ihrerseits ist mit einer PLL-Regelungseinrichtung 34 verbunden. Diese umfasst einen spannungsgesteuerten Oszillator 26 (VCO = Voltage Controlled Oscillator), ein damit gekoppeltes Filter 27 sowie einen mit dem Filter 27 gekoppelten digitalen Phasenkomparator 28. Die PLL-Regelungsvorrichtung 34 ist über ein Eingangsfiler 31 mit der externen Energieversorgung 33 gekoppelt. Über ein Eingangsfiler 32 ist ebenfalls die Endstufe 24 mit der Energieversorgung 33 verbunden. Die PLL-Regelungsvorrichtung 34, genauer der digitale Phasenkomparator 28, erhält als Eingangssignal einen durch die Strommesseinrichtung 23 gemessenen Strom, der durch einen Signalverstärker 29 verstärkt ist. Ferner wird eine am Ausgang der Endstufe 24 anliegende Spannung über einen weiteren Signalverstärker 30 einem Eingang des digitalen Phasenkomparators 28 zugeführt. Eine Leistungsanpassung kann im Mikrosekunden-Bereich durch den exakten Phasenabgleich von Strom und Spannung in den Schaltelementen der Ansteuerschaltung 25 und dem Resonanzkreis erfolgen und führt zu einem nahezu verlustfreien Schalten der Endstufe 24 und damit einer optimalen Leistungseinkopplung in das in das Entladungsgefäß 4 eingeleitete Plasma.

**[0040]** Ein derartiger Hochfrequenzgenerator mit PLL-Regelung eignet sich deshalb besonders für die hochfrequente Energieversorgung von Ionenquellen (TWK) sowie in Elektronenquellen (NTR) mit induktiver Anregung sowie für Anwendungen, bei denen es auf geringsten Energieverbrauch ankommt.

**[0041]** Die Erfindung ermöglicht als Endstufe in dem Hochfrequenzgenerator 16 den Einsatz von Halbbrücken in Verbindung mit einer PLL-Frequenz- und Phasenregelung sowie einer Resonanzkreisankopplung. Im Ausführungsbeispiel der Fig. 4 ist ein Serienresonanzkreis dargestellt, welcher im Frequenz- und Leistungsbereich von 600 kHz bis 14 MHz bzw. 1 W bis 3 kW arbeiten kann. Die als Halbbrücke ausgebildete Endstufe 24 ist zwischen einem Versorgungs- und einem Bezugspotentialanschluss verschaltet und umfasst in bekannter Weise zwei mit ihren Laststrecken seriell zueinander verschaltete Schaltelemente 44, im Ausführungsbeispiel in Form von MOSFETs. Diese werden durch die Ansteuerschaltung 25 angesteuert. Die Koppelkapazität 22 ist mit einem Knotenpunkt 38, welcher jeweils mit einem Hauptanschluss der Schaltelemente 44 verbunden ist, gekoppelt. Ein Widerstand 45 des Resonanzkreises, der einen Spulenwiderstand repräsentiert, ist mit Bezugspotential, z.B. Masse, verbunden. Die Schaltelemente 44 werden durch die Ansteuerschaltung 25 angesteuert, die mit einer in Strom und Spannung veränder-

lichen Energieversorgung verbunden ist.

**[0042]** Fig. 5 zeigt ein weiteres Prinzipschaltbild einer als Vollbrücke ausgestalteten Endstufe 24 des Hochfrequenzgenerators. Eine als Vollbrücke ausgebildete Endstufe eignet sich für einen Frequenzbereich von 600 kHz bis 5 MHz und einen Leistungsbereich von 2 kW bis 10 kW. In bekannter Weise umfasst die Endstufe 24 jeweils zwei parallel verschaltene Halbbrückenzeige, die zwischen einem Versorgungs- und einem Bezugspotentialanschluss verschaltet sind und jeweils zwei mit ihren Laststrecken seriell verschaltete Schaltelemente 44 in Form von MOSFETS umfassen. Der Resonanzkreis, umfassend die Koppelspule 5, den Koppelkondensator 22 sowie den Leitungswiderstand 35, ist mit einem Knotenpunkt 39 einer ersten Halbbrücke und einem Knotenpunkt 41 einer zweiten Halbbrücke der Endstufe 24 verbunden. Ferner ist der Energieversorgung 33 ein Glättungskondensator 54 parallel geschaltet.

**[0043]** Der Übersichtlichkeit halber sind in den Fig. 4 und 5 weder die Ansteuerschaltung zur Ansteuerung der Schaltelemente 44 noch die PLL-Regelungsvorrichtung zur Anpassung der Frequenz und Phase dargestellt.

**[0044]** Fig. 8 stellt ein elektrisches Schaltbild möglicher Ankopplungen von Koppelspulen an einen Hochfrequenzgenerator dar. Eine Ankopplung des Hochfrequenzgenerators 16 an die Ionen- oder Elektronenquelle kann über einfache Serienresonanzkreise oder Parallelresonanzkreise in Verbindung mit einer PLL-Phasenregelung erfolgen. Ebenso kann die Ankopplung über einen Serien-/Parallelresonanzkreis erfolgen, wobei die Koppelspule 5 eine Mittelanzapfung besitzt (linke Hälfte der Fig. 8). Deren zwei freie Enden können jeweils mit einem Bezugspotential, im Ausführungsbeispiel Masse, verbunden sein. Parallel dazu ist ein Kondensator 55 verschaltet. Nicht dargestellt ist der Einfachheit halber die PLL-Frequenz-/Phasenregelung. Der Resonanzkreis umfasst ferner den Koppelkondensator 22 sowie den Leitungswiderstand 35. Eine dem PLL-Regelkreis zugeführte Spannung wird über den Widerstand 35 abgegriffen, wobei diese Punkte mit v gekennzeichnet sind. Der dem PLL-Regelkreis als Regelgröße zugeführte Strom wird an dem mit I gekennzeichneten Punkt abgegriffen. In der rechten Hälfte der Fig. 8 ist eine Darstellung gewählt, bei der die Koppelspule 5 zwischen zwei Koppelkondensatoren 22a und 22b angeordnet ist. Beide Enden der Koppelspule 5 sind kapazitiv angeschlossen. Nicht dargestellt ist der Leitungswiderstand. Nicht dargestellt ist ferner die gemäß dem erfindungsgemäßen Gedanken vorgesehene PLL-Frequenz-Phasenregelung sowie der Hochfrequenzgenerator. Durch die beschriebene Ankopplung steigen der Wirkungsgrad des Hochfrequenzgenerators und der Wirkungsgrad der Ionen- oder Elektronenquelle erheblich. In beiden Baugruppen treten keine Blindströme auf, wodurch die Verlustleistung jeweils sinkt. Durch eine optimierte Wahl der Windungszahl der Spule können sowohl eine optimale Plasmaeinkopplung als auch optimale Betriebsparameter (Betriebsspannung und Strom) des Hochfrequenzgenerators erreicht wer-

den.

**[0045]** Fig. 9 zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung der Ankopplung einer Koppelspule über einen Zusatz-Transformator 42 an den Hochfrequenzgenerator 16. Durch den Zusatz-Transformator 42 ist eine zusätzliche transformatorische Impedanzanpassung, insbesondere im Frequenz- und Leistungsbereich von 600 kHz bis 5 MHz bzw. 1 W bis 1 kW möglich. Der Zusatz-Transformator 42 weist im Ausführungsbeispiel eine Mittelanzapfung auf. Ein dem Hochfrequenzgenerator 16 nachgeschalteter Kondensator 54 dient zur Gleichspannungsentkopplung des Zusatz-Transformators 42.

