



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 1 130 949 A1**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
05.09.2001 Bulletin 2001/36

(51) Int Cl.7: **H05H 3/02**

(21) Numéro de dépôt: **01400460.0**

(22) Date de dépôt: **22.02.2001**

(84) Etats contractants désignés:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE TR**
Etats d'extension désignés:
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorité: **02.03.2000 FR 0002704**

(71) Demandeur: **ETAT-FRANCAIS représenté par le
Délégué Général pour l' Armement
94114 Arcueil Cedex (FR)**

(72) Inventeurs:
• **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)**

(54) **Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes froids**

(57) L'invention concerne un dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids comprenant une structure ferromagnétique présentant quatre pôles disposés dans un même plan XOY excités par des bobines principales fournissant l'excitation principale, et deux pôles additionnels orientés selon un axe

Z perpendiculaires au plan desdits quatre pôles, les pôles étant couplés magnétiquement par une ou plusieurs culasses.

Les pôles additionnels sont constitués par une structure externe et une structure interne excités séparément par deux bobines parcourues par des courants contraires.

EP 1 130 949 A1

Description

[0001] La présente invention concerne le domaine de la production d'atomes neutres froids par piégeage magnétique.

[0002] Le principe général du piégeage magnétique d'atomes est connu. L'article "Permanent magnet trap for cold atoms" paru dans Phys. Rev. A 51, R22 (1995) décrit par exemple un dispositif comportant des aimants permanents capables de donner un champ très élevé. Le piège est chargé à partir d'un jet ralenti. Une mélasse à six faisceaux au cœur du piège permet de procéder à un premier refroidissement du gaz piégé à une température de 200 microkelvins. Pour atteindre les hautes densités nécessaires à l'obtention d'un fort taux de collisions élastiques, il est nécessaire de disposer d'un potentiel magnétique très raide. Les courbures générées par les dispositifs de l'art antérieur sont de l'ordre de 1000 Gauss par cm^2 .

[0003] De tels dispositifs ne permettent toutefois pas d'extraire le condensat hors du potentiel magnétique en coupant le champ, ni de modifier les courbures de champ. Pour remédier à ces inconvénients, on a proposé des dispositifs comprenant des électro-aimants.

[0004] L'invention concerne plus particulièrement un dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids comprenant une structure ferromagnétique présentant 4 pôles disposés dans un même plan XOY excités par des bobines principales (le quadripôle) fournissant l'excitation principale, et deux pôles additionnels (le dipôle) orientés selon un axe Z perpendiculaires au plan desdits quatre pôles, les pôles étant couplés magnétiquement par une ou plusieurs culasses. On entend par "culasse" une pièce en matériau ferromagnétique assurant la circulation du flux.

[0005] Il est par ailleurs possible d'ajouter sur un ou plusieurs pôles des bobines pour la compensation des champs rémanents.

[0006] Un tel dispositif est décrit dans l'article "Trapping cold neutral atoms with an iron-core electromagnet" paru dans "The european physical journal JD1, 255-258.

[0007] Ce document divulgue l'utilisation d'un électro-aimant à noyau ferromagnétique pour générer le champ magnétique de piégeage. De tels dispositifs ne sont pas totalement satisfaisants car les courants de Foucault limitent les temps de montée et de coupure du champ magnétique.

[0008] Pour remédier à ces inconvénients et réaliser un dispositif présentant des performances accrues, notamment un meilleur pouvoir de confinement, l'invention concerne dans son acception la plus générale un dispositif présentant des pôles additionnels constitués par une structure externe et une structure interne excités séparément par deux bobines parcourues par des courants contraires.

[0009] Ce dispositif constitue un piège de Ioffé-Pritchard à biais compensé pour le piégeage et/ou la réalisation d'une source cohérente d'atomes froids (condensats de Bose-Einstein), permettant de réaliser de forts taux de compression avec une faible consommation électrique. Il autorise un fonctionnement continu ou pulsé avec des temps de coupure de 100 microsecondes. Il permet également un ajustement des champs magnétiques produits par les différentes bobines par un ajustement du courant parcourant les bobines d'excitation.

[0010] Avantagusement, les pôles additionnels sont formés par un noyau sensiblement cylindrique présentant une extrémité creusée par une cavité annulaire coaxiale à l'intérieur de laquelle est logée la bobine d'excitation intérieure.

[0011] Selon une variante préférée, certains pôles au moins présentent un manchon pourvu d'un canal tubulaire pour la circulation d'un fluide de thermorégulation.

[0012] De préférence, ledit manchon est entouré par la bobine de compensation.

