



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
12.09.2012 Bulletin 2012/37

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

(21) Numéro de dépôt: **11405231.9**

(22) Date de dépôt: **09.03.2011**

(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 RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA ME

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

(72) Inventeur: **La désignation de l'inventeur n'a pas encore été déposée**

(74) Mandataire: **Aivazian, Denis et al**
Moinas & Savoye S.A.
42, rue Plantamour
1201 Genève (CH)

(54) **Horloge atomique**

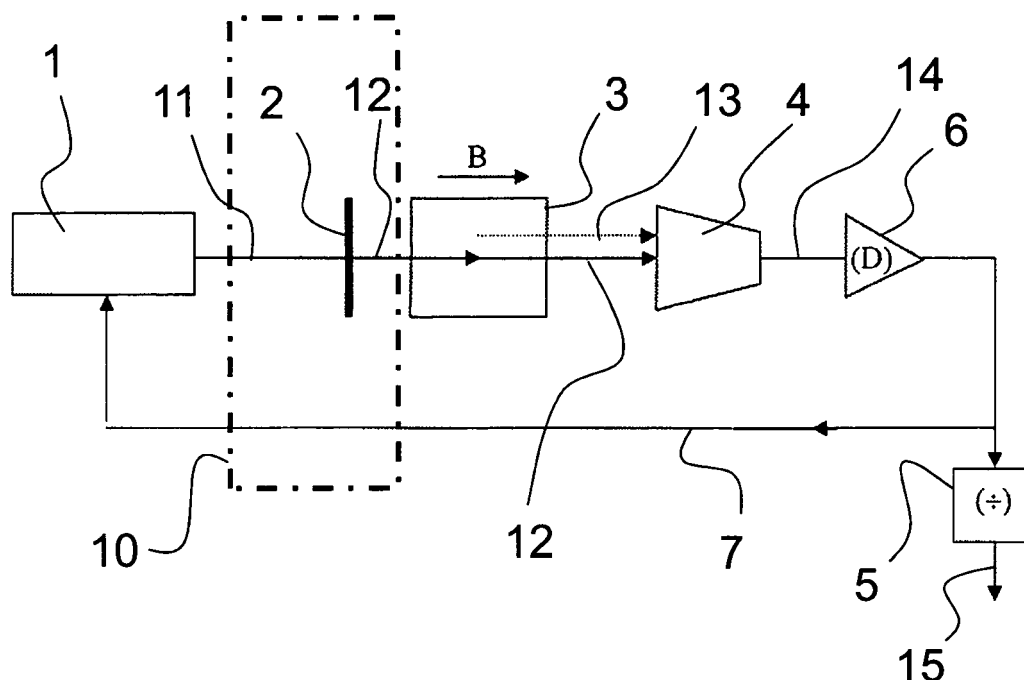
(57) Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique, comprenant les étapes suivantes :

- envoi d'un faisceau laser (11 ; 112 ; 212) issu d'une source laser au travers une cellule (3 ; 106 ; 206) ;
- détection d'une fréquence de battements obtenus entre le faisceau issu de la source laser et transmis au sein de la cellule et le faisceau induit par effet Raman au sein des atomes de la cellule (3 ; 106 ; 206) ;

et caractérisé en ce qu'il comprend un procédé d'allumage de l'horloge atomique comprenant les étapes suivantes :

- une première phase de recherche du courant d'injection optimal du laser en boucle ouverte de l'horloge atomique,
- une seconde phase d'allumage de l'horloge comprenant la mise en boucle fermée de l'horloge par le retour du signal microonde reçu en sortie de la cellule pour le contrôle du courant d'injection du laser.

Fig.1



Description

Introduction

[0001] La présente invention concerne un procédé d'émission d'un signal de référence de temps par une horloge atomique ainsi qu'une horloge atomique en tant que telle utilisant un tel procédé.

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 docks, Book chapter in Comprehensive Microsys-

tems, 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.

[0006] Toutefois, les horloges atomiques existantes restent insuffisantes et l'invention cherche une solution pour une horloge atomique qui représente un meilleur compromis entre la précision et la consommation.

Brève description de l'invention

[0007] A cet effet, l'invention repose sur une solution d'émission d'un signal de référence de temps par une horloge atomique, comprenant notamment un procédé d'allumage de l'horloge atomique comprenant les étapes suivantes :

- une première phase de recherche du courant d'injection optimal du laser en boucle ouverte de l'horloge atomique,
- une seconde phase d'allumage de l'horloge comprenant la mise en boucle fermée de l'horloge par le

retour du signal microonde reçu en sortie de la cellule pour le contrôle du courant d'injection du laser.

[0008] L'invention est plus précisément définie par les revendications.

Brève description des figures

[0009] Ces objets, caractéristiques et avantages de la présente invention seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faits à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

La figure 1 représente un schéma de principe d'une horloge atomique selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 2 représente un schéma fonctionnel de l'horloge atomique selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 3 représente un schéma électrique équivalent d'un système de détection optoélectronique selon un mode de réalisation de la présente invention.

La figure 4 représente un schéma électrique équivalent d'un détecteur optoélectronique selon un autre mode de réalisation de la présente invention.

La figure 5 représente schématiquement les courbes de gain g en fonction de la fréquence ω , les deux axes étant logarithmiques, pour un amplificateur à transimpédance classique (trait plein), un amplificateur à transimpédance doté d'un élément permettant d'augmenter la bande passante (« inductor peaking » ou « high frequency gain boosting », traitillé), et un système de détection selon l'invention (pointillé).

La figure 6 représente le spectre d'absorption d'un gaz en fonction du balayage en courant d'injection laser avec l'horloge atomique en boucle ouverte.

La figure 7 représente un premier mode de réalisation d'une horloge atomique à double passage.

La figure 8 représente un second mode de réalisation d'une horloge atomique à double passage.

La figure 9 représente un troisième mode de réalisation d'une horloge atomique à double passage.

La figure 10 représente une vue schématique éclatée d'une horloge atomique basée sur le second mode de réalisation à double passage et une géométrie à angle droit.

La figure 11 représente une vue schématique éclatée d'une horloge atomique basée sur le second mode de réalisation à double passage et une géométrie droite.

La figure 12 représente une vue schématique d'une horloge atomique basée sur le premier mode de réalisation à double passage.

La figure 13 représente une vue schématique d'une horloge atomique basée sur le premier mode de réalisation à double passage avec géométrie à angle droit.

La figure 14 représente une vue schématique d'une horloge atomique basée sur le troisième mode de réalisation à double passage.

[0010] La solution retenue repose sur l'utilisation d'un oscillateur atomique basé sur l'effet Raman, qui repose sur l'irradiation d'atomes de référence à une fréquence optique de résonance qui induit l'émission de photons avec une fréquence optique décalée de la fréquence hyperfine de l'atome de référence. La combinaison des deux signaux résultants permet d'obtenir un battement détectable, dont la fréquence du signal sert de base de temps à l'horloge.

[0011] La figure 1 illustre schématiquement la partie optique d'une horloge atomique à effet Raman selon un mode de réalisation de l'invention. Elle comprend une diode laser 1, qui peut être à basse consommation et de type VCSEL, qui émet un faisceau polarisé linéairement 11, une lame quart d'onde 2 qui polarise la lumière provenant du laser selon un faisceau incident de polarisation circulaire 12. Ce faisceau 12 traverse une cellule 3 comprenant des atomes choisis, comme du Césium ou du Rubidium avec un gaz tampon, placée de manière optionnelle dans un champ magnétique B . En sortie de cette cellule 3, le signal incident 12 est combiné avec le second signal 13 généré par l'effet Raman, comme explicité ci-dessus. La combinaison des deux signaux est détectée par un photodétecteur 4 qui permet la récupération du signal comprenant la base de temps atomique, provenant des atomes de Césium ou Rubidium. Ce signal de sortie 14 est analysé par un dispositif électronique de traitement du signal, de type diviseur de fréquence microonde 5 pour générer la fréquence du signal nécessaire à la base de temps. La sortie 15 représente finalement cette base de temps, exploitée par une horloge comme cela sera explicité par la suite. Un amplificateur radiofréquence 6, optionnel, est positionné en sortie du photodétecteur 4.

[0012] En remarque, de manière optionnelle mais avantageuse, une partie du signal de sortie 14 est utilisé pour moduler le courant d'injection du laser, par une injection micro-onde au niveau du laser 1, représentée par la flèche 7. Cela permet d'atteindre un rapport signal-sur-bruit en sortie 14 de meilleure qualité et plus facile à

exploiter. Ce principe équivaut à une modulation en amplitude du laser.

[0013] En remarque, la cellule 3 a été positionnée au sein d'un champ magnétique B, qui permet de lever la dégénérescence des sous-états Zeeman des atomes. En variante, elle pourrait se trouver dans un champ magnétique nul, permettant d'obtenir une superposition des niveaux d'énergie, et un signal élevé, ainsi qu'une horloge simplifiée.

