

12 BREVET D'INVENTION B1

54 Cellule de magnétomètre à pompage optique.

22 Date de dépôt : 24.03.23.

30 Priorité :

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : MAG4HEALTH Société par actions
simplifiée (SAS) — FR.

43 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 27.09.24 Bulletin 24/39.

45 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 11.07.25 Bulletin 25/28.

72 Inventeur(s) : PALACIOS-LALOY Agustin.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

73 Titulaire(s) : MAG4HEALTH Société par actions
simplifiée (SAS).

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.



Description

Titre de l'invention : Cellule de magnétomètre à pompage optique

Domaine technique

[0001] Le domaine de l'invention est celui des magnétomètres à pompage optique.

Technique antérieure

[0002] Les magnétomètres à pompage optique utilisent des gaz atomiques confinés dans une cellule, typiquement de l'hélium métastable ou des gaz d'alcalins, en tant qu'élément sensible. Ces magnétomètres, qui peuvent prendre différentes configurations, permettent de remonter au champ magnétique en exploitant les trois processus suivants qui ont lieu de façon soit séquentielle soit concomitante :

[0003] 1) L'utilisation de sources de lumière polarisée, typiquement des lasers, permet de préparer des états atomiques caractérisés par une certaine orientation ou alignement de leurs spins. Ce processus reçoit le nom de « pompage optique » dans le domaine.

[0004] 2) Ces états atomiques évoluent sous l'effet du champ magnétique, notamment sous l'effet Zeeman qui correspond à des décalages des niveaux d'énergie en fonction du champ magnétique auquel sont soumis les atomes.

[0005] 3) Les propriétés optiques du milieu atomique subissent alors des modifications qui dépendent de l'état des atomes. On peut ainsi par une mesure optique, par exemple par une mesure d'absorption optique, remonter au décalage Zeeman subi, et en déduire une mesure du champ magnétique dans lequel est plongée la cellule.

[0006] La sensibilité, aussi appelée bas bruit intrinsèque, atteignable avec de tels magnétomètres à pompage optique est remarquable et nettement plus favorable que celle de la plupart des autres technologies de mesure magnétique (fluxgate, effet Hall, magnétorésistance, etc.). Seul le magnétomètre de type SQUID possède un bruit semblable, mais il requiert un refroidissement cryogénique de l'élément sensible, qui contient des éléments nécessitant d'être supraconducteurs pour son fonctionnement, ce qui restreint son champ d'application pratique.

[0007] La mesure des champs magnétiques est utile pour différentes applications, notamment la caractérisation des courants électriques circulant dans le corps humain permettant par exemple de comprendre et diagnostiquer différentes pathologies du cerveau et du cœur. Dans une telle utilisation pour des mesures sur le corps humain, il est avantageux de disposer non pas d'un seul magnétomètre, mais d'un réseau dense de magnétomètres permettant d'obtenir une bonne résolution spatiale. Cela requiert que les magnétomètres soient d'une taille latérale suffisamment réduite (il est alors habituel de parler de magnétomètres « miniatures »). Comme il s'agit dans ces techniques d'imagerie biomagnétique d'imager l'intérieur du corps humain où les sources ma-

gnétiques sont typiquement à une distance de un à quelques centimètres de la surface du corps, l'idéal est de disposer de magnétomètres de taille semblable à cette distance, présentant ainsi typiquement une taille latérale comprise entre 3 mm et 3 cm.

[0008] Les magnétomètres à pompage optique des alcalins de taille latérale centimétrique et compatibles avec une mise en réseau atteignent aujourd'hui des sensibilités proches de $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Cette sensibilité peut être comprise comme le « bruit intrinsèque » que le fonctionnement du magnétomètre vient ajouter au signal mesuré. Il provient de différents phénomènes, notamment le bruit de la lumière utilisée pour mesurer les états atomiques, qui, dans le meilleur des cas, présente des fluctuations quantiques aussi appelées « bruit de photons » ou « bruit de grenaille optique ».

[0009] Dans le cas de magnétomètres à pompage optique de l'hélium métastable, des sensibilités de l'ordre de $50 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ont été rapportées dans l'article [1] listé ci-après. Une telle sensibilité n'est pas aussi favorable que le cas des magnétomètres alcalins. Toutefois, les magnétomètres à pompage optique de l'hélium métastable présentent des nombreux autres avantages pratiques. Notamment, ils n'ont pas besoin d'un chauffage pour fonctionner. Ils présentent par ailleurs une bande passante nettement plus étendue.