[0013] Selon une variante, les culasses sont constituées par deux éléments annulaires de rayon R_{int} et R_{ext} avec $R_{\text{ext}} = R_{\text{int}} + E$ où E désigne l'épaisseur de la culasse, les deux éléments étant emboîtables et positionnés dans deux plans perpendiculaires.

[0014] Avantagusement, les culasses sont constituées un premier élément annulaire s'étendant sur 180° prolongé à chaque extrémité par des seconds éléments annulaires s'étendant sur 90° , dans un plan perpendiculaire au plan du premier élément, chacun desdits seconds éléments annulaires étant couplés à un élément annulaire s'étendant sur 180° dans un plan perpendiculaire aux autres éléments annulaires.

[0015] Selon un mode de réalisation préféré, les culasses et les pôles sont constitués en un matériau ferromagnétique limitant les courants de Foucault, notamment un matériau ferromagnétique feuilleté ou des matériaux frittés. Selon un exemple, la culasse présente un feuilletage annulaire perpendiculaire au feuilletage des pôles.

[0016] De préférence, l'extrémité de certains pôles au moins présente une forme biseautée.

[0017] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit, se référant à un exemple non limitatif de réalisation et aux figures annexées où :

- la figure 1 représente une vue schématique d'une première variante de réalisation d'un dispositif selon l'invention ;
- la figure 2 représente une vue en coupe médiane d'un pôle additionnel, à une échelle agrandie ;
- la figure 3 représente une variante de réalisation d'un dispositif selon l'invention.

- la figure 4 représente une vue schématique d'un équipement mettant en oeuvre un dispositif selon l'invention.
- la figure 5 représente le cycle de fonctionnement d'un dispositif selon l'invention.

[0018] La figure 1 représente une vue d'un première variante de réalisation.

[0019] Le dispositif est constitué de deux éléments de deux culasses (1, 2) de forme torique, et par six éléments polaires (3 à 8) radiaux.

[0020] Les culasses (1, 2) sont formées par l'enroulement d'une bande de matériau ferromagnétique. Les culasses présentent des rayons différents pour permettre l'emboîtement de la culasse intérieure dans la culasse extérieure, les deux culasses (1, 2) présentant des plans médians perpendiculaires. La première culasse (1) est placée dans le plan YOZ. La deuxième culasse (2) est placée dans le plan XOZ. Les quatre pôles (3,5,7,8) sont placés dans le plan XOY. Ils sont formés par un noyau ferromagnétique réalisé en un matériau feuilleté, entouré par une bobine (13,17,15,18) en tube de cuivre fournissant l'excitation principale, et par une bobine additionnelle non représentée sur la figure, fournissant un champ de compensation des champs rémanents.

[0021] Les pôles (3 et 5) et (7, 8) du plan XOY sont placés en vis-à-vis et sont excités par des courants contraires pour créer un champ quadripolaire dans le plan XOY d'amplitude $B=G(xe_x+ye_y)$; où G désigne le gradient de champ magnétique.

[0022] Les deux derniers pôles (4, 6) sont orientés selon l'axe Z et sont constitués d'un noyau ferromagnétique réalisé en un matériau feuilleté entouré par une bobine externe (14 et 16). Ces deux pôles (4, 6) comportent en outre une bobine interne (27, 28) parcourue par un courant en sens contraire du courant parcourant la bobine externe. La structure interne permet de créer un champ dipolaire d'axe de symétrie Z :

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

où C désigne la courbure du champ dipolaire (axe 3).

[0023] La structure externe crée un champ de même forme qui va permettre de compenser B_0 tout en conservant une valeur élevée pour C. On obtient un champ total dont le module correspond à un potentiel de type Ioffé-Pritchard :

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

[0024] Le dispositif comporte en outre du quadripôle (3, 5, 7, 8) un dipôle formé des deux pôles (4,6) disposés selon l'axe z dont la figure 2 représente une vue détaillée, en coupe longitudinale. Ce dipôle a pour fonction la compensation du champ constant au centre du piège pour produire un confinement important, et permettant d'obtenir des cadences d'impulsion supérieures à 0,01 hertz, de l'ordre du hertz.

[0025] Les pôles du dipôle comportent un noyau (31) feuilleté présentent une extrémité tronconique (30).

[0026] Le noyau présente une cavité axiale (32) de forme annulaire dans laquelle est logée une bobine électrique (35) entourant un noyau cylindrique (31).

[0027] Le noyau principal (31) est entouré par une première bobine principale (14, 16) (Fig.1) et une bobine de compensation des champs rémanents (37).

[0028] Les bobines principale (36) ainsi que la bobine interne (35) sont alimentées en série et en opposition en mode impulsionnel. Les bobines de l'un des pôles et les bobines du pôle complémentaire en vis-à-vis sont elle-même reliées pour une alimentation en série, dans le même sens et non plus en opposition.