[0014] La figure 2 représente de manière fonctionnelle une horloge atomique à effet Raman selon un mode de réalisation de l'invention. Il comprend un dispositif d'alimentation et convertisseur DC/DC 21, un centre de traitement 23 qui peut être un processeur ou une électronique à basse puissance, dont les fonctions principales comprennent tout ou partie des fonctions suivantes : fixation de la fréquence de fonctionnement du laser 1 et de son courant d'injection, contrôle de la température de la cellule 3 et du laser 1, gestion du mode intermittent du laser, correction de la fréquence de l'horloge atomique en fonction de la température, calage d'une horloge supplémentaire de moindre précision comme à base de quartz. La mise en oeuvre de ces fonctions sera détaillée par la suite. L'horloge comprend ensuite une source de courant DC 24 pour le laser 1, une source de courant DC 25 pour le chauffage du laser 1, une source de courant 26 du solénoïde pour la génération du champ magnétique B 36, une source de courant 27 pour le chauffage de la cellule 3, qui coopère avec un dispositif de chauffage 37 associé, auquel peut être de plus ajouté un capteur de température.

[0015] Ces différents composants permettent le fonctionnement du laser 1 qui agit sur le dispositif optique 10 de l'horloge dont une représentation simplifiée a été présentée en référence à la figure 1. Dans cette réalisation, l'ensemble formé par le générateur de champ magnétique optionnel B 36, le dispositif de chauffage 37 et la cellule 3 est positionné dans une enceinte permettant d'atteindre leur blindage magnétique. En variante, une partie seulement de ces composants peut être intégrée au sein de ce blindage. En variante encore, ce champ magnétique peut être nul et l'horloge simplifiée, comme explicité précédemment. En sortie, un photodétecteur 4 rapide comprend une sortie DC pour renvoyer un signal proportionnel à l'intensité lumineuse reçue vers le centre de traitement 23. Il comprend de plus une sortie RF pour un signal qui est d'abord amplifié par une chaîne d'amplification 32 puis une ligne à retard et déphaseur 33 pour être réinjecté sur un diplexeur 34 (bias tee) qui permet de combiner le signal RF avec le courant DC d'injection laser provenant de la source de courant 24. Une partie du signal RF amplifié est traité par un diviseur de fréquence 5 avant son retour vers le centre de traitement 23. En sortie de ce centre de traitement, un signal à fréquence d'utilisateur 22 est obtenu (par exemple de 32 kHz, ou 1 pulse par seconde, etc.). Enfin, la mise en oeuvre de cette horloge est de préférence réalisée à partir de composants à faible consommation.

[0016] En remarque, les horloges atomiques de type CPT utilisent toutes une architecture complexe et comprennent un dispositif de correction de l'horloge locale, appelé par sa dénomination anglo-saxonne « Voltage Controlled Oscillator » (VCO), ainsi qu'une électronique de contrôle de l'horloge, représentant au total une forte consommation de puissance. L'horloge atomique de type Raman décrit précédemment présente l'avantage d'une plus grande simplicité pour une consommation fortement réduite.

[0017] Dans un tel oscillateur à effet Raman, un faisceau laser incident à une première fréquence interagit avec une vapeur d'atomes, stimulant ainsi, par une interaction lumière-atome, l'émission d'un second faisceau par effet Raman ayant une deuxième fréquence. Comme cela a été mentionné, le battement entre la première fréquence et la deuxième fréquence produit une troisième fréquence : la fréquence de battement, qui est exploitée comme base de temps. Dans le cas où la vapeur comprend par exemple du Rubidium-85 et où le laser est de type semi-conducteur à cavité verticale et à émission de surface émettant un faisceau de lumière à une longueur d'onde se situant aux alentours de 780nm ou de 794nm, la fréquence de battement est de l'ordre de 3GHz avec une bande passante autour d'une centaine de kHz. Cette fréquence de battement est en général de très bas niveau et a un contenu spectral très réduit. La détection de ces fréquences de battement en sortie de l'horloge est un problème technique délicat, en particulier pour limiter la consommation.

[0018] Pour répondre à ce problème technique, il est proposé un système de détection d'un signal (i_{PD}) haute fréquence (ω_C) à bande étroite, ledit système ayant une basse consommation de courant. Le système comprend un générateur pour fournir le signal (i_{PD}) sous forme d'un courant, et un circuit de résonance parallèle pour faire varier l'impédance de la sortie du générateur en fonction de la fréquence du signal généré et pour convertir le courant en tension. Le système comprend en plus un étage d'amplification pour augmenter encore le gain en dégradant de façon minimale le bruit du système pour permettre la détection d'un signal de très faible amplitude. Le générateur est le photodétecteur 4 mentionné précédemment, stimulé par de la radiation électromagnétique.

[0019] Selon un mode de réalisation du système de détection, représenté sur la figure 3, une simple inductance L1 est comprise dans la réalisation du circuit de résonance parallèle et le photodétecteur est du type photodiode PD. La photodiode PD est polarisée au travers de l'inductance L1 connectée à une source de tension. Ceci permet de maintenir la photodiode PD à une tension désirée en fournissant le courant nécessaire pour que la photodiode PD fonctionne correctement. Il est à noter que le signal à détecter a un contenu spectral centré autour d'une fréquence prédéterminée ω_C qui est de l'ordre de quelques gigahertz et très étroit (de l'ordre de $10^{-4} \times \omega_C$).

[0020] Le signal à détecter i_{PD} apparaît sous la forme

d'un courant sur un noeud N) qui relie l'inductance L1 à la photodiode PD. Ce noeud N est couplé électriquement à l'entrée de l'amplificateur MAMP et le signal amplifié apparaît à la sortie de l'amplificateur MAMP. Le noeud N ainsi configuré a donc une capacité parasite C_{IN} . Cette capacité parasite C_{IN} forme avec l'inductance L1 le circuit de résonance parallèle. La valeur de l'inductance est déterminée de sorte que sa réactance inductive à la fréquence du signal à détecter soit égale à la réactance capacitive de la capacité parasite C_{IN} . En d'autres termes $\omega_C \times L1 = 1/(\omega_C \times C_{IN})$. Sous ces conditions, on a un filtre passe-bande avec un facteur de qualité Q et une largeur à mi-hauteur de $1/Q$. Avec une inductance L1 intégrée au circuit, on atteint un facteur de qualité Q de 10 environ, alors que l'on obtient un facteur de qualité Q de 50 environ avec une inductance L1 externe au circuit. La résistance parallèle équivalente R_p a une valeur de $\omega \times L \times Q$. Grâce à un facteur de qualité Q élevé, on peut réaliser un gain important sans la consommation qui lui serait normalement associée. Sans la présente invention, on utiliserait un amplificateur transimpédance large bande avec 10GHz de bande passante à la place de celui qui est proposé. Typiquement, ce genre d'amplificateur consomme autour d'un watt, alors que l'amplificateur proposé ci-dessus consomme moins de deux milliwatts.

[0021] La figure 5 montre bien la différence du gain en fonction de la fréquence pour les deux types d'amplificateur. Un amplificateur transimpédance large bande de l'état de la technique permet de couvrir une grande plage de fréquence, mais entraîne une forte consommation et un bruit comparativement élevé, vu que le bruit est d'autant plus important que la bande passante est large. Contrairement à l'amplificateur à transimpédance large bande, la solution proposée sélectionne avec un élément résonant un signal centré autour d'une fréquence centrale qui est nettement plus faible que la fréquence de coupure typique de la technologie de photodétecteur utilisée. La caractéristique de gain montre une bande passante très étroite, compatible avec le contenu spectral étroit du signal (de l'ordre de $10^{-4} \times \omega_C$), ce qui diminue fortement le bruit par rapport à un amplificateur transimpédance. La consommation est très faible car le système ne comporte pas d'éléments actifs.

[0022] Puisque le noeud N a une impédance très élevée, il suffit d'utiliser un simple amplificateur de type MOS à source commune à faible bruit pour augmenter encore le gain en dégradant de façon minimale le bruit du système pour permettre la détection d'un signal de très faible amplitude. Dans un mode de réalisation, l'amplificateur a une charge résistive sur la sortie. Dans un autre mode de réalisation, profitant du fait que le signal à détecter a un contenu spectral très réduit, qui peut être d'une seule fréquence non-modulée, la charge à la sortie de l'amplificateur est assurée par une deuxième inductance L2 dont la valeur est choisie pour maximiser le gain pour un signal à la fréquence prédéterminée ω_C .

[0023] L'entrée de l'amplificateur peut être couplée en mode AC avec le noeud N, i.e., avec une capacité de

couplage CC, et l'entrée de l'amplificateur peut donc être polarisée par une source de tension V_b à travers une résistance R_b de façon à ce que l'entrée de l'amplificateur soit à une tension optimale. Dans la fabrication d'un circuit selon la présente invention, il se peut que la valeur de la capacité parasite C_{IN} ou la valeur de l'inductance L1 varie d'un lot à l'autre ou d'une pièce à l'autre. Ceci aurait l'effet de déplacer la fréquence de résonance du circuit de résonance en dehors de la bande de fréquence adéquate pour détecter un signal à la fréquence prédéterminée. Pour cette raison, il est proposé d'agir sur la valeur de la capacité du noeud N en ajustant cette capacité. Ceci peut se faire de différentes manières, par exemple par l'emploi d'une capacité ajustable (trim capacitor) ou par l'emploi de plusieurs capacités que l'on peut connecter ou déconnecter au noeud N, par exemple par le dépôt ciblé de métal lors de la fabrication. Ceci peut être également accompli par un système de laser-trimming où le noeud (N) est connecté à une capacité dont la valeur est ajustée par ablation laser au moment du test de l'ensemble.