**[0046]** Fig. 10 zeigt eine Darstellung von Frequenzbandbreite und Resonanzkreisgüte bzw. Frequenzverstimmung sowie Phasengang einer Ionenquelle bei verschiedenen Plasmazuständen. Die unterschiedlichen Gütekurven des Resonanzkreises sind durch unterschiedliche Impedanzen des Plasmas aufgrund unterschiedlicher Ionisationsgrade verursacht. So hat die steilste Kurve in der unteren Graphik die größte Güte und die kleinste Bandbreite. Die Darstellung veranschaulicht, dass der erfindungsgemäße Regelkreis auf Güten unterschiedlichster Art reagiert und stabil einrastet. Die in der oberen Hälfte der Figur angegebenen Kurven zeigen, dass sich durch eine Veränderung der Plasma-Impedanzen Ionenströme unterschiedlicher Phasenlage ergeben, welche durch den Phasenregelkreis kompensiert werden.

**[0047]** Fig. 11 zeigt ein weiteres Prinzipschaltbild, das den Einsatz der PLL-Regelungsvorrichtung zur Steuerung des Hochfrequenzgenerators darstellt. Die Endstufe 24 ist im Beispiel als Klasse-D-Halbbrücke ausgebildet, wobei der Resonanzkreis mit dem Knotenpunkt 39 gekoppelt ist. Zwischen dem Knotenpunkt 39 und einem Widerstand 35 ist eine Strommesseinrichtung 23 vorgesehen. Der Widerstand 35 stellt einen Leitungswiderstand dar. Der seriell dazu verschaltete Widerstand 45 repräsentiert einen Spulenwiderstand. Zwischen dem Knotenpunkt 39 und einem Bezugspotential wird eine Spannung abgegriffen. Diese Spannung und ein durch die Strommesseinrichtung 23 gemessener Strom werden den Eingängen eines Phasenkomparators 28 zugeführt. Die an dem Phasenkomparator 28 anliegende Ausgangsspannung wird gefiltert an den Eingang des spannungsgesteuerten Oszillators 26 zugeführt. Diese Steuerungsspannung wird von dem Phasenkomparator, der die Funktion eines Fehlerverstärkers hat, verändert, bis an seinen Eingängen eine Frequenz- und Phasengleichheit vorliegt. Über ein Flip-Flop 47 werden Treiberstufen 48, 49 angesteuert, die über Transformatoren 50, 51 Endstufen 52, 53 ansteuern bzw. treiben.

**[0048]** Fig. 12 zeigt eine Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator, der eine Klasse-D-Vollbrücke mit PLL-Regelung aufweist. Der Resonanzkreis ist als Serienresonanzkreis ausgebildet. Die übrigen Bauelemente und deren Verschaltung entsprechen der Beschreibung zu Fig. 11.

**[0049]** In Fig. 13 ist eine Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator dargestellt, der eine Klasse-E-Endstufe mit PLL-Regelung aufweist. Der Resonanzkreis ist als Serienresonanzkreis ausgebildet und umfasst den Koppelkondensator 22, die Koppelspule 5 und den Leitungswiderstand 35 und den Spulenwiderstand 45. Der Einsatz einer Klasse-E-Endstufenschaltung für den Hochfrequenzgenerator mit PLL-Frequenz- und Phasenregelung und Resonanzkreisankopplung, insbesondere einem Serien-/Parallelresonanzkreis einschließlich der Koppelspule, wird bevorzugt im Frequenz- und Leistungsbereich von 600 kHz bis 30 MHz bzw. 1 W bis 500 W eingesetzt. Die Spule 56 ist Bestandteil des Klasse-E-Verstärkers und um ein Vielfaches größer als die Spule 5. Sie dient als Energiespeicher, wenn die Endstufe 52 gesperrt ist. Die übrigen Bauelemente und deren Verschaltung entsprechen der Beschreibung zu Fig. 11.

**[0050]** Fig. 14 zeigt ein elektrisches Ersatzschaltbild einer Vorrichtung mit einem Hochfrequenzgenerator, der eine Klasse-D-Halbbrücke mit PLL-Regelung und zusätzlicher transformatorischer Aufwärtsanpassung aufweist. Hierzu sind ein Transformator 57 und ein Kondensator 58 mit dem Ausgang der Endstufen 52, 53 verschaltet. Der Kondensator 58 ist dabei in bekannter Weise mit einer Mittelpunktanzapfung des Transformators 57 verbunden. Die übrigen Bauelemente und deren Verschaltung entsprechen der Beschreibung zu Fig. 11.

**[0051]** Schließlich zeigt Fig. 15 ein Ausführungsbeispiel einer möglichen kapazitiven Impedanztransformation, welche bei sämtlichen Verstärkerklassen (Klasse C, Klasse D, Klasse E, Klasse F) zum Einsatz kommen kann. Mit einer derartigen Impedanztransformation ist es möglich, die Impedanz des Plasmas bzw. eine Eingangsimpedanz  $Z_i$  des Resonanzkreises zu variieren und damit die Effizienz, den Frequenzbereich sowie den Spannungsbereich (zur Schubauflösung) zu optimieren. Der Widerstand 38 repräsentiert den Widerstand des Plasmas. Dem Widerstand 38 kann ein Kondensator 59 parallel geschaltet sein. Der Widerstand 60 und der dazu parallel geschaltete Kondensator 61 repräsentieren Elemente des Hochfrequenzgenerators. Die Kondensatoren 22, 61 repräsentieren Resonanzkondensatoren, die Spule 5 ist die Koppelspule.

**[0052]** Der Vorteil sämtlicher beschriebener Varianten besteht darin, dass eine Leistungseinkopplung der von dem Hochfrequenzgenerator erzeugten Energie über einen großen Leistungs- und Frequenzbereich ohne Impedanzanpassungsnetzwerk direkt in das Plasma der Ionen- oder Elektronenquelle möglich ist. Kern der Leistungsanpassung ist dabei die Einbeziehung der Koppelspule, konstruktionsbedingter Koppelkapazitäten zwischen dem Plasma und dem Gehäuse des Entladungsgefäßes sowie der Verkabelung zu einem Serien-/oder Parallelresonanzkreis, sowie die automatische Frequenz- und Phasenregelung des Hochfrequenzgenerators.

## Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Einkopplung von Ionisationsenergie in eine induktiv oder induktiv-kapazitiv angeregte Ionen- oder Elektronenquelle, mit

- einem Entladungsgefäß (4) für ein zu ionisierendes Gas,
- einer um das Entladungsgefäß (4) gewickelten Koppelspule (5) zur Einspeisung einer zur Plasma-Anregung notwendigen Hochfrequenz-Energie,
- einem mit der Koppelspule (5) elektrisch gekoppelten Koppelkondensator (22),
- einem mit der Koppelspule (5) elektrisch gekoppelten Hochfrequenzgenerator (16), der zusammen mit dem zumindest einen Koppelkondensator (22) einen Resonanzkreis ausbildet, wobei der Hochfrequenzgenerator (16) eine PLL-Regelungsvorrichtung (34) zur automatischen Impedanzanpassung des Resonanzkreises aufweist, so dass der Resonanzkreis mit einer Resonanzfrequenz betreibbar ist,

wobei der zumindest eine Koppelkondensator (22) und die Koppelspule über einen Transformator (42) an den Hochfrequenzgenerator angeschlossen sind, wobei der Transformator (42) primärseitig kapazitiv mit dem Hochfrequenzgenerator gekoppelt ist und sekundärseitig mit dem zumindest einen Koppelkondensator (22) und der Koppelspule (5) den Resonanzkreis bildet, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hochfrequenzgenerator (16) ohne Zwischenschaltung eines Impedanzanpassungsnetzwerks mit der Koppelspule verbunden ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch die PLL-Regelungsvorrichtung (34) eine Frequenz- und/oder Phasenregelung zur Impedanzanpassung des Resonanzkreises durchgeführt wird.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leistungsregelung des Hochfrequenzgenerators (16) durch Einstellung einer Eingangsspannung ( $U_{in}$ ) und eines Eingangsstroms ( $I_{in}$ ) des Hochfrequenzgenerators (16) vornehmbar ist.

4. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Resonanzkreis als Serien- oder Parallelresonanzkreis ausgebildet ist.

5. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) über eine Mittelpunktanzapfung (41) verfügt, an welche der Hochfrequenzgenerator (16) ange-



geschlossen ist.

6. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) zwischen zwei oder mehreren Koppelkondensatoren (22a, 22b) angeordnet ist. 5
7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Vorrichtung zur Erfassung von Strom und Spannung in dem Resonanzkreis vorgesehen ist, welche mit der PLL-Regelungsvorrichtung (34) gekoppelt ist, um dieser den gemessenen Strom und die gemessene Spannung als Regelgrößen zuzuführen. 10
8. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine Koppelkondensator (22) in dem Hochfrequenzgenerator (16) oder außerhalb von diesem angeordnet ist. 15
9. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) einseitig geerdet ist. 20
10. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) isoliert zu einem Bezugspotential über den Resonanzkreis angeschlossen ist. 25
11. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) und das Plasma einen Transformator ausbilden, wobei das Plasma eine Sekundärwicklung des Transformators darstellt. 30
12. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hochfrequenzgenerator (16) eine Leistungsstufe (24) umfasst. 35
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leistungsstufe (24) wahlweise als eine der nachfolgend aufgeführten Varianten ausgebildet ist: 40
  - Halbbrücken-Klasse-D-Endstufe;
  - Vollbrücken-Klasse-D-Endstufe;
  - Push-Pull-Endstufe;
  - Endstufe der Klasse E;
  - Endstufe der Klasse F;
  - Endstufe der Klasse C.
14. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch den Hochfrequenzgenerator (16) eine Resonanzfrequenz im Bereich von 0,5 MHz bis 30 MHz einstellbar ist. 55

15. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die in den Hochfrequenzgenerator (16) eingekoppelte Leistung im Bereich von 1 W bis 10 kW ist.
16. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die an den Hochfrequenzgenerator (16) gekoppelte Lastimpedanz in einem Bereich von 0,1 Ohm bis 1 Ohm oder in einem Bereich von 1 Ohm bis 50 Ohm liegt.
17. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Entladungsgefäß (4) einen Gaseinlass (6) und einen gegenüberliegend angeordneten Auslass (7) mit zumindest zwei Extraktionsgittern (8) mit jeweils einer Multi Lochmaske umfasst, welche als elektrische Linse zur Fokussierung der zu extrahierenden Ionenstrahlen dient.
18. Vorrichtung nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** an die Extraktionsgitter (8) ein elektrisches Feld anlegbar ist.
19. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) eine einlagige oder eine mehrlagige oder eine bifilare Wicklung umfasst.
20. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) um das Entladungsgefäß (4) oder innerhalb des Entladungsgefäßes angeordnet ist.
21. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Koppelspule (5) zylindrisch, kegelförmig, sphärisch oder teilkonisch mit zylindrischem Übergangskörper um das Entladungsgefäß entsprechender Form gewickelt ist.

## Claims

1. Device for coupling ionisation energy into an ion or electron source, which is excited inductively or inductively-capacitively, and which comprises 45
  - a discharge vessel (4) for a gas to be ionized,
  - a coupling coil (5), which is wound around the discharge vessel (4) for feeding a high-frequency energy, which is required for plasma excitation,
  - a coupling capacitor (22), which is electrically coupled to the coupling coil (5),
  - a high-frequency generator (16), which is electrically coupled to the coupling coil (5) and which forms together with the at least one coupling ca-

pacitor (22) a resonant circuit, the high-frequency generator (16) including a PLL controller (34) for automatic impedance matching of the resonant circuit, so that the resonant circuit can be driven at a resonant frequency,

wherein

the at least one coupling capacitor (22) and the coupling coil are connected to the high-frequency generator via a transformer (42), wherein on the primary side the transformer (42) is capacitively coupled to the high-frequency generator and on the secondary side forms the resonant circuit with the at least one coupling capacitor (22) and the coupling coil (5), **characterized in that** the high-frequency generator (16) is connected to the coupling coil without interposing an impedance matching network.

2. Device according to claim 1, **characterized in that** a frequency and/or phase control for impedance matching of the resonant circuit is carried out by the PLL controller (34).
3. Device according to claim 1 or 2, **characterized in that** the power control of the high-frequency generator (16) can be performed by adjusting an input direct voltage ( $U_{in}$ ) and an input current ( $I_{in}$ ) of the high-frequency generator (16).
4. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the resonant circuit is a series or parallel resonant circuit.
5. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) has a centre tap (41), to which the high-frequency generator (16) is attached.
6. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) is disposed between two or more coupling capacitors (22a, 22b).
7. Device according to any of the preceding claims, **characterized in that** a device for detecting current and voltage in the resonant circuit is provided, which is coupled to the PLL controller (34) in order to feed the measured current and the measured voltage as controlled variables thereto.
8. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the at least one coupling capacitor (22) is disposed in the high-frequency generator (16) or outside the high-frequency generator (16).
9. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) is ground-

ed unilaterally.

10. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) is attached insulated from a reference potential via the resonant circuit.
11. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) and the plasma form a transformer, the plasma representing a secondary winding of the transformer.
12. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the high-frequency generator (16) comprises a power output stage (24).
13. Device according to claim 12, **characterized in that** the power output stage (24) is optionally configured as one of the variants listed below:
  - half bridge Class D output stage;
  - full bridge class D output stage;
  - push pull output stage;
  - output stage of class E;
  - output stage of class F;
  - output stage of class C.
14. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** a resonant frequency is set in a range of 0.5 MHz to 30 MHz by the high-frequency generator (16).
15. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the power that is coupled into the high frequency generator (16) is in a range of 1 W to 10 kW.
16. Device according to any one of the foregoing claims, **characterised in that** the load impedance, which is coupled to the radio frequency generator (16), is in a range of 0.1 ohm to 1 ohm or in a range of 1 ohm to 50 ohm.
17. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the discharge vessel (4) includes a gas inlet (6) and an outlet (7), which are arranged opposite each other, with at least two extraction grids (8), each of which has one multi-apertured mask, which serves as an electric lens for focusing the ion beams that are to be extracted.
18. Device according to claim 17, **characterised in that** an electric field can be applied to the extraction grids (8).
19. Device according to any one of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) comprises a single layered or a multi-layered or a bifilar winding.

20. Device according to any of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) is disposed around the discharge vessel (4) or inside the discharge vessel.
21. Device according to any of the previous claims, **characterized in that** the coupling coil (5) is wound about the discharge vessel of the corresponding shape in a cylindrical, conical, spherical or partially conical manner with a cylindrical transition body.

## Revendications

1. Dispositif pour le couplage d'une énergie d'ionisation dans une source d'ions ou d'électrons excitée par induction ou par induction-capacité, comportant

- un récipient de décharge (4) pour un gaz à ioniser,
- une bobine de couplage (5) enroulée autour du récipient de décharge (4) pour l'alimentation en énergie à haute fréquence nécessaire pour l'excitation d'un plasma,
- un condensateur de couplage (22) couplé électriquement à la bobine de couplage (5),
- un générateur de haute fréquence (16) couplé électriquement à la bobine de couplage (5), qui forme avec ledit au moins un condensateur de couplage (22) un circuit résonant, le générateur de haute fréquence (16) présentant un dispositif de régulation PLL (34) pour l'adaptation automatique de l'impédance du circuit résonant afin que le circuit résonant puisse fonctionner à une fréquence de résonance,

dans lequel ledit au moins un condensateur de couplage (22) et la bobine de couplage sont connectés au générateur de haute fréquence par l'intermédiaire d'un transformateur (42), le transformateur (42) étant couplé de manière capacitive au générateur de haute fréquence du côté primaire et forme avec ledit au moins un condensateur de couplage (22) et la bobine de couplage (5) le circuit résonant du côté secondaire,

### **caractérisé en ce que**

le générateur de haute fréquence (16) est relié à la bobine de couplage sans interposition d'un réseau d'adaptation d'impédance.