Exposé de l'invention

[0010] L'invention a pour objectif de réduire le bruit intrinsèque des magnétomètres à pompage optique de l'hélium métastable

[0011] A cet effet, l'invention propose une cellule pour magnétomètre à pompage optique, comportant :

- une enceinte renfermant un gaz ; et
- un circuit d'excitation d'un plasma dans l'enceinte, qui comprend un ou plusieurs éléments en matériau électriquement conducteur agencés par rapport à l'enceinte de manière à permettre l'application d'une décharge électrique au gaz renfermé dans l'enceinte.

[0012] Une conductance du circuit d'excitation est définie comme la somme de la conductance de chacun du ou des éléments en matériau électriquement conducteur où la conductance d'un élément en matériau électriquement conducteur correspond à la conductivité du matériau électriquement conducteur pondérée par le ratio entre le volume de matériau électriquement conducteur dudit élément et le carré de la distance entre ledit élément et le centre de la cellule. Selon l'invention, la conductance du circuit d'excitation est inférieure à 8000 Siemens, de préférence inférieure à 5000 Siemens, encore plus de préférence inférieure à 1500 Siemens.

[0013] Certains aspects préférés mais non limitatifs de cette cellule sont les suivants :

- l'enceinte présente une dimension caractéristique comprise entre 3 mm et 3 cm, de préférence comprise entre 5 mm et 2 cm ;

- le circuit d'excitation est couplé capacitivement à la cellule, le ou les éléments en matériau électriquement conducteur consistant en deux électrodes ;
- chacune des électrodes est constituée d'un anneau de matériau électriquement conducteur qui entoure l'enceinte ;
- chacune des électrodes est constituée d'un dépôt de matériau électriquement conducteur sur l'enceinte ;
- chacune des électrodes est constituée d'une impression de matériau électriquement conducteur sur un film diélectrique rapporté sur l'enceinte ;
- le film diélectrique est flexible ;
- le circuit d'excitation est couplé inductivement à l'enceinte, le ou les éléments en matériau électriquement conducteur consistant en une bobine enroulée en plusieurs boucles autour de la cellule ;
- la bobine est un solénoïde ;
- la bobine est une hélice d'un résonateur hélicoïdal.

[0014] L'invention vise également un magnétomètre à pompage optique comprenant une cellule selon l'invention ainsi qu'un casque de magnétoencéphalographie, comprenant une pluralité de magnétomètres selon l'invention.

Brève description des dessins

[0015] D'autres aspects, buts, avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante de formes de réalisation préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la [Fig.1] un schéma d'un magnétomètre intégrant une cellule conforme à l'invention ;
- la [Fig.2] est un exemple d'électrode déposée sur un film diélectrique flexible selon un motif en fourche.

[0016] EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

[0017] Contrairement aux magnétomètres à pompage optique des alcalins, les magnétomètres à pompage optique de l'hélium métastable sont basés sur un état atomique qui n'est pas l'état fondamental (1^1S_0 en notation spectroscopique pour l'hélium-4), mais un état excité, en l'occurrence l'état métastable triplet (noté 2^3S_1 pour l'hélium-4). Pour que le magnétomètre puisse fonctionner, cet état doit être peuplé. Cela est habituellement obtenu en utilisant une décharge électrique fonctionnant dans le domaine des hautes fréquences, typiquement entre 1 MHz et 100 MHz. Cette décharge crée un plasma à l'intérieur de la cellule dans lequel des collisions de forte énergie entre atomes et électrons permet d'exciter une partie des atomes à l'état métastable. Différentes stratégies pour amorcer et maintenir cette décharge plasma sont utilisables :

- Un circuit de décharge couplé capacitivement, constitué par deux électrodes placées de part et d'autre de la cellule de gaz ; ou
- Un circuit de décharge couplé inductivement, constitué par un solénoïde situé de manière à ce que le flux magnétique qu'il crée soit en partie appliqué au gaz placé à l'intérieur de la cellule. Une variante consiste en un résonateur hélioidal connecté à un générateur uniquement à l'une de ses extrémités et faisant face à un plan de masse. Pour certaines fréquences, ce résonateur se comporte comme un solénoïde, avec des avantages en termes d'adaptation d'impédances au générateur.

[0018] Pour les applications de mesure sur le corps humain, il est préférable que le magnétomètre soit de taille réduite. Idéalement il faut pour cela que les éléments du magnétomètre autres que l'élément sensible (notamment l'élément capacitif ou inductif qui permet l'allumage et le maintien du plasma) soient peu encombrants et qu'ils puissent être situés au voisinage immédiat de cet élément sensible, de manière à ce que l'encombrement global du capteur soit seulement très légèrement supérieur à l'encombrement de l'élément sensible qu'il contient. Les électrodes capacitives sont en ce sens intéressantes, ainsi qu'un circuit inductif comprenant une bobine de diamètre très légèrement supérieur à celui de la cellule d'hélium.

