

(19)



(11)

EP 2 473 886 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
29.05.2013 Bulletin 2013/22

(21) Numéro de dépôt: **10760897.8**

(22) Date de dépôt: **01.09.2010**

(51) Int Cl.:
G04F 5/14 (2006.01)

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/CH2010/000215

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2011/026252 (10.03.2011 Gazette 2011/10)

(54) **DISPOSITIF POUR HORLOGE ATOMIQUE**

VORRICHTUNG FÜR ATOMUHR

DEVICE FOR ATOMIC CLOCK

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO SE SI SK SM TR**

(30) Priorité: **04.09.2009 EP 09405149
09.07.2010 CH 11222010**

(43) Date de publication de la demande:
11.07.2012 Bulletin 2012/28

(73) Titulaire: **CSEM Centre Suisse d'Electronique
et de Microtechnique SA
2002 Neuchâtel (CH)**

(72) Inventeurs:
• **LECOMTE, Steve
CH-1233 Bernex (CH)**
• **HAESLER, Jacques
CH-3280 Murten (CH)**

(74) Mandataire: **Moinas & Savoye SA
42, rue Plantamour
1201 Genève (CH)**

(56) Documents cités:
**EP-A1- 0 550 240 US-A1- 2007 139 128
US-A1- 2007 146 085 US-A1- 2009 128 820**

EP 2 473 886 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

Introduction

[0001] La présente invention concerne le domaine des horloges atomiques.

Etat de l'Art

[0002] Les horloges atomiques miniatures (volume d'un cm³ ou inférieur), à basse consommation électrique (inférieure au Watt) et qui permettent des applications portables sont des dispositifs rendus possibles par la combinaison des principes physiques CPT (piégeage cohérent de population) ou Raman avec une architecture d'horloge atomique basée sur une cellule d'absorption à gaz. Ces deux principes physiques ne nécessitent pas de cavité microonde pour interroger les atomes de référence (typiquement Rubidium ou Césium) et éliminent ainsi la contrainte de volume associée aux horloges atomiques traditionnelles de type cellule. La partie physique de l'horloge, qui est constituée de la source lumineuse, des éléments optiques, de la cellule à gaz, du photodétecteur et de toutes les fonctions telles que chauffage et génération de champ magnétique, va faire l'objet des considérations qui suivent. L'implémentation de technologies telles que les lasers de type semi-conducteur à émission de surface et cavité verticale (vertical cavity surface-emitting laser, VCSEL), les techniques de micro-fabrication pour les cellules à gaz et d'encapsulation sous vide ont permis de réduire massivement le volume et la consommation électrique de ces horloges atomiques. Les lasers VCSEL offrent la possibilité de combiner la fonction de pompage optique et l'interrogation microonde des atomes de référence. Ce type de laser offre les avantages suivants : modulation du courant d'injection possible jusqu'à plusieurs gigahertz, basse consommation, longueur d'onde compatible avec les atomes standards de référence (Rubidium ou Césium), excellente durée de vie, fonctionnement à haute température, bas coût et puissance optique idéalement adaptée. Les technologies de microstructuration du silicium couplées aux procédés de collage/soudage d'un substrat en verre (typiquement pyrex ou quartz) sur un substrat en silicium permettent de réaliser des cellules à gaz de dimensions beaucoup plus petites que ce qu'il est possible de réaliser avec la technique traditionnelle de soufflage et formage de tube en verre. La réduction des dimensions de la cellule à gaz est également accompagnée par une diminution de la consommation nécessaire pour chauffer la cellule à gaz.

[0003] Différents arrangements de la partie physique d'une telle horloge ont été réalisés. La majorité des arrangements sont basés sur un passage unique du faisceau laser au travers de la cellule (voir S. Knappe, MEMS atomic clocks, Book chapter in Comprehensive Microsystems, vol. 3, p. 571 (2008), Ed. Elsevier), d'autres tirent profit de cellules à gaz comportant des miroirs à

l'intérieur de la cellule ou encore permettant un double passage du faisceau laser au travers de la cellule (voir documents US7064835 et EP0550240). Les arrangements avec double passage de la lumière au travers de la cellule ont l'avantage de doubler la longueur optique effective de la cellule et donc d'améliorer les performances de l'horloge atomique (en termes de consommation électrique et/ou de stabilité de fréquence). Néanmoins, ces arrangements double passage n'ont pas été implémentés pour des raisons d'instabilité du dispositif et en particulier à cause de perturbations du laser provoquées par la lumière rétro-réfléchi par les miroirs sur le laser.

[0004] Les documents US7064835 (Symmetricom), US5340986 (Wong) et US2009/128820 (Seiko, fig. 6) décrivent l'utilisation d'un élément séparateur afin de diriger le faisceau réfléchi vers le photodétecteur. La lumière émise par le laser est polarisée linéairement, convertie en polarisation circulaire par une lame quart-d'onde avant passage dans la cellule, réflexion sur le miroir, deuxième passage dans la cellule, et détection sur un photodétecteur.

[0005] Les configurations décrites ci-dessus présentent des inconvénients pour réaliser un oscillateur CPT. En effet, un détecteur peut être placé avant le passage de la lumière dans la cellule et un autre après le double passage dans la cellule, mais aucun photodétecteur ne peut être positionné après un seul passage de la lumière dans la cellule. Ce détecteur additionnel permet d'obtenir un signal supplémentaire à celui du détecteur placé après le double passage. Ce signal supplémentaire est utile pour mesurer et contrôler des paramètres de l'horloge tels que la température de la cellule ou la fréquence de la source laser par exemple. De plus, les configurations décrites ci-dessus sont peu applicables dans une configuration d'un oscillateur Raman du fait que l'asservissement de la fréquence de la source laser est effectué par le même détecteur assurant la détection du faisceau laser de retour de la cellule.

Brève description de l'invention

[0006] La présente invention vise donc à proposer un dispositif pour horloge atomique permettant un double passage dans la cellule et qui permet un asservissement aisé de la fréquence laser, tant pour un oscillateur CPT que pour un oscillateur Raman.

[0007] Ce but est atteint par un dispositif pour horloge atomique comprenant une source laser générant un faisceau laser, une lame quart d'onde modifiant la polarisation linéaire du faisceau laser en une polarisation circulaire et inversement, une cellule à gaz placée sur le faisceau laser de polarisation circulaire, un miroir renvoyant le faisceau laser vers la cellule à gaz, un premier photodétecteur, ainsi que des moyens pour empêcher le faisceau réfléchi d'atteindre la source laser, **caractérisé en ce qu'il** comprend un second photodétecteur, placé derrière le miroir, ledit miroir étant semi-transparent et lais-

sant passer une partie du faisceau laser, ledit second photodétecteur servant à l'asservissement en fréquence optique du laser et/ou à l'asservissement de la température de la cellule.

