



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 13 171 T2 2006.06.22**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 130 949 B1**

(51) Int Cl.⁸: **H05H 3/02 (2006.01)**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **601 13 171.1**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 400 460.0**

(96) Europäischer Anmeldetag: **22.02.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **05.09.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **07.09.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.06.2006**

(30) Unionspriorität:

0002704 02.03.2000 FR

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, GB, IT, NL

(73) Patentinhaber:

**Etat-Français représenté par le Délégué Général
pour l'Armement, Arcueil, FR**

(72) Erfinder:

**Bouyer, Philippe, 91440 Bures sur Yvette, FR;
Aspect, Alain, 91190 Gif sur Yvette, FR; Lecrivain,
Michel, 94200 Ivry sur Seine, FR; Desruelle, Bruno,
75013 Paris, FR; Boyer, Vincent, 75690 Paris
Cedex 14, FR**

(74) Vertreter:

Prinz und Partner GbR, 80335 München

(54) Bezeichnung: **Elektromagnetische Vorrichtung zur Erzeugung von kalten Atomen**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet der Produktion von kalten neutralen Atomen unter Verwendung von Magnetfallen.

[0002] Das allgemeine Prinzip der Magnetfallen für Atome ist bekannt. Der Artikel "Permanent magnet trap for cold atoms", erschienen in Phys. Rev. A 51, R22 (1995), beschreibt beispielsweise eine Vorrichtung, die Permanentmagnete enthält, die fähig sind, ein sehr starkes Feld abzugeben. Die Falle wird mittels eines abgebremsten Strahls beschickt. Eine Melasse aus sechs Strahlenbündeln im Zentrum der Falle ermöglicht, ein erstes Abkühlen des eingefangenen Gases auf eine Temperatur von 200 Mikrokkelvin vorzunehmen. Um die hohen Dichten zu erreichen, die für einen Erhalt eines hohen Anteils elastischer Stöße notwendig sind, muss ein sehr steil verlaufendes magnetisches Potential zur Verfügung stehen. Die Kurven, die von den Vorrichtungen des Standes der Technik erzeugt werden, sind in der Größenordnung von 1000 Gauß pro cm^2 .

[0003] Derartige Vorrichtungen ermöglichen jedoch weder, das Kondensat aus dem magnetischen Potential zu extrahieren, wobei das Feld durchtrennt wird, noch die Feldwölbungen zu modifizieren. Um diesen Nachteilen abzuwehren sind Vorrichtungen vorgeschlagen worden, die Elektromagnete enthalten.

[0004] Die Erfindung betrifft insbesondere eine elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion von kalten neutralen Atomen, die eine ferromagnetische Struktur enthält, die vier Pole, die in derselben Ebene XOY angeordnet sind und durch Hauptspulen (den Quadrupol), die die Haupterregung liefern, erregt werden, und zwei zusätzliche Pole (den Dipol), die längs einer zu der Ebene der vier Pole senkrechten Achse Z orientiert sind, aufweist, wobei die Pole durch ein oder mehrere Joche magnetisch gekoppelt sind. Unter "Joch" wird ein Teil aus einem ferromagnetischen Werkstoff verstanden, der die Zirkulation des Flusses sicherstellt.

[0005] Außerdem ist es möglich, für die Kompensation remanenter Felder einen oder mehrere Pole von Spulen hinzuzufügen.

[0006] Eine solche Vorrichtung ist in dem Artikel "Trapping cold neutral atoms with an iron-core electromagnet", erschienen in: The european physical journal. JD1, 255–258, beschrieben.

[0007] Dieses Dokument offenbart die Verwendung eines Elektromagneten mit ferromagnetischem Kern, um das Magnetfeld der Falle zu erzeugen. Derartige Vorrichtungen sind nicht völlig zufrieden stellend, denn die Wirbelströme beschränken die Anstiegs- und Abschaltzeit des Magnetfeldes.

[0008] Um diesen Nachteilen abzuwehren und eine Vorrichtung zu verwirklichen, die eine gesteigerte Leistungsfähigkeit, insbesondere ein besseres Einschließungsvermögen, aufweist, betrifft die Erfindung in ihrem allgemeinsten Sinne eine Vorrichtung, die zusätzliche Pole aufweist, die durch eine äußere Struktur und eine innere Struktur gebildet sind, die getrennt durch zwei Spulen erregt werden, die von entgegengesetzten Strömen durchflossen werden.