[0029] La bobine secondaire de compensation des champs rémanents (37) est montée sur une structure de thermostabilisation (38) de forme annulaire, entourant la partie centrale du pôle (31). Cette structure annulaire (38) présente un canal annulaire (39) pour la circulation d'un fluide thermostaté.

[0030] L'ensemble des bobines est alimenté par un courant impulsionnel d'une puissance de l'ordre de 150 W pour produire un gradient de l'ordre de 2400 gauss par centimètre, avec un facteur de mérite F de l'ordre de 80.000.

[0031] La distance inter-pôles est de l'ordre de 4 centimètres. Le diamètre des pôles est de l'ordre de 20 millimètres. Une cellule cylindrique d'un diamètre de 25 millimètres est placée dans cet espace.

[0032] La figure 2 représente une variante de réalisation d'une structure de piégeage d'atomes froids.

[0033] La structure ferromagnétique est composée de deux anneaux demi-circulaire (50, 51) disposés dans des plans perpendiculaires. Ces deux arceaux (50, 51) sont reliés par des arceaux (52, 53) en quart de cercle dont les extrémités sont couplées respectivement aux extrémités des arceaux demi-circulaires (50, 51). Ces arceaux (52, 53)

en quart de cercle sont dans un troisième plan XOY perpendiculaire à l'intersection des deux plans susvisés.

[0034] La structure comportant 4 pôles principaux (54 à 57) quadripôles XOY excités par des bobines (58, 59) alimentées par des courants dans le même sens, les bobines (58, 59) entourant les arceaux (52, 53) en quart de cercle.

[0035] Les arceaux demi-circulaires (50, 51) sont couplés chacun avec un pôle additionnel (60, 61) s'étendant radialement. Ces pôles (60, 61) sont entourés par une structure thermostabilisatrice. L'excitation principale est fournie par les bobines (66, 67) et (68, 69) réparties sur l'arceau semi-circulaire (50, 51) de part et d'autre du pôle secondaire (60, 61). Elles sont parcourues par des courants contraires.

[0036] Les dispositifs selon l'invention permettent de générer un potentiel magnétique très raide, et ajustable.

[0037] La figure 4 représente un exemple d'équipement mettant en oeuvre un dispositif selon l'une ou l'autre des variantes de l'invention.

[0038] L'équipement comporte un four (100) à recirculation chauffé à environ 140°C pour produire un jet d'atomes ^{87}Rb . Une mélasse optique 2D produite par un faisceau laser transversal produit la collimation du jet et permet de l'orienter dans l'axe d'un tube (101). Ce tube (101) débouche dans une enceinte primaire (102) relié à une pompe à vide (103). La pression P_1 régnant dans l'enceinte (102) est d'environ 10^{-9} millibar. La pompe est une pompe turbo présentant un fort taux de compression (supérieur à 19^9 pour l'azote). L'enceinte (102) est munie d'une jauge à cathode froide (105) pour la mesure de la pression.

[0039] La mélasse est obtenue par des diodes laser de puissance 50 à 100 mW et un laser maître de 3.5 mW à 780 nm avec une largeur de raie de 1 Mhz.

[0040] Une partie de faisceaux lasers contre-propageant désaccordés vers le rouge de la transition atomique produit une force de pression de radiation sur l'atome éclairé.

[0041] Un cylindre froid est positionné dans l'enceinte, pour assurer le collage des atomes non collimatés. Il est formé par un bloc métallique percé d'un trou de 10 millimètres de diamètre. Il ne laisse passer que les atomes du jet émis sur l'axe. Ce cylindre est refroidi par un flexiplongeur (106) qui assure une circulation d'éthylène-glycol à -55 °C.

[0042] Une vanne (107) permet d'isoler l'enceinte secondaire. Une pompe ionique (108) assure le vide intermédiaire à l'intermédiaire d'un tube de ralentissement (109). Ce tube de ralentissement (109) permet d'isoler thermiquement le four (100) de l'enceinte secondaire (112). L'enceinte secondaire (112) est constituée par une cellule en verre de 1x2 cm reliée à une pompe ionique (113) et à un sublimateur de titane. Les parois sont périodiquement chauffées pour compenser la formation de vapeur du Rubidium.

[0043] Le piège électromagnétique (120) selon l'invention est placé à la sortie d'un ralentisseur (118) comportant une bobine électrique (119).

[0044] La figure 5 représente la séquence temporelle de l'équipement.

[0045] Les différentes étapes d'un cycle de fonctionnement sont synchronisées. Le champ quadripolaire sphérique produit par les pôles principaux est interrompu et le désaccord des faisceaux pièges est augmenté préalablement à la coupure du faisceau pompes. Au cours de cette séquence, les faisceaux repompeurs latéraux restent allumés.