[0024] Selon un autre mode de réalisation de la présente invention, le circuit de résonance comprend un résonateur électromécanique de type résonateur à onde de volume ou Bulk Acoustic Wave (BAW), comme illustré par la figure 4. Le résonateur à onde de volume (BAW) permet un filtrage encore plus sélectif et il présente, à l'anti-résonance, une impédance réelle élevée tout en permettant de neutraliser la capacité parasite C_{IN} du noeud N. Selon un mode de réalisation, le résonateur électromécanique permet d'atteindre un facteur de qualité supérieur à 300. Dans ce mode de réalisation, la photodiode est polarisée à l'aide d'un circuit adaptif dont l'étage de sortie est une source de courant CCS contrôlée de façon à garantir une tension de polarisation fixe sur la diode en basse fréquence.

[0025] Un autre problème technique rencontré pour la mise en oeuvre de l'horloge à effet Raman est d'atteindre une stabilité suffisante, lui permettant un fonctionnement précis sur une durée satisfaisante. Ce problème est résolu par le fonctionnement décrit précédemment en relation avec la figure 1 et représenté de manière fonctionnelle par la figure 2.

[0026] Une rétroaction du signal RF détecté sur la fréquence optique du laser, afin d'asservir la fréquence d'émission du laser, est toujours préconisée dans l'état de la technique pour obtenir un oscillateur atomique stable et de haute précision, en particulier pour les horloges atomiques de type CPT. Dans le cas présent, il a été constaté qu'il était quasiment impossible de maîtriser le fonctionnement de l'oscillateur Raman de façon répétable et fiable en boucle fermée vis-à-vis de la fréquence optique du laser. La détection synchrone pour la stabilisation de la fréquence d'un laser n'est pas adéquate dans le cas d'un oscillateur Raman en boucle fermée.

[0027] De manière surprenante, il a été possible de faire fonctionner l'oscillateur Raman sans asservissement en fréquence optique du laser, c'est-à-dire avec un

asservissement en fréquence nul, ou autrement dit sans contrôle actif de la fréquence optique du laser, soit un fonctionnement en boucle ouverte vis-à-vis de la fréquence du laser.

[0028] Des tests de stabilité ont été effectués selon le principe précédent, qui ont démontré une grande stabilité de fréquence de l'horloge atomique. A une température de 87,5 °C, l'oscillateur Raman varie d'une seconde tous les 160 ans et fonctionne de façon stable pendant plusieurs jours au moins en continu.

[0029] La température de la cellule, d'une longueur active de 5 mm, a aussi été abaissée jusque sous la température de fusion du Rubidium (39.3°C). Une baisse de température de 90°C à 35°C correspond à une diminution de la pression de vapeur saturante de deux ordres de grandeur ($\sim 10^{-4}$ torr à 10^{-6} torr). La stabilité dépend de la température de la cellule mais reste acceptable jusqu'à une température de 35 °C. En effet, à une température de 40°C, l'oscillateur Raman fonctionne toujours à satisfaction avec une stabilité de une seconde tous les 16 ans, ce qui est remarquable. A 35°C, le signal Raman était toujours présent et suffisamment stable. Cette constatation inattendue permet d'envisager un oscillateur atomique sans chauffage de la cellule, fonctionnant par exemple uniquement quand la température autour de la cellule est suffisante, par exemple autour de 35°C, préférentiellement autour de 40°C. Il est aussi envisageable de diminuer la température de fonctionnement en utilisant du Cs au lieu du Rb dans la cellule, la température de fusion du Césium étant encore plus basse que celle du Rubidium (28.5°C au lieu de 39.3°C).

[0030] Un problème technique supplémentaire est rencontré lors de la mise en route de l'horloge. En effet, la solution explicitée précédemment montre comment obtenir un fonctionnement stable et performant de l'horloge lorsqu'elle est en régime de croisière, à partir des dispositifs décrits en rapport avec les figures 1 et 2. Un fonctionnement entièrement en boucle ouverte, c'est-à-dire sans le retour 7 de la figure 1, serait une variante de réalisation envisageable moins performante car le signal obtenu serait relativement faible et spectralement moins pur.

[0031] Pour cela, il a été constaté qu'il existe une plage réduite de courant d'injection du laser, soit une plage de fréquence correspondante, à proximité du pic d'absorption optique du gaz de la cellule, qui permet lorsqu'on débute une irradiation laser sur la cellule en boucle ouverte puis qu'on passe en régime fermé tel que décrit précédemment d'obtenir une mise en résonance de l'horloge pour atteindre le régime de fonctionnement optimal décrit précédemment. Ainsi, par le choix judicieux du courant d'injection du laser lors de l'allumage du laser puis la mise en circuit fermé vis-à-vis du courant d'injection du laser tel qu'explicité ci-dessus, l'horloge atteint naturellement son régime de fonctionnement optimal. Ce phénomène permet un auto-allumage de l'horloge, et rend possible son utilisation de manière intermittente.

[0032] Cette plage de fonctionnement est plus exac-

tement illustrée par la figure 6 pour le cas du Rubidium naturel. Cette figure montre la courbe 50 d'absorption optique du Rubidium, par le signal obtenu sur la photodiode 6, en fonction du courant d'injection du laser. La plage de courant favorable est située dans la zone 52, qui représente une portion du pic de plus grande absorption 51, à une certaine distance des deux valeurs maximale Vmax et Vmin de ce pic. En choisissant une plage réduite [V1 ; V2], suffisamment éloignée de ces valeurs, on en déduit une plage de courant [i1, i2] favorable. Les considérations précédentes permettent la mise en oeuvre du procédé d'allumage suivant d'un oscillateur à effet Raman, qui fait partie du procédé d'émission d'un signal de temps par horloge atomique selon l'invention.

[0033] Une première phase consiste en une recherche du courant d'injection optimal i du laser, c'est à dire la fourchette i1 à i2. Cette première phase comprend les étapes suivantes :

- mise en boucle ouverte de l'horloge à effet Raman ;
- balayage de la fréquence du laser et identification du point Vmax d'absorption maximale et du courant d'injection Imax correspondant ainsi que du point Vmin d'absorption minimale du pic 51 associé et du courant d'injection Imin correspondant ;
- détermination d'un courant d'injection ILD entre i1 et i2 en ajoutant une certaine valeur seuil delta à Imin ou en la retranchant à Imax. Par exemple, une valeur proche de i1 peut être choisie.

[0034] A titre d'exemple, pour le Rubidium et le laser VCSEL utilisé pour les expériences, le courant d'injection du laser doit être choisi entre 2.25760 mA et 2.25824 mA. V1 se trouve 15% de Vmax-Vmin au-dessus de Vmin et V2 à 67% de Vmax-Vmin au-dessus de Vmin.

[0035] Cette première phase du procédé d'allumage peut être réalisée avant chaque allumage de l'horloge, afin d'obtenir la plus grande précision possible, ce qui permet de modifier les valeurs précédentes dans le temps en fonction d'une éventuelle dérive du dispositif ou des conditions de mesure. En variante, cette phase n'est réalisée qu'une fois pour étalonner le dispositif et les données sont mémorisées pour être reprises à chaque allumage.

[0036] Le procédé d'allumage met de plus en oeuvre les étapes suivantes d'allumage concret du laser et de l'horloge ;

- mise en boucle fermée de l'horloge, en ajoutant la rétroaction 7 explicitée précédemment ;
- ajustement du courant d'injection du laser à la valeur ILD identifiée par la première phase ;
- vérification de l'obtention du phénomène de résonance de l'horloge en sortie ;
- en cas de non résonance, légère modification de la valeur du courant d'injection ILD dans la plage [i1 ; i2] selon un pas prédéfini, et répétition de cette étape jusqu'à obtenir le phénomène de résonance.

[0037] Selon une variante avantageuse, ce procédé comprend une étape préalable de mesure de la puissance optique du laser, car la fréquence de l'horloge peut dépendre de la puissance optique interagissant avec les atomes. Cette opération peut se faire en mesurant la puissance optique au moyen d'une photodiode du dispositif et en comparant la photo-tension ainsi générée avec une source de tension stable de référence. L'ajustement du courant d'injection du laser et de la température du laser permet ensuite d'obtenir la puissance optique et la fréquence optique nominales de l'horloge.

[0038] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, ce procédé comprend une étape préalable de mise en température de la cellule de gaz et du laser, car le fonctionnement de l'horloge dépend de la température, comme cela a été mentionné précédemment. Il existe une corrélation entre la fréquence de l'horloge Raman en boucle fermée et la température de la cellule. Cette propriété permet de maîtriser la fréquence lors des phases de marche et d'arrêt de l'horloge par la seule mesure de la température.

[0039] Ainsi, selon le mode de réalisation choisi, l'horloge à effet Raman comprend un asservissement en température. Pour cela, il comprend un capteur de température, qui peut être une photodiode, et un dispositif de chauffage pour augmenter la température si elle est sous une température de consigne.

[0040] Les étapes décrites précédemment du procédé d'allumage sont gérées automatiquement par l'horloge, sur la base des moyens matériel (hardware) et logiciel (software) du centre de traitement 23 mentionné précédemment, notamment sous le pilotage du microprocesseur.