[0009] Diese Vorrichtung bildet eine Ioffé-Pritchard-Falle mit Fehlerkompensation für das Gefangenhalten und/oder die Verwirklichung einer kohärenten Quelle kalter Atome (Bose-Einstein-Kondensate) und ermöglicht, sehr hohe Verdichtungsverhältnisse bei einem niedrigen Energieverbrauch zu erzielen. Sie erlaubt einen Betrieb, der kontinuierlich oder mit Abschaltzeiten von 100 Mikrosekunden gepulst ist. Außerdem ermöglicht sie eine Anpassung der von den verschiedenen Spulen erzeugten Magnetfelder durch Anpassen des Stroms, der die Erregungsspulen durchfließt.

[0010] Vorteilhaft sind die zusätzlichen Pole aus einem im Wesentlichen zylindrischen Kern gebildet, der ein Ende aufweist, in dem ein koaxialer ringförmiger Hohlraum ausgetieft ist, in dem die innere Erregungsspule angeordnet ist.

[0011] Gemäß einer bevorzugten Variante weisen wenigstens bestimmte Pole eine Hülle auf, die mit einem rohrförmigen Kanal für die Zirkulation eines Temperatursteuerungsfluids versehen ist.

[0012] Vorzugsweise ist die Hülle von der Kompensationsspule umgeben.

[0013] Gemäß einer Variante sind die Joche aus zwei ringförmigen Elementen mit Radien R_{int} und R_{ext} gebildet, mit $R_{\text{ext}} = R_{\text{int}} + E$, wobei E die Dicke des Jochs bezeichnet, wobei die zwei Elemente in zwei senkrechten Ebenen einsetzbar und positioniert sind.

[0014] Vorteilhaft sind die Joche aus einem ersten ringförmigen Element gebildet, das sich über 180° erstreckt und an jedem Ende durch zweite ringförmige Elemente verlängert ist, die sich in einer zu der Ebene des ersten Elements senkrechten Ebene über 90° erstrecken, wobei jedes dieser zweiten ringförmigen Elemente mit einem ringförmigen Element gekoppelt ist, das sich in einer zu den anderen ringförmigen Elementen senkrechten Ebene über 180° erstreckt.

[0015] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind die Joche und die Pole aus einem ferromagnetischen Werkstoff hergestellt, der die Wirbelströme begrenzt, insbesondere aus einem lamellierten ferromagnetischen Werkstoff oder aus gesinterten Werkstoffen. Gemäß einem Beispiel weist das Joch eine ringförmige Lamellierung senkrecht zur Lamellierung der Pole auf.

[0016] Vorzugsweise weist das Ende zumindest bestimmter Pole eine abgeschrägte Form auf.

[0017] Die Erfindung wird besser verstanden beim Lesen der folgenden Beschreibung, die sich auf ein nicht einschränkendes Ausführungsbeispiel und auf die beigefügten Figuren bezieht, wovon

[0018] Fig. 1 eine schematische Ansicht einer ersten Ausführungsvariante einer Vorrichtung gemäß der Erfindung darstellt;

[0019] Fig. 2 eine Ansicht eines Schnitts durch die Mittellinie eines zusätzlichen Pols in einem größeren Maßstab darstellt;

[0020] Fig. 3 eine Ausführungsvariante einer Vorrichtung gemäß der Erfindung darstellt;

[0021] Fig. 4 eine schematische Ansicht einer Ausrüstung darstellt, die eine Vorrichtung gemäß der Erfindung benutzt;

[0022] Fig. 5 den Arbeitszyklus einer Vorrichtung gemäß der Erfindung darstellt.

[0023] Fig. 1 stellt eine Ansicht einer ersten Ausführungsvariante dar.

[0024] Die Vorrichtung ist aus zwei Elementen zweier Joche (**1, 2**) torischer Form und aus sechs radialen Polelementen (**3 bis 8**) gebildet.

[0025] Die Joche (**1, 2**) sind durch Wickeln eines Bands aus ferromagnetischem Werkstoff gebildet. Die Joche weisen unterschiedliche Radien auf, um das Einfügen des inneren Jochs in das äußere Joch zu ermöglichen, wobei die zwei Joche (**1, 2**) zueinander senkrechte Mittelebenen aufweisen. Das erste Joch (**1**) ist in der Ebene YOZ angeordnet. Das zweite Joch (**2**) ist in der Ebene XOZ angeordnet. Die vier Pole (**3, 5, 7, 8**) sind in der Ebene XOY angeordnet. Sie sind aus einem ferromagnetischen Kern geformt, der aus einem lamellierten Werkstoff hergestellt ist, und von einer Spule (**13, 17, 15, 18**) in Kupferrohr, welche die Haupterregung liefert, und von einer in der Figur nicht gezeigten zusätzlichen Spule, die ein Feld zur Kompensation remanenter Felder liefert, umgeben.