Brève description des figures

[0008] L'invention sera mieux comprise grâce à la description détaillée qui va suivre en se référant aux dessins annexés dans lesquels :

Figure 1(a): Schéma de principe de l'oscillateur CPT

Figure 1(b): Schéma de principe de l'oscillateur Raman

Figure 2: Premier mode de réalisation à double passage avec filtre polarisant

Figure 3: Second mode de réalisation à double passage avec cube polarisant

Figure 4: Troisième mode de réalisation à double passage avec miroir oblique

Figure 5: Présentation schématique éclatée du dispositif de l'invention basé sur le second mode de réalisation à double passage et une géométrie à angle droit

Figure 6: Présentation schématique selon le premier mode de réalisation à double passage de la conception du dispositif de l'invention basé sur le concept de l'horloge atomique CPT avec géométrie à angle droit

Figure 7: Présentation schématique éclaté du dispositif de l'invention basé sur le second mode de réalisation à double passage et avec une géométrie droite

Figure 8a et 8b: Présentation schématique selon le premier mode de réalisation à double passage de la conception du dispositif de l'invention à géométrie droite pour l'horloge atomique CPT (8a) et l'oscillateur Raman (8b)

Figure 9: Présentation schématique selon le premier mode de réalisation à double passage de la conception du dispositif de l'invention basé sur le concept de l'oscillateur Raman avec géométrie à angle droit

Figure 10: Présentation schématique selon le troisième mode de réalisation à double passage de la conception du dispositif de l'invention basé sur le concept de l'horloge atomique CPT sans cube séparateur placé entre la source laser et la cellule

Figures 11: Présentation schématique selon le troisième mode de réalisation à double passage de la conception du dispositif de l'invention basé sur le concept de l'oscillateur Raman sans cube séparateur placé entre la source laser et la cellule

Description détaillée

[0009] La figure la illustre le schéma de principe de l'horloge atomique CPT comprenant une diode laser **102**, une lame $\lambda/4$ (ou lame quart d'onde) **105**, une cellule à gaz (atomique) **106**, un champ magnétique B optionnel, un premier photodétecteur **108**, une électronique de contrôle (A) et un oscillateur micro-onde (C). Le faisceau laser ayant traversé la cellule à gaz **106** est capté par le premier photodétecteur **108** et est utilisé par l'électronique de contrôle pour stabiliser la fréquence du laser (B) et la fréquence de l'oscillateur microonde (C). Un diviseur microonde (\div) permet de générer la fréquence de référence demandée par l'utilisateur final du dispositif.

[0010] La figure 1b illustre le schéma de principe d'un oscillateur Raman en boucle fermée comprenant une diode laser **102**, une lame $\lambda/4$ (ou lame quart d'onde) **105**, une cellule à gaz (atomique) **106**, un champ magnétique B optionnel, un premier photodétecteur **108**, un diviseur de fréquence microonde (\div), et un amplificateur radiofréquence (RF) (D). Le faisceau laser émis par la diode laser **102** subit dans la cellule à gaz **106** une interaction lumière-atome qui génère un faisceau complémentaire appelé faisceau Raman. Les deux faisceaux de lumière sont captés par le premier photodétecteur **108** et le battement de fréquences de ces deux faisceaux est amplifié (D) et utilisé comme rétroaction sur le laser pour fermer la boucle microonde de l'oscillateur Raman.

[0011] Les figures 2, 3 et 4 illustrent 3 modes de réalisation différents permettant de réaliser simultanément le double passage dans la cellule à gaz et l'asservissement de fréquence ainsi que la protection de la source laser envers les réflexions. Le point commun de ces différents modes de réalisation est la présence d'un miroir semi-transparent **107** qui laisse passer une partie du faisceau laser ayant traversé la cellule à gaz afin d'atteindre un photodétecteur **109** servant à l'asservissement en fréquence optique du laser et/ou à l'asservissement de la température de la cellule.

[0012] Ces trois modes de réalisations différent dans le moyen utilisé pour diriger le faisceau vers la cellule et les photodétecteurs, et dans le moyen utilisé pour empêcher le faisceau réfléchi par le miroir de venir perturber la source laser.

[0013] La figure 2 illustre le premier mode de réalisation de l'invention. La source laser **102** produit un faisceau laser polarisé linéairement et qui est dirigée vers le polariseur **103**, dont l'axe de transmission est orienté de manière à laisser passer le faisceau laser, puis vers le séparateur **101** dont le pourcentage de séparation est prédéfini. Une partie du faisceau est ainsi transmise vers le photodétecteur optionnel **108b**. Le séparateur réfléchi

l'autre partie du faisceau vers une lame quart d'onde **105**. La polarisation linéaire est notée « P » pour la partie parallèle à l'axe de transmission du polariseur (partie transmise) et « S » pour la partie perpendiculaire à l'axe de transmission du polariseur (partie absorbée par le polariseur). Dans les figures, la partie « P » est symbolisée par des cercles pleins et la partie « S » par des traits. Le rôle de la lame **105** est de changer la polarisation linéaire du faisceau laser en une polarisation circulaire et cette lame est orientée par rapport au polariseur de façon à générer une polarisation circulaire. En effet, l'interaction entre la lumière et les atomes de la cellule à gaz **106** est optimale lorsqu'elle est réalisée avec un faisceau de polarisation circulaire. Une partie du faisceau sortant de la cellule à gaz **106** est ensuite réfléchi par un miroir **107**, ce qui inverse le sens de sa polarisation circulaire, et traverse ainsi une seconde fois la cellule à gaz **106**. En sortant de la cellule à gaz **106**, le faisceau atteint la lame quart d'onde **105**. Selon le pourcentage de séparation prédéfini du séparateur **101**, ce faisceau est ensuite en partie transmis et atteint le photodétecteur **108a**. Une autre partie de ce faisceau est déviée par le séparateur **101** et est fortement atténuée par le polariseur **103** car sa polarisation est perpendiculaire à celle de l'axe de transmission du polariseur **103**, la source laser **102** étant ainsi protégée des rétro-réflexions. Une faible partie du faisceau ayant traversé la cellule à gaz **106** est transmise par le miroir **107** et captée par le photodétecteur **109**.

[0014] La figure 3 illustre le second mode de réalisation de l'invention. Il diffère du premier mode par l'utilisation d'un séparateur **101** qui réfléchit le faisceau selon une première polarisation et laisse passer le faisceau selon une seconde polarisation. Ainsi le faisceau sortant de la source laser **102** est séparé selon sa polarisation et le même principe s'applique au faisceau réfléchi. Il n'est ainsi pas nécessaire de placer un polariseur entre le séparateur **101** et la source laser du fait que le faisceau réfléchi est entièrement transmis vers le photodétecteur **108a**. La polarisation linéaire est notée « P » pour la partie parallèle à l'axe de polarisation du séparateur (partie transmise dans la configuration à angle droit de la figure 3) et « S » pour la partie perpendiculaire à l'axe de polarisation du séparateur (partie déviée à 90°). Dans la figure 3, la partie « P » est symbolisée par des traits et la partie « S » par des cercles pleins. Une faible partie du faisceau ayant traversé la cellule à gaz **106** est transmise par le miroir **107** et captée par le photodétecteur **109**.

[0015] La figure 4 illustre le troisième mode de réalisation de l'invention. Sur cette figure, la déviation du faisceau laser est assurée par le miroir semi-transparent **107** qui est disposé selon un angle non perpendiculaire par rapport à l'axe du faisceau laser. Ainsi le faisceau réfléchi n'atteint pas la source laser **102** mais est dirigé directement sur le photodétecteur **108a**. Dans le cas de l'oscillateur Raman, il est avantageux que le miroir **107** soit de forme concave, la forme concave étant destinée à focaliser le faisceau de lumière réfléchi sur le photodé-

tecteur **(108a)**. Une faible partie du faisceau ayant traversé la cellule à gaz **106** est transmise par le miroir **107** et captée par le photodétecteur **109**. Cette forme concave du miroir peut être réalisée sur les modes des figures 2 et 3 apportant les avantages décrits ci-dessus.

[0016] Un exemple de réalisation plus complet correspondant au deuxième mode de réalisation est illustré à la figure 5. Le séparateur **101** est réalisé sous la forme d'un cube à sélection de polarisation (polarizing beam splitter cube, PBSC). Ce cube permet d'implémenter une double traversée de la cellule à gaz **106** qui multiplie par deux l'interaction entre la lumière du laser et le milieu atomique. On obtient un meilleur signal atomique et ainsi une meilleure stabilité de la fréquence de l'horloge atomique.