[0019] Une étude sur les régimes de décharge optimaux pour obtenir un signal de magnétométrie de forte amplitude a été menée et est publiée dans la thèse de J. Rutkowski [2], pour des cellules de 5 mm et 1 cm de dimension caractéristique et des électrodes consistant en des fragments de scotch cuivre.

[0020] D'autres électrodes capacitives sont évoquées dans la littérature, notamment des électrodes constituées de deux (ou plus) anneaux qui entourent la cellule. Ces électrodes sont évoquées notamment dans la thèse de Marie-Constance Corsi [3], qui mentionne un fil « plus épais » que celui servant à connecter le scotch cuivre (qui est de 0.1 mm). La demande de brevet [4] associée à ces travaux divulgue un diamètre de fil de 315 microns.

[0021] En plus d'obtenir un fort signal de magnétométrie, il est souhaitable également que le bruit intrinsèque du magnétomètre soit limité à ses composantes inévitables, notamment le bruit de photons, ce qui se produit lorsque d'autres bruits techniques (bruit de courant dans le laser, par exemple) deviennent négligeables. Or le bruit de photons pouvant être calculé, la Demanderesse a pu constater qu'il existait encore des bruits techniques, de nature inconnue, qui limitaient le bruit total du capteur. La Demanderesse a suspecté que ce bruit technique était en lien avec les électrodes, ce qui est maintenant avéré comme il sera décrit plus bas.

[0022] La Demanderesse a ainsi pu montrer que dans le cas de capteurs basés sur le pompage optique de l'hélium métastable, les électrodes en scotch cuivre utilisées tradi-

tionnellement (épaisseur entre 35 et 100 microns) ainsi que les électrodes en boucles de fil épais utilisées également de par le passé (épaisseur de 315 ou 500 microns) introduisent un bruit magnétique significatif, qui, pour des capteurs optimisés, devient le bruit limitant du capteur.

- [0023] Elle a par ailleurs constaté qu'il est possible de réduire fortement cette contribution de bruit, en atteignant ainsi des niveaux de sensibilité plus favorable qu'auparavant, en limitant drastiquement la quantité de matière conductrice qui constitue le moyen d'excitation de la décharge plasma (électrodes ou circuit de décharge inductive) placé à proximité de la cellule de mesure.
- [0024] Forte de ce constat, la Demanderesse propose une cellule pour magnétomètre à pompage optique dotée d'un circuit d'excitation d'un plasma dans une enceinte qui renferme un gaz atomique au moyen d'une décharge électrique, circuit optimisé pour créer de fortes densités d'atomes métastables, avec des temps de vie longs, sans créer de bruit technique additionnel du fait de cette décharge ou de ses moyens d'excitation.
- [0025] L'invention porte ainsi sur une cellule pour magnétomètre à pompage optique, qui comporte une enceinte renfermant un gaz et un circuit d'excitation d'un plasma dans l'enceinte.
- [0026] Le magnétomètre est de préférence un magnétomètre miniature, l'enceinte présentant alors une dimension caractéristique (diamètre s'il s'agit d'une sphère, côté s'il s'agit d'un cube, diamètre et hauteur s'il s'agit d'un cylindre) comprise entre 3 mm et 3 cm, de préférence comprise entre 5 mm et 2 cm.
- [0027] Le gaz peut être de l'hélium-4.
- [0028] Le circuit d'excitation d'un plasma dans l'enceinte comprend un ou plusieurs éléments en matériau électriquement conducteur agencés par rapport à l'enceinte de manière à permettre l'application d'une décharge électrique au gaz renfermé dans l'enceinte. Ce circuit est alimenté par un générateur radiofréquence RF, par exemple dans la gamme 10-100 MHz.
- [0029] Selon l'invention, la quantité de matière conductrice placée à proximité de l'élément sensible est limitée pour que la conductance du circuit d'excitation soit inférieure à 8000 Siemens, de préférence inférieure à 5000 Siemens, encore plus de préférence inférieure à 1500 Siemens. En réduisant cette conductance à des valeurs inférieures à 8000 Siemens, il devient en effet possible de dépasser les meilleures sensibilités obtenues antérieurement sur des magnétomètres hélium miniatures.
- [0030] Dans le cadre de l'invention, cette conductance Q_{total} du circuit d'excitation est définie comme la somme de la conductance Q de chacun du ou des éléments en matériau électriquement conducteur. En d'autres termes, lorsque le circuit d'excitation compte un seul élément en matériau électriquement conducteur, sa conductance Q_{total} correspond à celle de l'élément en matériau électriquement conducteur. Et lorsque le

circuit d'excitation compte plusieurs éléments en matériau électriquement conducteur, sa conductance Q_{total} correspond à la somme des conductances individuelles de chacun des éléments en matériau électriquement conducteur