[0026] Die Pole (**3 und 5**) und (**7, 8**) der XOY-Ebene sind einander gegenüber angeordnet und werden durch entgegengesetzte Ströme erregt, um in der Ebene XOY ein Quadrupolfeld der Stärke $B = G(xe_x + xe_y)$ zu erzeugen, wobei G den Gradienten des Magnetfeldes bezeichnet.

[0027] Die zwei letzten Pole (**4, 6**) sind längs der Z-Achse orientiert und aus einem ferromagnetischen Kern gebildet, der aus einem lamellierten Werkstoff hergestellt ist, der von einer äußeren Spule (**14 und 16**) umgeben ist. Diese zwei Pole (**4, 6**) enthalten außerdem eine innere Spule (**27, 28**), die von einem Strom in entgegengesetzter Richtung zu dem Strom, der die äußere Spule durchfließt, durchflossen wird. Die innere Struktur ermöglicht, ein Dipolfeld mit der Symmetrieachse Z zu erzeugen:

$$B_z = B_0 + C \left(z^2 - \frac{x^2 + y^2}{2} \right)$$

wobei C die Wölbung des Dipolfeldes (Achse **3**) bezeichnet.

[0028] Die äußere Struktur erzeugt ein Feld gleicher Form, das ermöglichen wird, B_0 zu kompensieren, während gleichzeitig ein höherer Wert für C beibehalten wird. Es wird ein Gesamtfeld erhalten, dessen Absolutbe-

trag einem Potential vom Ioffé-Pritchard-Typ entspricht:

$$|B| = (B_0^{\text{int}} - B_0^{\text{ext}}) + \left(\frac{G^2}{2(B_0^{\text{int}} - B_0^{\text{ext}})} - \frac{C^{\text{int}} - C^{\text{ext}}}{2} \right) (x^2 + y^2) + (C^{\text{int}} - C^{\text{ext}}) z^2$$

[0029] Außer dem Quadrupol (**3, 5, 7, 8**) enthält die Vorrichtung einen Dipol, der aus zwei Polen (**4, 6**) gebildet ist, die in Richtung der z-Achse angeordnet sind, wovon **Fig. 2** eine genaue Darstellung im Längsschnitt zeigt. Dieser Dipol hat die Kompensation des konstanten Feldes im Zentrum der Falle zur Aufgabe, um eine starke Einschließung zu erzeugen, wobei er ermöglicht, Impulsfrequenzen über 0,01 Hertz, in der Größenordnung von Hertz, zu erzielen.

[0030] Die einen lamellierten Kern (**31**) enthaltenden Pole des Dipols weisen ein kegelstumpfförmiges Ende (**30**) auf.

[0031] Der Kern weist einen axialen Hohlraum (**32**) von Ringform auf, in dem eine elektrische Spule (**35**) untergebracht ist, die einen zylindrischen Kern (**31**) umgibt.

[0032] Der Hauptkern (**31**) ist von einer ersten Hauptspule (**14, 16**) (**Fig. 1**) und einer Spule zur Kompensation remanenter Felder (**37**) umgeben.

[0033] Die Hauptspulen (**36**) sowie die innere Spule (**35**) werden in Reihe und in Gegenphase im Impulsbetrieb gespeist. Die Spulen eines der Pole und die Spulen des gegenüberliegenden komplementären Pols sind ihrerseits für eine Speisung in Reihe, in der gleichen Richtung und nicht mehr entgegengesetzt, geschaltet.

[0034] Die Sekundärspule zur Kompensation der remanenten Felder (**37**) ist an einer ringförmigen Struktur zur Thermostabilisierung (**38**), die den zentralen Teil des Pols (**31**) umgibt, angebracht. Diese ringförmige Struktur (**38**) weist einen ringförmigen Kanal (**39**) für die Zirkulation eines thermostabilisierten Fluids auf.

[0035] Die Gesamtheit der Spulen wird durch einen Impulsstrom mit einer Leistung in der Größenordnung von 150 W gespeist, um einen Gradienten in der Größenordnung von 2400 Gauß pro Zentimeter bei einem Gütefaktor F in der Größenordnung von 80 000 zu erzeugen.