[0017] Sur la figure 5, l'ensemble optique est basé sur un cube séparateur miniature **101** dont les côtés sont de préférence inférieurs ou égaux à 1 mm, le cube **101** faisant office de séparateur. Selon un mode standard, le volume du cube est de typiquement 1 mm³. Le faisceau de lumière de la diode laser **102** arrive sur l'un des côtés du cube **101**. Selon un mode de réalisation, la diode laser est de type semi-conducteur à cavité verticale et à émission de surface (VCSEL) émettant un faisceau divergeant de lumière à 795 nm. Dans d'autres modes de réalisation, d'autres types de diodes laser ayant des longueurs d'ondes variant typiquement de 780 nm à 894 nm peuvent être utilisés pour une cellule à gaz contenant du Rubidium ou du Césium. Ce choix est dicté par la composition atomique de la cellule à gaz. Selon un mode de réalisation, une lentille de collimation peut être ajoutée devant la diode laser pour produire un faisceau laser non-divergeant.

[0018] Selon un mode standard, la lumière produite **112** par le laser **102** a une polarisation linéaire et est atténuée par un filtre neutre absorbant **104a**. Un type différent de filtre peut être utilisé dans d'autres modes de réalisation. La présence de ce filtre n'est pas nécessaire à l'invention. Une lame demi-onde **104b** peut être utilisée pour modifier l'angle de la polarisation linéaire de la source laser. En combinaison avec le cube miniature **101**, la lame demi-onde **104b** joue le rôle d'un atténuateur variable. Dans d'autres modes de réalisation, l'utilisation de la lame demi-onde **104b** peut être omise et le rapport d'intensité lumineuse entre les faisceaux transmis et réfléchi par le cube **101** est ajusté par une orientation appropriée de l'axe de polarisation linéaire de la lumière émise par le laser par rapport au cube séparateur. Une lame quart d'onde **105** est placée en sortie de cube contre la face d'où sort le faisceau laser dévié par le séparateur **101**, soit à angle droit du faisceau incident au cube. L'axe rapide de la lame quart d'onde **105** est orienté de telle sorte que la polarisation linéaire incidente **113** est modifiée vers une polarisation circulaire **114** selon un premier sens de rotation. Dans d'autres modes de réalisation, la lame quart d'onde **105** est orientée de telle sorte que la polarisation linéaire incidente **113** est modifiée vers une polarisation circulaire selon un sens de rotation inverse

au premier. Le rayon laser de polarisation circulaire **114** traverse la cellule à gaz **106** et parvient sur le miroir **107**. Ce dernier ne renvoie le rayon que partiellement et une partie du rayon traverse le miroir **107** pour se diriger vers le photodétecteur **109**. Selon un mode standard, la cellule à gaz est réalisée en verre-silicium-verre par des techniques MEMS (microsystème électromécanique) avec un volume intérieur de typiquement 1 mm³ et remplie avec un milieu absorbant de type vapeur atomique de métal alcalin (Rubidium ou Césium), et un mélange de gaz tampon. Selon un mode standard, la cellule à gaz est remplie avec du Rubidium-87 et un mélange d'azote et d'argon comme gaz tampon. Dans d'autres formes de réalisations, d'autres types de cellules peuvent être remplies avec des gaz tampons différents. Selon un mode particulier, une cellule miniature cylindrique peut être utilisée. Selon un autre mode particulier, la cellule à gaz peut être intégrée dans le PBSC **101**. La cellule **106** peut être remplie avec d'autres types de vapeur métallique alcaline (rubidium-85, rubidium naturel, césium-133 par exemple) et d'autres types de gaz tampon (Xe, Ne par exemple).

[0019] La figure 6 illustre la conception d'un dispositif particulièrement adapté pour l'horloge CPT selon le premier mode de réalisation. L'enseignement de ce mode de réalisation peut être adapté à la réalisation d'autres horloges atomiques que celle basée sur le schéma de l'oscillateur Raman (figure 1b). Selon un mode de réalisation standard (géométrie à angle droit), le pourcentage de séparation du séparateur **101** est prédéfini de manière à avoir une transmission majoritaire et une réflexion minoritaire d'environ 90% et 10% (+/- 10%) respectivement.

[0020] Après son interaction avec les atomes de la vapeur de métal alcalin, le faisceau de lumière **114** polarisé circulairement est majoritairement réfléchi par un miroir **107**. Dans un mode de réalisation CPT standard, la fenêtre de sortie de la cellule à gaz **106** est recouverte de métal (argent ou or, par exemple) pour jouer le rôle de réflecteur. Dans un autre mode de réalisation, le revêtement de la fenêtre de sortie de la cellule à gaz **106** peut être un miroir diélectrique. La transmission du réflecteur **107** est choisie de manière à ce qu'une faible partie de la lumière soit transmise vers le photodétecteur **109**. La lumière rétro-réfléchi **115** passe à travers et interagit une seconde fois avec le milieu atomique (double passage). En sortie de cellule, le faisceau traverse la lame quart d'onde **105** qui transforme sa polarisation circulaire en polarisation linéaire **116**, perpendiculaire à l'axe de transmission du polariseur **103**, et est majoritairement transmis par le cube séparateur miniature **101**. Ce faisceau de lumière transmis **117** atteint le photodétecteur **108a** qui enregistre le spectre d'absorption et plus spécifiquement la diminution d'absorption due au processus de piégeage cohérent de population (CPT). Dans un mode de réalisation CPT standard, le photodétecteur **108a** est un photodétecteur de type silicium. Dans d'autres modes de réalisation CPT, différents types de photodétecteurs peuvent être utilisés. La partie minoritaire **119**

du faisceau **116** dévié par le séparateur **101** est atténuée par le polariseur **103** et ne perturbe ainsi pas le laser. Le second photodétecteur **108b** enregistre le faisceau de lumière **118** transmis initialement par le cube séparateur miniature **101**. De cette manière, la puissance de sortie de la diode laser **102** peut être mesurée et réglée par une boucle d'asservissement dédiée. Les diaphragmes **110** et **111** sont utilisés pour éviter qu'une lumière indésirable n'atteigne les photodétecteurs si la taille du faisceau laser est supérieure aux dimensions des faces du cube séparateur miniature **101**. La lumière enregistrée par le photodétecteur **109** situé après le miroir **107** peut être utilisée pour différents types d'asservissement tels que fréquence du laser ou température de la cellule.

[0021] La figure 7 illustre une conception à double passage optique basée sur le deuxième mode de réalisation, avec une géométrie droite **200** (le codage numérique commence à **200** pour la conception **200**) qui est très similaire à la conception à angle droit et double passage **100** (voir Figure 5). La différence principale comparée à la conception **100** réside dans la position de l'entité « cellule à gaz **206**, lame quart d'onde **205**, miroir semi-transparent **207** et photodétecteur **209** » et du photodétecteur **208b**. Dans le modèle **200** de la figure 7, la cellule à gaz **206** est placée au dessus du PBSC **201** et est donc située vis-à-vis du laser **202**. De cette manière, le faisceau de lumière de polarisation P **213** transmis par le PBSC puis modifié en faisceau de polarisation circulaire par la lame quart d'onde **205** interagit avec le milieu atomique. Le faisceau de lumière de polarisation S **217** est réfléchi par le PBSC **201** et le photodétecteur **208b** placé à angle droit est utilisé pour la mesure de la puissance laser. A part ces différences, le principe de fonctionnement de la conception **200** est le même que pour le modèle **100**.