- [0031] La conductance d'un élément en matériau électriquement conducteur correspondant à la conductivité σ du matériau électriquement conducteur (en Siemens/m) pondérée par le ratio entre le volume V de matériau électriquement conducteur dudit élément (en m^3) et le carré de la distance a (en m) entre ledit élément et le centre de la cellule, soit $Q = \sigma * \frac{V}{a^2}$. Ainsi, lorsque le circuit d'excitation comprend plusieurs éléments en matériau électriquement conducteur (deux électrodes par exemple), sa conductance Q_{total} correspond à la somme de la conductance Q des différents éléments.
- [0032] Dans un mode de réalisation possible, le circuit d'excitation est couplé capacitivement à la cellule, le ou les éléments en matériau électriquement conducteur consistant en deux électrodes.
- [0033] Chacune des électrodes peut être constituée d'un anneau de matériau électriquement conducteur qui entoure l'enceinte, selon la disposition divulguée dans [3] mais avec une conductance conforme à l'invention.
- [0034] Dans une première variante, chacune des électrodes peut être constituée d'un dépôt de matériau électriquement conducteur sur l'enceinte.
- [0035] Dans une deuxième variante, chacune des électrodes peut être constituée d'une impression de matériau électriquement conducteur sur un film diélectrique, ce film étant rapporté, par exemple par collage, sur l'enceinte. Le film diélectrique est de préférence un film flexible.
- [0036] Dans un autre mode de réalisation possible, le circuit d'excitation est couplé inductivement à l'enceinte, le ou les éléments en matériau électriquement conducteur consistant en une bobine enroulée en plusieurs boucles autour de la cellule.
- [0037] La bobine peut être un solénoïde ou peut constituer l'hélice d'un résonateur héliçoïdal.
- [0038] L'invention s'étend à un magnétomètre à pompage optique comprenant une cellule telle que précédemment décrite ainsi qu'à un casque de magnétoencéphalographie, comprenant une pluralité de magnétomètres selon l'invention.
- [0039] En référence à la [Fig.1], un tel magnétomètre à pompage optique est doté d'une cellule qui comprend une enceinte 1 remplie d'un gaz atomique, par exemple de l'hélium-4, soumis à un champ magnétique ambiant B_0 dont la projection sur trois axes de coordonnées rectangulaires en définit trois composantes.
- [0040] A titre d'exemple, un tel magnétomètre peut être basé sur une enceinte remplie d'hélium-4 de haute pureté. Cette enceinte peut présenter une dimension caractéristique comprise entre 3 mm et 3 cm (diamètre s'il s'agit d'une sphère, côté s'il s'agit

d'un cube, diamètre et hauteur s'il s'agit d'un cylindre). Elle est remplie d'hélium, à une pression dépendant de sa taille, qui typiquement peut être de 10 Torr pour une cellule cylindrique de 1 cm.

- [0041] La cellule est éclairée par une source de pompage optique 2 apte à émettre en direction de la cellule 1 un faisceau de lumière F, par exemple un faisceau laser, accordé à une longueur d'onde de pompage (ce faisceau est ainsi également désigné par faisceau de pompe). La longueur d'onde de pompage est calée sur une raie de transition atomique, par exemple sur la raie D0 à 1083 nm dans le cas de l'hélium-4.
- [0042] Le magnétomètre comporte par ailleurs un circuit d'excitation d'un plasma dans l'enceinte qui comprend un ou plusieurs éléments conducteurs tels que précédemment décrit. Ce circuit d'excitation est couplé à générateur HF 4 et à des bobines de surtension 5.
- [0043] Dans une réalisation possible, des électrodes sont agencées sur la surface extérieure de l'enceinte afin d'allumer et maintenir capacitivement une décharge plasma dans le gaz d'hélium. Cette décharge permet de peupler l'état 2^3S_1 qui est celui utilisé pour la mesure magnétique.
- [0044] Comme cela est représenté sur la [Fig.2], ces électrodes 11 peuvent par exemple être réalisées par un procédé d'électronique flexible, consistant à la lithographie d'une piste de matériau conducteur 12 (par exemple une couche de cuivre de 35 microns d'épaisseur) en formant un motif, par exemple en forme de fourche. Les dents de la fourche peuvent être dimensionnées pour épouser la surface extérieure d'une enceinte cylindrique sur toute sa hauteur. Ces dents sont agencées sur une partie rectangulaire 13 d'un film diélectrique flexible, cette partie rectangulaire pouvant présenter des dimensions de 11 mm x 6 mm.
- [0045] Alternativement, ces électrodes peuvent être réalisées par le dépôt d'une couche mince de matériau conducteur sur la surface extérieure de l'enceinte (par exemple une couche de cuivre de 1 micron d'épaisseur) par un procédé de dépôt physique par phase vapeur, tel que l'évaporation ou la pulvérisation cathodique. Dans ce cas, la séparation entre les deux électrodes est prévue avant de réaliser le dépôt en disposant des éléments de masquage, tels que du scotch. La reprise de contact sur les couches minces est également prévue et peut être réalisée par exemple par des procédés de micro-soudure à ultrasons, ou bien par une soudure sur une goutte de laque à l'argent.
- [0046] Dans tous ces cas, les éléments sont connectés au générateur 4 de champ radio-fréquence, typiquement dans la gamme 10-100 MHz. Il est avantageux de disposer un circuit d'adaptation d'impédance entre ces électrodes et le générateur RF afin de réduire les réflexions de puissance causées par une trop forte désadaptation d'impédance. Ce circuit est réalisé au moyen des bobines de surtension 5, par exemple deux bobines de cœur air, avec une inductance de quelques dizaines de μH . Une telle