[0046] La compensation des champs rémanents pour démagnétisation de la structure ferromagnétique permet d'obtenir un refroidissement efficace.

[0047] Les applications de tels dispositifs concernent en particulier les horloges atomiques, ainsi que les systèmes de navigation embarquée.

Revendications

1. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids comprenant une structure ferromagnétique présentant 4 pôles disposés dans un même plan XOY excités par des bobines principales fournissant l'excitation principale, et deux pôles additionnels orientés selon un axe Z perpendiculaires au plan desdits quatre pôles, les pôles étant couplés magnétiquement par une ou plusieurs culasses, **caractérisé en ce que** lesdits pôles additionnels sont constitués par une structure externe et d'une structure interne excités séparément par deux bobines parcourues par des courants contraires.

2. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon la revendication 1 **caractérisé en ce que** les pôles additionnels sont formés par un noyau sensiblement cylindrique présentant une extrémité creusée par une cavité annulaire coaxiale à l'intérieure de laquelle est logée la bobine d'excitation intérieure.

3. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon la revendication 1 ou 2 **caractérisé en ce que** certains pôles au moins présentant un manchon pourvu d'un canal tubulaire pour la circulation d'un fluide de thermorégulation.

4. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon la revendication 3 **caractérisé en**

ce que certains pôles au moins sont entourés par une bobine de compensation des champs rémanents.

- 5 5. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon l'une quelconque des revendications précédentes **caractérisé en ce que** les culasses sont constituées par deux éléments annulaires de rayon R_{int} et R_{ext} avec $R_{\text{ext}} = R_{\text{int}} + E$ où E désigne l'épaisseur de la culasse, les deux éléments étant emboîtables et positionnés dans deux plans perpendiculaires.
- 10 6. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon l'une quelconque des revendications précédentes **caractérisé en ce que** la culasse est constituée un premier élément annulaire s'étendant sur 180° prolongé à chaque extrémité par des seconds éléments annulaires s'étendant sur 90° , dans un plan perpendiculaire au plan du premier élément, chacun desdits seconds éléments annulaires étant couplés à un élément annulaire s'étendant sur 180° dans un plan perpendiculaire aux autres éléments annulaires.
- 15 7. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon la revendication précédente **caractérisé en ce que** les seconds éléments annulaires s'étendant sur 90° sont entourés chacun par une bobine d'excitation des pôles principaux.
- 20 8. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon l'une quelconque des revendications précédentes **caractérisé en ce que** les culasses et les pôles sont constitués en un matériau limitant les courants de Foucault.
9. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon l'une quelconque des revendications précédentes **caractérisé en ce que** l'extrémité de certains pôles au moins présente une forme tronconique.
- 25 10. Dispositif électromagnétique pour la production d'atomes neutres froids selon l'une quelconque des revendications précédentes **caractérisé en ce que** les pôles présentent en outre des bobines secondaires pour la compensation des champs rémanents.