[0022] Sur la figure 8a et selon un mode de réalisation CPT à géométrie droite selon le premier mode de réalisation, le pourcentage de séparation du cube séparateur est prédéfini de manière inverse à celle décrite précédemment (boîtier à angle droit de la figure 6), à savoir une transmission minoritaire et une réflexion majoritaire d'environ 10% et 90% respectivement (+/- 10%). La conception à double passage et géométrie droite ainsi obtenue **200** (le codage numérique commence à **200** pour la conception **200**) est très similaire à la conception à angle droit et double passage **100** (voir Figure 6). Le rôle du séparateur **201** est ainsi inversé afin que la partie minoritaire du faisceau provenant de la diode laser **202** soit transmise plutôt que déviée. Pour sa part, le faisceau rétro-réfléchi **216** est alors majoritairement dévié vers le photodétecteur **208a**. La différence principale dans l'arrangement des différents éléments comparée à la conception **100** réside dans la position de l'entité « cellule à gaz **206**, lame quart d'onde **205**, miroir semi-transparent **207** et photodétecteur **209** ». Dans le modèle **200** de la figure 8a, l'entité cellule à gaz est placée au dessus du cube séparateur **201** et est donc située vis-à-vis du laser **202**. Le photodétecteur **208b** est placé à angle droit, où

le faisceau de lumière émis par le laser **202** est réfléchi par le cube séparateur **201** et est utilisé pour la mesure de la puissance laser. A part ces différences, le principe de fonctionnement de la conception **200** est le même que pour le modèle **100**.

[0023] La figure 8b illustre la représentation schématique du boîtier à géométrie droite **200** à double passage du mode de réalisation de l'oscillateur Raman selon le premier mode de réalisation. Toutes les références numériques correspondent au modèle **100** du mode de réalisation Raman et commencent par "2" au lieu de "1". Dans le cas de l'oscillateur Raman, le pourcentage de séparation du cube séparateur est prédéfini de manière inverse à celle décrite ci-dessus (horloge atomique CPT de la figure 8a), à savoir une réflexion minoritaire et une transmission majoritaire d'environ 2% et 98% respectivement (+/- 2%).

[0024] La figure 9 illustre un dispositif particulièrement adapté pour un oscillateur Raman selon le premier mode de réalisation et géométrie à angle droit. Le pourcentage de séparation du séparateur **101** est prédéfini de manière à avoir une transmission minoritaire et une réflexion majoritaire d'environ 2% et 98% respectivement (+/- 2%). Après son interaction avec les atomes de la vapeur de métal alcalin, le faisceau de lumière incident **114a** et le faisceau de lumière généré par la diffusion Raman stimulée (appelé faisceau Raman) **114b** sont réfléchis par un miroir **107**. Dans un mode de réalisation Raman standard, le miroir **107** est revêtu d'argent, il est incliné (typiquement de 2 à 20 degrés) et/ou excentré par rapport à son axe de symétrie et l'axe défini par le faisceau laser incident et est concave avec une longueur focale choisie pour focaliser les faisceaux de lumière rétro-réfléchis **115** (faisceaux incident et Raman) sur le photodétecteur **108a**. Le miroir **107** a une transmission typique de quelques pourcents. Ces pourcents de lumière transmise atteignant la surface du photodétecteur **109** sont utilisés pour mesurer le spectre d'absorption et pour stabiliser la fréquence optique du laser. Dans une réalisation Raman différente, la fenêtre de sortie de la cellule à gaz **106** est concave, revêtu d'argent (ou d'un autre métal, comme par exemple l'or) et joue le rôle de réflecteur. Dans d'autres réalisations, le revêtement de la fenêtre de sortie du miroir peut être fait de couches diélectriques.

[0025] Les faisceaux de lumière rétro-réfléchis **115** (incident et Raman) passent à travers et interagissent une seconde fois avec le milieu atomique (double passage). La lame quart d'onde **105** transforme ces faisceaux de lumière polarisés circulairement en faisceaux de lumière de polarisation linéaire **116**. Ces faisceaux de lumière sont majoritairement déviés **119** (incident et Raman) et atteignent le premier photodétecteur **108a** qui enregistre le battement de fréquences entre le faisceau incident et le faisceau Raman. Dans un mode de réalisation Raman standard, le premier photodétecteur **108a** est un photodétecteur de type semi-conducteur à grande vitesse (silicium ou arséniure de gallium) qui est positionné au foyer du miroir concave **107**. Dans d'autres modes de réalisation

Raman, différents types de photodétecteurs à grande vitesse peuvent être utilisés. Le second photodétecteur **108b** enregistre la lumière **118** provenant directement du laser **102** et transmise initialement par le cube séparateur miniature **101**. De cette manière, la puissance de sortie de la diode laser **102** peut être mesurée et réglée par une boucle d'asservissement dédiée. En option, le photodétecteur **121** enregistre le faisceau rétro-réfléchi **117** transmis par le séparateur **101**. Les diaphragmes **110** et **111** sont utilisés pour éviter qu'une lumière indésirable n'atteigne les photodétecteurs si leurs dimensions sont supérieures à celles du cube séparateur miniature **101**.

[0026] Les figures 10 et 11 illustrent le troisième mode de réalisation pour l'horloge atomique CPT et l'oscillateur Raman, respectivement, et qui n'est pas basé sur un cube séparateur, mais sur une simple géométrie à double passage. La lumière émise par la source laser est polarisée linéairement, convertie en polarisation circulaire par une lame quart d'onde **105** avant passage dans la cellule, réflexion sur le miroir, deuxième passage dans la cellule, et détection sur un photodétecteur **108a**. Le miroir **107** est semi-transparent, avec un deuxième photodétecteur **109** placé derrière le miroir.

[0027] C'est l'utilisation du miroir semi-transparent **107** qui permet la détection de lumière ayant interagi avec les atomes de la cellule par le photodétecteur **109**. Cette détection par un deuxième photodétecteur est particulièrement favorable dans le cas d'une utilisation du dispositif basée sur un oscillateur Raman. Dans le cas d'un oscillateur Raman, le photodétecteur **108a** a une bande passante très étroite et centrée autour de la fréquence de résonance des atomes afin de maximiser son efficacité de détection du signal. La fréquence de résonance atomique élevée (typiquement >1GHz) a pour conséquence d'avoir un photodétecteur de petite taille. Ce cahier des charges n'est pas compatible avec une détection du signal ayant interagi avec les atomes de la cellule pour ajuster la fréquence optique du laser sur le pic de résonance, ou pour ajuster la température de la cellule. Dans ce cas-là, une fréquence de coupure basse (typiquement < 100kHz), voire un fonctionnement DC, sont indiqués. Il est donc préférable de disposer de deux détecteurs, l'un servant à la détection du signal d'horloge, l'autre à l'asservissement en fréquence optique du laser et/ou à l'asservissement de la température de la cellule. Le moyen idéal de réaliser cette deuxième détection d'un signal ayant interagi avec les atomes de la cellule est d'utiliser un miroir semi-transparent pour la réflexion et de placer derrière ce miroir un photodétecteur **109**.

[0028] Pour l'oscillateur Raman, il est également avantageux que le miroir **107** soit de forme concave comme à la figure 11, la forme concave étant destinée à focaliser le faisceau de lumière réfléchi sur le photodétecteur **108a**.

[0029] Cet arrangement est également intéressant pour une horloge basée sur un principe CPT, car le photodétecteur situé derrière le miroir semi-transparent peut

servir à des fins de stabilisation de la température de la cellule contenant les atomes ou de la fréquence de la source laser.

[0030] Pour éviter que les faisceaux rétro-réfléchis par le miroir ne perturbent la source laser **102**, il est aussi avantageux de placer un polariseur **103** devant la source laser **102** et avec un axe de transmission parallèle à la polarisation du faisceau émis par la source laser **102**.