[0036] Der Abstand zwischen den Polen ist in der Größenordnung von 4 Zentimetern. Der Durchmesser der Pole ist in der Größenordnung von 20 Millimetern. In diesem Raum ist eine zylindrische Zelle mit einem Durchmesser von 25 mm angeordnet.

[0037] **Fig. 3** zeigt eine Ausführungsvariante einer Struktur einer Falle für kalte Atome.

[0038] Die ferromagnetische Struktur ist aus zwei halbkreisförmigen Ringen (**50, 51**) gebildet, die in zueinander senkrechten Ebenen angeordnet sind. Diese zwei Bögen (**50, 51**) sind durch Viertelkreisbögen (**52, 53**), deren Enden jeweils mit den Enden der Halbkreisbögen (**50, 51**) gekoppelt sind, miteinander verbunden. Diese Viertelkreisbögen (**52, 53**) sind in einer dritten Ebene XOY senkrecht zur Schnittlinie der zwei oben genannten Ebenen.

[0039] Die Struktur weist 4 Hauptpole (**54 bis 57**) auf, Quadrupole XOY, die von Spulen (**58, 59**) erregt werden, die von Strömen in gleicher Richtung gespeist werden, wobei die Spulen (**58, 59**) die Viertelkreisbögen (**52, 53**) umgeben.

[0040] Die Halbkreisbögen (**50, 51**) sind jeweils mit einem zusätzlichen Pol (**60, 61**) gekoppelt, der sich radial erstreckt. Diese Pole (**60, 61**) sind von einer thermostabilisierenden Struktur umgeben. Die Haupterregung wird von den Spulen (**66, 67**) und (**68, 69**) erbracht, die über dem Halbkreisbogen (**50, 51**) beiderseits des sekundären Pols (**60, 61**) verteilt sind. Sie werden von entgegengesetzten Strömen durchflossen.

[0041] Die Vorrichtungen gemäß der Erfindung ermöglichen, ein sehr steiles und einstellbares magnetisches Potential zu erzeugen.

[0042] **Fig. 4** stellt ein Beispiel für eine Ausrüstung dar, die eine Vorrichtung gemäß der einen oder anderen Variante der Erfindung benutzt.

[0043] Die Ausrüstung enthält einen Umwälzofen (100), der auf ungefähr 140°C erwärmt wird, um einen Strahl ^{87}b -Atome zu erzeugen. Eine zweidimensionale optische Melasse, die mittels eines transversalen Laserstrahlenbündels erzeugt ist, bewirkt die Kollimation des Strahlstroms und ermöglicht, ihn in Richtung der Achse eines Rohrs (101) zu orientieren. Dieses Rohr (101) mündet in einem primären Vakuumbehälter, der an eine Vakuumpumpe (103) angeschlossen ist. Der in dem Vakuumbehälter (102) herrschende Druck P_1 beträgt ungefähr 10^{-9} Millibar. Die Pumpe ist eine Turbomolekularpumpe, die ein hohes Verdichtungsverhältnis (höher 10^9 für Stickstoff) aufweist. Der Vakuumbehälter (102) ist für die Messung des Drucks mit einem Kaltkathoden-Vakuummeter (105) ausgerüstet.

[0044] Die Melasse wird durch Laserdioden mit einer Leistung von 50 bis 100 mW und einen Masterlaser von 3,5 mW bei 780 nm und einer Linienbreite von 1 MHz erhalten.

[0045] Ein Teil der sich in entgegengesetzter Richtung ausbreitenden Laserstrahlenbündel, die gegenüber dem Übergang eines Atoms rotverstimmt sind, erzeugt eine Strahlungsdruckkraft auf das angestrahlte Atom.

[0046] In dem Vakuumbehälter ist ein kalter Zylinder positioniert, um das Hängenbleiben der nicht kollimierten Atome sicherzustellen. Er ist aus einem Metallblock geformt, der von einem Loch mit einem Durchmesser von 10 Millimetern durchbohrt ist. Er lässt nur die Atome des Strahls hindurch, die auf der Achse abgegeben werden. Dieser Zylinder wird mittels eines flexiblen Tauchkörpers (106), der eine Zirkulation von Ethylenglykol mit -55°C sicherstellt, gekühlt.