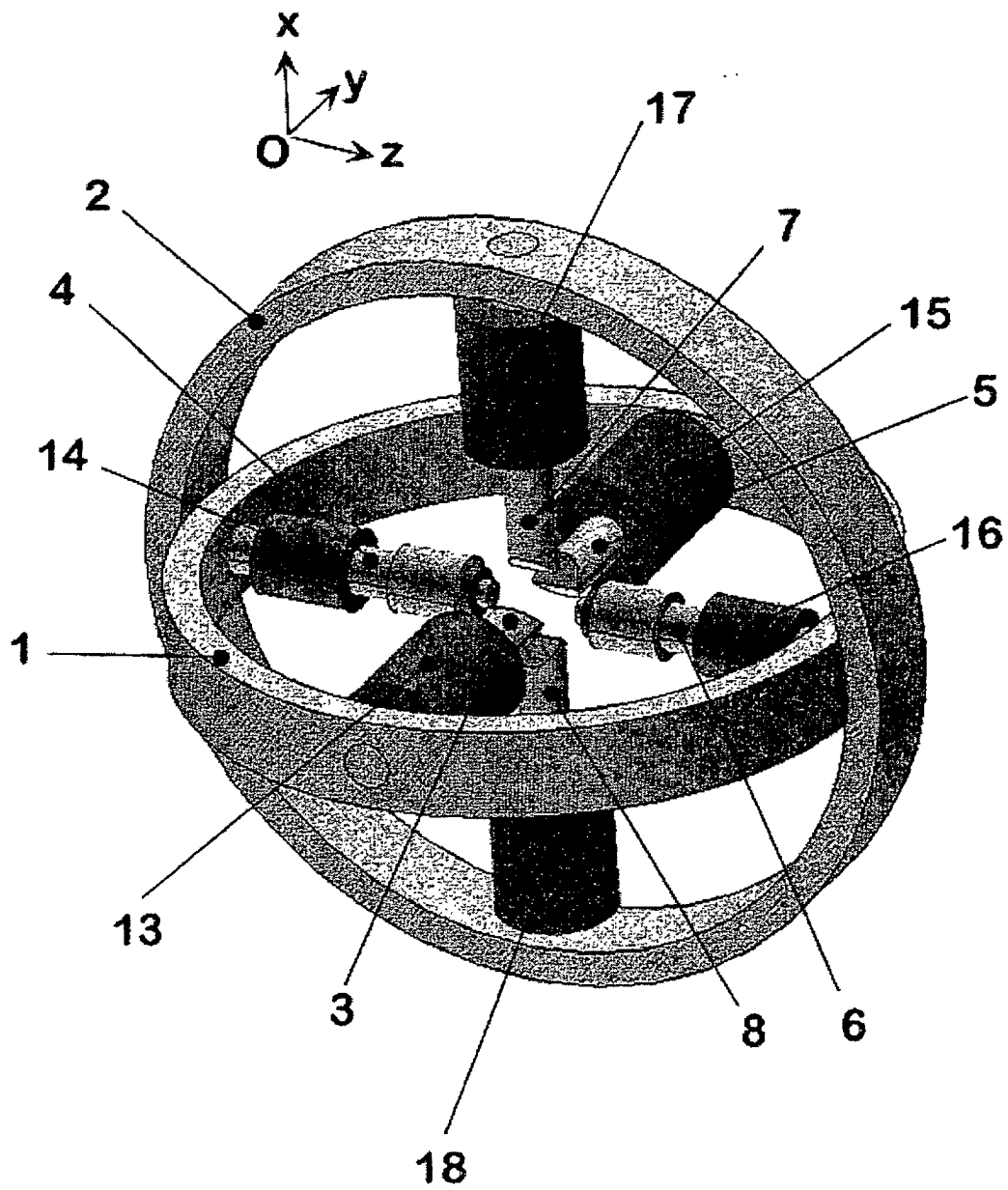
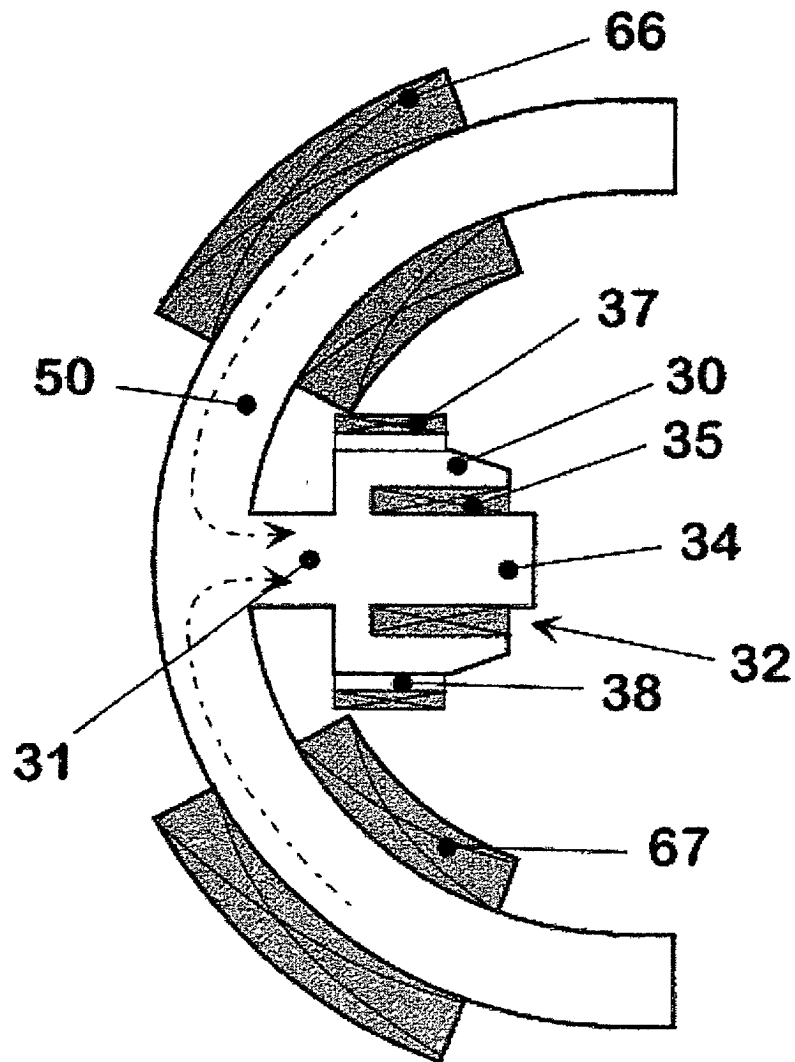