[0031] En option, on peut également utiliser les éléments suivantes :

- un filtre neutre **104** placé entre la source laser **102** et la lame quart d'onde **105** afin d'ajuster la puissance du faisceau laser
- un filtre réfléchif incliné **104** placé entre la source laser **102** et la lame quart d'onde **105** afin de réfléchir une partie du faisceau laser et d'ajuster sa puissance
- un troisième photodétecteur **108b** placé de manière à enregistrer la lumière réfléchi par le filtre réfléchif incliné **104** pour l'asservissement de la puissance optique du laser **102**

Revendications

1. Dispositif pour horloge atomique comprenant une source laser (102) générant un faisceau laser, une lame quart d'onde (105) modifiant la polarisation linéaire du faisceau laser en une polarisation circulaire et inversement, une cellule à gaz (106) traversée par le faisceau laser de polarisation circulaire, un miroir (107) renvoyant le faisceau laser vers la cellule à gaz, et un premier photodétecteur (108a), ainsi que des moyens (103, 101, 107) pour empêcher le faisceau réfléchi d'atteindre la source laser (102), **caractérisé en ce qu'il** comprend un second photodétecteur (109), placé derrière le miroir (107), ledit miroir étant semi-transparent et laissant passer une partie du faisceau laser, ledit second photodétecteur (109) servant à l'asservissement en fréquence optique du laser et/ou à l'asservissement de la température de la cellule (106).
2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les moyens pour empêcher le faisceau réfléchi d'atteindre la source laser (102) comprennent un séparateur (101) placé entre la source laser (102) et le miroir (107) et permettant de dévier et de laisser passer une partie du faisceau laser selon un pourcentage prédéfini, ainsi qu'un polariseur (103) placé entre la sortie du faisceau laser et le séparateur afin de protéger la source laser des rétro-réflexions provenant des différents éléments optiques composant le dispositif.
3. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en**

ce que les moyens pour empêcher le faisceau réfléchi d'atteindre la source laser (102) comprennent un séparateur (101) placé entre la source laser (102) et le miroir (107) et permettant de dévier et de laisser passer le faisceau laser selon la polarisation dudit faisceau de telle sorte que la polarisation du faisceau provenant de la source laser (102) via le séparateur (101) et arrivant sur la lame quart d'onde (105) est linéaire selon le premier angle et est modifiée par la lame quart d'onde (105) en polarisation circulaire, et ainsi que la polarisation circulaire du faisceau réfléchi par le miroir (107) et traversant une seconde fois la cellule à gaz (106) est modifiée en polarisation linéaire selon le second angle par la lame quart d'onde (105), le séparateur (101) acheminant le faisceau rétro-réfléchi vers le premier photodétecteur (108a).

4. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les moyens pour empêcher le faisceau réfléchi d'atteindre la source laser (102) comprennent des moyens pour incliner le miroir (107) selon un angle non perpendiculaire par rapport à l'axe du faisceau laser, le faisceau réfléchi étant ainsi dévié de l'axe du faisceau émis par la source laser.
5. Dispositif selon les revendications 1 à 4, caractérisé en que le miroir (107) est de forme concave, de manière à focaliser le faisceau de lumière réfléchi sur le premier photodétecteur (108a).
6. Dispositif selon les revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** le miroir (107) est de forme concave et dont l'axe de symétrie est excentré par rapport à celui défini par le faisceau laser incident de manière à focaliser le faisceau de lumière réfléchi sur le photodétecteur (108a) et empêcher le faisceau réfléchi d'atteindre la source laser (102).
7. Dispositif selon la revendication 2 ou 3, **caractérisé en ce qu'il** comprend un troisième photodétecteur (108b) placé après le séparateur (101) de telle sorte qu'une partie du faisceau laser atteigne ledit troisième photodétecteur (108b) sans avoir traversé la cellule à gaz (106).
8. Dispositif selon l'une des revendications 2, 3 ou 7, **caractérisé en ce qu'il** comprend un diaphragme (110) placé entre le séparateur et la cellule à gaz (106), ce diaphragme réduisant la taille du faisceau laser.
9. Dispositif selon l'une des revendications 2, 3, 7 ou 8, **caractérisé en ce qu'il** comprend un deuxième diaphragme (111) placé entre le séparateur (101) et la cellule à gaz (106), ce diaphragme réduisant la taille du faisceau laser.

Patentansprüche

1. Vorrichtung für eine Atomuhr mit einer einen Laserstrahl erzeugenden Laserquelle (102), mit einer $\lambda/4$ -Platte (105), die die lineare Polarisierung des Laserstrahles in eine zirkuläre Polarisierung und umgekehrt ändert, mit einer Gaszelle (106), die von dem Laserstrahl mit zirkulärer Polarisierung passiert ist, mit einem Spiegel (107), der den Laserstrahl zu der Gaszelle lenkt, und mit einem ersten Photodetektor (108a) sowie mit Mitteln (103, 101, 107) zum Verhindern des Beaufschlagens der Laserquelle (102) durch den reflektierten Strahl, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie über einen zweiten Photodetektor (109) verfügt, der hinter dem Spiegel (107) angeordnet ist, wobei der Spiegel halbdurchlässig ist und einen Teil des Laserstrahles durchlässt und wobei der zweite Photodetektor (109) zum Beeinflussen der optischen Frequenz des Lasers und/oder zum Beeinflussen der Temperatur der Zelle (106) dient.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mittel zum Verhindern des Beaufschlagens der Laserquelle (102) durch den reflektierten Strahl über einen Strahlteiler (101) verfügen, der zwischen der Laserquelle (102) sowie dem Spiegel (107) angeordnet ist und der gemäß einem vorbestimmten Anteil ein Ablenken sowie ein Durchlassen eines Teiles des Laserstrahles gestattet, und einen Polarisator (103) aufweisen, der zwischen dem Austritt des Laserstrahles und dem Strahlteiler angeordnet ist, um die Laserquelle vor Rückreflexionen zu schützen, die von den die Vorrichtung bildenden verschiedenen optischen Elementen stammen.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mittel zum Verhindern des Beaufschlagens der Laserquelle (102) durch den reflektierten Strahl über einen Strahlteiler (101) verfügen, der zwischen der Laserquelle (102) sowie dem Spiegel (107) angeordnet ist und der ein Ablenken sowie einen Durchlass des Laserstrahles in Abhängigkeit der Polarisierung des Strahles derart gestattet, dass die Polarisierung des Strahles, der aus der Laserquelle (102) über den Strahlteiler (101) stammt und über die gleiche $\lambda/4$ -Platte (105) einfällt, gemäß dem ersten Winkel linear ist und durch die $\lambda/4$ -Platte (105) in eine zirkuläre Polarisierung geändert ist, und dass weiterhin die zirkuläre Polarisierung des durch den Spiegel (107) reflektierten und die Gaszelle (106) zum zweiten Mal passierenden Strahls durch die gleiche $\lambda/4$ -Platte (105) in eine in Richtung des zweiten Winkels lineare Polarisierung geändert ist, wobei der Strahlteiler (101) den rückreflektierten Strahl in Richtung des ersten Photodetektors (108a) lenkt.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mittel zum Verhindern des Beaufschlagens der Laserquelle (102) durch den reflektierten Strahl über Mittel zum Neigen des Spiegels (107) entsprechend einem in Bezug auf die Achse des Laserstrahles nicht rechtwinkligen Winkels aufweisen, so dass der reflektierte Strahl somit von der Achse des durch die Laserquelle abgegebenen Strahles abgelenkt ist.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Spiegel (107) von konkaver Gestalt ist, so dass der reflektierte Lichtstrahl auf den ersten Photodetektor (108a) fokussiert ist.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Spiegel (107) von konkaver Gestalt ist und dessen Symmetrieachse in Bezug auf die des einfallenden Laserstrahles versetzt ist, um den reflektierten Lichtstrahl auf den Photodetektor (108a) zu fokussieren und den reflektierten Strahl am Beaufschlagens der Laserquelle (102) zu hindern.
7. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie mit einem dritten Photodetektor (108b) ausgestattet ist, der nach dem Strahlteiler (101) derart angeordnet ist, dass ein Teil des Laserstrahles den dritten Photodetektor (108b) beaufschlagt, ohne die Gaszelle (106) passiert zu haben.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2, 3 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie weiterhin über eine Blende (110) verfügt, die zwischen dem Strahlteiler und der Gaszelle (106) angeordnet ist, wobei die Blende die Strahlweite des Laserstrahles verringert.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2, 3, 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie mit einer zweiten Blende (111) ausgestattet ist, die zwischen dem Strahlteiler (101) und der Gaszelle (106) angeordnet ist, wobei die Blende die Strahlweite des Laserstrahles verringert.