adaptation d'impédance peut permettre d'allumer la décharge avec des puissances de l'ordre de 200 mW et la maintenir avec des puissances de l'ordre de 10 mW.

[0047] Une fois la décharge allumée, une population substantielle d'atomes de la cellule est portée à l'état 2^3S_1 qui permet de réaliser une mesure magnétique selon différentes configurations bien connues dans le domaine, et rapportées par exemple dans l'article [5].

[0048] Un des modes opératoires possibles du magnétomètre consiste à traverser la cellule avec un faisceau laser collimaté, polarisé linéairement au moyen d'un polariseur 3 et accordé sur la raie D0 de l'hélium-4. Ce faisceau provient d'un laser 2 présentant une excellente stabilité d'amplitude, caractérisée par un bruit relatif RIN (« Relative Intensity Noise ») dominé par le bruit de photons à des puissances de l'ordre de 1 mW. Il doit également présenter un bruit de phase très faible. Parmi les technologies de laser répondant à ce besoin, les laser fibre ainsi que les lasers à permettent d'atteindre les meilleures performances de mesure.

[0049] Ce faisceau est photodéecté après son passage dans la cellule. En complément, un champ radiofréquence, à une fréquence de par exemple 40 kHz, est appliqué à la cellule dans une direction orthogonale à celle de la polarisation de la lumière. Il apparaît alors un signal dans le spectre de photodétection à 40 kHz qui, dans une gamme de quelques dizaines de nT autour du champ nul, permet une mesure de la composante du champ magnétique parallèle à la direction du champ radiofréquence appliqué. La détection synchrone de ce signal permet de mesurer une composante du champ magnétique. Le bruit intrinsèque du capteur correspond alors au bruit obtenu en sortie de détection synchrone, dont les sources peuvent être diverses. Dans le cas décrit ici, ce bruit est limité par le bruit de photons de la lumière laser utilisée pour réaliser la lumière, et il correspond en unités magnétiques à des valeurs comprises entre 20 et 30 fT/sqrt(Hz), ce qui est plus avantageux que les niveaux de bruit obtenus précédemment.

[0050] Le magnétomètre peut ainsi comprendre un circuit d'excitation de résonances paramétriques qui comporte un générateur de radiofréquence 8 qui alimente des bobines d'Helmholtz 7 d'axes orthogonaux qui entourent la cellule afin de générer un champ magnétique d'excitation des résonances paramétriques, également désigné par champ magnétique radiofréquence. Le magnétomètre comprend par ailleurs un dispositif de détection de résonances paramétriques 6 configuré pour mesurer l'absorption du faisceau de lumière par le gaz atomique et un photodécteur 10 agencé pour recevoir le faisceau de lumière ayant traversé la cellule et délivrer un signal de photodétection audit dispositif de détection de résonances paramétriques 6.

[0051] Le magnétomètre peut également comprendre un système d'asservissement en boucle fermé du magnétomètre pour venir constamment soumettre l'élément sensible à un

champ magnétique total nul. Le système d'asservissement comprend un régulateur 9 couplé au dispositif de détection 6 et qui injecte un courant dans les bobines de Helmholtz 7 afin de générer un champ magnétique de compensation B_c tel que la somme $B_c + B_0$ est maintenue à zéro en permanence. Alternativement, le magnétomètre peut être opéré en boucle ouverte, sans compensation du champ ambiant.

[0052] On notera que le bruit étant lié à la conductance des éléments conducteurs du circuit d'excitation, il est possible d'utiliser des électrodes présentant des volumes plus importants que celui des électrodes décrites ci-après mais réalisées dans des matériaux moins bons conducteurs électriques que le cuivre et l'aluminium, par exemple des métaux de transition tels que Nb et Mo, des alliages tels que CuAl, AgCu, AuAg, ou des semiconducteurs tels que Si ou le Ge.