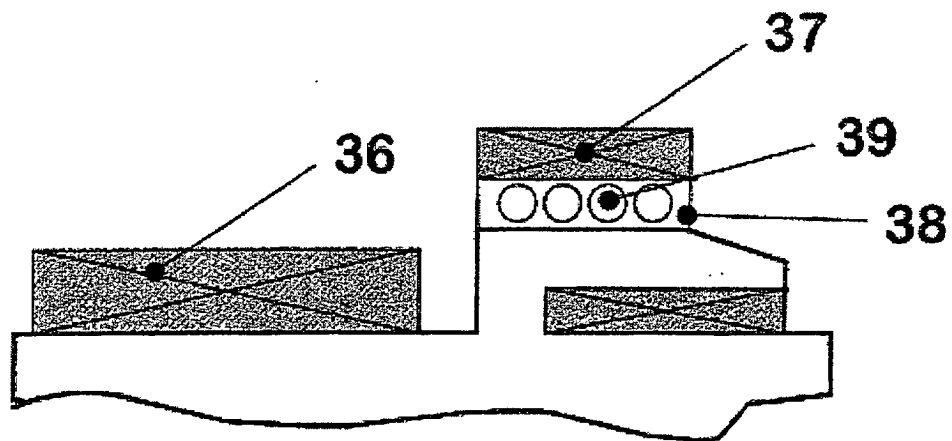