[0047] Ein Ventil (107) ermöglicht, den sekundären Vakuumbehälter zu isolieren. Eine Ionenpumpe (108) stellt das Intermediärvakuum mit Hilfe eines Bremsrohrs (109) sicher. Dieses Bremsrohr (109) ermöglicht eine thermische Isolation des Ofens (100) von dem sekundären Vakuumbehälter (112). Der sekundäre Vakuumbehälter (112) ist aus einer Glaszelle von $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ gebildet, die an eine Ionenpumpe (113) und an eine Titan-Getterpumpe angeschlossen ist. Die Wände werden in regelmäßigen Abständen erwärmt, um die Bildung von Rubidiumdampf zu kompensieren.

[0048] Die elektromagnetische Falle (120) gemäß der Erfindung ist am Ausgang einer Bremsvorrichtung (118) platziert, die eine elektrische Spule (119) enthält.

[0049] Fig. 5 stellt die zeitliche Abfolge der Ausrüstung dar.

[0050] Die verschiedenen Schritte eines Arbeitszyklus sind synchronisiert. Vor dem Freisetzen des "Depumping"-Strahlenbündels wird das von den Hauptpolen erzeugte sphärische Quadrupolfeld unterbrochen und die Verstimmung der in der Falle eingeschlossenen Strahlenbündel wird verstärkt. Während dieser Sequenz bleiben die seitlichen "Repumping"-Strahlenbündel an.

[0051] Die Kompensation remanenter Felder für eine Entmagnetisierung der ferromagnetischen Struktur ermöglicht, eine wirksame Kühlung zu erzielen.

[0052] Die Anwendungen derartiger Vorrichtungen betreffen insbesondere Atomuhren sowie Bordnavigationssysteme.

Patentansprüche

1. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion von kalten neutralen Atomen, die eine ferromagnetische Struktur enthält, die vier Pole (3, 5, 7, 8), die in derselben Ebene XOY angeordnet sind und durch Hauptspulen (13, 15, 17, 18), die die Haupterregung liefern, erregt werden, und zwei zusätzliche Pole (4, 6), die längs einer zu der Ebene der vier Pole senkrechten Achse Z orientiert sind, aufweist, wobei die Pole durch ein oder mehrere Joche (1, 2) magnetisch gekoppelt sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass jeder der zusätzlichen Pole (4, 6) durch eine äußere Struktur und eine innere Struktur gebildet ist, die getrennt durch zwei Spulen (35, 37) erregt werden, die von entgegengesetzten Strömen durchflossen werden.

2. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion von kalten neutralen Atomen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die zusätzlichen Pole durch einen im Wesentlichen zylindrischen Kern gebildet sind, der ein Ende aufweist, in dem ein coaxialer ringförmiger Hohlraum ausgetieft ist, in dem die innere Erregungsspule angeordnet ist.

3. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach Anspruch 1 oder 2, da-

durch gekennzeichnet, dass wenigstens bestimmte Pole eine Hülle aufweisen, die mit einem rohrförmigen Kanal für die Zirkulation eines Temperatursteuerungsfluids versehen ist.

4. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens bestimmte Pole von einer Spule zur Kompensation remanenter Felder umgeben sind.

5. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Joche durch zwei ringförmige Elemente mit Radien R_{int} und R_{ext} gebildet sind, mit $R_{\text{ext}} = R_{\text{int}} + E$, wobei E die Dicke des Jochs bezeichnet, wobei die zwei Elemente in zwei senkrechten Ebenen einsetzbar und positioniert sind.

6. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Joch aus einem ersten ringförmigen Element gebildet ist, das sich über 180° erstreckt und an jedem Ende durch zweite ringförmige Elemente verlängert ist, die sich in einer zu der Ebene des ersten Elements senkrechten Ebene über 90° erstrecken, wobei jedes dieser zweiten ringförmigen Elemente mit einem ringförmigen Element gekoppelt ist, das sich in einer zu den anderen ringförmigen Elementen senkrechten Ebene über 180° erstreckt.

7. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die zweiten ringförmigen Elemente, die sich über 90° erstrecken, jeweils von einer Erregungsspule der Hauptpole umgeben sind.

8. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Joche und die Pole aus einem Werkstoff hergestellt sind, der die Foucault-Ströme begrenzt.

9. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Ende wenigstens bestimmter Pole kegelstumpfförmig ist.