[0041] Selon une première réalisation d'horloge atomique, l'oscillateur à effet Raman est utilisé de manière intermittente, en complément d'un oscillateur conventionnel de l'état de la technique, par exemple à quartz. Dans cette réalisation, l'oscillateur atomique transmet une base de temps qui permet le calage de l'oscillateur à quartz, sa correction, et permet d'augmenter fortement sa précision dans le temps. Ce fonctionnement intermittent de l'oscillateur atomique présente l'avantage d'une consommation maîtrisée. La période d'allumage de l'oscillateur atomique est choisie en fonction d'un compromis entre la consommation et la précision de l'horloge : plus cet oscillateur est utilisé, plus l'horloge sera précise mais plus la consommation sera élevée. Lorsque l'oscillateur supplémentaire de moindre précision est corrigé par l'oscillateur atomique, ce dernier est éteint.

[0042] Selon une seconde réalisation d'horloge atomique, l'oscillateur à effet Raman est utilisé seul, comme unique base de temps, et donc selon un fonctionnement permanent. Dans cette réalisation, la plus grande précision est obtenue, mais par l'intermédiaire d'une plus grande consommation énergétique.

[0043] L'horloge atomique décrite précédemment est de plus réalisée selon une structure compacte et peu encombrante. Les figures 7 à 14 décrivent ainsi plusieurs

modes de réalisation de la partie optique de l'oscillateur atomique. Pour cela, toutes ces réalisations sont basées sur un double passage du faisceau laser dans la cellule, ce qui permet d'atteindre une longueur totale importante du faisceau laser dans un petit volume.

[0044] Les figures 7 à 9 illustrent trois modes de réalisation différents permettant de réaliser simultanément un double passage dans la cellule à gaz 106 et une protection de la source laser 102 envers les réflexions. Un 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 106 afin d'atteindre un photodétecteur 109, servant à l'asservissement de la température de la cellule. En variante, ces modes de réalisation pourraient être simplifiés en supprimant ce photodétecteur 109 et en utilisant un miroir non transparent.

[0045] Ces trois modes de réalisations diffèrent 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.

[0046] La figure 7 illustre le premier mode de réalisation de l'invention. La source laser 102 produit un faisceau laser polarisé linéairement et qui est dirigé vers un polariseur 103, dont l'axe de transmission est orienté de manière à laisser passer le faisceau laser, puis vers un séparateur 101 dont le pourcentage de séparation est prédéfini. Une partie du faisceau est ainsi transmise vers un photodétecteur optionnel 108b. Le séparateur réfléchit 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.

[0047] La figure 8 illustre le second mode de réalisation. Il diffère du premier mode décrit ci-dessus 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 8) et « S » pour la partie perpendiculaire à l'axe de polarisation du séparateur (partie déviée à 90°). Dans la figure 10, 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.

[0048] La figure 9 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. Avantageusement, le miroir 107 est de forme concave pour focaliser le faisceau de lumière réfléchi sur le photodétecteur 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 aussi être utilisée sur les deux modes de réalisation des figures 7 et 8 apportant les avantages décrits ci-dessus.

[0049] Un exemple de réalisation plus complet correspondant au deuxième mode de réalisation est illustré à la figure 10. 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.

[0050] Sur la figure 10, 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 106 con-

tenant 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.

[0051] 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 réfléchis 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 naturel 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-87, césium-133 par exemple) et d'autres types de gaz tampon (Xe, Ne par exemple).

[0052] La figure 11 illustre une conception à double passage optique basée sur le deuxième mode de réalisation correspondant à la figure 8, avec une géométrie droite qui est très similaire à la conception à angle droit et double passage représenté sur la figure 10. La différence principale 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 de la figure 11, 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 cette réalisation est le même que pour le modèle précédent.

[0053] La figure 12 illustre la représentation schématique du boîtier à géométrie droite à double passage du mode de réalisation de l'horloge Raman selon le premier mode de réalisation, correspondant à la figure 7. Le codage numérique commence à 201 pour cette conception, en conservant les mêmes dizaines et unités que celles utilisées sur les figures 7 à 9 pour les mêmes éléments. Un cube séparateur 201 est utilisé, dont le pourcentage de séparation est prédéfini de sorte d'avoir une réflexion minoritaire et une transmission majoritaire, d'environ 2% et 98% respectivement (+/- 2%). Le faisceau rétro-réfléchi 216 est alors majoritairement dévié vers le photodétecteur 208a. Dans ce modèle, l'entité cellule à gaz 206 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 212 émis par le laser 202 est réfléchi 218 par le cube séparateur 201 et est utilisé par exemple pour la mesure de la puissance laser. Le principe de fonctionnement de cette conception reste similaire aux descriptions précédentes.

[0054] La figure 13 illustre un dispositif 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. Dans une réalisation Raman différente, la fenêtre de sortie de la cellule à gaz 106 est concave, revêtue 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.

[0055] 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. 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.

[0056] La figure 14 illustre le troisième mode de réalisation de l'horloge Raman, non basé sur un cube séparateur mais sur une simple géométrie à double passage. La lumière émise par la source laser 102 est polarisée linéairement, convertie en polarisation circulaire par une lame quart d'onde 105 avant passage dans la cellule 106, réflexion sur le miroir 107, deuxième passage dans la cellule, et détection sur un premier photodétecteur 108a. Le miroir 107 est semi-transparent, avec un deuxième photodétecteur 109 placé derrière le miroir. Cette utilisation du miroir semi-transparent 107 permet la détection de lumière ayant interagi avec les atomes de la cellule par le photodétecteur 109. 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.

[0057] En option, on peut également utiliser les éléments suivants :

- 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 réfléchissant 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 réfléchie par le filtre réfléchissant incliné 104 pour l'asservissement de la puissance

optique du laser 102.

[0058] En remarque, dans ces réalisations décrites en rapport avec les figures 7 à 14, le photodétecteur 108a, 208a a pour fonction de détecter le battement induit par l'effet Raman du gaz présent dans la cellule 106, 206, et est donc un photodétecteur adapté pour la détection des micro-ondes. Le premier 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 108a de petit taille. Ce cahier des charges n'est pas compatible avec une détection du signal ayant interagi avec les atomes de la cellule pour ajuster par exemple la température de la cellule, ce qui est mis en oeuvre par le photodétecteur 109, 209 et/ou le photodétecteur 108b, 208b. Pour ces derniers, une fréquence de coupure basse (typiquement < 100kHz), voire un fonctionnement DC sont indiqués. C'est pourquoi il est préférable de disposer d'au moins deux détecteurs, l'un 108a servant à la détection du signal d'horloge, l'autre 109 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 107 pour la réflexion et de placer derrière ce miroir un photodétecteur 109, comme cela a été illustré. Il est également avantageux que le miroir 107 soit de forme concave, comme illustré à la figure 14, la forme concave étant destinée à focaliser le faisceau de lumière réfléchi sur le photodétecteur 108a. En remarque, ces derniers photodétecteurs sont optionnels.

Revendications

1. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique, comprenant les étapes suivantes :
 - envoi d'un faisceau laser (11 ; 112 ; 212) issu d'une source laser au travers une cellule (3 ; 106 ; 206) ;
 - détection d'une fréquence de battements obtenus entre le faisceau issu de la source laser et transmis au sein de la cellule et le faisceau induit par effet Raman au sein des atomes de la cellule (3 ; 106 ; 206) ;
 - et **caractérisé en ce qu'il** comprend un procédé d'allumage de l'horloge atomique comprenant les étapes suivantes :
 - une première phase de recherche du courant d'injection optimal du laser en boucle ouverte de l'horloge atomique,
 - une seconde phase d'allumage de l'horloge comprenant la mise en boucle fermée de l'horloge par le retour du signal microonde reçu en

sortie de la cellule pour le contrôle du courant d'injection du laser.

2. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** la première phase de recherche du courant d'injection optimal du laser du procédé d'allumage de l'horloge atomique comprend les étapes suivantes :
 - Mise en boucle ouverte de l'horloge atomique ;
 - Balayage de la fréquence du laser et identification du point (Vmax) d'absorption maximale et du courant d'injection (Imax) correspondant ainsi que du point (Vmin) d'absorption minimale du pic d'absorption (51) associé au point (Vmax) d'absorption maximale et du courant d'injection (Imin) correspondant ;
 - Détermination d'un courant d'injection (ILD) initial en ajoutant une certaine valeur seuil delta à (Imin) ou en la retranchant à (Imax), afin de se trouver dans l'intervalle [Imin ; Imax], éloigné des bornes (Imin, Imax).
3. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** la seconde phase d'allumage du procédé d'allumage de l'horloge atomique comprend les étapes suivantes :
 - Mise en boucle fermée de l'horloge par le retour du signal microonde reçu en sortie de la cellule pour le contrôle du courant d'injection du laser ;
 - Ajustement du courant d'injection du laser à la valeur (ILD) prédéterminée ;
 - Vérification de l'obtention du phénomène de résonance de l'horloge en sortie ;
 - En cas de non résonance de l'horloge, légère modification de la valeur du courant d'injection (ILD) selon un pas prédéfini, et répétition de cette étape jusqu'à obtenir le phénomène de résonance.
4. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend une étape d'ajustement de la puissance du laser.
5. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend une étape de retour du signal microonde reçu en sortie de la cellule pour le contrôle du courant d'injection du laser et **en ce qu'il** comprend un asservissement nul de la fréquence du laser.
6. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon l'une des revendications

- précédente, **caractérisé en ce qu'il** comprend une mesure de la température de l'horloge atomique permettant de corriger le signal de temps émis par l'horloge en fonction de la température.
7. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon l'une des revendications précédente, **caractérisé en ce qu'il** comprend un asservissement en température de l'horloge atomique.
 8. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon la revendication précédente, **caractérisé en ce qu'il** comprend un fonctionnement de l'horloge atomique à une température inférieure ou égale à 40 °C, ou un fonctionnement à une température inférieure ou égale à 35 °C.
 9. Procédé d'émission d'un signal de temps par une horloge atomique selon l'une des revendications précédente, **caractérisé en ce qu'il** comprend le fonctionnement de l'horloge atomique dans un champ magnétique nul.
 10. Horloge atomique, comprenant une source laser (1 ; 102 ; 202), une cellule (3 ; 106 ; 206) comprenant une vapeur d'atomes et disposée de sorte de recevoir un faisceau laser (11 ; 112 ; 212) issu de la source laser, et un système de détection de fréquences disposé de sorte de recevoir le faisceau laser issu de la cellule (3 ; 106 ; 206) pour détecter une fréquence de battement obtenue entre le faisceau issu de la source laser et transmis au sein de la cellule et le faisceau induit par effet Raman au sein des atomes de la cellule (3 ; 106 ; 206) **caractérisée en ce qu'elle** comprend un centre de traitement (23) qui met en oeuvre le procédé d'émission d'un signal de temps par horloge atomique selon l'une des revendications précédente.
 11. Horloge atomique selon la revendication précédente, **caractérisée en ce qu'elle** comprend un asservissement nul de la fréquence du laser.
 12. Horloge atomique selon l'une des revendications 10 ou 11, **caractérisée en ce que** le système de détection de fréquences de battement comprend un photodétecteur (4 ; 108a ; 208a) et un amplificateur.
 13. Horloge atomique selon l'une des revendications 10 à 12, **caractérisée en ce qu'elle** comprend une source de courant (24) pour le laser, un diplexeur (34), et une liaison de retour depuis le système de détection de fréquence vers le diplexeur (34) qui permet de combiner le signal détecté par le système de détection avec la source de courant (24) pour le contrôle du courant d'injection du laser.
 14. Horloge atomique selon la revendication 12 ou 13, **caractérisée en ce que** le système de détection de fréquences est un système de détection d'un signal (i_{PD}) correspondant aux battements induits par l'effet Raman, au contenu spectral étroit centré autour d'une fréquence centrale (ω_C), comprenant au moins un premier élément inductif (L1) qui est connecté au photodétecteur (4 ; 108a ; 208a) et une capacité parasite (C_{IN}) parallèle au photodétecteur, formant un circuit de résonance pour sélectionner le signal à détecter, ledit circuit de résonance ayant une fréquence de résonance qui correspond à la fréquence centrale (ω_C).
 15. Horloge atomique selon l'une des revendications 10 à 14, **caractérisée en ce qu'elle** comprend au moins un second photodétecteur (108b, 109 ; 208b, 209).
 16. Horloge atomique selon l'une des revendications 10 à 15, **caractérisée en ce qu'elle** comprend au moins un miroir (107 ; 207) pour réfléchir le faisceau laser et lui permettre au moins un second passage dans une cellule (3 ; 106 ; 206) avant d'atteindre le système de détection de fréquences.
 17. Horloge atomique selon la revendication précédente, **caractérisée en ce qu'elle** comprend un miroir (107 ; 207) semi-transparent et un second photodétecteur (109) placé derrière le miroir (107).
 18. Horloge atomique selon l'une des revendications 10 à 17, **caractérisée en ce qu'elle** comprend une cellule (3 ; 106 ; 206) comprenant du Césium ou du Rubidium.
 19. Horloge atomique selon l'une des revendications 10 à 18, **caractérisée en ce qu'elle** comprend un dispositif de chauffage.