2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le dispositif de régulation PLL (34) effectue une régulation de fréquence et/ou de phase pour adapter l'impédance du circuit résonant.
3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** la régulation de puissance du générateur de haute fréquence (16) peut être effectuée par ré-

glage d'une tension continue d'entrée ( $U_{in}$ ) et d'un courant d'entrée ( $I_n$ ) du générateur de haute fréquence (16).

4. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le circuit résonant est réalisé sous la forme d'un circuit résonant série ou parallèle.
5. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) dispose d'une prise centrale (41) à laquelle le générateur de haute fréquence (16) est connecté.
6. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) est disposée entre deux ou plusieurs condensateurs de couplage (22a, 22b).
7. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** est prévu un dispositif de détection du courant et de la tension dans le circuit résonant, lequel est couplé au dispositif de régulation PLL (34) afin de lui fournir le courant mesuré et la tension mesurée en tant que grandeurs réglées.
8. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ledit au moins un condensateur de couplage (22) est disposé dans le générateur de haute fréquence (16) ou à l'extérieur de celui-ci.
9. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) est mise à la terre à une extrémité.
10. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) est connectée de manière isolée à un potentiel de référence via le circuit résonant.
11. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) et le plasma forment un transformateur, le plasma constituant un enroulement secondaire du transformateur.
12. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le générateur de haute fréquence (16) comprend un étage final de puissance (24).
13. Dispositif selon la revendication 12, **caractérisé en ce que** l'étage final de puissance (24) est réalisé au choix sous la forme de l'une des variantes énumérées ci-dessous :

- étage final de classe D en demi-pont ;

- étage final de classe D en pont intégral ;
  - étage final en push-pull ;
  - étage final de classe E ;
  - étage final de classe F ;
  - étage final de classe C. 5
14. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le générateur de haute fréquence (16) peut régler une fréquence de résonance dans la gamme de 0,5 MHz à 30 MHz. 10
15. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la puissance couplée dans le générateur de haute fréquence (16) se situe dans la plage de 1 W à 10 kW. 15
16. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'impédance de charge couplée au générateur de haute fréquence (16) se situe dans une plage de 0,1 ohm à 1 ohm ou dans une plage de 1 ohm à 50 ohms. 20
17. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le récipient de décharge (4) comprend une entrée de gaz (6) et une sortie (7) disposée à l'opposé avec au moins deux grilles d'extraction (8) présentant chacune un masque à trous multiples qui sert de lentille électrique pour focaliser les faisceaux d'ions à extraire. 25  
30
18. Dispositif selon la revendication 17, **caractérisé en ce qu'un** champ électrique peut être appliqué aux grilles d'extraction (8).
19. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) comprend un enroulement monocouche, multicouche ou bifilaire. 35
20. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) est disposée autour du récipient de décharge (4) ou à l'intérieur du récipient de décharge. 40
21. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la bobine de couplage (5) est cylindrique, conique, sphérique ou partiellement conique avec un corps de transition cylindrique enroulé autour du récipient de décharge de forme correspondante. 45  
50