10. Elektromagnetische Vorrichtung für die Produktion kalter neutraler Atome nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Pole außerdem sekundäre Spulen für die Kompensation remanenter Felder aufweisen.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

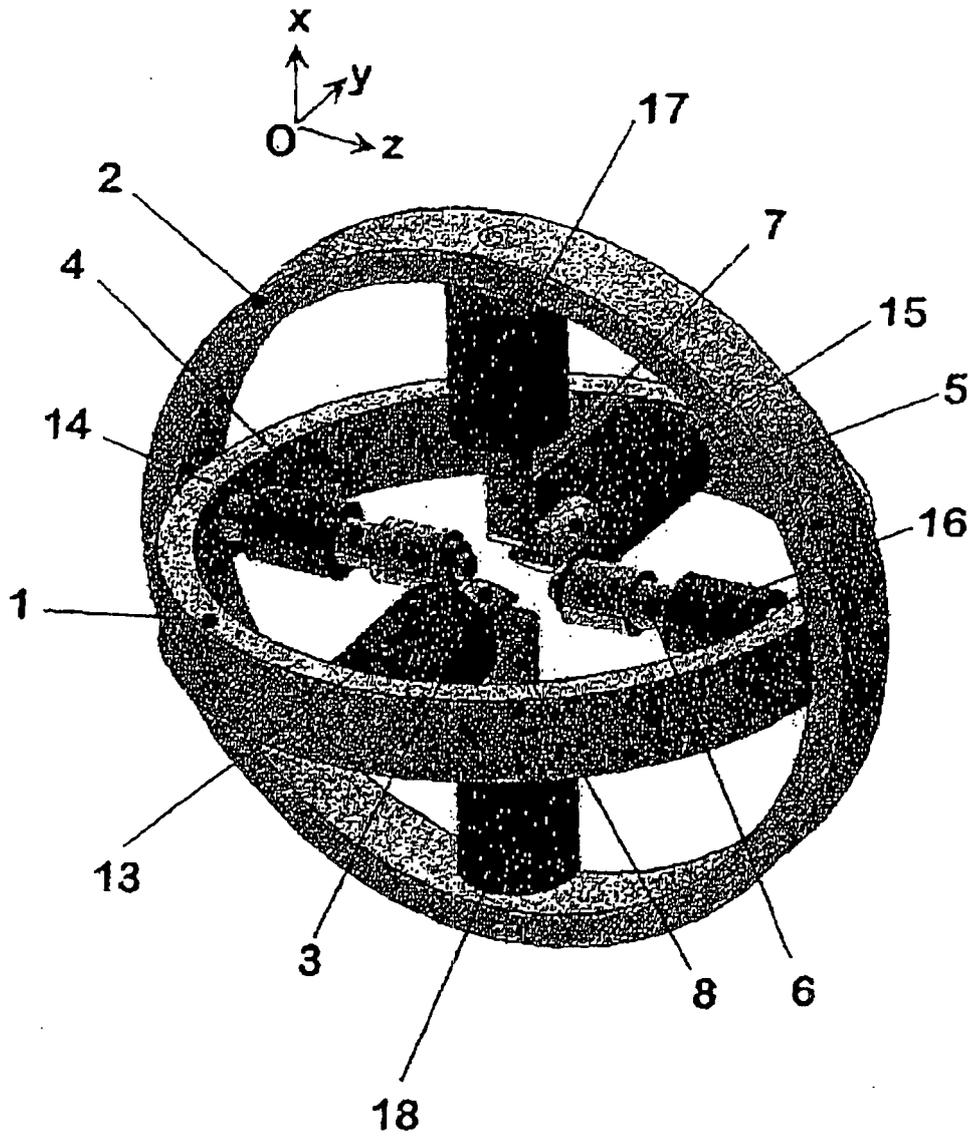


FIG. 1

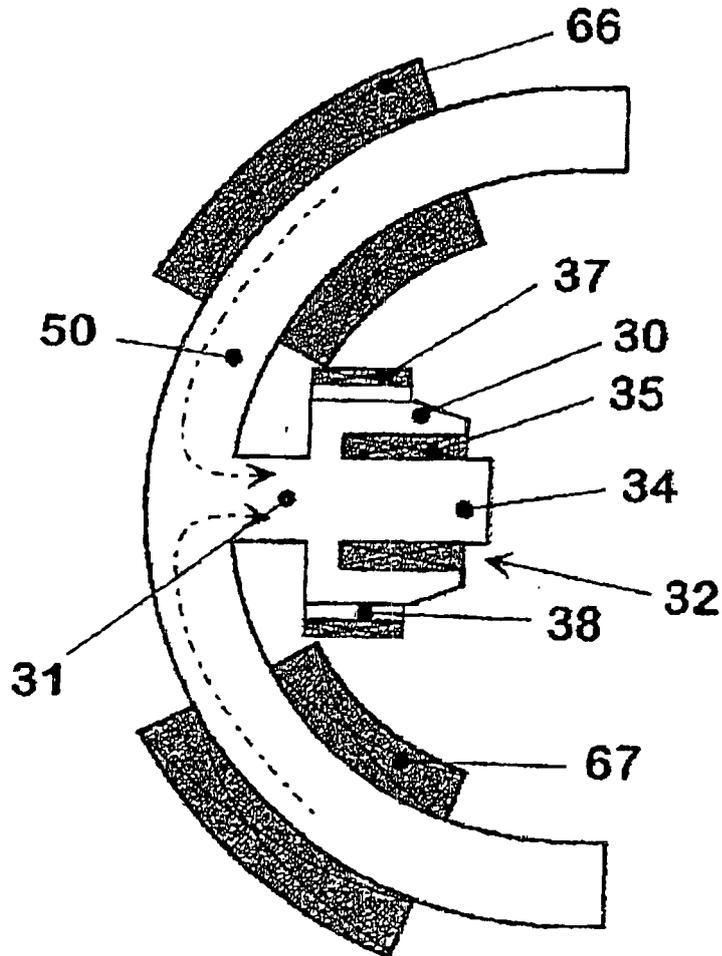
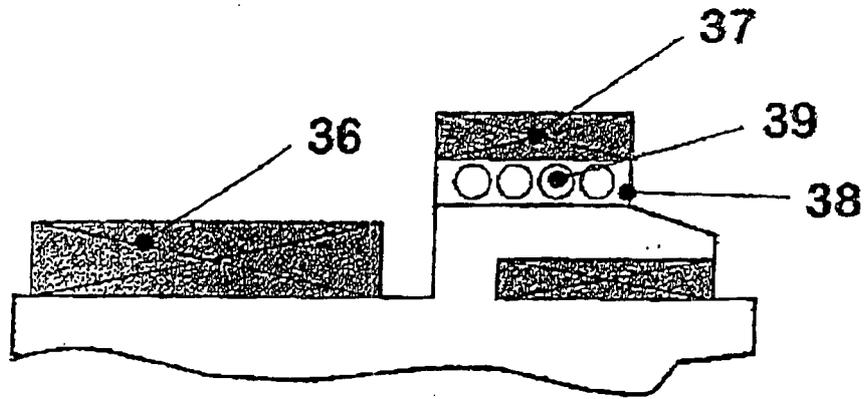
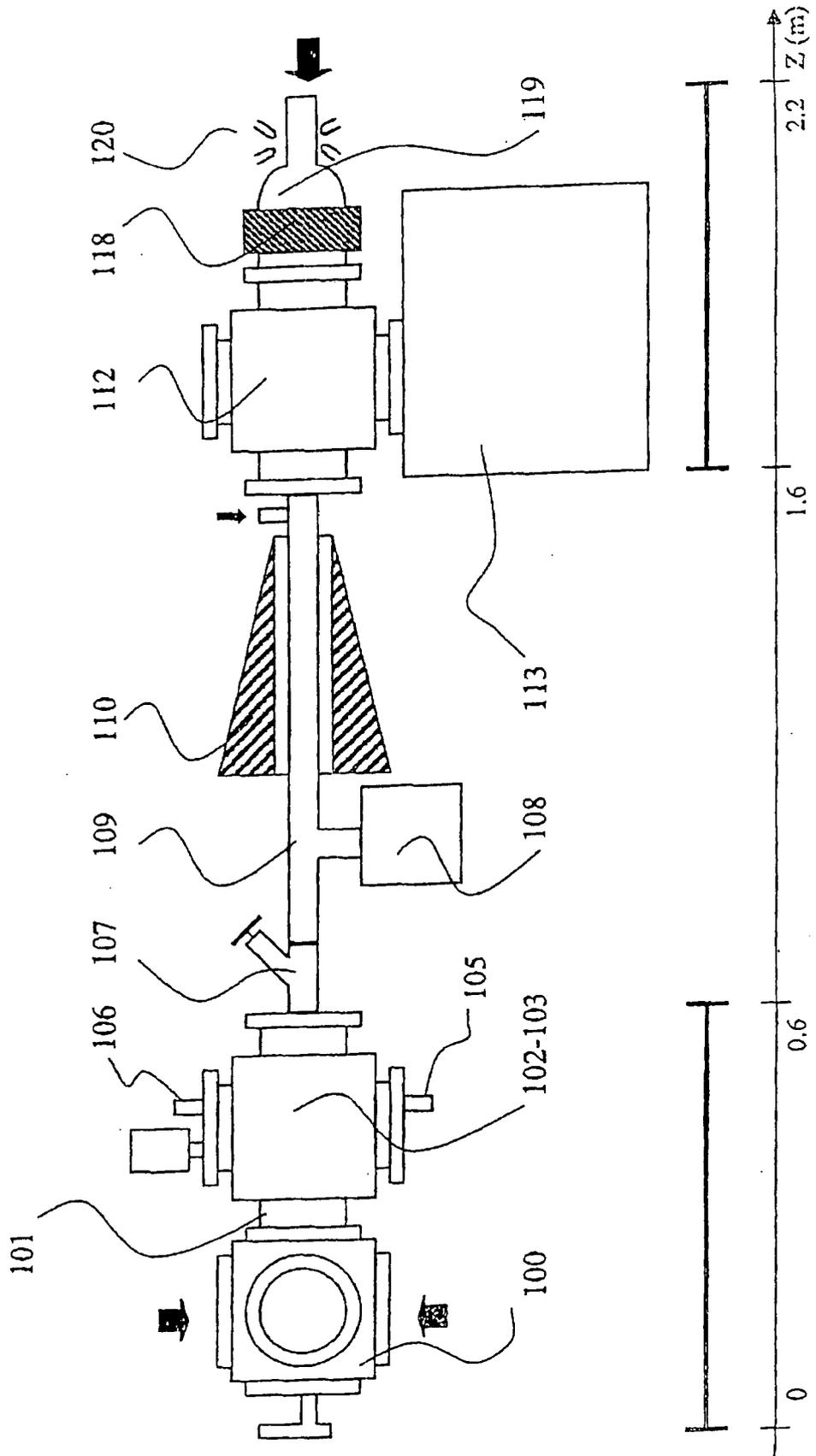