Claims

1. A device for an atomic clock comprising a laser source (102) generating a laser beam, a quarter-wave plate (105) modifying the linear polarization of the laser beam into a circular polarization and vice versa, a gas cell (106) passed through by the laser beam with circular polarization, a mirror (107) sending the laser beam back toward the gas cell, and a first photodetector (108a), as well as means (103,

- 101, 107) for preventing the reflected beam from reaching the laser source (102), **characterized in that** it comprises a second photodetector (109), placed behind the mirror (107), said mirror being semitransparent and allowing a portion of the laser beam to pass, said second photodetector (109) being used to control the optical frequency of the laser and/or to control the temperature of the cell (106).
2. The device as claimed in claim 1, **characterized in that** the means for preventing the reflected beam from reaching the laser source (102) comprise a splitter (101) placed between the laser source (102) and the mirror (107) and being used to deflect and allow a portion of the laser beam to pass according to a predefined percentage, as well as a polarizer (103) placed between the output of the laser beam and the splitter in order to protect the laser source from the back-reflections from the various optical elements making up the device.
3. The device as claimed in claim 1, **characterized in that** the means for preventing the reflected beam from reaching the laser source (102) comprise a splitter (101) placed between the laser source (102) and the mirror (107) and being used to deflect and allow the laser beam to pass depending on the polarization of said beam in such a way that the polarization of the beam from the laser source (102) via the splitter (101) and arriving on the quarter-wave plate (105) is linear according to the first angle and is modified by the quarter-wave plate (105) into circular polarization, and so that the circular polarization of the beam reflected by the mirror (107) and passing a second time through the gas cell (106) is modified into linear polarization according to the second angle by the quarter-wave plate (105), the splitter (101) directing the back-reflected beam to the first photodetector (108a).
4. The device as claimed in claim 1, **characterized in that** the means for preventing the reflected beam from reaching the laser source (102) comprise means for inclining the mirror (107) according to an angle that is not perpendicular to the axis of the laser beam, the reflected beam thus being deflected from the axis of the beam emitted by the laser source.
5. The device as claimed in the claims 1 to 4, **characterized in that** the mirror (107) is of concave form, so as to focus the reflected light beam on the first photodetector (108a).
6. The device as claimed in the claims 1 to 4, **characterized in that** the mirror (107) is of concave form and the axis of symmetry of which is off-center relative to that defined by the incident laser beam so as to focus the reflected light beam on the photodetector (108a) and prevent the reflected beam from reaching the laser source (102).
7. The device as claimed in claim 2 or 3, **characterized in that** it comprises a third photodetector (108b) placed after the splitter (101) so that a portion of the laser beam reaches said third photodetector (108b) without having passed through the gas cell (106).
8. The device as claimed in claim 2, 3 or 7 **characterized in that** it comprises a diaphragm (110) placed between the splitter and the gas cell (106), this diaphragm reducing the size of the laser beam.
9. The device as claimed in one of claims 2, 3, 7 or 8, **characterized in that** it comprises a second diaphragm (111) placed between the splitter (101) and the gas cell (106), this diaphragm reducing the size of the laser beam.