55

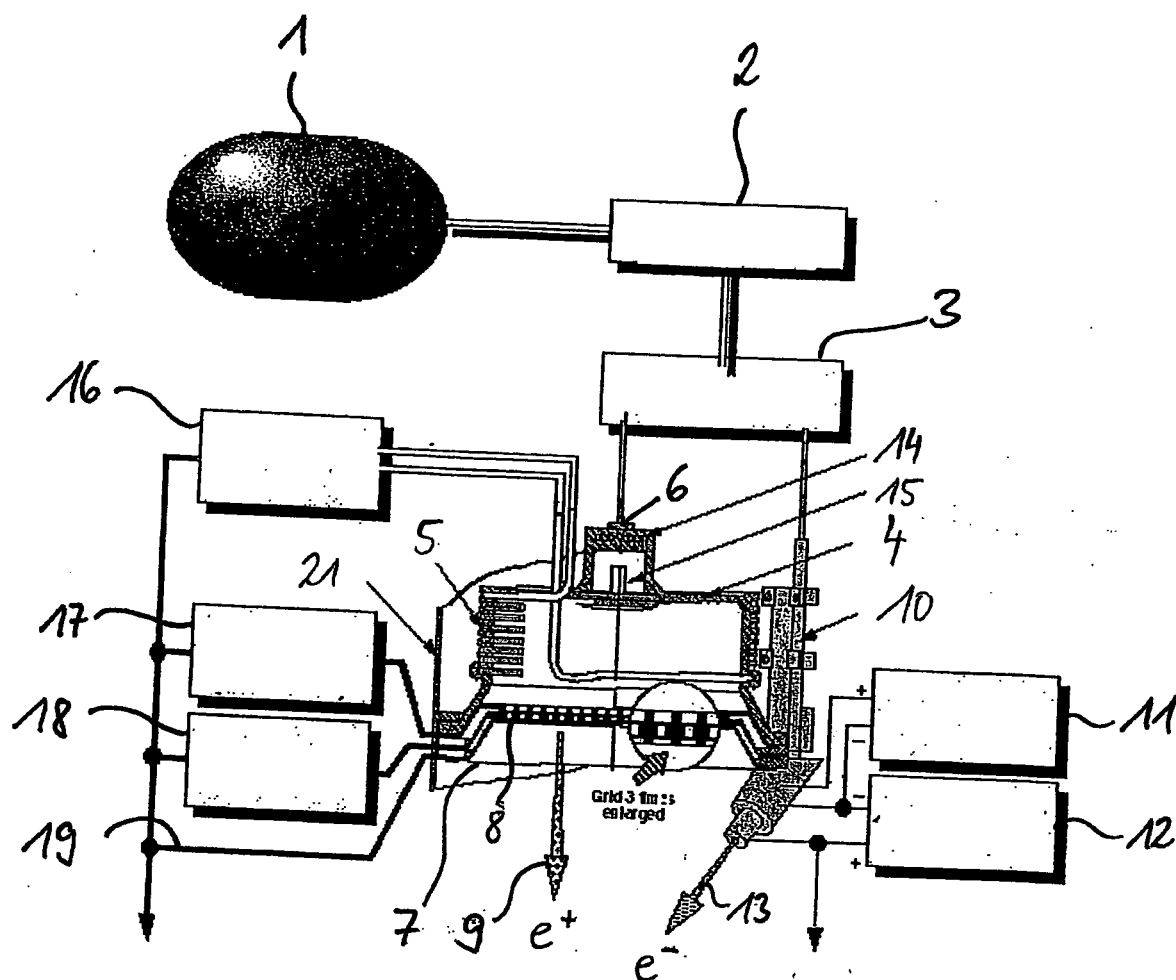


Fig. 1

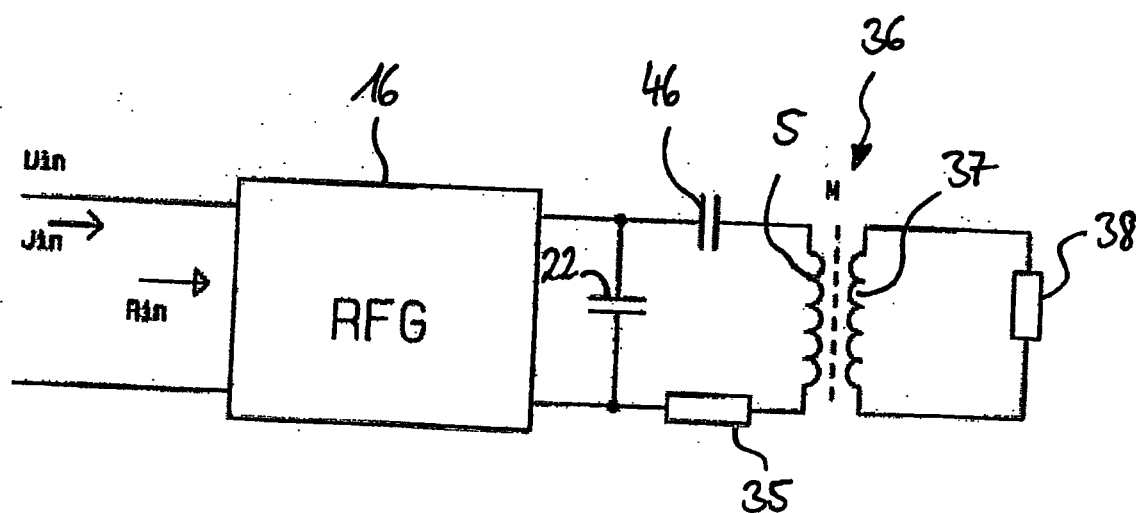


Fig. 2

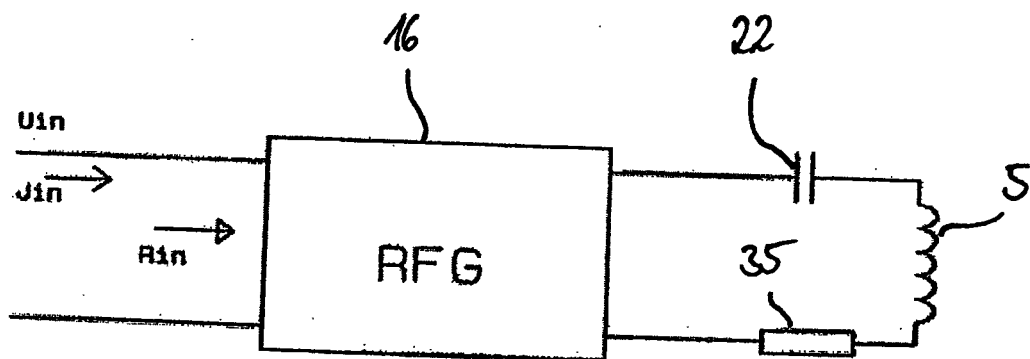


Fig. 3

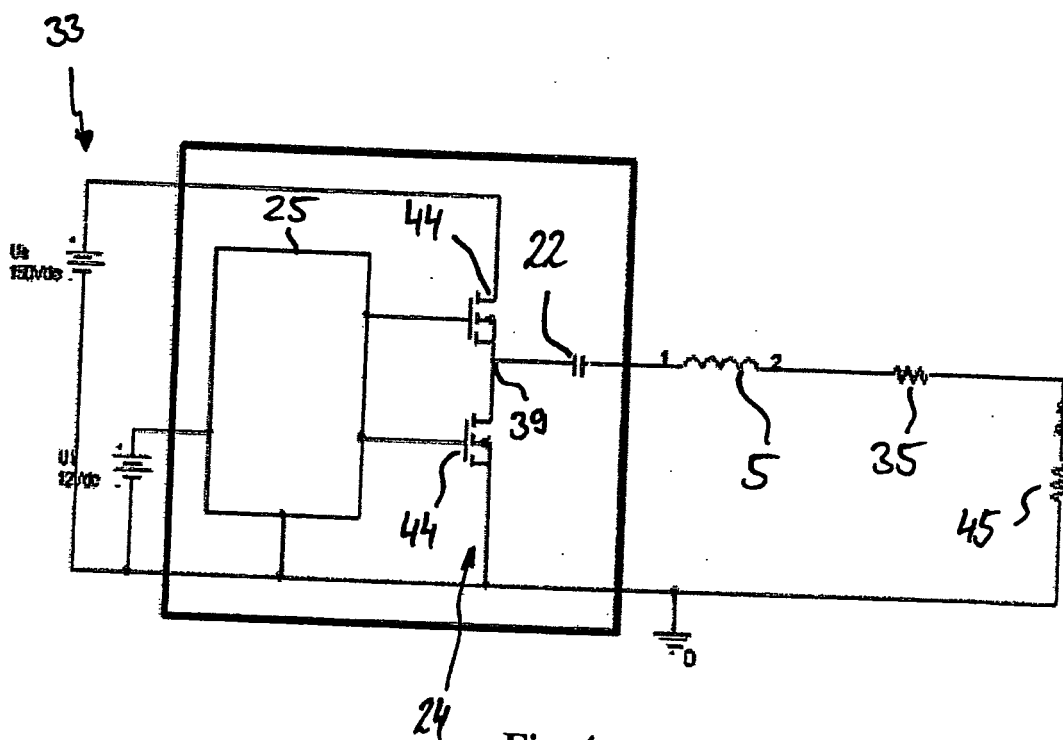


Fig. 4