Fig.1

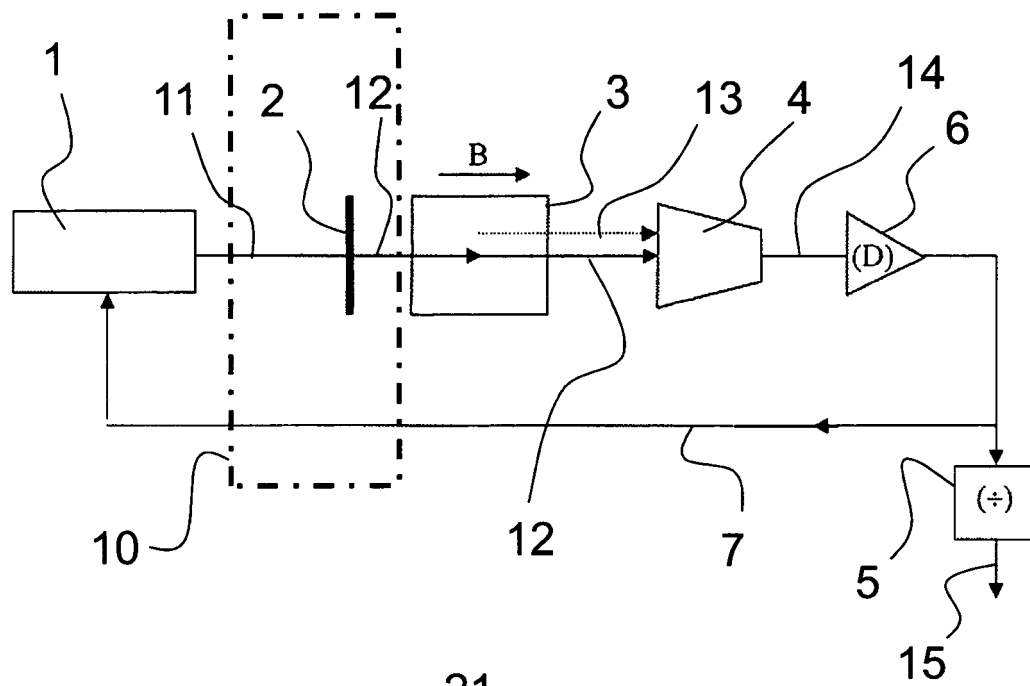


Fig.2

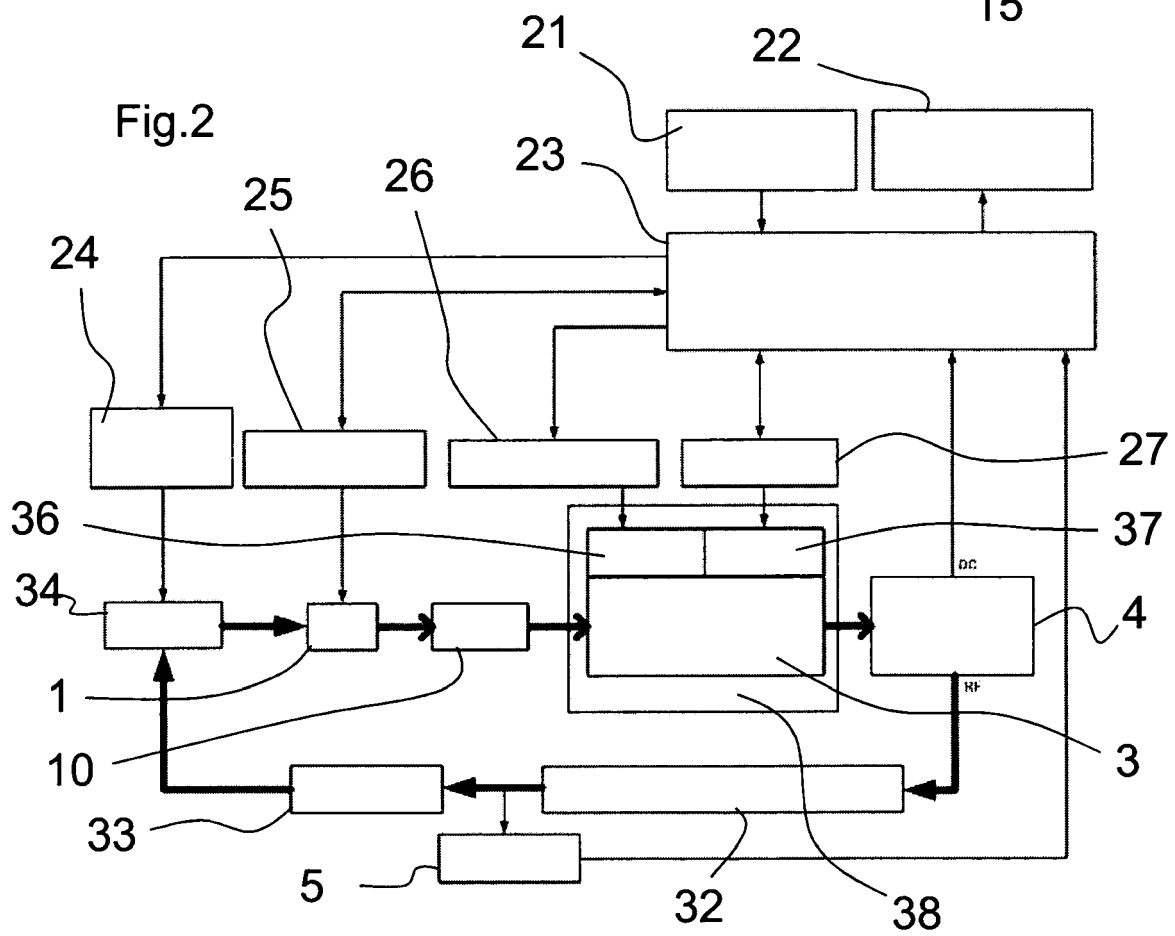


Fig.3

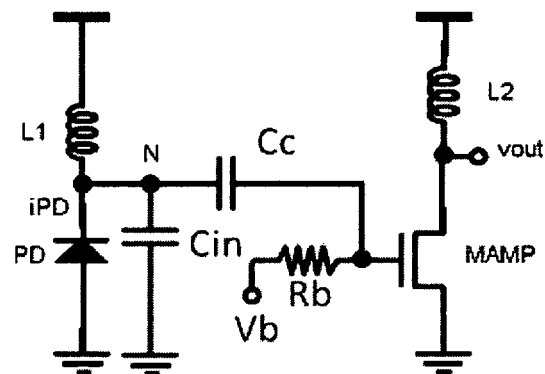


Fig.4

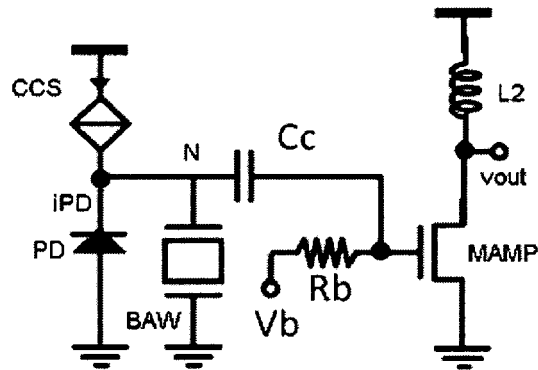
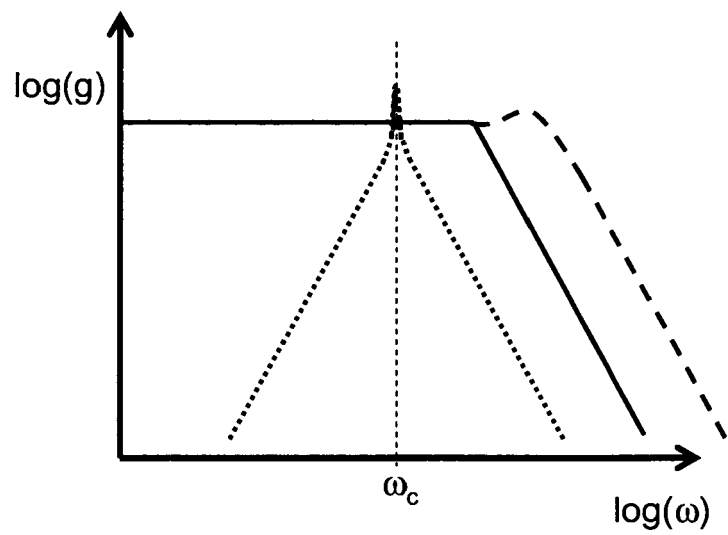
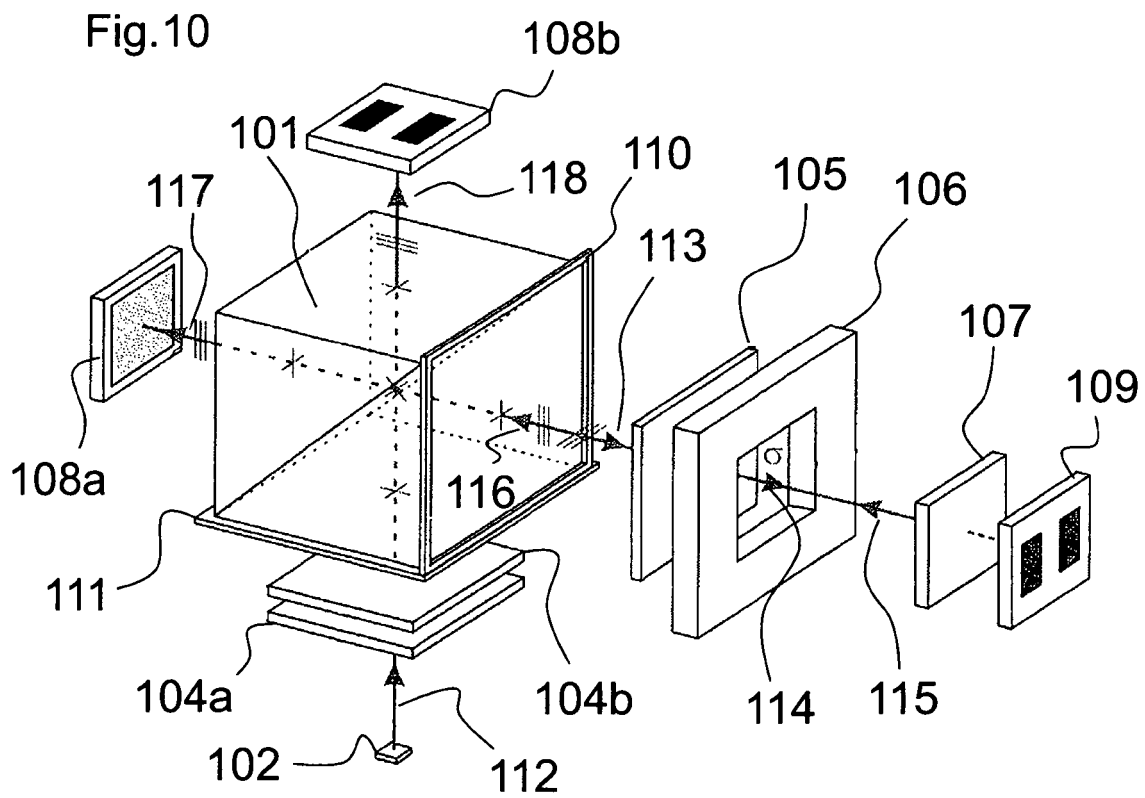
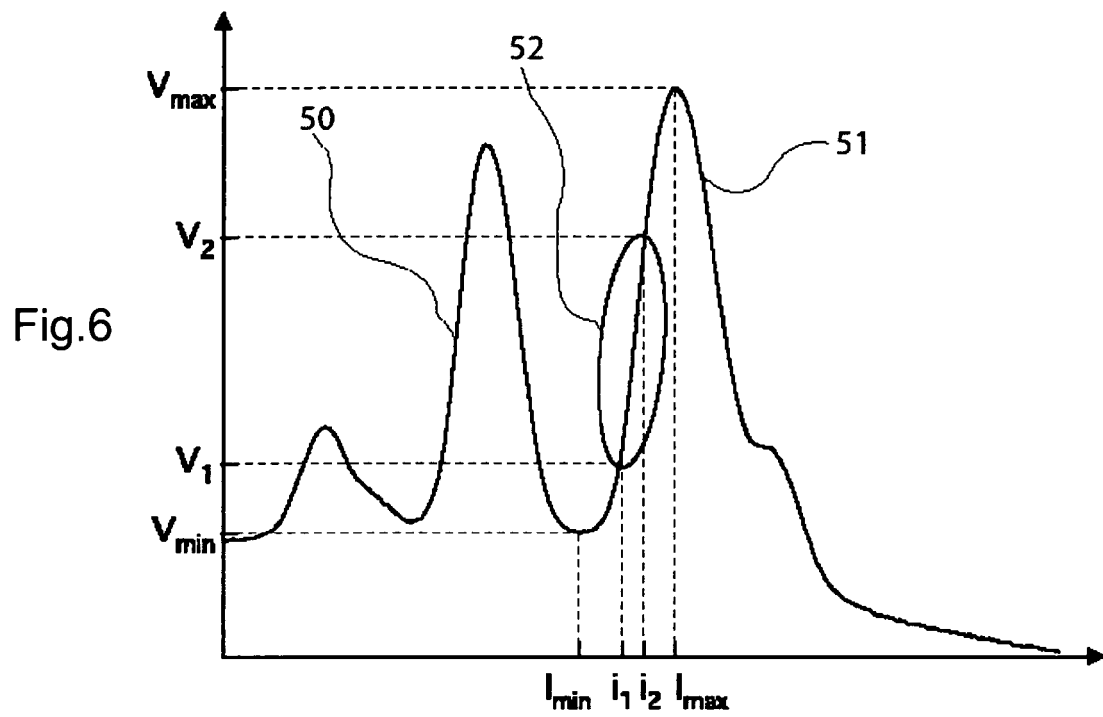