[0053] Dans une autre réalisation possible, un allumage inductif peut être réalisé en utilisant un solénoïde ou un résonateur hélicoïdal de diamètre inférieur ou égal à 3 cm par exemple, et réalisé :

- soit avec un fil de cuivre de diamètre typiquement inférieur à 300 microns ;
- soit avec un fil plus épais, réalisé en un matériau présentant une conductivité plus faible que celle du cuivre ou de l'aluminium, notamment réalisé dans les matériaux listés ci-dessus pour le cas d'électrodes capacitives.

Exemples comparatifs

[0054] • Exemple 1a : selon l'art antérieur

[0055] Cet exemple exploite la cellule décrite dans [2] (cellule de 100 mm³ sous la forme d'un cylindre de 5 mm de diamètre et de hauteur), des électrodes sous la forme de fragments de scotch cuivre (du fabricant 3M référence 3313, d'une épaisseur de 35 microns) de 4*4 mm chacune collés sur la surface extérieure de la cellule, et connectés au générateur RF par des fils soudés sur ces éléments en cuivre. La grandeur Q_{total} , en négligeant le métal des soudures vaut 10700 Siemens. La composante de bruit incompris qui résulte des mesures en configuration de mesure bas champ est de l'ordre de 120 fT/sqrt(Hz).

- Exemple 1b : selon l'art antérieur

[0056] Cet exemple exploite une cellule de taille plus grande (cylindre de 1 cm de diamètre et 1 cm de long), également décrite dans [2]. Les électrodes sont des fragments de scotch cuivre (du fabricant 3M référence 3313, d'une épaisseur de 35 microns) de 1 x 0,9 cm chacune collées sur la surface extérieure de la cellule, et connectées au générateur RF par des fils soudés sur ces éléments en cuivre. La grandeur Q_{total} , en négligeant le métal des soudures vaut 13000 Siemens. La composante de bruit incompris qui résulte des mesures en configuration de mesure bas champ est de l'ordre de 100 fT/sqrt(Hz).

- Exemple 2 (état de l'art antérieur)

- [0057] Cet exemple exploite des électrodes en anneau telles que celles décrites dans [3] et [4], chacune composée d'une boucle de 1 cm de diamètre réalisée avec du fil de cuivre d'un diamètre de 315 microns. La grandeur Q_{total} vaut 11700 Siemens. La composante de bruit inconnue qui résulte des mesures en configuration de mesure bas champ est de l'ordre de $77 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$.
- Exemple 3 (selon l'invention)
- [0058] Cet exemple exploite des électrodes en couches minces (formées par un dépôt de cuivre) d'épaisseur de 1 micron, déposé par évaporation, avec un masquage permettant qu'il ait la forme d'un rectangle de 1 x 1 cm sur les faces latérales d'une cellule cylindrique. Ces électrodes sont connectées au générateur RF par un fil micro-soudé aux ultrasons. La grandeur Q_{total} , en négligeant le métal des soudures vaut 920 Siemens. Le bruit non expliqué est inférieur à $19 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, avec une forte incertitude du fait de sa puissance plus faible de celle du bruit de photons lors de l'expérience ($30 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$).
- Exemple 4 (selon l'invention)
- [0059] Cet exemple exploite des électrodes fines réalisées sur un polymère flexible tel que le kapton par des procédés de lithographie bien connus dans le domaine de l'électronique flexible, avec une largeur de piste de 150 microns et une épaisseur de cuivre de 18 microns. La grandeur Q_{total} vaut 1170 Siemens. Le bruit non expliqué est de $16 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, avec une forte incertitude du fait de sa faible puissance comparée à celle du bruit de photons lors de l'expérience ($25 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$).
- Exemple 5 (selon l'invention)
- [0060] Cet exemple exploite des électrodes telles que celles de l'exemple 2 mais réalisées avec un fil de 100 microns. La grandeur Q_{total} vaut 1200 Siemens. La composante de bruit inconnue qui résulte des mesures en configuration de mesure bas champ est de l'ordre de $25 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$.
- Exemple 6 (selon l'invention)
- [0061] Cet exemple exploite un moyen d'allumage inductif consistant en une bobine inductive avec un fil de 150 microns entouré 6 fois autour de la cellule avec un diamètre de 2 cm. La grandeur Q_{total} vaut 7900 Siemens. La composante de bruit inconnue qui résulte des mesures en configuration de mesure bas champ est de l'ordre de $32 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Références

- [0062] [1] W. Fourcault et al., "Helium-4 magnetometers for room-temperature biomedical imaging: toward collective operation and photon-noise limited sensitivity," *Opt. Express*, vol. 29, no. 10, pp. 14467–14475, May 2021, doi: 10.1364/OE.420031.
- [0063] [2] J. Rutkowski, "Study and realization of a miniature isotropic helium magnetometer," Université de Franche Comté, 2014.