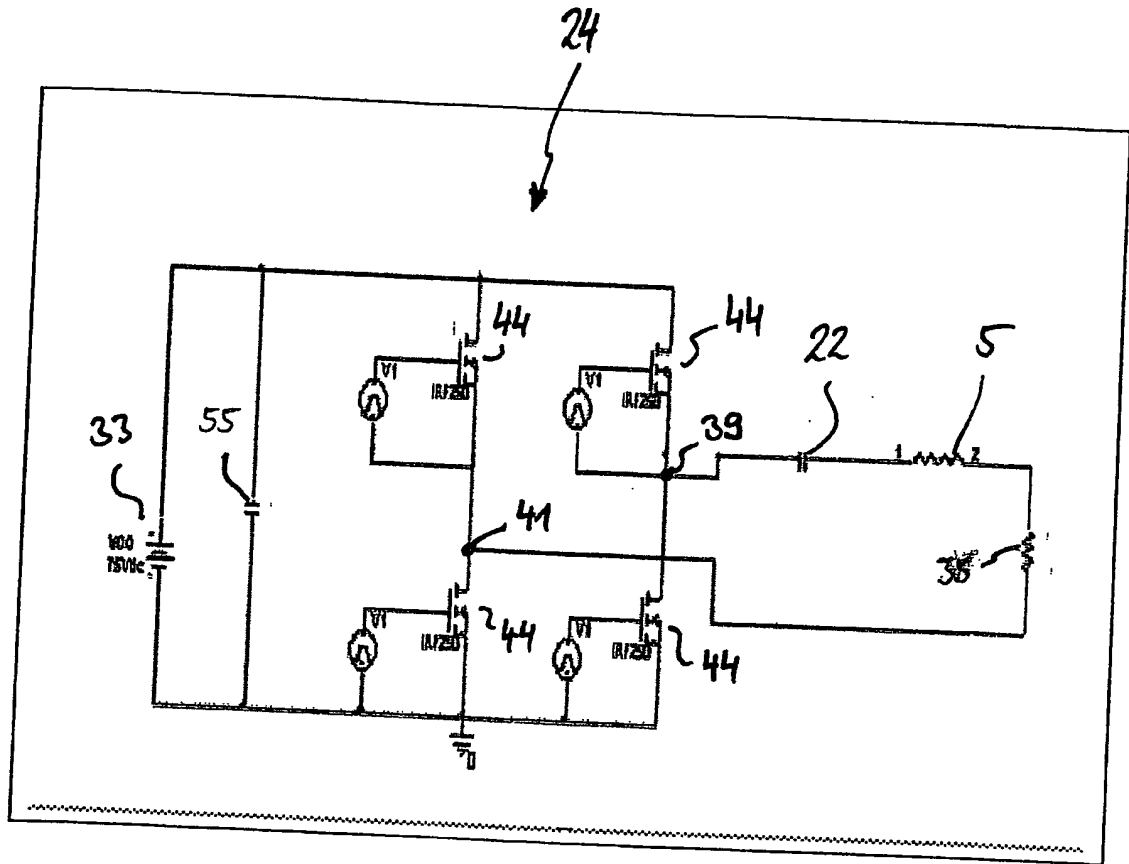


Fig. 5

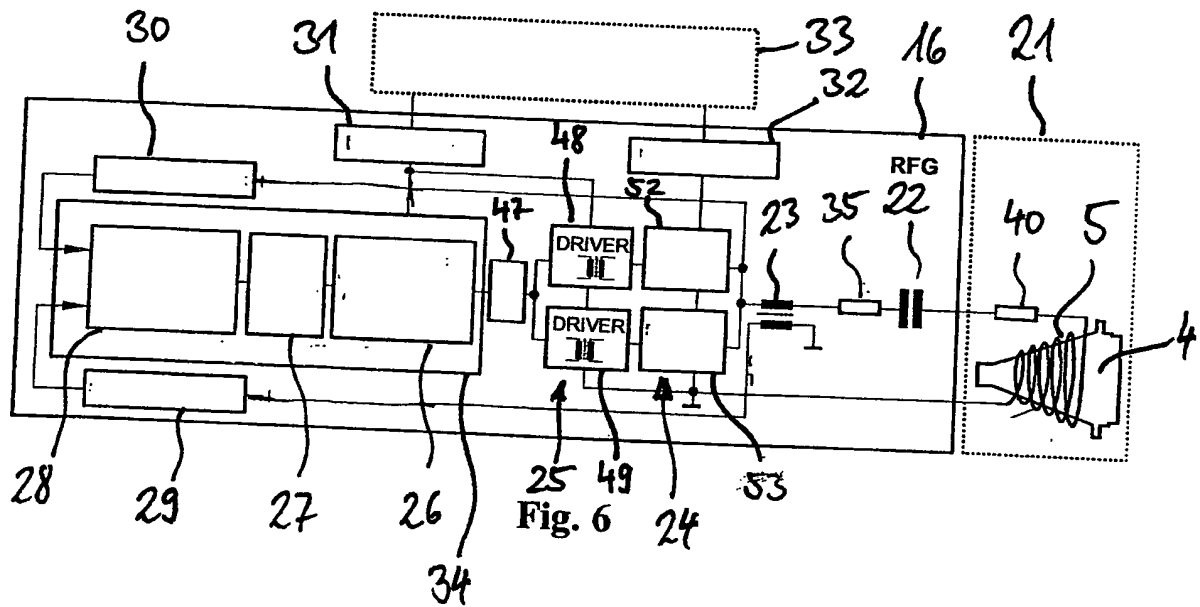


Fig. 6

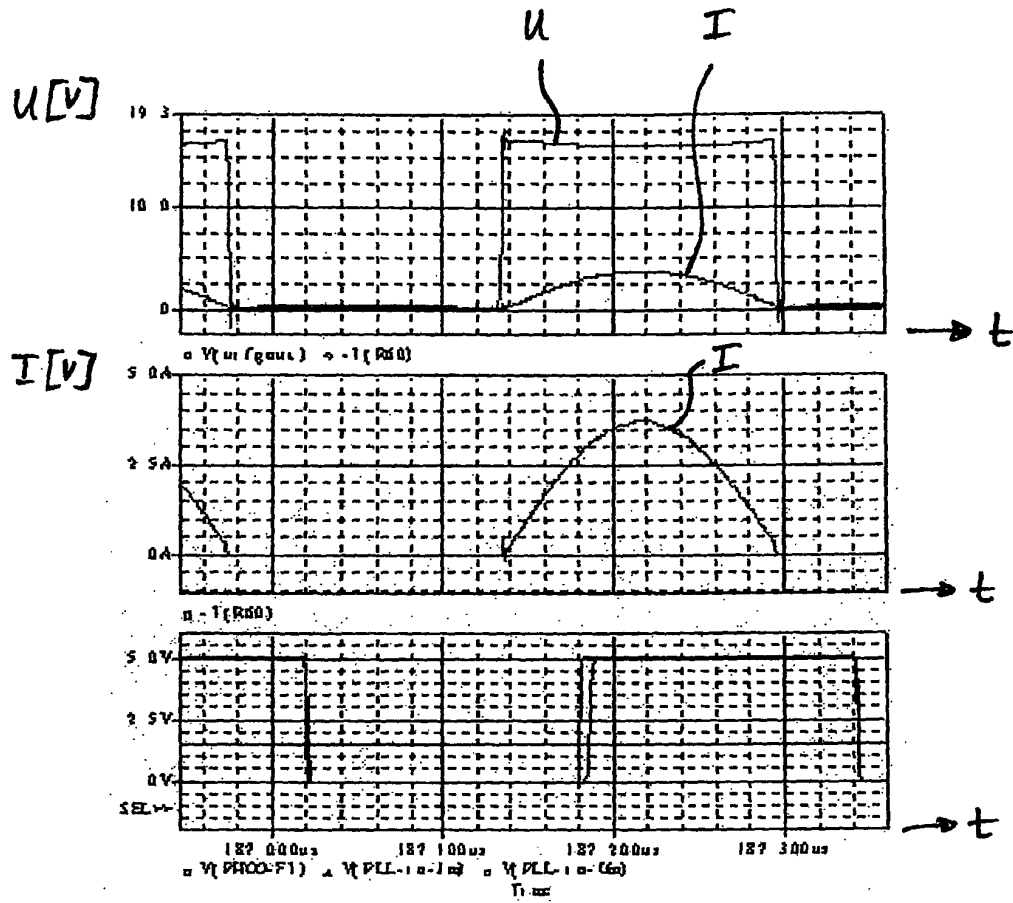


Fig. 7

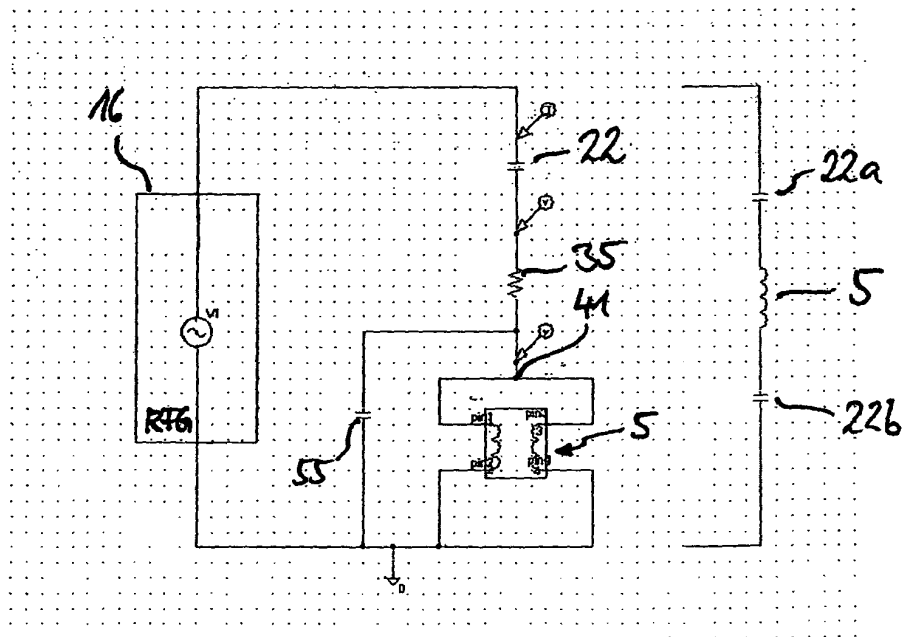


Fig. 8



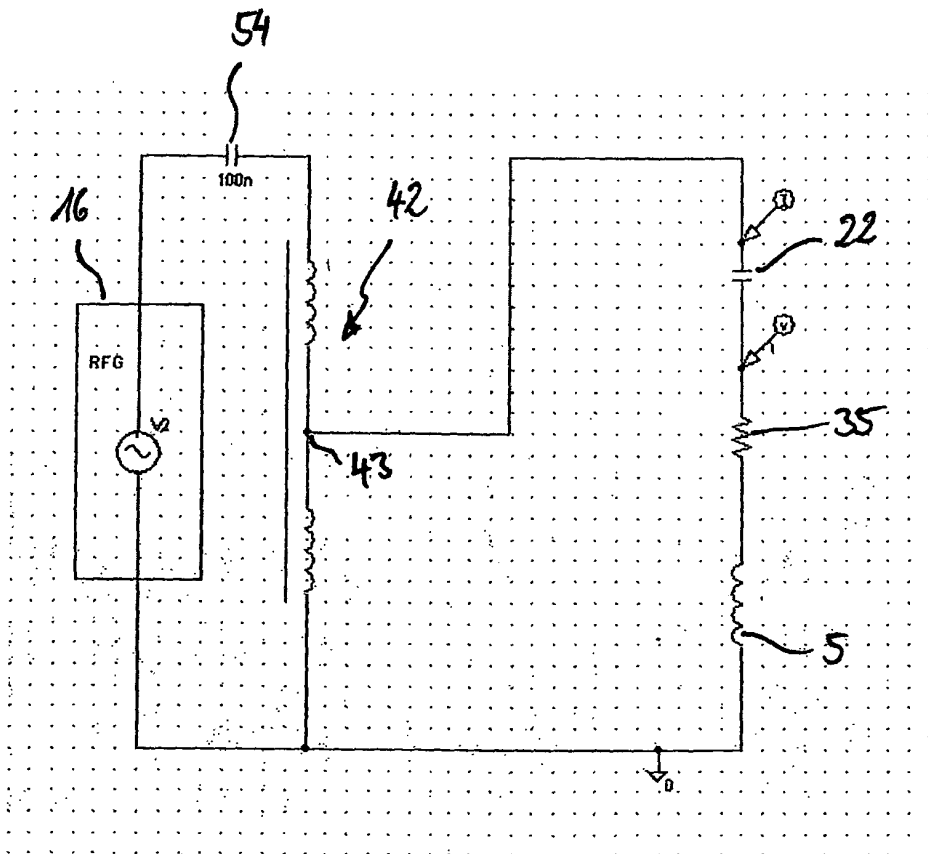