Fig.5





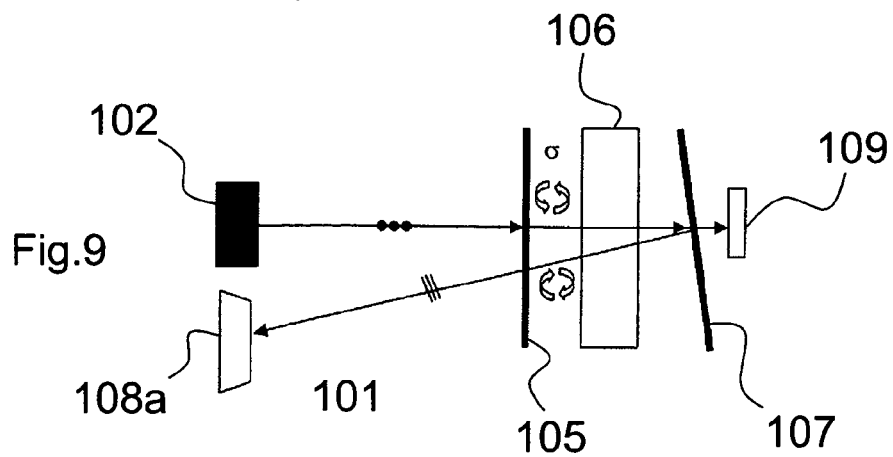
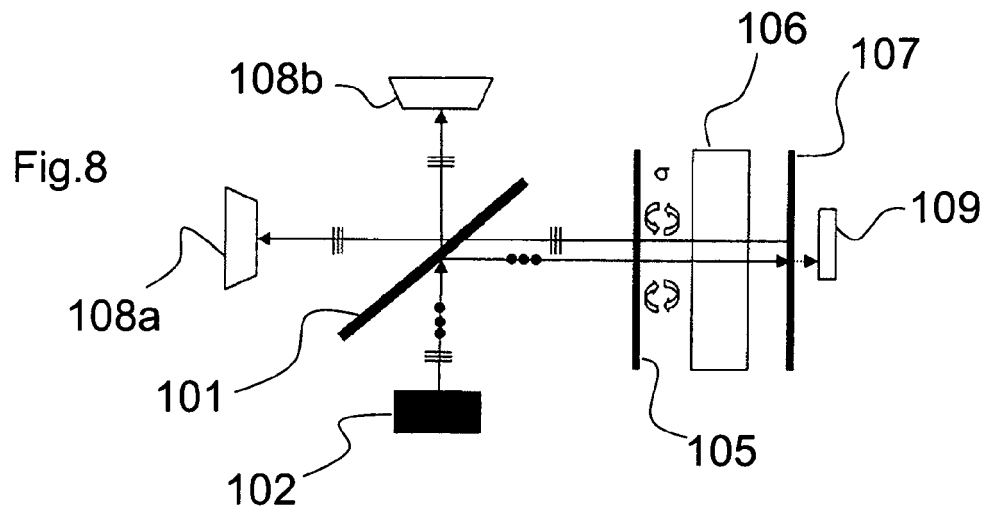
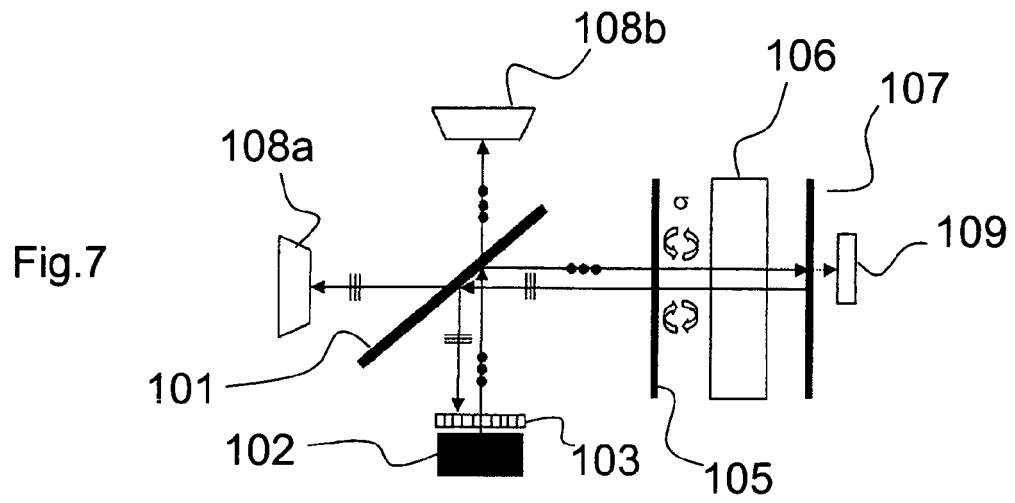