FIG. 1



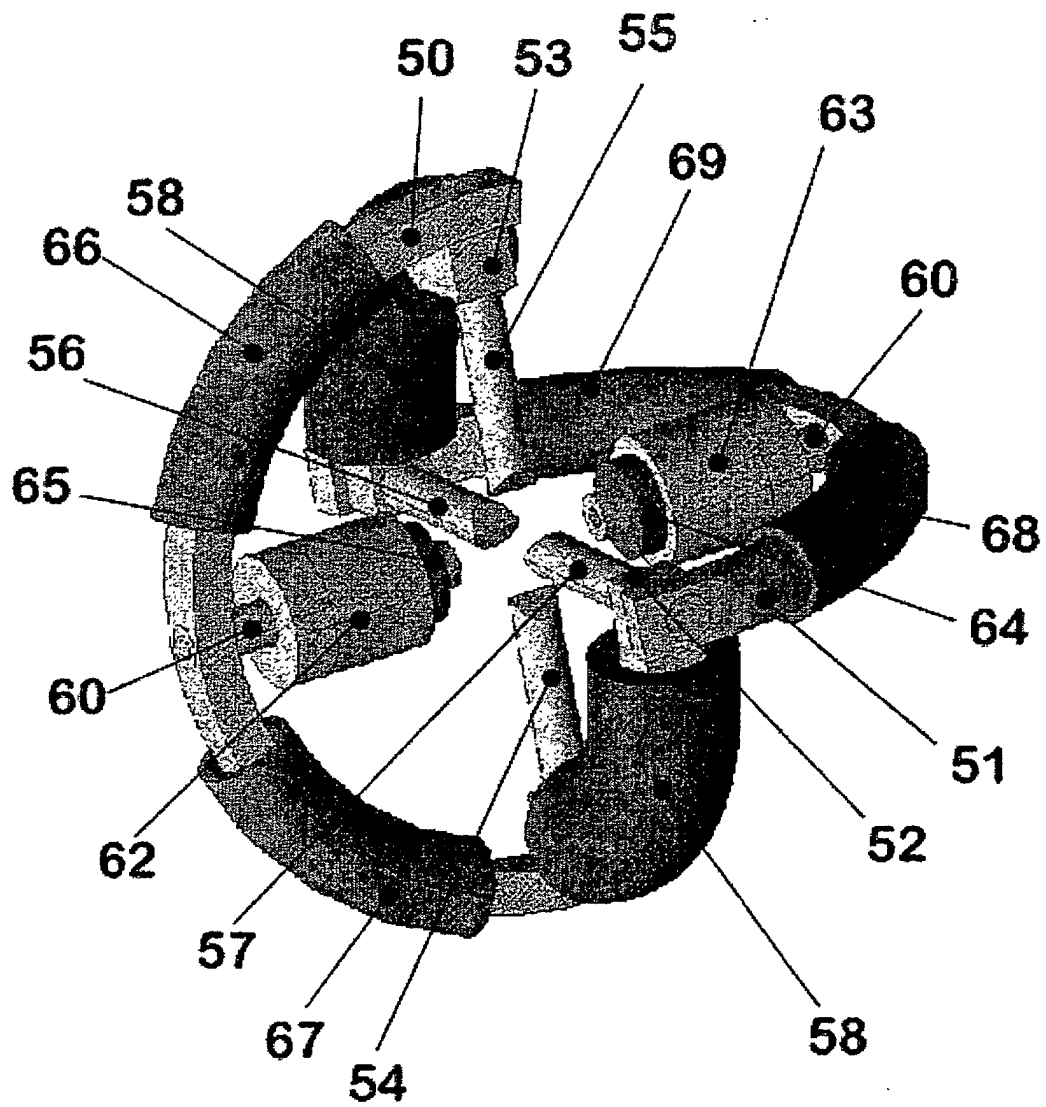
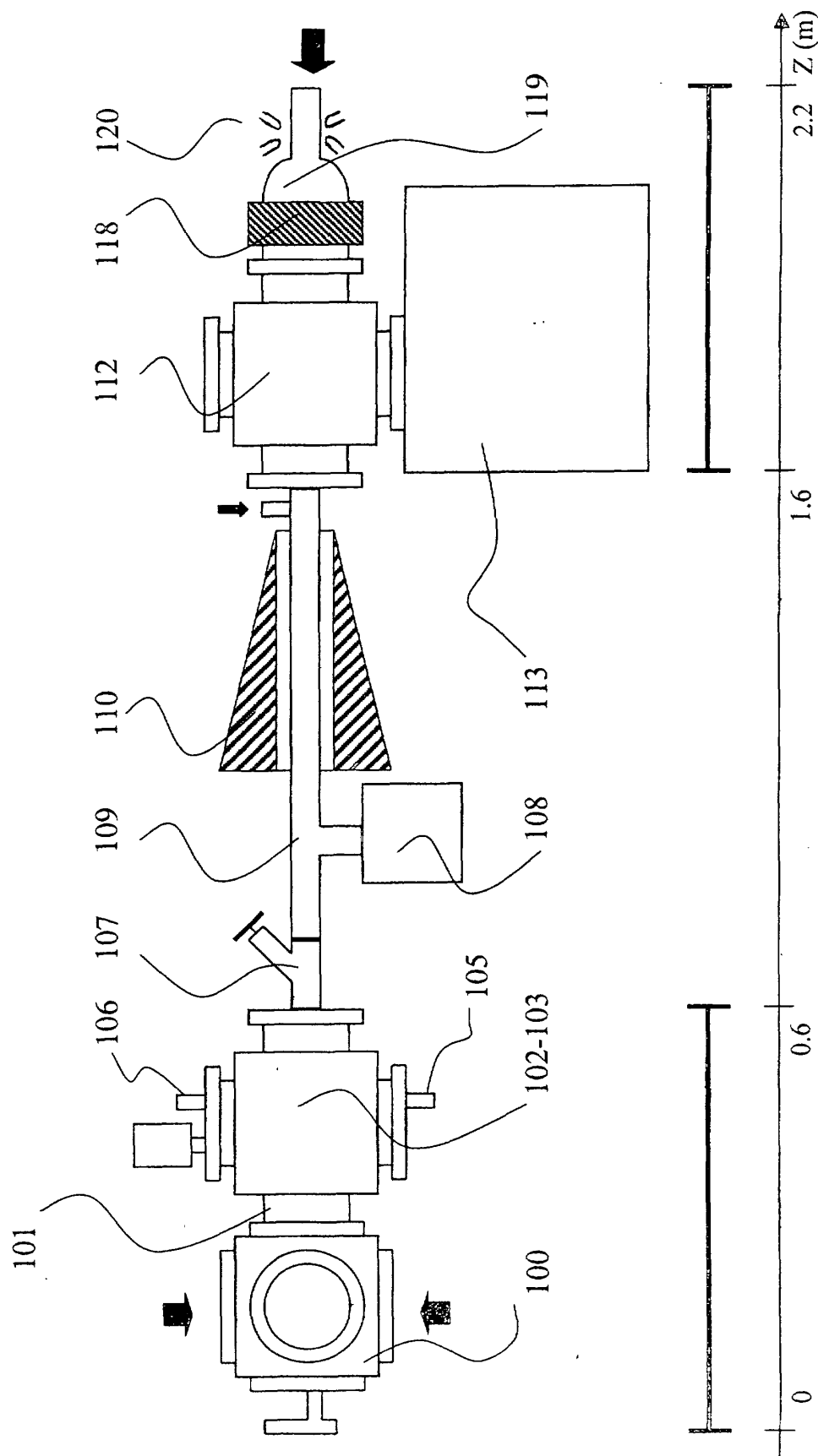