Fig. 9

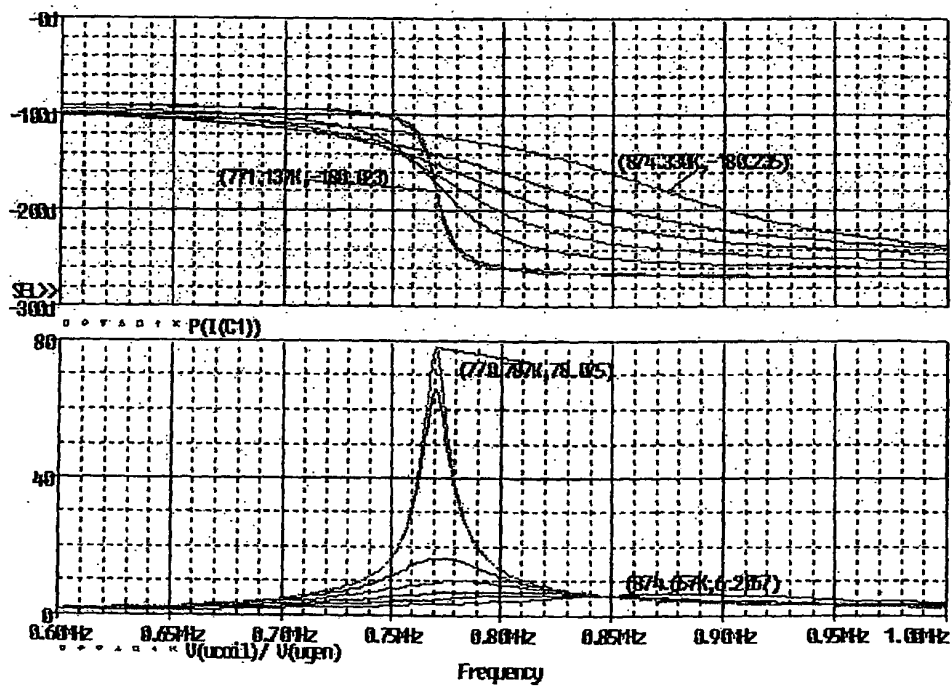


Fig. 10

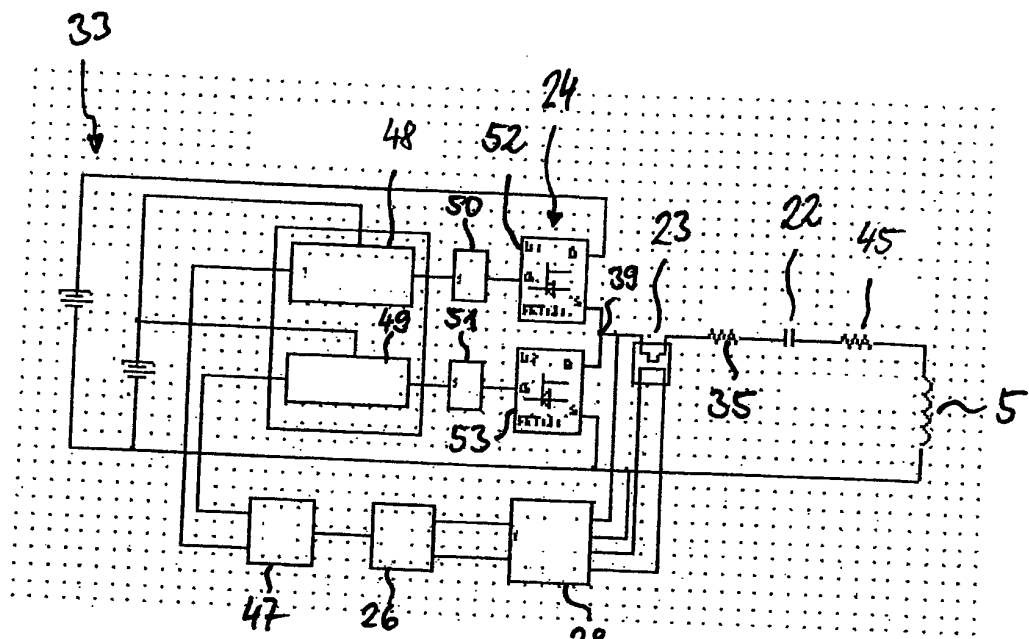


Fig. 11

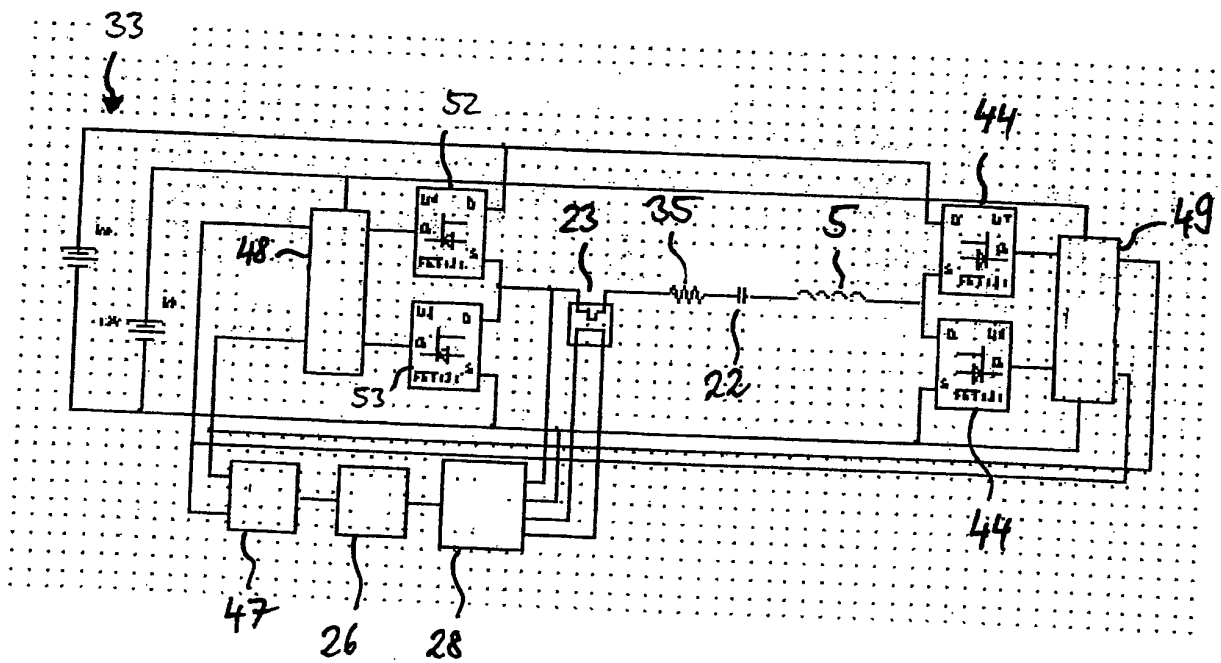


Fig. 12

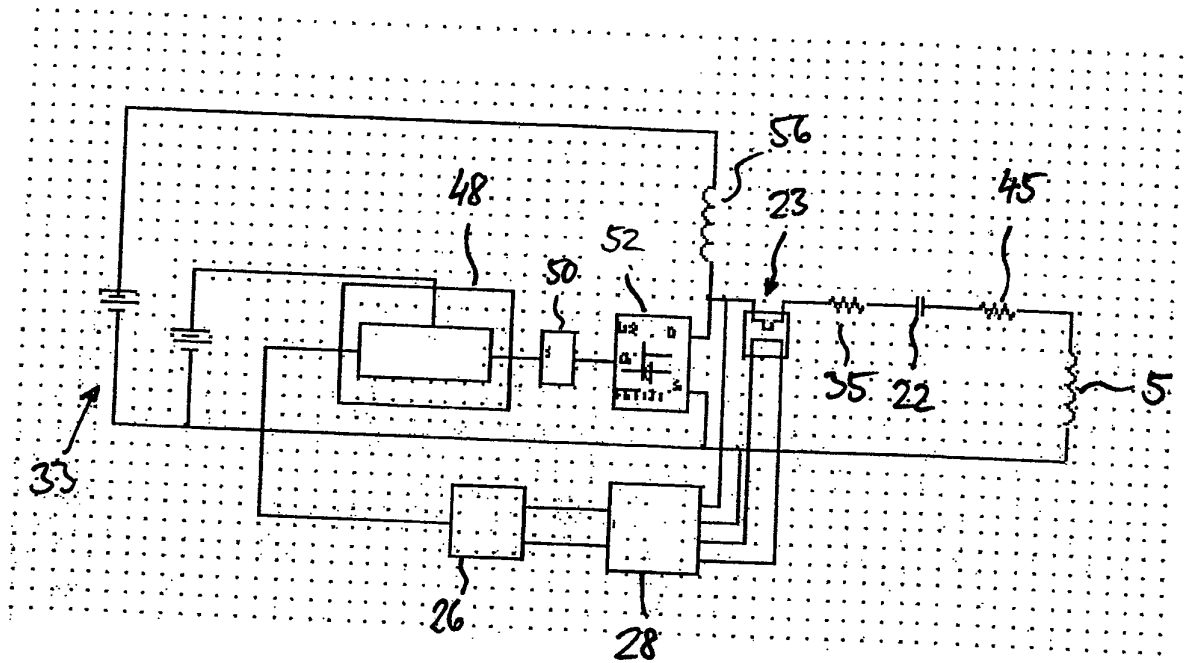