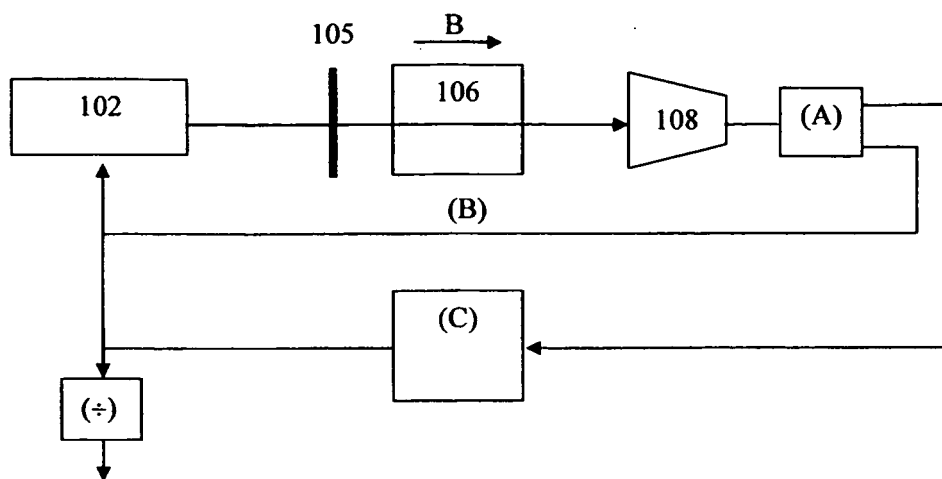


Fig. 1a

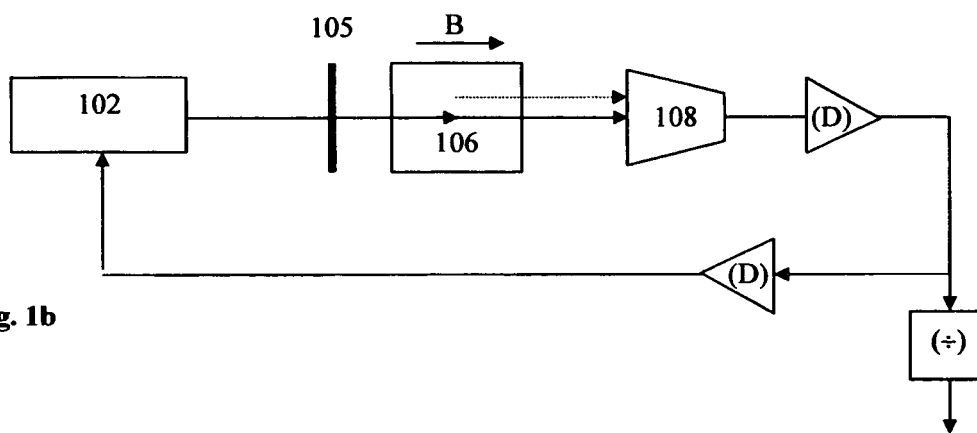


Fig. 1b

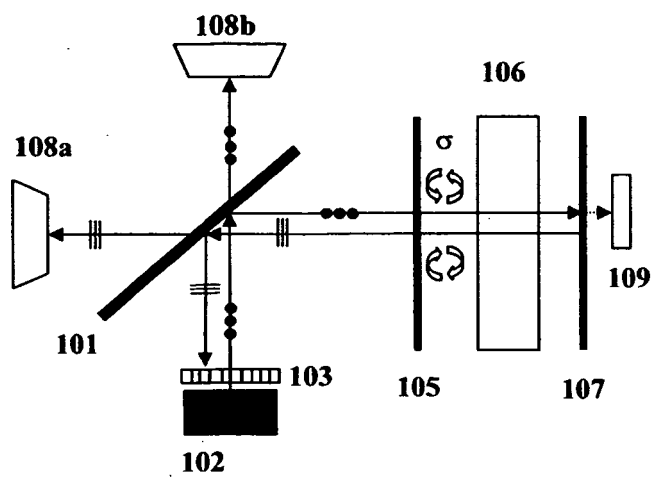


Fig. 2

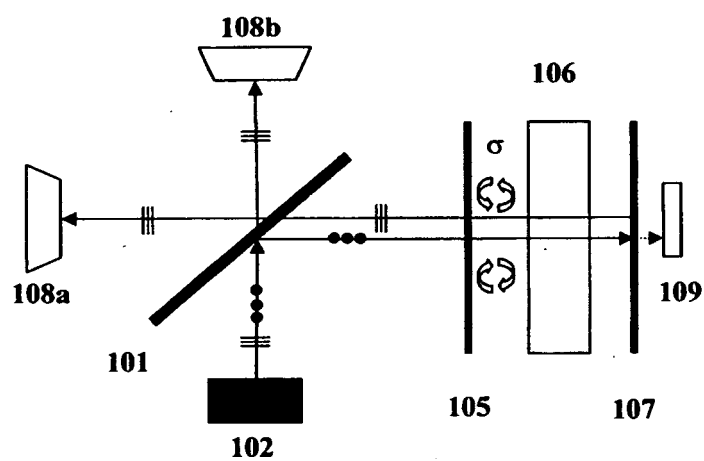


Fig. 3

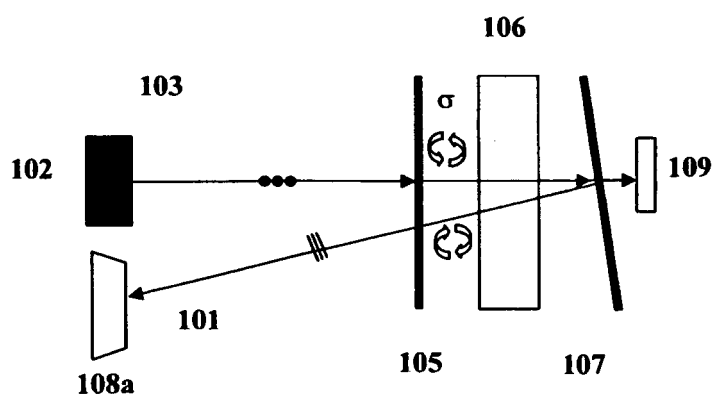


Fig. 4

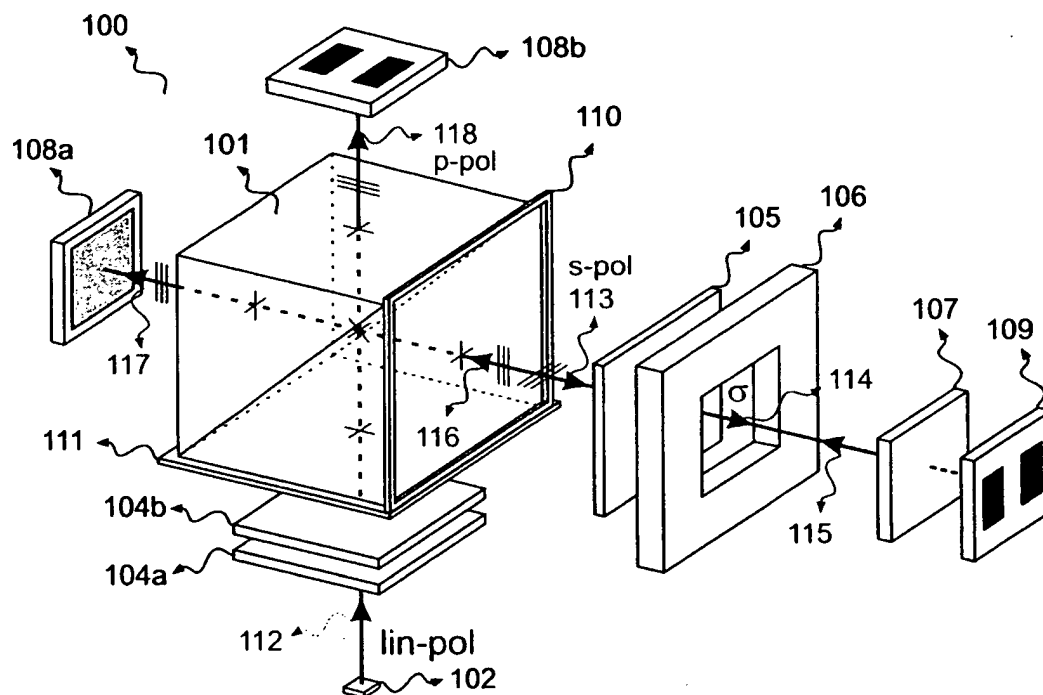


Fig. 5

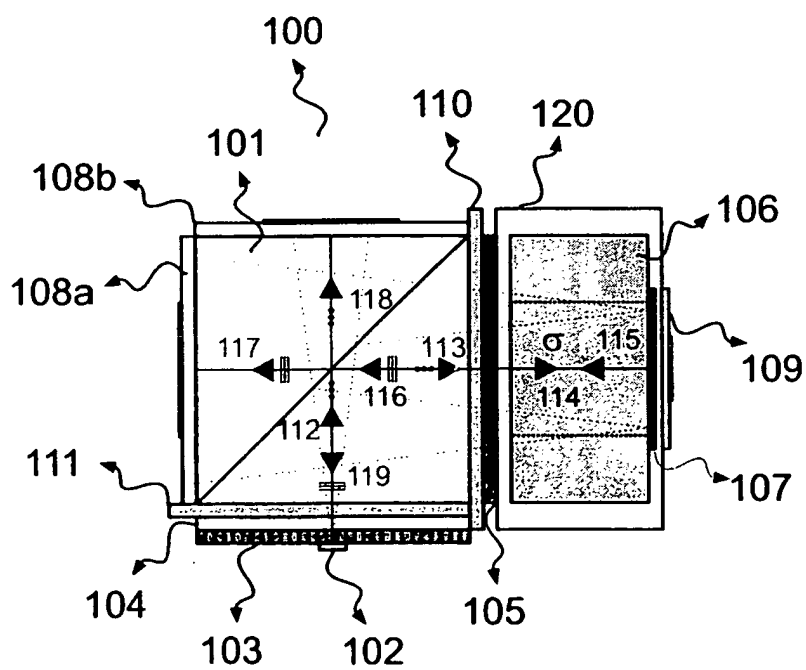


Fig. 6

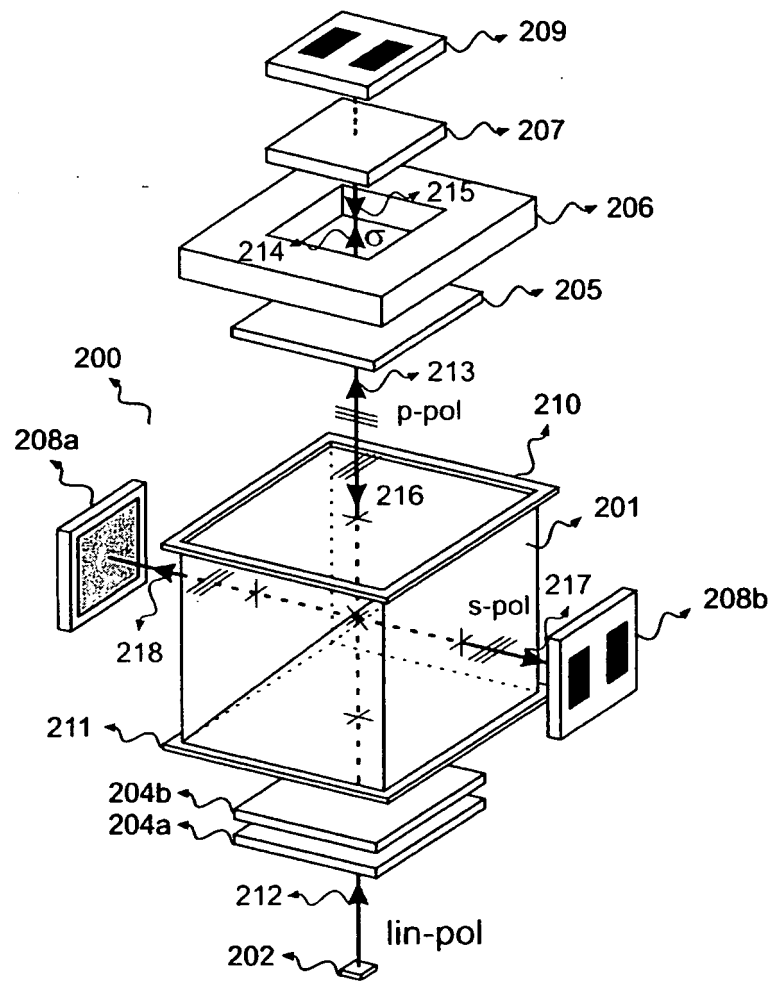


Fig. 7

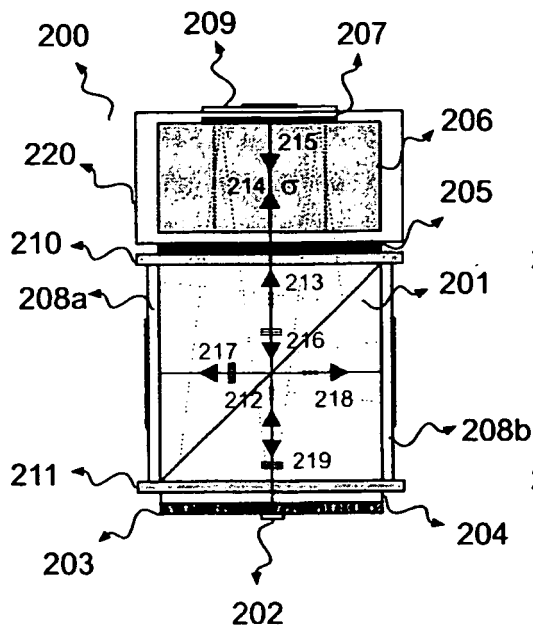


Fig. 8a

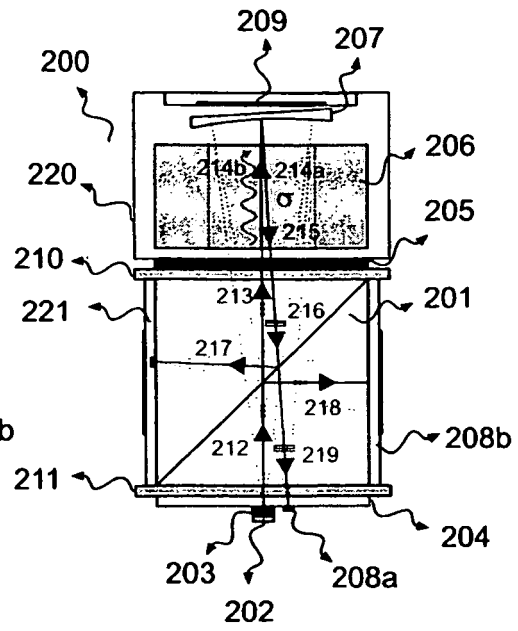


Fig. 8b

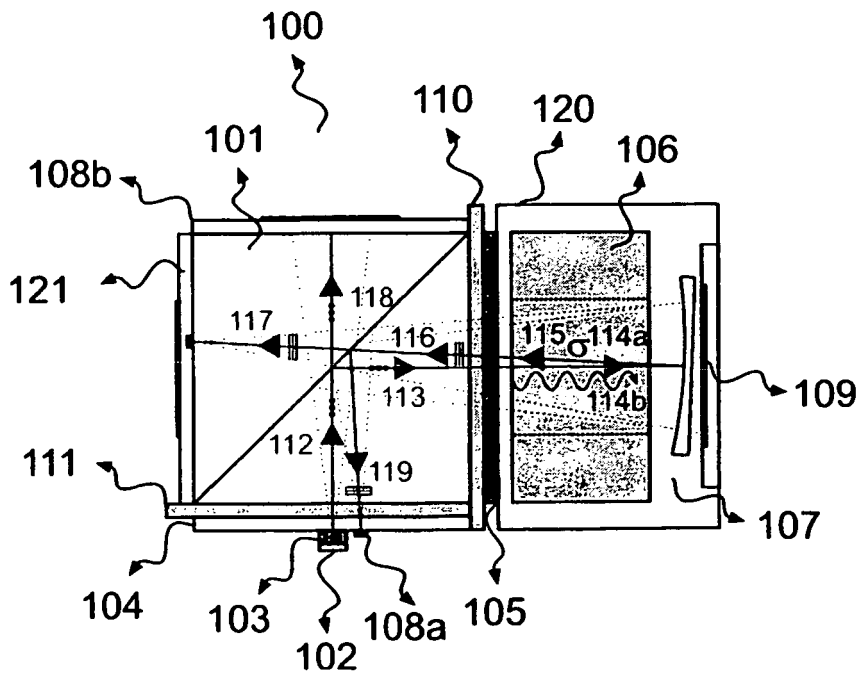


Fig. 9

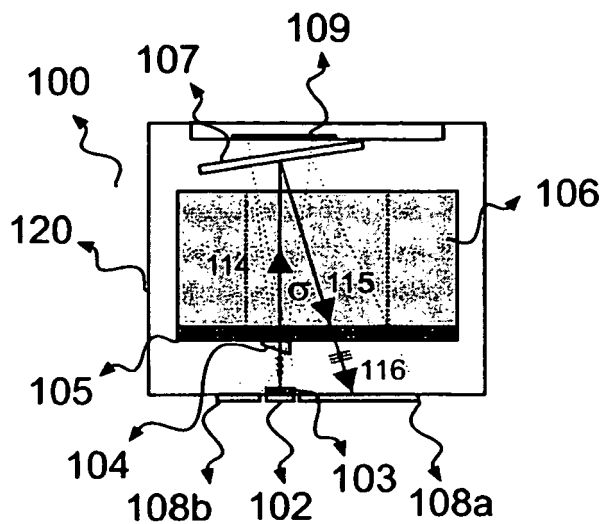


Fig. 10

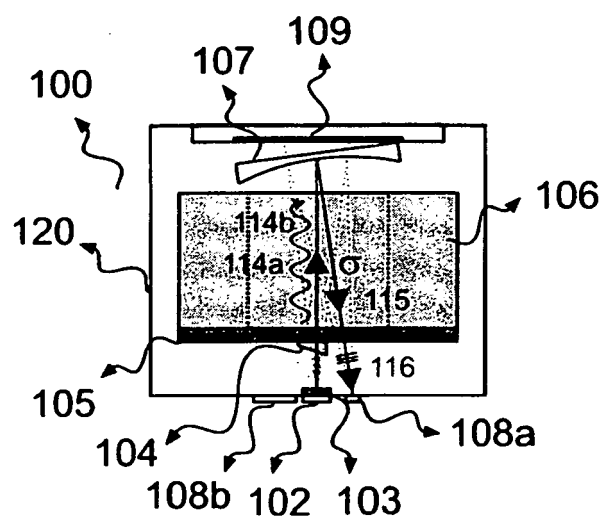


Fig. 11

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 7064835 B [0003] [0004]
- EP 0550240 A [0003]
- US 5340986 A, Wong [0004]
- US 2009128820 A [0004]

Littérature non-brevet citée dans la description

- MEMS atomic clocks. **S. KNAPPE**. Comprehensive Microsystems. Elsevier, 2008, vol. 3, 571 [0003]