FIG. 3

FIG. 4



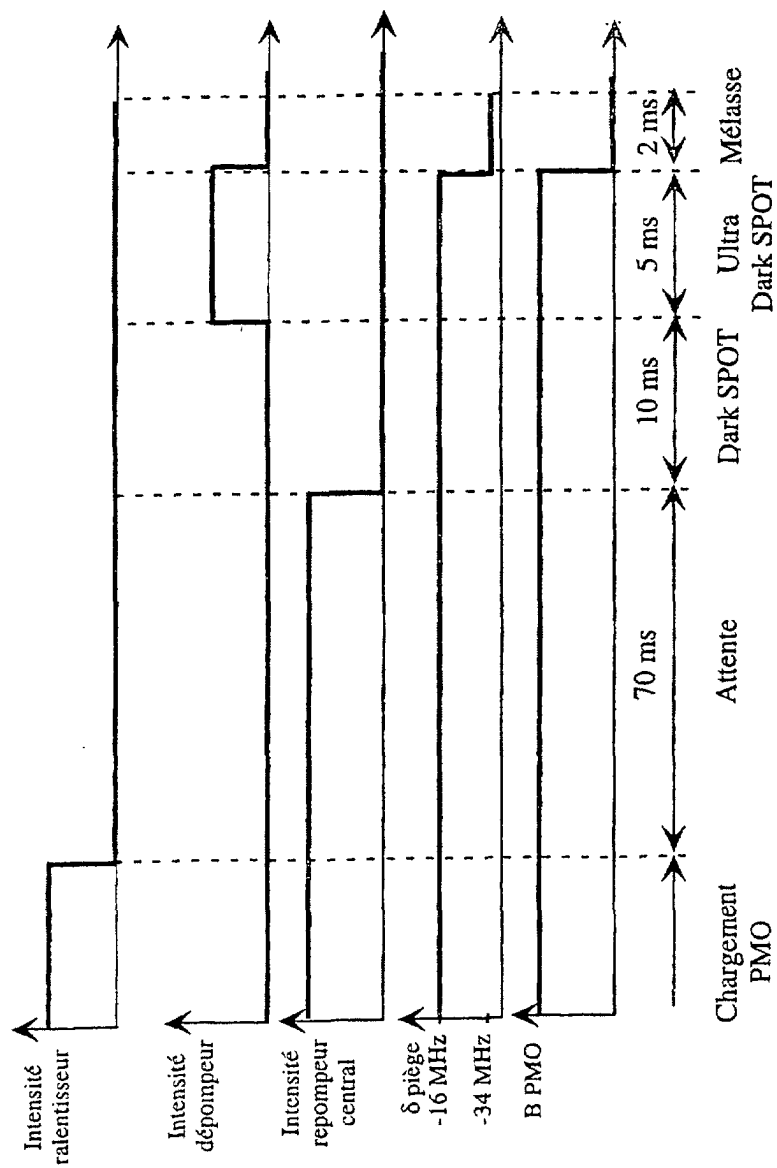


FIG. 5



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 01 40 0460

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.C1.7)
D,A	DESUELLE B ET AL: "TRAPPING COLD NEUTRAL ATOMS WITH AN IRON-CORE ELECTROMAGNET" EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D: ATOMS, MOLECULES, CLUSTERS AND OPTICAL PHYSICS, EDP SCIENCES, LES ULIS, FR, 1998, pages 255-258, XP000937558 ISSN: 1434-6060 * page 255, colonne de gauche, dernier alinéa; figure 1 * * page 257, colonne de gauche, alinéa 2 * * page 257, colonne de droite, dernier alinéa * ---	1,8	H05H3/02
D,A	TOLLET J J ET AL: "PERMANENT MAGNET TRAP FOR COLD ATOMS" PHYSICAL REVIEW, A. GENERAL PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 51, no. 1, janvier 1995 (1995-01), pages R22-R25, XP000938673 ISSN: 1050-2947 * page 51, colonne de gauche, alinéa 3 * * figure 1 * ---	1,5,6	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.C1.7)
A	ESSLINGER T ET AL: "Bose-Einstein condensation in a quadrupole-Ioffe-configuration trap" PHYSICAL REVIEW A (ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS), OCT. 1998, APS THROUGH AIP, USA, vol. 58, no. 4, pages R2664-R2667, XP000953007 ISSN: 1050-2947 * page 2664, colonne de gauche, alinéa 2 * * page 2665, colonne de droite, alinéa 1 * * page 2666, colonne de droite, alinéa 1 * -----	3,8,9	H05H
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 19 juin 2001	Examineur Capostagno, E
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ----- & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

EPO FORM 1503 03 82 (P04C02)