Fig. 13

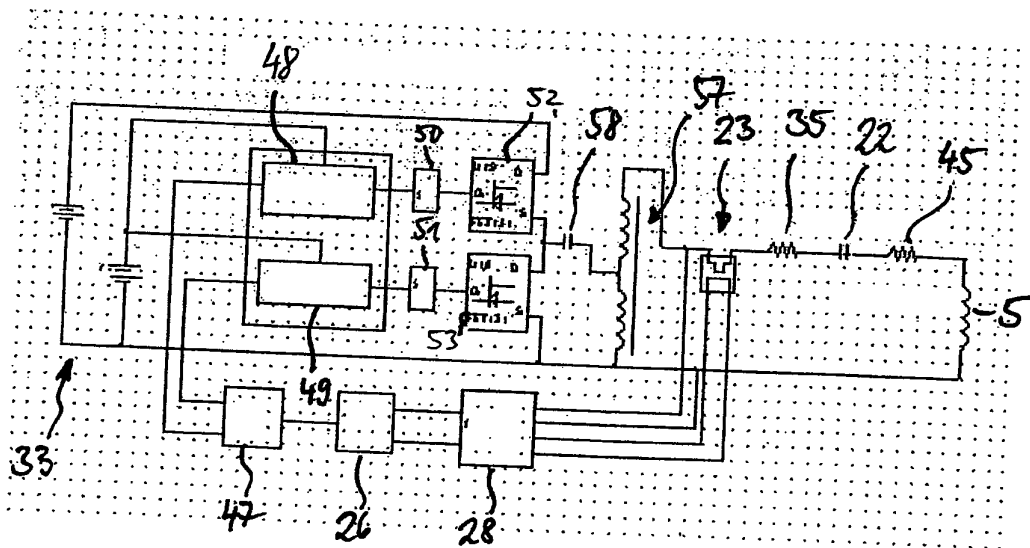


Fig. 14

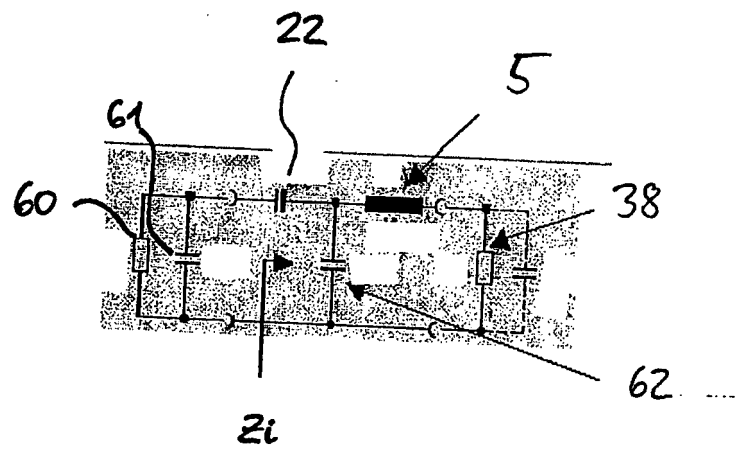


Fig. 15

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- DE 19948229 C1 [0004]
- US 2007114945 A1 [0005]