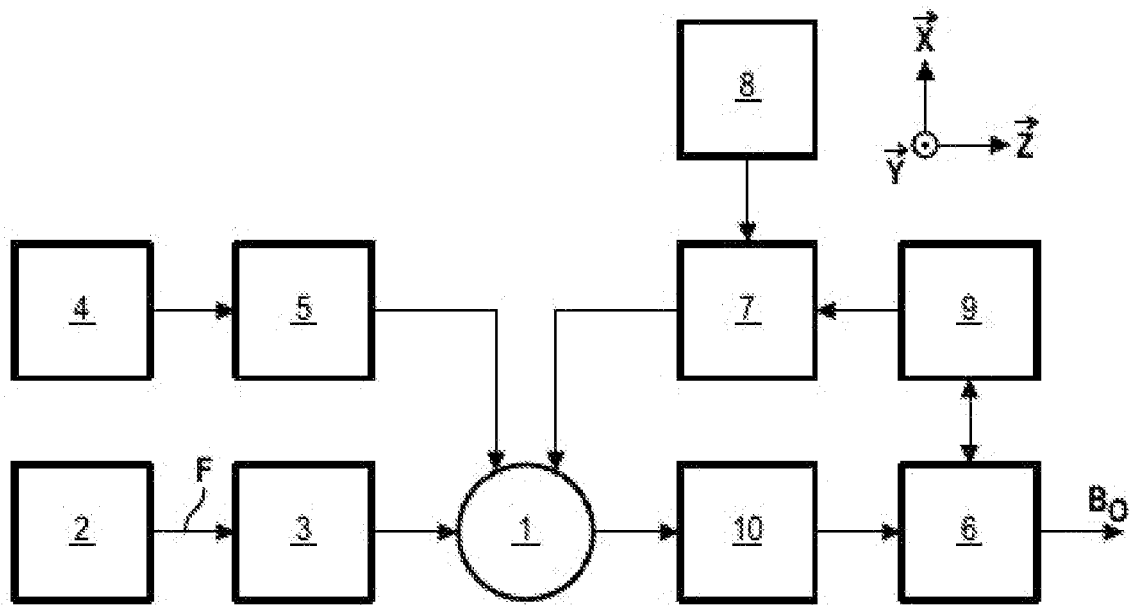
- [0064] [3] M.-C. Corsi, “Magnétomètres à pompage optique à Hélium 4: développement et preuve de concept en magnétocardiographie et en magnétoencéphalographie,” phdthesis, Université Grenoble Alpes, 2015. Accessed: Apr. 20, 2021. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01233850>
- [0065] [4] FR 3 035 769 A1
- [0066] [5] G. Le Gal, L.-L. Rouve, and A. Palacios-Laloy, “Parametric resonance magnetometer based on elliptically polarized light yielding three-axis measurement with isotropic sensitivity,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 118, no. 25, p. 254001, Jun. 2021, doi: 10.1063/5.0047124.