Fig.11

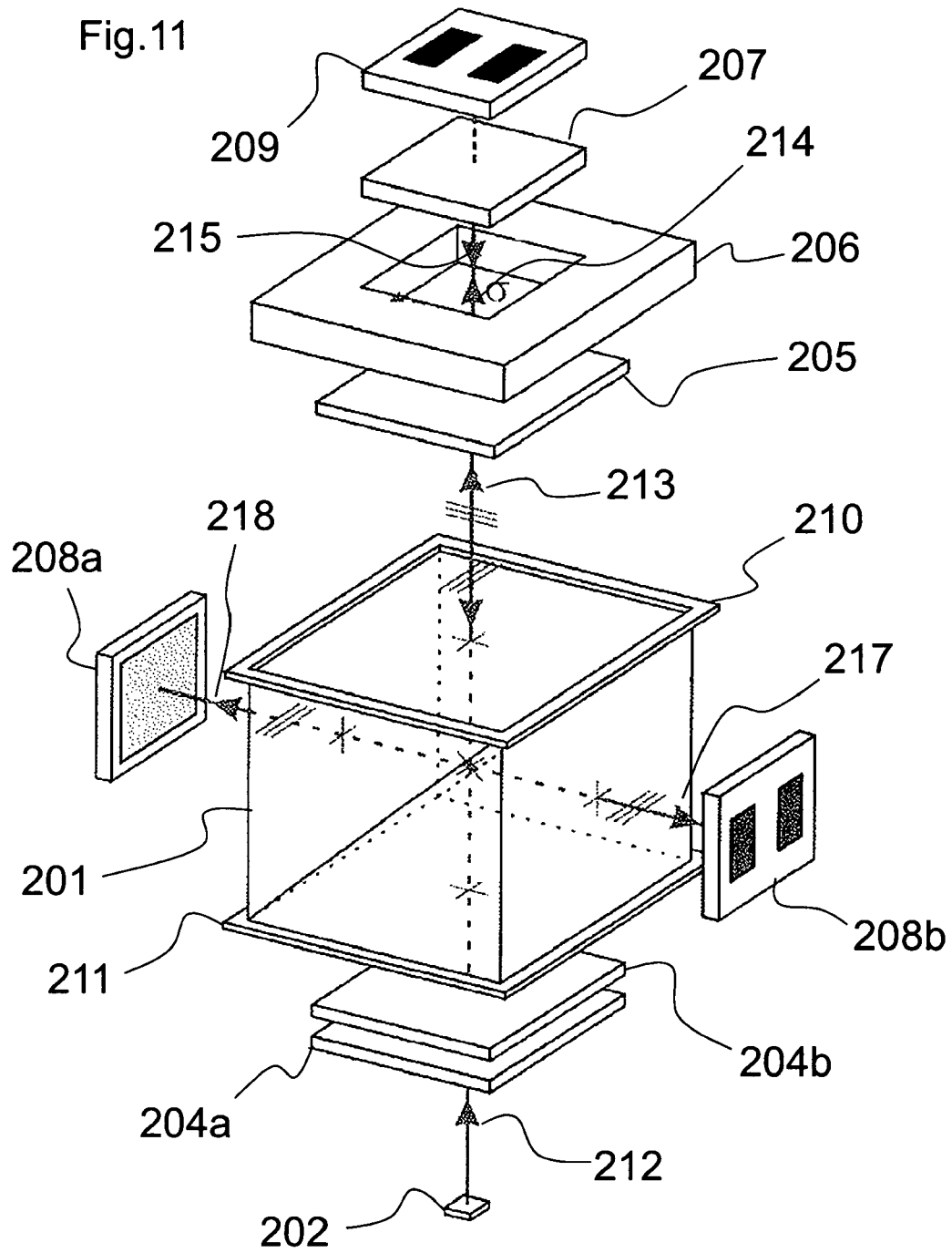


Fig.12

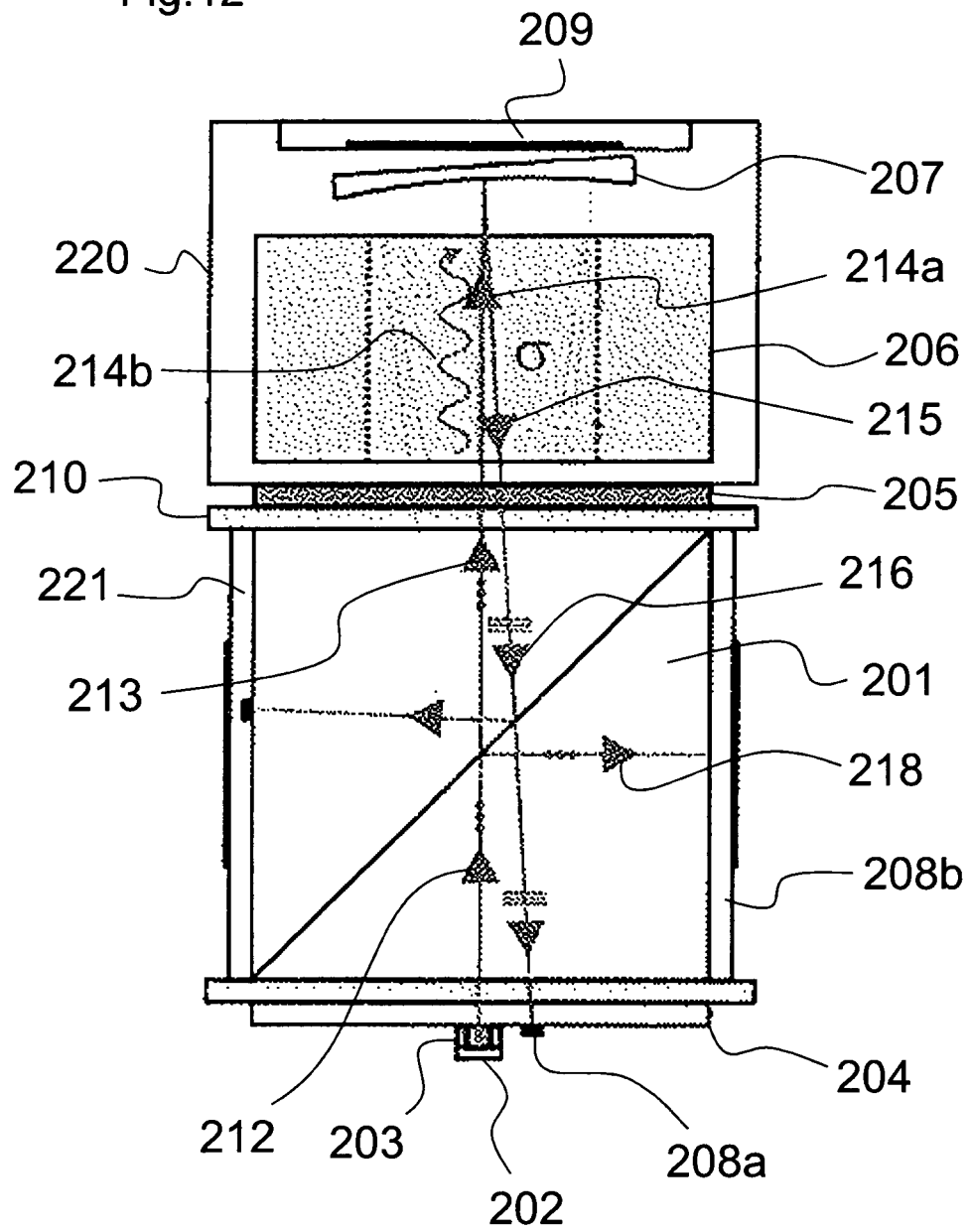


Fig.13

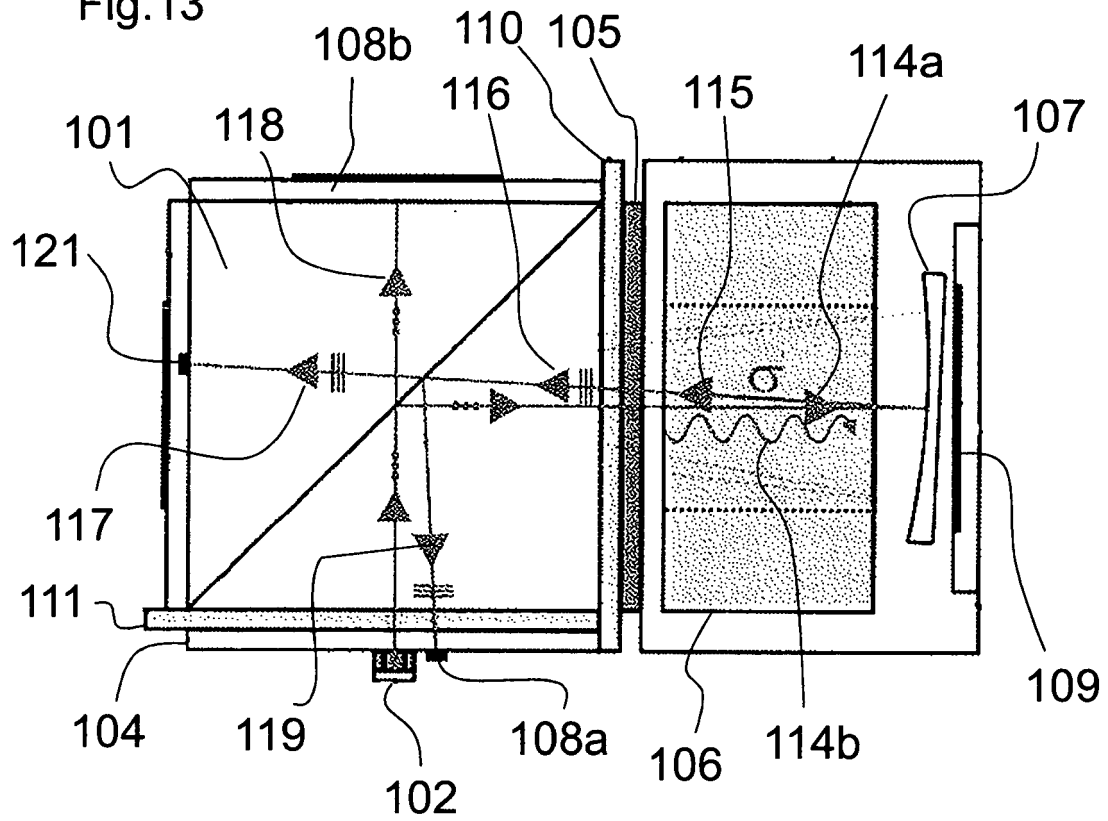
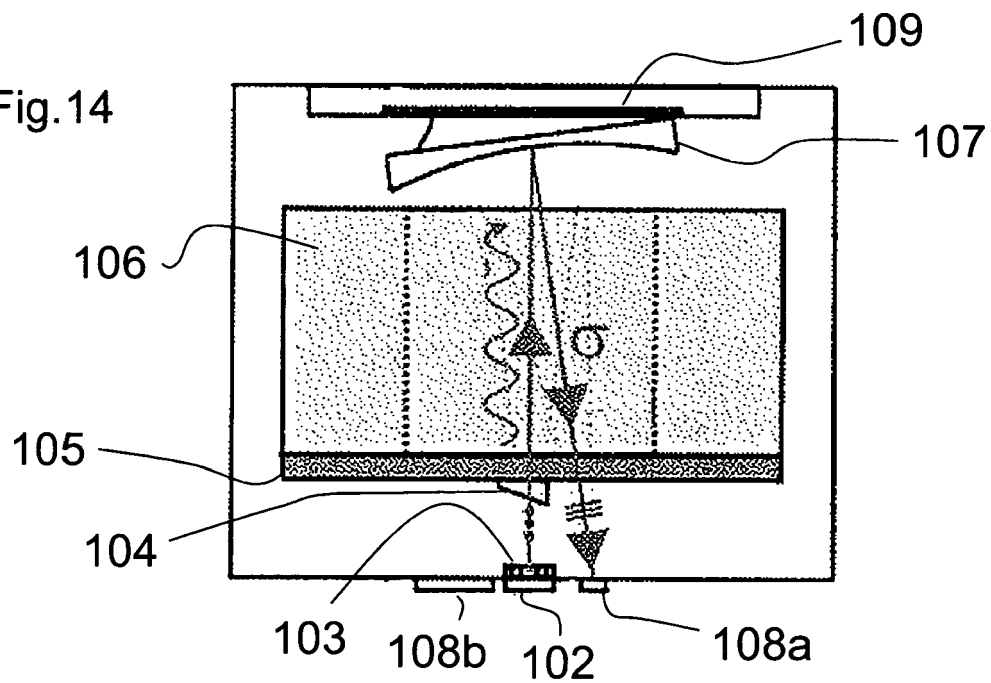


Fig.14





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 11 40 5231

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
Y	US 2002/163394 A1 (HOLLBERG LEO [US] ET AL) 7 novembre 2002 (2002-11-07)	1,4-15	INV. G04F5/14
A	* alinéa [0024]; figure 3 *	2,3	

Y	JP 63 143888 A (YOKOGAWA ELECTRIC CORP) 16 juin 1988 (1988-06-16)	1,4-15	
A	* figure 1 *	2,3	

A	US 5 553 087 A (TELLE HELMUT H [GB]) 3 septembre 1996 (1996-09-03)	1-15	
	* colonne 2 - colonne 3; figure 2 *		

Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G04F H01S H03L
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		20 juin 2011	Mérimèche, Habib
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			

1
EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 11 40 5231

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.

Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

20-06-2011

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2002163394 A1	07-11-2002	AUCUN	
JP 63143888 A	16-06-1988	JP 1794525 C JP 4082192 B	14-10-1993 25-12-1992
US 5553087 A	03-09-1996	AUCUN	

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

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 docks. **S. KNAPPE**. Comprehensive Microsystems. Elsevier, 2008, vol. 3, 571 [0003]