FIG. 2

FIG. 4



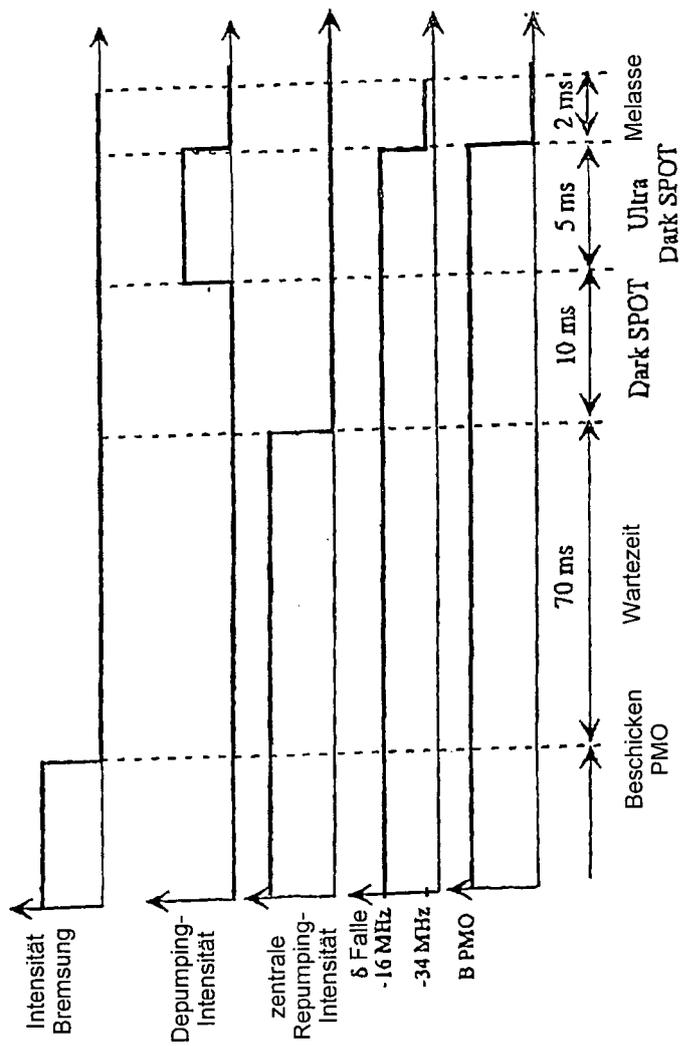


FIG. 5