Revendications

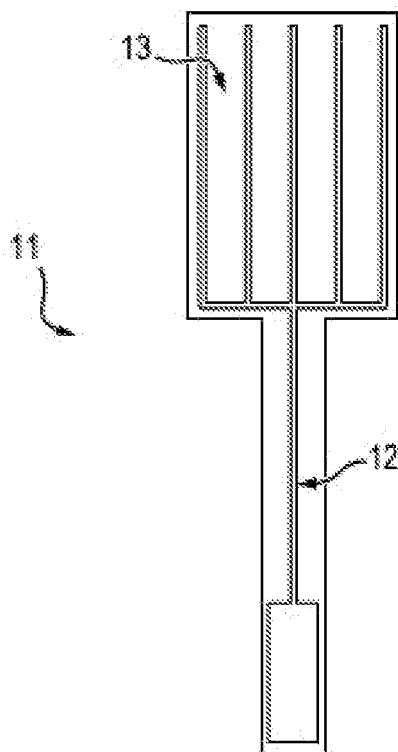
- [Revendication 1] Cellule pour magnétomètre à pompage optique, comportant :
- une enceinte (1) renfermant un gaz ; et
 - un circuit d’excitation d’un plasma dans l’enceinte, qui comprend un ou plusieurs éléments en matériau électriquement conducteur (11) agencés de manière à appliquer une décharge électrique au gaz renfermé dans l’enceinte,
- caractérisée en ce qu’une conductance du circuit d’excitation, définie comme la somme de la conductance de chacun du ou des éléments en matériau électriquement conducteur où la conductance d’un élément en matériau électriquement conducteur correspond à la conductivité du matériau électriquement conducteur pondérée par le ratio entre le volume de matériau électriquement conducteur dudit élément et le carré de la distance entre ledit élément et le centre de la cellule, est inférieure à 8000 Siemens.
- [Revendication 2] Cellule selon la revendication 1, dans laquelle la conductance du circuit d’excitation est inférieure à 5000 Siemens, de préférence inférieure à 1500 Siemens.
- [Revendication 3] Cellule selon la revendication 1, dans laquelle l’enceinte présente une dimension caractéristique comprise entre 3 mm et 3 cm, de préférence comprise entre 5 mm et 2 cm.
- [Revendication 4] Cellule selon l’une des revendications 1 à 3, dans laquelle le circuit d’excitation est couplé capacitivement à la cellule, le ou les éléments en matériau électriquement conducteur consistant en deux électrodes.
- [Revendication 5] Cellule selon la revendication 4, dans laquelle chacune des électrodes est constituée d’un anneau de matériau électriquement conducteur qui entoure l’enceinte.
- [Revendication 6] Cellule selon la revendication 4, dans laquelle chacune des électrodes est constituée d’un dépôt de matériau électriquement conducteur sur l’enceinte.
- [Revendication 7] Cellule selon la revendication 4, dans laquelle chacune des électrodes est constituée d’une impression de matériau électriquement conducteur (12) sur un film diélectrique (13) rapporté sur l’enceinte.
- [Revendication 8] Cellule selon la revendication 7, dans laquelle le film diélectrique est flexible.

- [Revendication 9] Cellule selon l'une des revendications 1 à 3, dans laquelle le circuit d'excitation est couplé inductivement à l'enceinte, le ou les éléments en matériau électriquement conducteur consistant en une bobine enroulée en plusieurs boucles autour de la cellule.
- [Revendication 10] Cellule selon la revendication 9, dans laquelle la bobine est un solénoïde.
- [Revendication 11] Cellule selon la revendication 9, dans laquelle la bobine est une hélice d'un résonateur hélicoïdal.
- [Revendication 12] Magnétomètre à pompage optique comprenant une cellule selon l'une des revendications 1 à 11.
- [Revendication 13] Casque de magnétoencéphalographie, comprenant une pluralité de magnétomètres selon la revendication 12.

[Fig. 1]



[Fig. 2]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

FOURCAULT WILLIAM ET AL: "Helium-4 magnetometers for room-temperature biomedical imaging: toward collective operation and photon-noise limited sensitivity",
UNIV. GRENOBLE ALPES,
vol. 29, no. 10,
28 avril 2021 (2021-04-28), page 14467,
XP093074608,
DOI: 10.1364/OE.420031

J. RUTKOWSKI ET AL: "Towards a miniature atomic scalar magnetometer using a liquid crystal polarization rotator",
SENSORS AND ACTUATORS A: PHYSICAL,
vol. 216, 13 mai 2014 (2014-05-13), pages 386-393, XP055272789,
NL
ISSN: 0924-4247, DOI:
10.1016/j.sna.2014.05.003

Anonymous: "ITO coatings",
Internet

,
9 novembre 2022 (2022-11-09), pages 1-3,
XP093082833,
Internet
Extrait de l'Internet:
URL: <https://web.archive.org/web/20221109180947/https://www.pgo-online.com/intl/ito.html>
[extrait le 2023-09-18]

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

LABYT ETIENNE ET AL:
"Magnetoencephalography With Optically Pumped 4He Magnetometers at Ambient Temperature",
IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING,
IEEE, USA,
vol. 38, no. 1,
16 juillet 2018 (2018-07-16), pages 90-98,
XP011694945,
ISSN: 0278-0062, DOI:
10.1109/TMI.2018.2856367
[extrait le 2018-12-27]

FR 3 035 769 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR])
4 novembre 2016 (2016-11-04)

US 3 350 632 A (GETTYO ROBINSON HUGH)
31 octobre 1967 (1967-10-31)

FR 2 668 862 A1 (CENTRE NAT RECH SCIENT
[FR]) 7 mai 1992 (1992-05-07)

MOREAU O ET AL: "MAGNETOMETRE A 3HE POMPE
PAR DIODE LASER",
JOURNAL DE PHYSIQUE III, EDITIONS DE
PHYSIQUE, PARIS, FR,
vol. 7, no. 1, janvier 1997 (1997-01),
pages 99-115, XP000688470,
ISSN: 1155-4320, DOI: 10.1051/JP3:1997113

US 5 162 732 A (COLEGROVE FORREST D [US]
ET AL) 10 novembre 1992 (1992-11-10)

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT