

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①① N° de publication : **3 143 111**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **22 13084**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **G 01 D 5/26 (2023.01), G 02 B 6/10**

①②

## BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Dispositif de mesure d'une grandeur physique.

②② Date de dépôt : 09.12.22.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 14.06.24 Bulletin 24/24.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 22.11.24 Bulletin 24/47.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *Commissariat à l'Energie Atomique  
et aux Energies Alternatives Etablissement public à  
caractère industriel et commercial — FR.*

⑦② Inventeur(s) : COTILLARD Romain, LAFFONT  
Guillaume et ROUSSEL Nicolas.

⑦③ Titulaire(s) : Commissariat à l'Energie Atomique et  
aux Energies Alternatives Etablissement public à  
caractère industriel et commercial.

⑦④ Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

FR 3 143 111 - B1



## Description

### Titre de l'invention : Dispositif de mesure d'une grandeur physique

- [0001] L'invention concerne un dispositif de mesure d'une grandeur physique ainsi qu'un étalon pour la réalisation de ce dispositif.
- [0002] Ces dispositifs sont, par exemple, utilisés pour mesurer une température ou une pression ou une déformation mécanique.
- [0003] Un exemple d'un tel dispositif connu de mesure est décrit dans la demande CN102879022A. Ce dispositif connu comporte un étalon et un transducteur optique. Le transducteur optique permet de transformer une variation de la grandeur physique à mesurer en un déplacement d'un pic de puissance du spectre de puissance du transducteur optique. L'étalon permet de générer un spectre de puissance de référence qui est utilisé pour corriger la mesure et donc pour améliorer la précision de cette mesure.
- [0004] Pour cela, le spectre de puissance de l'étalon comporte une succession de pics de puissance très rapprochés dans une plage de travail prédéterminée.
- [0005] A ce jour, de nombreux modes de réalisation d'un tel étalon ont été proposés. Par exemple, il a été proposé de réaliser un tel étalon à l'aide d'une cavité de Fabry Pérot dont les dioptries sont des miroirs raccordés aux extrémités d'une fibre optique. De telles miroirs présentent une réflectivité élevée, c'est-à-dire supérieure à 90 %. Dans ces conditions, les pics du spectre de puissance de l'étalon sont fins et la précision du dispositif de mesure est élevée. Toutefois, la fabrication d'une telle cavité de Fabry Perot est complexe notamment car il faut raccorder des miroirs aux extrémités d'une fibre optique. Un exemple d'un tel mode de réalisation d'un étalon est décrit dans la demande WO2020113147A1.
- [0006] Dans la demande CN102879022A, il est proposé de réaliser l'étalon en gravant dans le cœur d'une fibre optique une succession de réseaux de Bragg situés les uns après les autres. La longueur d'onde  $\lambda_B$  de la fréquence fondamentale  $f_B$  de résonance de chacun de ces réseaux de Bragg est différente de celle des autres réseau de Bragg. Toutefois, les largeurs des pics de puissance de l'étalon de la demande CN102879022A sont généralement moins fins que ceux obtenus à l'aide d'un étalon telle que celui de la demande WO2020113147A1. De plus, une telle succession de réseaux de Bragg est complexe à réaliser et conduit souvent à un étalon assez long et donc encombrant.
- [0007] L'invention vise à proposer un dispositif de mesure d'une grandeur physique qui présente une précision élevée et qui soit, en même temps, simple à fabriquer.
- [0008] L'invention a donc pour objet un dispositif de mesure d'une grandeur physique, ce dispositif comportant :
- [0009] - un transducteur optique dont le spectre de puissance présente au moins un pic de

puissance dont la position varie, tout en restant à l'intérieur d'une plage de travail prédéterminée, en fonction de la grandeur physique à mesurer, cette plage de travail prédéterminée étant une plage de longueurs d'onde et cette plage de travail étant comprise entre 200 nm et 5000 nm,

- [0010] - un étalon dont le spectre de puissance en réflexion comporte plusieurs pics de puissance répartis à l'intérieur de la plage de travail, l'intervalle spectral libre de cet étalon étant inférieur ou égal à 5 nm, cet étalon comportant :
- [0011] - un premier guide d'onde contenant un cœur qui s'étend le long d'un axe longitudinal et à l'intérieur duquel un signal optique guidé par ce premier guide d'onde est apte à se propager le long de l'axe longitudinal du premier guide d'onde, et
- [0012] - un premier réseau de Bragg réalisé dans le cœur du premier guide d'onde, ce premier réseau de Bragg comportant au moins trois motifs identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe longitudinal du premier guide d'onde et séparés les uns des autres par un premier pas constant,
- [0013] - une structure isolante apte à isoler le premier réseau de Bragg des variations de température et des variations de contrainte mécanique exercées par un milieu extérieur sur l'étalon,
- [0014] - un analyseur spectral configuré pour :
- [0015] - mesurer séparément la réponse spectrale du transducteur optique dans la plage de travail et la réponse spectrale de l'étalon dans la même plage de travail, puis
- [0016] - déterminer l'amplitude du déplacement du pic du transducteur optique à partir des réponses spectrales du transducteur optique et de l'étalon mesurées séparément l'une de l'autre, puis
- [0017] - établir une variation de la grandeur physique à partir de l'amplitude déterminée du déplacement du pic du transducteur optique,
- [0018] dans lequel le premier pas du premier réseau de Bragg est configuré pour que le spectre de puissance du premier réseau de Bragg présente plusieurs harmoniques discernables d'ordre supérieur à cent dans la plage de travail, ces harmoniques formant ainsi les pics de puissance du spectre de puissance de l'étalon à des longueurs d'onde connues.
- [0019] Les modes de réalisation de ce dispositif de mesure peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :
- [0020] 1)
- [0021] - l'analyseur spectral comporte une source optique accordable apte à émettre un signal optique mono-fréquence qui interagit avec le transducteur optique et l'étalon, cette source optique étant commandable à l'aide d'un signal de commande pour faire varier la longueur d'onde du signal optique émis, la longueur d'onde du signal optique émis étant reliée au signal de commande par une fonction de transfert non-linéaire, et

- [0022] - l'analyseur spectral est également configuré pour :
- [0023] - estimer la fonction de transfert non-linéaire de la source optique commandable à partir de la réponse spectrale de l'étalon mesurée et des longueurs d'onde connues auxquelles se produisent les pics de puissance du spectre de puissance de l'étalon sur la plage de travail, puis
- [0024] - construire un signal de commande qui permet d'obtenir une variation, en fonction du temps, plus linéaire de la longueur d'onde du signal optique émis sur toute la plage de travail à partir de la fonction de transfert estimée, et
- [0025] - commander la source optique à l'aide de ce signal de commande construit.
- [0026] 2)
- [0027] - l'analyseur spectral comporte :
- [0028] - une source laser équipée d'un port de sortie par l'intermédiaire duquel un signal optique est émis, et
- [0029] - un coupleur optique qui raccorde optiquement le transducteur optique et l'étalon simultanément à ce port de sortie, et
- [0030] - l'analyseur spectral est apte à mesurer simultanément les réponses spectrales du transducteur optique et de l'étalon obtenues en réponse au signal optique émis sur le port de sortie.
- [0031] 3) Le guide d'onde de l'étalon est une fibre optique.
- [0032] 4)
- [0033] - chaque motif du premier réseau de Bragg s'étend principalement dans un plan, appelé « plan du motif », perpendiculaire à l'axe longitudinal du premier guide d'onde, et
- [0034] - chaque motif est constitué d'une ou plusieurs bulles disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif, et
- [0035] - la surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 50 % de la surface de la section transversale du cœur du premier guide d'onde.
- [0036] 5) Chaque motif est constitué de plusieurs bulles disjointes disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif.
- [0037] 6)
- [0038] - le premier pas est supérieur ou égal à 20  $\mu\text{m}$ , et
- [0039] - l'écart entre l'indice de réfraction du cœur du premier guide d'onde et l'indice de réfraction de chaque motif du premier réseau de Bragg est supérieur à 0,3.
- [0040] 7) Chaque motif est réalisé à l'aide d'une impulsion d'un laser femtoseconde.
- [0041] 8) La grandeur physique est choisie dans le groupe constitué d'une température, d'une déformation mécanique et d'une pression hydrostatique.
- [0042] L'invention a également pour objet un étalon pour la réalisation du dispositif de

mesure précédent, dans lequel le spectre de puissance en réflexion de cet étalon comporte plusieurs pics de puissance répartis à l'intérieur d'une plage de travail prédéterminée, l'intervalle spectrale libre de cet étalon étant inférieur ou égal à 5 nm et cette plage de travail prédéterminée étant une plage de longueurs d'onde et cette plage de travail étant comprise entre 200 nm et 5000 nm, cet étalon comportant :

- [0043] - un premier guide d'onde contenant un cœur qui s'étend le long d'un axe longitudinal et à l'intérieur duquel un signal optique guidé par le guide d'onde est apte à se propager le long de l'axe longitudinal du guide d'onde, ce guide d'onde étant apte à être optiquement raccordé à un analyseur spectral,
- [0044] - un premier réseau de Bragg réalisé dans le cœur du premier guide d'onde, ce premier réseau de Bragg comportant au moins trois motifs identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe longitudinal du premier guide d'onde et séparés les uns des autres par un premier pas constant,
- [0045] - une structure isolante apte à isoler le premier réseau de Bragg des variations de température et des variations de contrainte mécanique exercées par un milieu extérieur sur l'étalon, cette structure isolante comportant :
  - [0046] - un capteur de température,
  - [0047] - un élément chauffant ou refroidissant commandable apte à chauffer ou à refroidir le premier guide d'onde, et
  - [0048] - un microcontrôleur configuré pour commander l'élément chauffant en fonction d'une consigne de température et de la température mesurée par le capteur pour limiter les variations de température du premier guide d'onde autour de cette consigne de température,
- [0049] dans lequel le premier pas du premier réseau de Bragg est configuré pour que le spectre de puissance du premier réseau de Bragg présente plusieurs harmoniques discernables d'ordre supérieur à cent dans la plage de travail, ces harmoniques formant ainsi les pics de puissance du spectre de puissance de l'étalon à des longueurs d'onde connues.
- [0050] Les modes de réalisation de l'étalon ci-dessus peuvent comporter la caractéristique suivante :
- [0051] - L'étalon comporte un second réseau de Bragg réalisé dans le cœur du premier guide d'onde, ce second réseau de Bragg comportant au moins trois motifs identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe longitudinal du premier guide d'onde et séparés les uns des autres par un second pas constant, ce second pas étant configuré pour que la longueur d'onde de la fréquence fondamentale de résonance du second réseau de Bragg soit située à l'intérieur de la plage de travail.
- [0052] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en se référant aux dessins sur

lesquels :

- [0053] - la [Fig.1] est une illustration schématique de l'architecture d'un dispositif de mesure d'une grandeur physique,
- [0054] - la [Fig.2] est une illustration schématique d'un étalon du dispositif de mesure de la [Fig.1],
- [0055] - la [Fig.3] est une illustration schématique, partielle et en coupe longitudinale, d'un réseau de Bragg utilisé dans l'étalon de la [Fig.2],
- [0056] - la [Fig.4] est une illustration schématique, en coupe transversale, d'un motif du réseau de Bragg de la [Fig.3],
- [0057] - la [Fig.5] est un graphe représentant une portion du spectre de puissance du réseau de Bragg de la [Fig.3],
- [0058] - la [Fig.6] est un organigramme d'un procédé de fabrication du réseau de Bragg de la [Fig.3],
- [0059] - la [Fig.7] est un organigramme d'un procédé de mesure d'une grandeur physique à l'aide du dispositif de la [Fig.1], et
- [0060] - la [Fig.8] est une illustration schématique, partielle et en coupe longitudinale, d'un autre mode de réalisation d'un étalon pour le dispositif de mesure de la [Fig.1].
- [0061] Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments. Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détails.
- [0062] Dans cette description des exemples détaillés de modes de réalisation sont d'abord décrits dans un chapitre I en référence aux figures. Ensuite, dans un chapitre II, des variantes de ces modes de réalisation sont introduits. Enfin, les avantages des différents modes de réalisation sont précisés dans un chapitre III.
- [0063] Chapitre I : Exemples de modes de réalisation
- [0064] La [Fig.1] représente un dispositif 2 de mesure d'une grandeur physique. Par exemple, ici, la grandeur physique à mesurer est une température d'un milieu extérieur.
- [0065] Le dispositif 2 comporte un transducteur optique 4 et un étalon 6. Le transducteur 4 est exposé aux variations de la grandeur physique à mesurer.
- [0066] Le transducteur 4 transforme une variation de la grandeur physique à mesurer en un déplacement d'un pic de puissance de son spectre de puissance. Dans ce texte, à défaut d'indication contraire, le terme « spectre de puissance » ou « spectre » désigne le spectre de puissance en réflexion. Le spectre de puissance en réflexion est le spectre de puissance du signal optique réfléchi par un composant optique. Un pic dans le spectre de puissance en réflexion correspond à une raie d'absorption dans le spectre de puissance en transmission du même composant optique.
- [0067] Le spectre de puissance du transducteur 4 comporte, par exemple, un seul pic de puissance dans une plage de travail prédéterminée. Cette plage de travail a une largeur

supérieure à 5 nm. Typiquement, sa largeur est également inférieure ou égale à 200 nm ou 120 nm. Ici, la largeur de la plage de travail est égale à 100 nm. La plage de travail est située à l'intérieur du domaine de l'optique. Le domaine de l'optique désigne la plage contenant les longueurs d'onde habituellement utilisées en optique. Plus précisément, dans ce texte, le domaine de l'optique désigne la plage qui s'étend de 200 nm à 5000 nm et, de préférence, de 400 nm à 2000 nm.

- [0068] Par exemple, le transducteur 4 est identique ou similaire à celui décrit dans la demande CN102879022A. Le transducteur 4 est donc ici un réseau de Bragg qui est réalisé dans le cœur d'une fibre optique 14. La longueur d'onde  $\lambda_{B4}$  de la fréquence fondamentale  $f_{B4}$  de ce réseau de Bragg est située à l'intérieur de la plage de travail prédéterminée. De préférence, la longueur d'onde  $\lambda_{B4}$  est située sensiblement au milieu de la plage de travail. La longueur d'onde de la fréquence fondamentale d'un réseau de Bragg est donnée par la relation (1) suivante :  $\lambda_B = 2 * n_e * \Lambda$ , où :
- [0069] -  $\lambda_B$  est la longueur d'onde de la fréquence fondamentale du réseau de Bragg,
- [0070] -  $n_e$  est l'indice effectif de la fibre optique à l'intérieur de laquelle le réseau de Bragg est réalisé,
- [0071] -  $\Lambda$  est le pas du réseau de Bragg, et
- [0072] - le symbole « \* » désigne l'opération de multiplication scalaire dans ce texte.
- [0073] L'indice effectif  $n_e$  de propagation est aussi connu sous le nom de « constante de phase du mode ». Il est défini par la relation suivante :  $n_g = n_e - \lambda dn_e/d\lambda$ , où  $n_g$  est l'indice de groupe et  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal optique guidé par la fibre optique. L'indice effectif de propagation d'une fibre optique dépend des dimensions du cœur de cette fibre optique et des matériaux formant ce cœur et la gaine optique de cette fibre optique. Il peut être déterminé expérimentalement ou par simulation numérique.
- [0074] L'étalon 6 présente un spectre de puissance en réflexion comportant plusieurs pics de puissance répartis à l'intérieur de la plage de travail. L'intervalle spectrale libre de cet étalon sur la plage de travail est inférieur ou égal à 5 nm et, de préférence, inférieur ou égal à 1 nm. Par la suite, une telle succession de pics est aussi appelée « un peigne de pics » ou simplement « un peigne ». Contrairement au transducteur 4, l'étalon 6 est configuré pour que son spectre de puissance soit constant. En particulier, l'étalon 6 est agencé pour que son spectre de puissance ne se déplace pas en fonction de la grandeur physique mesurée ni en fonction de variations d'autres grandeurs physiques du milieu extérieur dans lequel l'étalon 6 est plongé. En particulier, l'étalon 6 est agencé pour que son spectre de puissance ne se déplace pas en fonction de la température du milieu extérieur. Dans ce texte, « ne se déplace pas » signifie que l'amplitude du déplacement du spectre de puissance de l'étalon 6 est négligeable devant l'amplitude  $\Delta\lambda$  du déplacement du spectre de puissance du transducteur 4 observée dans le même temps. Ici,

l'amplitude du déplacement du spectre de puissance de l'étalon 6 est considérée comme négligeable si elle est dix ou cent fois inférieure à l'amplitude  $\Delta\lambda$ .

- [0075] Le transducteur 4 est optiquement raccordé à un port 10 d'entrée/sortie d'un coupleur optique 12 par l'intermédiaire du guide d'onde 14. Le coupleur optique 12 comporte :
- [0076] - un port 16 d'entrée optiquement raccordé à un port 18 de sortie d'un analyseur spectral 20 par l'intermédiaire d'un guide d'onde 22, et
- [0077] - un port 24 de sortie optiquement raccordé à un port 26 d'entrée de l'analyseur spectral 20 par l'intermédiaire d'un guide d'onde 28.
- [0078] L'étalon 6 est optiquement raccordé à un port 30 d'entrée/sortie d'un coupleur optique 32 par l'intermédiaire d'un guide d'onde 34. Le coupleur optique 32 comporte :
- [0079] - un port 36 d'entrée optiquement raccordé à un port 38 de sortie de l'analyseur spectral 20 par l'intermédiaire d'un guide d'onde 42, et
- [0080] - un port 44 de sortie optiquement raccordé à un port 46 d'entrée de l'analyseur spectral 20 par l'intermédiaire d'un guide d'onde 48.
- [0081] Dans ce mode de réalisation, tous les guides d'onde ci-dessus sont des fibres optiques respectives. Ainsi, par la suite, les mêmes références numériques sont utilisées pour désigner le guide d'onde ou la fibre optique. Ici, les fibres optiques utilisées sont des fibres optiques monomodes également connues sous l'acronyme SMF (« Simple Mode Fiber »).
- [0082] L'analyseur spectral 20 est capable de mesurer les réponses spectrales du transducteur 4 et de l'étalon 6 puis de déterminer la variation de la grandeur physique à mesurer à partir de ces réponses spectrales mesurées. Pour cela, il comporte :
- [0083] - une source laser accordable 50,
- [0084] - un coupleur optique 52 qui raccorde optiquement un port 54 de sortie de la source laser 50, simultanément, aux deux ports de sortie 18 et 38,
- [0085] - deux capteurs optiques 62 et 64 optiquement raccordés, respectivement, aux ports d'entrée 26 et 46 pour mesurer la puissance du signal optique reçu sur ces ports d'entrée, et
- [0086] - une unité électronique 70 de traitement électriquement raccordée aux capteurs 62, 64 pour recevoir des signaux électriques représentatifs des puissances des signaux optiques mesurés par, respectivement, les capteurs 62 et 64.
- [0087] La source laser 50 émet, en direction du transducteur 4 et de l'étalon 6, un signal optique mono-fréquence par l'intermédiaire du port 54. La longueur d'onde  $\lambda_s$  du signal optique émis est dans le domaine de l'optique. La valeur de la longueur d'onde  $\lambda_s$  dépend d'un signal de commande reçu sur un port 66 de commande de la source laser 50. Plus précisément, la longueur d'onde  $\lambda_s$  est reliée à la valeur du signal de commande par une fonction de transfert qui, à chaque valeur du signal de commande,

associe une valeur correspondante de la longueur d'onde  $\lambda_s$ . Typiquement, cette fonction de transfert n'est pas parfaitement linéaire. Dans ce cas, elle est dite « non-linéaire ». Une telle source laser 50 est également appelée « source laser à balayage ». En effet, moyennant l'utilisation d'un signal de commande approprié, la longueur d'onde  $\lambda_s$  balaye toute la plage de travail. Ici, la plage de travail est une plage de longueurs d'onde qui s'étend de la longueur d'onde  $\lambda_{s\min}$  à la longueur d'onde  $\lambda_{s\max}$ . La largeur de la plage de travail est typiquement déterminée par les caractéristiques de la source 50. La largeur de la plage de travail est égale à la différence  $\lambda_{s\max} - \lambda_{s\min}$ . Dans ce mode de réalisation, cette plage de travail s'étend de 1500 nm à 1600 nm.

[0088] Le capteur 62 mesure le signal optique rétro-diffusé par le transducteur 4. En parallèle, le capteur 64 mesure le signal optique rétro-diffusé par l'étalon 6. Ici, les capteurs 62 et 64 sont identiques. Par exemple, les capteurs 62 et 64 sont chacun une photodiode. Chacun des capteurs 62, 64 présente une plage spectrale d'observation qui englobe la plage de travail.

[0089] L'unité 70 est notamment configurée pour :

[0090] - déterminer l'amplitude  $\Delta\lambda$  du déplacement du pic du transducteur 4 à partir des réponses spectrales du transducteur 4 et de l'étalon 6 mesurées séparément l'une de l'autre par les capteurs, respectivement, 62 et 64, puis

[0091] - établir une variation de la grandeur physique à mesurer à partir de l'amplitude  $\Delta\lambda$  déterminée.

[0092] Pour réaliser ces opérations, l'unité 70 comporte un microprocesseur programmable 72 et une mémoire 74 contenant les données et les instructions nécessaires au fonctionnement de l'analyseur spectral 20. Par exemple, ici, la mémoire comporte un coefficient  $S_G$  de sensibilité qui permet d'établir la variation de la grandeur physique à partir de l'amplitude  $\Delta\lambda$  déterminée. Dans cet exemple, le coefficient  $S_G$  est défini par la relation suivante  $\Delta\lambda/\lambda_{Bi4} = S_G * \Delta G$ , où :

[0093] -  $\lambda_{Bi4}$  est la longueur d'onde de la fréquence fondamentale du réseau de Bragg du transducteur 4 dans un état de référence, et

[0094] -  $\Delta\lambda$  est l'amplitude de la variation de la longueur d'onde de la fréquence fondamentale du réseau de Bragg du transducteur 4 obtenue en réponse à une variation  $\Delta G$  de la grandeur physique à mesurer.

[0095] La longueur d'onde  $\lambda_{Bi4}$  correspond, ici, à une longueur d'onde de référence pour le pic de puissance du transducteur 4. L'amplitude  $\Delta\lambda$  est égale à l'écart entre la longueur d'onde  $\lambda_{Bm4}$  de la fréquence fondamentale mesurée pour le transducteur 4 et la longueur d'onde  $\lambda_{Bi4}$  de référence. Contrairement à la longueur d'onde  $\lambda_{Bi4}$ , la longueur d'onde  $\lambda_{Bm4}$  varie en fonction de la grandeur physique à mesurer. La valeur de la longueur d'onde  $\lambda_{Bi4}$  est enregistrée dans la mémoire 74. Cette longueur d'onde  $\lambda_{Bi4}$  peut aussi être associée, dans la mémoire 74, à une valeur absolue correspondante de la

grandeur physique à mesurer.

- [0096] Habituellement, l'unité 70 est également raccordée à une interface homme-machine 76 pour communiquer le résultat des mesures réalisées à un être humain.
- [0097] La [Fig.2] représente plus en détail l'architecture de l'étalon 6. L'étalon 6 comporte un réseau de Bragg 80 réalisé dans le cœur de la fibre optique 34. Le réseau 80 est un réseau de Bragg d'ordre très élevé.
- [0098] Dans ce texte, « ordre très élevé » désigne le fait que le spectre de puissance du réseau de Bragg présente des harmoniques discernables d'ordre supérieur à N dans le domaine de l'optique et, plus précisément, dans la plage de travail, où N est un nombre entier supérieur à 100 et, de préférence, supérieur à 500 ou 1000. Autrement dit, dans le spectre de puissance en réflexion d'un réseau de Bragg d'ordre très élevé, il existe des harmoniques d'ordre k, supérieur à N, qui correspondent chacun à un pic de puissance distinct des pics correspondants aux harmoniques d'ordres k-1 et k+1. Ce pic d'ordre k est également supérieur au bruit. Ce pic d'ordre k est situé à la longueur d'onde  $\lambda_k$  définie par la relation (2) suivante :  $\lambda_k = 2 \cdot n_e \cdot \Lambda / k$ , où :
- [0099] - k est un nombre entier égal à l'ordre de l'harmonique,
- [0100] -  $n_e$  est l'indice effectif de la fibre optique dans laquelle est réalisée le réseau de Bragg d'ordre très élevé,
- [0101] -  $\Lambda$  est le pas du réseau de Bragg d'ordre très élevé.
- [0102] Ici, ce pic d'ordre k est situé à l'intérieur de la plage de travail.
- [0103] Le spectre de puissance du réseau 80, à l'intérieur de la plage de travail, comporte une succession de pics correspondant chacun à un harmonique d'ordre supérieur à N. Ces pics sont très rapprochés et très fins. Dans ce texte, « très rapproché » signifie que l'intervalle spectral libre est inférieur à 5 nm et, de préférence, inférieur ou égal à 1 nm. « très fins » signifie que la largeur à mi-hauteur de chaque pic est inférieure à l'intervalle spectral libre et, de préférence, deux fois inférieure à l'intervalle spectral libre. De plus, les hauteurs de ces pics sont sensiblement les mêmes sur toute la plage de travail car chacun de ces pics correspond à un harmonique d'ordre très élevé. Autrement dit, le spectre de puissance d'un réseau 80 est un peigne de pics tels que précédemment défini. Un exemple d'un tel peigne est représenté sur la [Fig.3] de l'article suivant : Pengtao Luo et Al : « Femtosecond laser plane-by-plane inscribed ultrahigh-order fiber Bragg grating and its application in multi-wavelength fiber lasers », Optic letter, 15/06/2022. Par la suite cet article est désigné par la référence « LUO2022 »..
- [0104] Il est souligné qu'un réseau de Bragg d'ordre très élevé se distingue des réseaux de Bragg standards couramment utilisés dans le domaine de l'optique par plusieurs caractéristiques. Dans les réseaux de Bragg standards, le pas du réseau de Bragg standard est choisi :

- [0105] - pour que longueur d'onde  $\lambda_B$  de la fréquence fondamentale  $f_B$  de résonance du réseau de Bragg soit dans le domaine de l'optique, ou
- [0106] - que seules les premiers harmoniques d'ordre inférieur à vingt soit dans le domaine de l'optique.
- [0107] Ainsi, le pas de ces réseaux de Bragg standards sont systématiquement inférieurs à 50  $\mu\text{m}$  ou 20  $\mu\text{m}$  et, généralement, même inférieur à 10  $\mu\text{m}$ . Dans ces conditions, le réseau de Bragg standard ne peut pas être un réseau de Bragg d'ordre très élevé. En effet, dans ce cas, même si des harmoniques d'ordre  $k$  supérieur à cent sont discernables dans son spectre de puissance, la longueur d'onde  $\lambda_k$  de ces harmoniques n'est pas dans le domaine de l'optique. Autrement dit, les longueurs d'onde  $\lambda_k$  des harmoniques d'ordre  $k$  supérieur à cent, sont toutes inférieures à 200 nm. A l'inverse, le pas d'un réseau de Bragg d'ordre très élevé est supérieur à 20  $\mu\text{m}$  ou 50  $\mu\text{m}$  et, souvent supérieure à 100  $\mu\text{m}$ . Dans ces conditions, la longueur d'onde  $\lambda_B$  de la fréquence fondamentale  $f_B$  de résonance du réseau de Bragg d'ordre très élevé et les longueurs d'onde de ses harmoniques d'ordre inférieur à cent, ne sont pas dans le domaine de l'optique.
- [0108] Les motifs des réseaux de Bragg standards sont couramment fabriqués en utilisant des impulsions de rayonnement ultraviolet ou des lasers à  $\text{CO}_2$  et non pas des impulsions d'un laser femtoseconde. Les réseaux de Bragg fabriqués sans utiliser d'impulsions d'un laser femtoseconde présentent seulement des harmoniques discernables d'ordre inférieur à vingt. Il semble que cela provient du fait que les variations de l'indice de réfraction dans la fibre optique obtenues en mettant en œuvre ces autres procédés connus sont beaucoup moins franches que celles obtenues à l'aide d'un laser femtoseconde. Ainsi, un réseau de Bragg fabriqué sans utiliser d'impulsions d'un laser femtoseconde, même s'il présente un pas supérieur à 20  $\mu\text{m}$  ou à 50  $\mu\text{m}$ , n'est pas un réseau de Bragg d'ordre très élevé.
- [0109] Il est aussi souligné qu'un réseau de Bragg ne doit pas être confondu avec une juxtaposition, le long d'une fibre optique, de cavités de Fabry-Perrot. En effet, les caractéristiques spectrales d'une fibre optique comportant une telle juxtaposition de cavités de Fabry-Perrot dépendent des longueurs de chaque cavité de Fabry-Perrot ainsi que de la réflectivité des dioptrés situés à chaque extrémité de chaque cavité de Fabry-Perrot. Contrairement à un réseau de Bragg, les dioptrés ne sont pas espacés les uns des autres d'un pas constant pour former une structure périodique.
- [0110] Les réseaux de Bragg sont également fréquemment utilisés, dans le domaine des sources laser, pour former les dioptrés d'extrémité d'une cavité de Fabry Perot de cette source laser. Dans ce cas, la réponse spectrale de cette cavité est principalement déterminée par la longueur de la cavité et non pas par les caractéristiques spectrales des réseaux de Bragg utilisés. Plus précisément, comme enseigné dans l'article LUO2022,

la caractéristique spectrale des réseaux de Bragg est alors utilisée pour ajuster la ou les longueurs d'onde de la source laser. Cet usage des réseaux de Bragg d'ordre très élevé dans les sources laser est éloigné du domaine de la mesure d'une grandeur physique. En particulier, cet usage n'enseigne pas qu'un réseau de Bragg d'ordre élevé peut avantageusement être utilisé pour réaliser un étalon d'un dispositif de mesure.

- [0111] L'étalon 6 est aussi agencé pour que le spectre de puissance du réseau 80 soit constant et cela malgré des variations dans les conditions d'utilisation. A cet effet, il comporte une structure isolante 82 qui isole le réseau 80 des variations du milieu extérieur à l'intérieur duquel l'étalon 6 est plongé. Dans ce mode de réalisation, la structure isolante 82 comporte un boîtier 84 à l'intérieur duquel le réseau 80 est fixé sans aucun degré de liberté. Le boîtier 84 isole le réseau 80 des variations des contraintes mécaniques que le milieu extérieur peut exercer sur le réseau 80.
- [0112] La structure isolante 82 comporte aussi, logé à l'intérieur du boîtier 84 :
- [0113] - un capteur 90 de température,
- [0114] - un élément 92 chauffant ou refroidissant commandable apte à chauffer ou à refroidir le réseau 80, et
- [0115] - un microcontrôleur 94 configuré pour commander l'élément chauffant en fonction d'une consigne Tc de température et de la température mesurée par le capteur 90 pour limiter les variations de température du réseau 80 autour de cette consigne Tc.
- [0116] L'élément 92 est par exemple un module Peltier ou un ensemble de plusieurs modules Peltier.
- [0117] Le microcontrôleur 94 comporte un microprocesseur programmable 96 et une mémoire 98 contenant les données et les instructions nécessaires au fonctionnement de l'étalon 6. Ici, la mémoire 98 comporte la consigne Tc pré-enregistrée et les instructions d'un module 100 d'asservissement. Lorsque le module 100 est exécuté par le microprocesseur 96, la température du réseau 80 est asservie sur la consigne Tc enregistrée dans la mémoire 98. Pour cela, le microprocesseur 96 commande l'élément 92 en fonction d'un écart entre la consigne Tc et la température mesurée par le capteur 90 de manière à réduire cet écart.
- [0118] La [Fig.3] représente plus en détail une mode de réalisation du réseau 80. La fibre optique 34 s'étend le long d'un axe longitudinal 108 parallèle à une direction Z d'un repère orthogonal XYZ. Les figures 3, 4 et 8 sont orientées par rapport à ce repère XYZ. Par exemple, la direction Z est horizontale et la direction Y est verticale.
- [0119] Pour simplifier la [Fig.3], seule la portion de la fibre optique 34 qui contient le réseau 80 est représentée. La fibre optique 34 guide le signal optique le long de l'axe longitudinal 108.
- [0120] La fibre optique 34 comporte :
- [0121] - un cœur 110 dans lequel se propage le signal optique guidé par cette fibre 34,

- [0122] - une gaine optique 112 réalisée dans un matériau dont l'indice de réfraction permet de maintenir le signal optique à l'intérieur du cœur 110 par réflexion au niveau de l'interface entre le cœur 110 et cette gaine 112, et
- [0123] - une gaine mécanique, typiquement en polymère, et qui recouvre la gaine 112.
- [0124] Pour simplifier la [Fig.3], la gaine mécanique de la fibre optique 34 n'a pas été représentée.
- [0125] Le réseau 80 est conçu pour obtenir un peigne de pics sur la plage de travail. De plus, ici, le réseau 80 est conçu pour que ce peigne soit formé par les harmoniques du réseau 80 d'ordre proche de 1024.
- [0126] A cet effet, le réseau 80 est composé d'une succession de motifs  $M_i$  disposés les uns derrière les autres le long de l'axe 108. L'indice  $i$  est le numéro d'ordre du motif dans la direction Z. L'indice  $i$  du premier motif le plus à gauche dans le réseau 80 est égal à 1 et l'indice  $i$  du dernier motif le plus à droite dans le réseau 80 est égal à  $p$ .  $p$  est égal au nombre de motifs  $M_i$  du réseau 80. Sur la [Fig.3], seuls les deux premiers et les deux derniers motifs du réseau 80 ont été représentés. La présence des motifs intermédiaires situés entre les motifs  $M_2$  et  $M_{p-1}$  est représentée par des petits cercles sur l'axe 108.
- [0127] Le nombre  $p$  de motifs est supérieur ou égal à trois et, de préférence, supérieur ou égal à dix. En effet, il a été observé que plus le nombre  $p$  est grand, plus la largeur à mi-hauteur de chaque pic décroît. Ici, le nombre  $p$  est aussi choisi suffisamment petit pour que la longueur du réseau 80 reste petite, c'est-à-dire inférieure à 1 mètre et, de préférence, inférieure à 10 cm. La longueur du réseau 80 est égale à la distance entre les motifs  $M_1$  et  $M_p$  mesurée le long de l'axe 108. Typiquement, le nombre  $p$  est inférieur à 200 ou 100.
- [0128] Le pas  $\Lambda_{80}$  entre deux motifs  $M_i$  et  $M_{i+1}$  immédiatement consécutifs dans la direction Z est constant quel que soit l'indice  $i$ . Le pas  $\Lambda_{80}$  est donc égal à la distance, le long de l'axe 108, qui sépare deux motifs  $M_i$  et  $M_{i+1}$  immédiatement consécutifs.
- [0129] Ici, le pas  $\Lambda_{80}$  est calculé pour que la longueur d'onde d'un harmonique d'ordre  $k_c$  soit égale ou très proche du centre de la plage de travail. Ici, l'ordre  $k_c$  est choisi égal à 1024.
- [0130] Pour cela, le pas  $\Lambda_{80}$  est compris entre  $0,9 * [k_c * \lambda_c / (2 * n_e)]$  et  $1,1 * [k_c * \lambda_c / (2 * n_e)]$  et, de préférence, compris entre  $0,98 * [k_c * \lambda_c / (2 * n_e)]$  et  $1,02 * [k_c * \lambda_c / (2 * n_e)]$ , où  $n_e$  est l'indice effectif de la fibre optique 34 et  $\lambda_c$  est la longueur d'onde située au centre de la plage de travail. Ici, la longueur d'onde  $\lambda_c$  est égale à 1550 nm.
- [0131] A titre d'exemple, la fibre optique 34 est réalisée à partir d'une fibre optique commercialisée sous la référence SMF-28 par la société Corning®. L'indice  $n_e$  de cette fibre optique est égal à environ 1,4676. Dans ces conditions, le terme  $k_c * \lambda_c / (2 * n_e)$  est égal à approximativement 540,8  $\mu\text{m}$ . Ici, le pas  $\Lambda_{80}$  est choisi égal à 540,8  $\mu\text{m}$ . Avec le

choix de cette valeur pour le pas  $\Lambda_{80}$ , seuls les harmoniques d'ordre compris entre 317 et 7936 sont dans le domaine de l'optique et seuls les harmoniques d'ordre compris entre 993 et 1058 sont compris dans la plage de travail. En particulier, la longueur d'onde  $\lambda_{B80}$  de la fréquence fondamentale du réseau 80 n'est pas dans le domaine de l'optique.

- [0132] Pour cette valeur du pas  $\Lambda_{80}$  et pour que la longueur  $L_{80}$  du réseau 80 soit inférieure à 10 cm, le nombre  $p$  de motifs est choisi inférieur à 185. Ici,  $p$  est choisi égal à 120, de sorte que la longueur  $L_{80}$  du réseau 80 est approximativement égale à 65 mm.
- [0133] Les motifs  $M_i$  sont tous structurellement identiques les uns aux autres et diffèrent les uns des autres seulement par leur position le long de l'axe 108. Ainsi, par la suite, seul le motif  $M_i$  est décrit en détail. Ce motif  $M_i$  s'étend principalement dans un plan  $P_i$  perpendiculaire à l'axe 108. Ce plan  $P_i$  est donc parallèle aux directions X et Y. Sur la [Fig.3], seuls les plans  $P_1, P_2, P_{p-1}$  et  $P_p$  dans lesquels s'étendent respectivement, les motifs  $M_1, M_2, M_{p-1}$  et  $M_p$  sont représentés.
- [0134] La [Fig.4] représente plus en détail un exemple de réalisation du motif  $M_i$ . Sur la [Fig.4], seule la section transversale du cœur 110 est représentée.
- [0135] Chaque motif  $M_i$  réfléchit une partie du signal optique incident. Une autre partie du signal optique incident traverse le motif  $M_i$ . Enfin, chaque motif  $M_i$  diffuse une partie de l'énergie du signal optique incident qui n'est alors ni réfléchi ni transmise à travers ce motif  $M_i$ . Cette énergie diffusée par chaque motif  $M_i$  crée des pertes d'insertion causées par la présence du réseau 80 dans le cœur 110 de la fibre optique 34. Pour minimiser ces pertes d'insertion, ici, la surface  $S_{M_i}$  de la section transversale du motif  $M_i$  occupe moins de la moitié de la surface  $S_{110}$  de la section transversale du cœur 110. La surface  $S_{M_i}$  est égale à la surface de la projection orthogonale du motif  $M_i$  sur le plan  $P_i$ . La surface  $S_{110}$  est égale à la surface de la section transversale du cœur 110. Typiquement, la surface  $S_{110}$  est constante le long de toute la longueur de la fibre optique 34.
- [0136] De préférence, la surface  $S_{M_i}$  est inférieure à  $0,1 * S_{110}$  ou à  $0,05 * S_{110}$  ou à  $0,01 * S_{110}$ . Ici, la surface  $S_{M_i}$  est inférieure à  $0,05 * S_{110}$ .
- [0137] Pour obtenir une réflectivité suffisante du motif  $M_i$  pour limiter le nombre  $p$  de motifs et donc pour limiter la longueur  $L_{80}$  du réseau 80, la surface  $S_{M_i}$  est supérieure à  $0,016 \mu\text{m}^2$ , c'est-à-dire supérieure à deux fois la surface de la projection orthogonale d'une bulle sphérique de 100 nm de diamètre sur le plan  $P_i$ . Dans ce mode de réalisation, la surface  $S_{M_i}$  est supérieure ou égale à  $0,032 \mu\text{m}^2$ .
- [0138] A cette fin, le motif  $M_i$  est constitué de plusieurs bulles  $B_j$ . L'indice  $j$  est un identifiant qui permet d'identifier de façon unique la bulle  $B_j$  parmi l'ensemble des autres bulles du même motif  $M_i$ . L'indice  $j$  est ici un nombre entier compris entre 1 et  $q$ , où  $q$  est égal au nombre de bulles  $B_j$  du motif  $M_i$ . Le nombre  $q$  est supérieur ou égal

à deux ou quatre. Ici, le nombre  $q$  est égal à six.

- [0139] Dans ce mode de réalisation, toutes les bulles  $B_j$  sont structurellement identiques les unes aux autres. Seules leurs positions dans le plan  $P_i$  permettent de les distinguer les unes des autres.
- [0140] Chaque bulle  $B_j$  crée une variation importante de l'indice de réfraction du cœur 110 dans la direction de propagation du signal optique. Pour cela, l'écart entre l'indice  $n_{r110}$  de réfraction du cœur 110 et l'indice  $n_{rB}$  de réfraction de la bulle  $B_j$  est supérieur à 0,3 ou à 0,4. Ici, l'intérieur de chaque bulle est vide ou pratiquement vide ce qui correspond à un écart entre les indices  $n_{r110}$  et  $n_{rB}$  supérieur ou égal à 0,4.
- [0141] De plus, pour que la variation d'indice de réfraction soit brusque, le diamètre  $D_j$  de chaque bulle  $B_j$  est inférieur à 200 nm et, de préférence, inférieur à 100 nm. Généralement, le diamètre  $D_j$  est également supérieur à 10 nm ou 50 nm.
- [0142] Chaque bulle  $B_j$  est principalement sphérique. Ainsi, le diamètre  $D_j$  de la bulle  $B_j$  est égal au diamètre de la sphère de plus petit volume qui contient entièrement la bulle  $B_j$ . Ici, ce diamètre  $D_j$  est inférieur à 100 nm.
- [0143] Le centre de chaque bulle  $B_j$  est contenu dans le plan  $P_i$ .
- [0144] Dans ce mode de réalisation, les bulles  $B_j$  sont disjointes, c'est-à-dire qu'elles ne se chevauchent pas et qu'elles ne sont pas fluidiquement raccordées les unes aux autres.
- [0145] Le motif  $M_i$  est centré sur l'axe 108. Pour cela, les bulles  $B_j$  sont disposées les unes à côté des autres de manière à ce que le barycentre du motif  $M_i$  soit situé à moins de 100 nm de l'axe 108 et le centre d'au moins une des bulles  $B_j$  est situé à moins de 100 nm de l'axe 108.
- [0146] Dans ce premier mode de réalisation, le barycentre du motif  $M_i$  est situé sur l'axe 108. De plus, le motif  $M_i$  est symétrique par rapport à l'axe 108.
- [0147] Les centres des bulles  $B_j$  sont situés les uns derrière les autres sur un axe  $A_i$  qui coupe l'axe 108 et qui appartient au plan  $P_i$ . Le motif  $M_i$  comporte donc une ligne de bulles disjointes. Dans ce cas, l'agencement des bulles disjointes forme ce qui est appelé un « trait pointillé » dans ce texte. Ici, l'axe  $A_i$  est parallèle à la direction Y. Dans ce mode de réalisation, les bulles  $B_3$  et  $B_4$  sont situées, respectivement, au-dessus et au-dessous de l'axe 108. Les centres des bulles  $B_3$  et  $B_4$  sont à moins de 100 nm de l'axe 108.
- [0148] La distance entre deux bulles  $B_j, B_{j+1}$  immédiatement consécutives le long de l'axe  $A_i$  est constante. Autrement dit, quelle que soit la paire de bulles  $B_j, B_{j+1}$  immédiatement consécutives le long de l'axe  $A_i$ , la distance qui sépare les centres de ces deux bulles est la même.
- [0149] La [Fig.5] représente le spectre de puissance du réseau 80 entre 1545 nm et 1555 nm. La réflectivité des pics du peigne obtenu atteint -21 dBm.
- [0150] La [Fig.6] représente un procédé de fabrication de la fibre optique 34. Ce procédé débute par une étape 120 de fourniture d'une fibre optique dont le cœur 110 est ini-

tialement dépourvu de réseau de Bragg. Par exemple, la fibre optique fournie est la fibre optique commercialisée sous la référence SMF-28 par la société Corning®.

[0151] Ici, la gaine mécanique de cette fibre optique est transparente aux impulsions d'un laser femtoseconde de sorte qu'il n'est pas nécessaire de retirer cette gaine mécanique aux emplacements où doivent être réalisés les motifs  $M_i$ .

[0152] Ensuite, lors d'une étape 122, le réseau 80 est fabriqué dans le cœur 110. Pour cela, une opération 124 de formation du motif  $M_i$  dans le cœur 110 de la fibre optique fournie est répétée à chaque emplacement où un tel motif  $M_i$  doit être formé.

[0153] Lors de l'opération 124, chaque bulle  $B_j$  est créée par une seule impulsion du laser femtoseconde. Plus précisément, lors de l'opération 124, le faisceau du laser femtoseconde est focalisé sur le centre de la bulle  $B_j$  à créer puis une impulsion d'une durée inférieure à 500 fs ou à 250 fs est émise et irradie le point du cœur 110 où doit se situer le centre de la bulle  $B_j$ . La bulle  $B_j$  est alors créée dans le cœur 110. Ensuite, la fibre optique est déplacée par rapport au laser femtoseconde pour que le faisceau du laser femtoseconde soit maintenant focalisé sur le centre de la prochaine bulle  $B_{j+1}$  à créer, puis une nouvelle impulsion du laser femtoseconde est émise.

[0154] Dans ce mode de réalisation, les bulles  $B_j$  sont donc créées les unes après les autres.

[0155] Les valeurs des différents paramètres d'un laser femtoseconde pour créer une bulle telle que la bulle  $B_j$  dépendent des caractéristiques de la fibre optique fournie ainsi que des caractéristiques du laser femtoseconde utilisé. Le réglage de ces différents paramètres pour créer les bulles  $B_j$  précédemment caractérisées, fait parti des compétences de l'homme du métier. Par exemple, à titre d'illustration, le lecteur peut consulter à ce sujet la demande CN211603608U qui décrit en détail un exemple d'installation permettant de former des bulles telles que les bulles  $B_j$  dans le cœur d'une fibre optique. Ici, les paramètres suivants ont été utilisés pour fabriquer la fibre optique 34 :

[0156] - la longueur d'onde centrale de l'impulsion du laser femtoseconde est égale à 512 nm,

[0157] - la durée de chaque impulsion du laser femtoseconde est égale à 160 fs, et

[0158] - la puissance de chaque impulsion du laser femtoseconde est égale à 45 nJ.

[0159] Le fonctionnement du dispositif 2 de mesure va maintenant être décrit en référence au procédé de la [Fig.7].

[0160] Lors d'une étape 130, l'unité 70 commande la source 50 pour faire varier linéairement, au cours du temps, la longueur d'onde  $\lambda_s$  depuis la longueur d'onde  $\lambda_{smin}$  jusqu'à la longueur d'onde  $\lambda_{smax}$ . A cet effet, l'unité 70 envoie à la source 50 un signal de commande généré à partir d'une estimation de la fonction de transfert de la source 50.

[0161] Le signal optique émis par la source 50 est guidé par le coupleur 52 et les fibres

optiques 22, 14, 42 et 34 jusqu'au transducteur 4 et à l'étalon 6. Le transducteur 4 et l'étalon 6 réfléchissent alors une partie du signal optique incident. Ces parties réfléchies du signal optique correspondent aux signaux rétro-diffusés, respectivement, par le transducteur 4 et l'étalon 6.

- [0162] En parallèle de l'étape 130, lors d'une étape 132, le capteur 62 mesure seulement le signal optique rétro-diffusé par le transducteur 4 et le capteur 64 mesure seulement le signal optique rétro-diffusé par l'étalon 6. Plus précisément, les capteurs 62, 64 génèrent chacun un signal électrique dont l'amplitude est représentative de la puissance du signal optique mesuré. Les signaux électriques générés par les capteurs 62, 64 sont transmis à l'unité 70 qui les acquièrent.
- [0163] Une fois les signaux électriques acquis par l'unité 70, lors d'une étape 134, l'unité 70 détermine l'amplitude  $\Delta\lambda$ .
- [0164] Lorsque la longueur d'onde  $\lambda_s$  est égale à la longueur d'onde  $\lambda_{Bm4}$  du transducteur 4, la puissance du signal optique rétro-diffusé par le transducteur 4 passe par un maximum. Puisque la longueur d'onde  $\lambda_s$  varie linéairement en fonction du temps, l'instant  $t_m$  auquel se produit ce maximum est proportionnel à la valeur actuelle de la longueur d'onde  $\lambda_{Bm4}$ . De même, la longueur d'onde  $\lambda_{Bi4}$  de référence correspond à un instant  $t_i$  de référence. Lors de l'étape 134, l'unité 70 calcule l'écart entre l'instant  $t_m$  mesuré et l'instant  $t_i$  de référence. Puisque la variation de la longueur d'onde  $\lambda_s$  au cours du temps est linéaire, l'écart  $t_m - t_i$  est proportionnel à l'amplitude  $\Delta\lambda$ . Le coefficient de proportionnalité entre l'écart  $t_m - t_i$  et l'amplitude  $\Delta\lambda$  est égal à la pente cible  $\alpha_c$  de la droite représentant l'évolution au cours du temps de la longueur d'onde  $\lambda_s$ . Cette pente cible  $\alpha_c$  est une constante prédéterminée et connue. Ainsi, lors de l'étape 134, l'unité 70 détermine  $\Delta\lambda$  à partir de l'écart mesuré entre les instants  $t_m$  et  $t_i$ .
- [0165] Ensuite, lors d'une étape 136, l'unité 70 établit la variation  $\Delta G$  de la grandeur physique mesurée à partir de l'amplitude  $\Delta\lambda$ . Par exemple, la variation  $\Delta G$  est calculée à l'aide de la relation suivante  $\Delta\lambda/\lambda_{Bi4} = S_G * \Delta G$ , où  $S_G$  est le coefficient de sensibilité pré-enregistré dans la mémoire 74. Si la longueur d'onde  $\lambda_{Bi4}$  est associée, dans la mémoire 74, à une valeur absolue correspondante de la grandeur physique à mesurer, alors l'unité 70 calcule également cette valeur absolue de la grandeur physique mesurée lors de l'étape 136.
- [0166] Ici, lors d'une étape 140, à chaque fois que le spectre de puissance de l'étalon 6 est mesuré par le capteur 64, l'unité 70 établit une nouvelle estimation de la fonction de transfert de la source 50. Pour cela, par exemple, l'unité 70 relève pour chacun des pics d'ordre  $k$  du peigne de l'étalon 6, l'instant  $t_{k,m}$  auquel il se produit. Ensuite, l'unité 70 associe l'instant relevé  $t_{k,m}$  à la longueur d'onde  $\lambda_k$  de ce pic d'ordre  $k$ . L'association de l'instant  $t_{k,m}$  et de la longueur d'onde  $\lambda_k$  forme un point  $(\lambda_k ; t_{k,m})$  d'abscisse  $\lambda_k$  et d'ordonnée  $t_{k,m}$ . La fonction de transfert estimée pour la source 50 correspond alors à la

courbe qui passe par l'ensemble des points  $(\lambda_k ; t_{k,m})$  relevés pour l'étalon 6.

[0167] Cette fonction de transfert estimée est ensuite utilisée lors de la prochaine exécution de l'étape 130 pour générer le signal de commande de la source 50 qui permet d'obtenir une variation linéaire, au cours de temps, de la longueur d'onde  $\lambda_s$  avec la pente cible  $\alpha_c$ . Par exemple, pour cela, chaque instant  $t_{k,m}$  est comparé à un instant théorique  $t_{k,t}$  auquel le pic d'ordre  $k$  aurait dû se produire si la variation de la longueur d'onde  $\lambda_s$  était parfaitement linéaire et avec la pente  $\alpha_c$ . L'instant théorique  $t_{k,t}$  est donc calculé à partir de la longueur d'onde  $\lambda_k$  du pic d'ordre  $k$  et de la pente cible  $\alpha_c$  prédéterminée et connue. Si l'amplitude de l'écart  $t_{k,m} - t_{k,t}$  dépasse un seuil prédéterminé, alors le signal de commande est localement modifié entre les instants  $t_{k-1,t}$  et  $t_{k,t}$  pour limiter l'amplitude de cet écart. Par exemple, si l'écart  $t_{k,m} - t_{k,t}$  est positif, cela signifie que l'instant  $t_{k,m}$  est en retard par rapport à l'instant  $t_{k,t}$ . Dans ce cas, le signal de commande est modifié entre les instants  $t_{k-1,t}$  et  $t_{k,t}$  pour faire croître plus rapidement la longueur d'onde  $\lambda_s$  entre ces instants  $t_{k-1,t}$  et  $t_{k,t}$ . A l'inverse, si l'écart  $t_{k,m} - t_{k,t}$  est négatif, cela signifie que l'instant  $t_{k,m}$  est en avance par rapport à l'instant  $t_{k,t}$ . Dans ce cas, le signal de commande est modifié entre les instants  $t_{k-1,t}$  et  $t_{k,t}$  pour faire croître plus lentement la longueur d'onde  $\lambda_s$  entre ces instants  $t_{k-1,t}$  et  $t_{k,t}$ .

[0168] Ainsi, dans ce mode de réalisation, le spectre mesuré de l'étalon 6 est utilisé pour linéariser la variation, au cours du temps, de la longueur d'onde  $\lambda_s$ . Cette linéarisation permet d'améliorer la précision de la mesure et permet aussi de compenser des dérives de la source 50. C'est donc de cette façon que la mesure du spectre de l'étalon 6 intervient dans la détermination de l'amplitude  $\Delta\lambda$ .

[0169] La [Fig.8] représente un étalon 150 susceptible d'être utilisé à la place de l'étalon 6. L'étalon 150 est identique à l'étalon 6 sauf qu'un second réseau de Bragg 152 est réalisé dans la fibre optique 34. Pour simplifier la [Fig.8], seul le cœur 110 et les réseaux 80 et 152 sont représentés.

[0170] Le réseau 152 est un réseau de Bragg standard dont la longueur d'onde  $\lambda_{B152}$  de sa fréquence fondamentale est située à l'intérieur de la plage de travail. La valeur absolue de la longueur d'onde  $\lambda_{B152}$  est connue. Ici, les motifs du réseau 152 sont conformés pour que l'amplitude du pic de puissance du réseau 152 à la longueur d'onde  $\lambda_{B152}$  soit supérieure, et de préférence 1,5 fois ou deux fois supérieure, à l'amplitude des pics du peigne du réseau 80 dans la plage de travail.

[0171] Le réseau 152 est, par exemple, réalisé dans le cœur 110 au même endroit que le réseau 80 mais décalé radialement par rapport au réseau 80 pour que ses motifs n'interfèrent pas avec les motifs du réseau 80. Par exemple, le réseau 152 est réalisée dans la partie supérieure du cœur 110 tandis que le réseau 80 est réalisé dans la partie inférieure du cœur 110. La partie supérieur du cœur 110 est celle située au-dessus d'un plan horizontal contenant l'axe 108 et la partie inférieure est celle située en-dessous de

ce plan horizontal.

[0172] Le spectre de puissance de l'étalon 150 est égal à la superposition du spectre du réseau 80 et du spectre du réseau 152. Ainsi, le spectre de l'étalon 150 comporte, en plus du peigne de pics, un pic supplémentaire à la longueur d'onde  $\lambda_{B152}$ . Ce pic supplémentaire est facilement identifiable car son amplitude est supérieure à l'amplitude des pics du peigne du réseau 80.

[0173] Lorsque l'étalon 6 est remplacé par l'étalon 150, l'unité 70 est modifiée pour déterminer en plus les valeurs absolues des longueurs d'onde correspondant à chacun des pics du peigne du réseau 80. Pour cela, l'unité 70 repère le plus grand pic de puissance, c'est-à-dire celui correspondant au réseau 152, dans le spectre mesuré de l'étalon 150. La valeur absolue de la longueur d'onde à laquelle ce plus grand pic apparaît dans le spectre de puissance de l'étalon 150 est connue et égale à la longueur d'onde  $\lambda_{B152}$ . Les positions des pics du peigne du réseau 80 par rapport au plus grand pic sont déterminées à partir du spectre mesurée de l'étalon 150. Ensuite, pour chaque pic du peigne du réseau 80, l'unité 70 détermine la valeur absolue de la longueur d'onde correspondant à ce pic à partir :

[0174] - du nombre d'intervalles spectrales libres qui le sépare du plus grand pic, et

[0175] - de la valeur absolue de la longueur d'onde  $\lambda_{B152}$ .

[0176] Par exemple, si un pic du peigne du réseau 80 est séparé du plus grand pic par 5,5 intervalles spectrales libres, alors la valeur absolue de la longueur d'onde à laquelle ce pic apparaît est égale à  $\lambda_{B152} + 5,5 * ISL_{80}$ , où  $ISL_{80}$  est la valeur connue de l'intervalle spectral libre du réseau 80.

[0177] A partir des valeurs absolues des longueurs d'onde des pics du peigne, l'unité 70 est alors capable d'estimer une fonction de transfert pour la source 50 qui à une valeur particulière du signal de commande, associe une valeur absolue de la longueur d'onde  $\lambda_s$ . Cela simplifie la génération d'un signal de commande qui fait varier linéairement la longueur d'onde  $\lambda_s$  en fonction du temps. Il est aussi possible, dans ce cas, d'établir directement la valeur absolue de la longueur d'onde  $\lambda_{Bm4}$ . Ensuite, l'unité 70 établie la valeur absolue de la grandeur physique à mesurer à partir d'une relation connue entre la valeur absolue de la longueur d'onde  $\lambda_{Bm4}$  et la valeur absolue de la grandeur physique.

[0178] Chapitre II : Variantes :

[0179] Variantes de l'étalon :

[0180] L'ordre  $k_c$  de l'harmonique qui se trouve au centre de la plage de travail est ici supérieur à 100 et, de préférence, choisi supérieur à 500 ou 1000. Cet ordre  $k_c$  peut aussi être choisi supérieur 2000 ou 4000 ou 10000. Théoriquement, il n'existe pas de limite supérieure pour cet ordre  $k_c$ . Toutefois, il découle de la relation (2) que plus l'ordre  $k_c$  est grand, plus le pas  $\Lambda$  du réseau de Bragg est grand et donc que le réseau de

Bragg d'ordre très élevé est plus long. En pratique, c'est donc la longueur maximale souhaitée pour le réseau de Bragg qui impose une limite supérieure pour l'ordre  $k_c$ . Ici, cette longueur maximale est fixée à 1 m.

- [0181] De même, la valeur minimale du pas  $\Lambda$  est supérieure à 20  $\mu\text{m}$  et, typiquement, supérieure à 50  $\mu\text{m}$  pour que des harmoniques d'ordre très élevé soient compris dans le domaine de l'optique. Théoriquement, il n'existe pas de valeur maximale pour le pas  $\Lambda$ . En effet, quelle que soit la valeur retenue pour le pas  $\Lambda$ , il est possible de trouver une valeur pour l'ordre  $k_c$  qui permet de placer la longueur d'onde  $\lambda_c$  au centre de la plage de travail. Toutefois, plus le pas  $\Lambda$  est grand, plus le réseau de Bragg est long. En pratique, c'est donc aussi la longueur maximale souhaitée pour le réseau de Bragg qui impose une limite supérieure pour la valeur du pas  $\Lambda$ .
- [0182] A titre d'exemple, en appliquant l'enseignement donné dans le chapitre I, il est possible d'obtenir des peignes pour toutes plages de travail. Cela s'applique en particulier aux plages de travail centrées sur les longueurs d'onde couramment utilisées en optique tel que, notamment, la longueur d'onde de 800 nm, 1000 nm, 1300 nm ou 1500 nm.
- [0183] La plage de travail peut être plus large que 100 nm. Par exemple, la largeur de cette plage de travail est, en variante, supérieure à 200 nm ou 300 nm. Il n'existe pas de limite supérieure pour la largeur de cette plage de travail si ce n'est qu'elle doit se situer dans le domaine de l'optique et qu'elle doit pouvoir être balayée par la source laser de l'analyseur spectral.
- [0184] Les différentes variantes du motif du réseau de Bragg d'ordre très élevé décrites dans la demande déposée le 29/07/2022 sous le n° FR2207936 par le présent déposant, s'applique aux réseaux de Bragg d'ordre très élevé du dispositif de mesure décrit ici.
- [0185] Les motifs du réseau de Bragg d'ordre très élevé réalisé dans le cœur de la fibre optique peuvent avoir des formes différentes. Par exemple, en variante, chaque motif comporte une seule bulle. Dans un autre mode de réalisation, comme décrit dans l'article LUO2022, chaque motif à la forme d'une ellipse.
- [0186] D'autres fibres optiques que la fibre SMF-28 peuvent être utilisées. Par exemple, la fibre optique peut être une fibre optique multimode ou MMF (Multi-Mode Fiber).
- [0187] Il n'est pas nécessaire que le cœur de la fibre optique soit constitué d'un dopage spécifique. Ainsi, le procédé de fabrication décrit peut être mis en œuvre avec des fibres optiques dont le cœur est réalisé en germanosilicates, en silice pure, en aluminosilicates dopés aux terres rares ou en saphir.
- [0188] Dans un mode de réalisation particulier, les caractéristiques de la fibre optique 34 dans laquelle est réalisé l'étalon 6 sont différentes des caractéristiques de la fibre optique 14 pour que la sensibilité de l'étalon aux variations de la grandeur physique à mesurer soit moindre que la sensibilité du transducteur optique 4 à ces mêmes va-

riations de la grandeur physique.

[0189] Variantes de la structure isolante :

[0190] D'autres modes de réalisation de la structure isolante sont possibles. Par exemple, le réseau 80 peut être isolé des variations de contraintes mécaniques en mettant en œuvre l'enseignement de la demande FR3087008A1.

[0191] La structure isolante peut aussi être conçue pour isoler le réseau 80 des variations de la pression hydrostatique.

[0192] Dans un mode de réalisation simplifié, la structure isolante n'est pas une structure isolante active mais une structure isolante passive, c'est-à-dire une structure isolante qui ne consomme pas d'énergie électrique pour isoler la fibre optique 34 des variations du milieu extérieur. Par exemple, une structure isolante passive comporte un matériau à très faible coefficient de dilatation thermique sur lequel la fibre optique est fixée sans aucun degré de liberté. Typiquement ce matériau à très faible coefficient de dilatation thermique a un coefficient de dilatation thermique inférieur à  $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Par exemple, ce matériau est un alliage de fer et de nickel tel que l'alliage Fe-Ni avec 36% atomique de Nickel. Cet alliage est connu sous le nom de Invar®. Dans un autre exemple de structure isolante passive, la fibre optique est enfouie à l'intérieur d'un matériau dont la conductivité thermique est inférieure à 0,05 W/m/K.

[0193] Dans un autre mode de réalisation, la structure isolante comporte un matériau qui vient exercer sur la fibre optique une contrainte mécanique qui compense l'effet de la dilatation thermique de cette fibre optique en réponse à une variation de température.

[0194] Le boîtier 82 peut être omis notamment si la contrainte mécanique exercée par le milieu extérieur sur le réseau 80 ne peut pas varier ou varie seulement de façon négligeable.

[0195] Variantes du transducteur optique :

[0196] Le transducteur optique ne comporte pas nécessairement un réseau de Bragg. Par exemple, en variante, le transducteur optique comporte un interféromètre de Fabry Péroต์ à la place du réseau de Bragg. Comme un réseau de Bragg, un tel interféromètre de Fabry Péroต์ présente un spectre de puissance comportant un pic dont la position varie en fonction de la température, de la contrainte en élongation et de la pression hydrostatique qui s'exerce sur cette cavité de Fabry Péroต์. Un tel interféromètre de Fabry Péroต์ peut être réalisé dans le cœur d'une fibre optique. Dans une autre variante, le transducteur optique est une cellule de gaz dont le spectre de puissance en transmission présente un raie d'absorption. La position de cette raie d'absorption dans le spectre de puissance varie, par exemple, en fonction de la température.

[0197] Lorsque le transducteur optique est un réseau de Bragg, le spectre de puissance du transducteur optique est décalé en réponse à une variation de température, une déformation longitudinale du cœur de la fibre optique ou une variation de la pression hy-

drostatique. Ainsi, tous les modes de réalisation précédent peuvent être adaptés pour mesurer une grandeur physique choisie dans le groupe composé de la température, d'une déformation longitudinale du cœur de la fibre optique et d'une variation de pression hydrostatique. A l'aide de la mesure d'une de ces grandeurs physiques, il est possible d'en déduire des mesures pour d'autres grandeurs physiques telles que des vibrations, l'accélération ou encore de détecter des ondes acoustiques.

[0198] La grandeur physique mesurée peut aussi être une autre grandeur physique que la température, la déformation longitudinale et la pression hydrostatique. Pour cela, il suffit que le transducteur optique soit sensible à cette autre grandeur physique. Par exemple, le transducteur optique peut être sensible à une dose de radiation. A titre d'illustration, pour cela, le cœur de la fibre optique 14 est réalisé dans un matériau photosensible. Ici, ce cœur est réalisé en germanosilicate. Initialement, un réseau de Bragg est fabriqué dans le cœur de la fibre optique 14. Ensuite, ce réseau de Bragg est transformé en un réseau de Bragg sensible à une dose du rayonnement à mesurer. Pour cela, ce réseau de Bragg fabriqué est exposé à un rayonnement ultraviolet pour créer des centres colorés issus de la recombinaison des liaisons entre le germanium et la silice. Lorsqu'ils sont soumis à une dose du rayonnement à mesurer, ces centres colorés sont modifiés, conduisant à un décalage de la longueur d'onde  $\lambda_{Bm4}$  du réseau de Bragg du transducteur optique.

[0199] En variante, le transducteur optique comporte une succession de plusieurs réseaux de Bragg réalisés les uns après les autres dans le cœur de la même fibre optique. Dans ce cas, de préférence, les longueurs d'onde  $\lambda_{Bn4}$  de chacun de ces réseaux de Bragg sont différentes. Grâce à cela, le même transducteur optique permet de mesurer la grandeur physique à différents endroits. Dans ce mode de réalisation, le spectre de puissance du transducteur optique comporte alors plusieurs pics de puissance dans la plage de travail.

[0200] Dans une autre variante, le dispositif de mesure comporte plusieurs transducteurs optiques optiquement raccordés en parallèle à l'analyseur spectral. Une telle configuration de plusieurs transducteurs optiques est par exemple illustrée dans la demande CN102879022A.

[0201] En variante le transducteur optique n'est pas réalisé dans la fibre optique 14 mais simplement raccordé optiquement à l'extrémité distale de la fibre optique 14. Par exemple, le transducteur optique est une cavité de Fabry Pérot formée entre deux miroirs réfléchissants et ces miroirs sont réalisés en dehors de la fibre optique 14.

[0202] Variantes de l'analyseur spectral:

[0203] En variante, la source optique n'est pas accordable. Par exemple, la source optique est une source laser large, c'est-à-dire une source laser qui émet un signal optique dont le spectre de puissance recouvre simultanément la totalité de la plage de travail. Dans

ce cas, le signal optique émis n'est pas mono-fréquence. De plus, pour chaque réponse spectrale à mesurer, l'analyseur spectral comporte alors une pluralité de photodétecteurs qui mesure simultanément la puissance de la réponse spectrale pour un grand nombre de longueurs d'ondes différentes. Par exemple, dans ce cas, chaque capteur 62, 64 est un spectromètre à barrette. Dans un tel mode de réalisation, il n'est pas nécessaire de faire varier la longueur d'onde  $\lambda_s$  pour balayer toute la plage de travail. L'estimation de la fonction de transfert de la source laser peut alors être omise.

- [0204] La source optique n'est pas nécessairement une source laser. Par exemple, la source optique peut aussi être réalisée à l'aide d'une cavité de Fabry Péroto accordable. Dans ce cas, le signal de commande provoque le déplacement d'au moins un des dioptrés de cette cavité de Fabry Péroto. Ce déplacement d'un dioptre provoque alors une modification de la fréquence de résonance propre de la cavité et donc une modification de la longueur d'onde  $\lambda_s$ .
- [0205] D'autres configurations de l'unité 70 sont possibles pour déterminer l'amplitude  $\Delta\lambda$ . En particulier, l'amplitude  $\Delta\lambda$  peut aussi être déterminée sans utiliser l'écart de temps  $t_m - t_i$ . Par exemple, en variante, l'amplitude  $\Delta\lambda$  est déterminée en décomptant le nombre de pics du spectre de l'étalon situés entre la longueur d'onde  $\lambda_{B_{i4}}$  et la longueur d'onde mesurée  $\lambda_{B_{m4}}$ . Une telle méthode est par exemple décrite dans le chapitre « Absolute Frequency Measurement » de la demande WO2020113147A1.
- [0206] Dans une autre variante, la fonction de transfert estimée pour la source 50 est utilisée pour corriger la longueur d'onde  $\lambda_{B_{m4}}$  de manière à obtenir une longueur d'onde corrigée plus proche de la réalité. Par exemple, pour cela, la longueur d'onde  $\lambda_{B_{m4}}$  corrigée est calculée à l'aide de la relation suivante :  $\lambda_{B_{m4}} = [(\lambda_{k+1} - \lambda_k) / (t_{k+1,m} - t_{k,m})] * (t_m - t_{k,m}) + \lambda_k$ , où :
- [0207] -  $\lambda_k$  et  $t_{k,m}$  sont, respectivement, l'abscisse et l'ordonnée du point  $(\lambda_k ; t_{k,m})$  de la fonction de transfert estimée lors de l'étape 140 pour lequel  $t_{k,m}$  précède immédiatement l'instant  $t_m$  mesuré lors de l'étape 134, et
- [0208] -  $\lambda_{k+1}$  et  $t_{k+1,m}$  sont, respectivement, l'abscisse et l'ordonnée du point  $(\lambda_{k+1} ; t_{k+1,m})$  de la fonction de transfert estimée lors de l'étape 140 pour lequel  $t_{k+1,m}$  suit immédiatement l'instant  $t_m$ .
- [0209] Dans cette variante, une interpolation linéaire de la fonction de transfert est réalisée entre deux points successifs  $(\lambda_k ; t_{k,m})$  et  $(\lambda_{k+1} ; t_{k+1,m})$ . Toutefois, une interpolation non-linéaire de la fonction de transfert entre ces deux points est également possible.
- [0210] Dans les cas ci-dessus, l'étalon 6 n'est pas utilisé pour linéariser la variation de la longueur d'onde  $\lambda_s$  de la source optique.
- [0211] Dans une variante simplifiée, l'unité 70 détermine seulement la variation de la grandeur physique mesurée et non pas sa valeur absolue. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de connaître la valeur de la grandeur physique mesurée correspondant à la

longueur d'onde  $\lambda_{B14}$ .

[0212] Dans un autre mode de réalisation, la réponse spectrale de l'étalon 6 est d'abord mesurée puis, seulement ensuite, la réponse spectrale du transducteur optique 4 est mesurée. Dans ce cas, un interrupteur optique est d'abord placé dans une position d'étalonnage dans laquelle il raccorde optiquement l'analyseur spectral 20 seulement à l'étalon 6 pour mesurer la réponse spectrale de l'étalon. Ensuite, cet interrupteur optique est basculé vers une position de mesure dans laquelle il raccorde optiquement l'analyseur spectral 20 seulement au transducteur optique 4 pour mesurer la réponse spectrale du transducteur optique. Généralement, la réponse spectrale de l'étalon 6 est alors seulement mesurée par intermittence et non pas à chaque fois que la réponse spectrale du transducteur optique 4 est mesurée. Dans ce mode de réalisation, le signal optique qui éclaire l'étalon 6 n'est pas nécessairement strictement identique au le signal optique qui éclaire le transducteur optique 4 puisqu'ils sont émis à deux instants différents.

[0213] En variante, au moins l'un des capteurs optiques et, de préférence, les deux capteurs optiques sont raccordés à l'extrémité distale des fibres optiques 14 et 34. Dans ce cas, l'analyseur spectral 20 mesure les signaux optiques qui ont traversés le transducteur 4 et l'étalon 6. Dès lors, les spectres de puissance des signaux mesurés sont des spectres de puissance en transmission et non pas en réflexion. Toutefois, tout ce qui a été décrit dans le cas particulier de spectres de puissance en réflexion s'adapte, sans difficulté particulière, au cas de spectres de puissance en transmission.

[0214] Les coupleurs optiques 12, 32 et 52 peuvent être remplacés par une seul coupleur optique multi-voies qui remplit à lui seul les fonctions de ces trois coupleurs optiques 12, 32 et 52.

[0215] Variante du procédé de fabrication :

[0216] Il existe de nombreuses variantes du procédé de fabrication d'un réseau de Bragg d'ordre très élevé. En particulier, tous les procédés de fabrication et leurs variantes décrits dans la demande déposée le 29/07/2022 sous le n° FR2207936 par le présent déposant sont utilisables pour fabriquer le réseau 80. Le procédé de fabrication décrit dans l'article LUO2022 est aussi utilisable.

[0217] Autres variantes :

[0218] Le guide d'onde n'est pas nécessairement une fibre optique. Tout ce qui est décrit dans ce texte dans le cas particulier de fibres optiques s'applique aussi au cas où les guides d'onde sont des guides d'onde réalisés sur une puce photonique. Par exemple, dans ce dernier cas, le cœur de chaque guide d'onde est en silicium monocristallin ou dans un autre matériau semi-conducteur et la gaine est réalisée dans un matériau couramment utilisé dans le domaine de l'optique sur silicium tel que de l'oxyde de silicium.

- [0219] Plusieurs des variantes décrites ci-dessus peuvent être combinées dans un même mode de réalisation.
- [0220] Chapitre III : Avantages des modes de réalisation décrits :
- [0221] Un réseau de Bragg d'ordre très élevé permet d'obtenir un peigne de pics en utilisant un seul réseau de Bragg et non pas une succession de plusieurs réseaux de Bragg comme décrit dans la demande CN102879022A. Ainsi, par rapport à l'étalon décrit dans la demande CN102879022A, l'étalon décrit dans les chapitres précédents est plus simple à réaliser et moins encombrant.
- [0222] De plus un réseau de Bragg d'ordre très élevé permet d'obtenir un peigne de pics identique à ceux obtenus à l'aide d'une cavité de Fabry Pérot telle que celle décrite dans la demande WO2020113147A1. Par contre, à performance égale, le réseau de Bragg d'ordre très élevé est plus simple à fabriquer et présente un encombrement plus réduit.
- [0223] Le fait que l'encombrement du réseau de Bragg d'ordre très élevé soit faible, réduit l'encombrement du dispositif de mesure et facilite aussi la réalisation de la structure isolante. En effet, il est beaucoup plus facile d'isoler thermiquement un réseau de Bragg d'ordre élevé de moins de 10 cm de longueur qu'une cavité de Fabry Pérot de plusieurs mètres de longueur.
- [0224] Ainsi, un dispositif de mesure comportant un étalon fabriqué à l'aide d'un réseau de Bragg d'ordre très élevé est, à performance égale, plus simple à fabriquer.
- [0225] L'utilisation de la réponse spectrale de l'étalon 6 pour obtenir une variation linéaire de la longueur d'onde émise par la source laser 50 sur toute la plage de travail, permet de simplifier la structure des capteurs 62, 64 et donc la structure du dispositif de mesure.
- [0226] Le fait de mesurer simultanément les réponses spectrales du transducteur optique 4 et de l'étalon 6 lorsqu'ils interagissent avec un même signal optique, garantit que les réponses spectrales mesurées sont bien des réponses spectrales obtenues en réponse à un même signal optique. Cela augmente la précision du dispositif de mesure.
- [0227] Le fait que l'étalon 150 comporte en plus un réseau de Bragg 152 dont la longueur d'onde  $\lambda_{B152}$  est située à l'intérieur de la plage de travail, permet d'identifier la valeur absolue de la longueur d'onde associée à chaque pic du peigne du réseau 80. Il est dès lors possible de mesurer la valeur absolue de la longueur d'onde à laquelle se produit le pic de puissance du transducteur optique 4 et donc de remonter ainsi à une valeur absolue de la grandeur physique mesurée.
- [0228] Le fait que l'étalon soit réalisé dans une fibre optique simplifie la fabrication du dispositif de mesure.
- [0229] Le fait d'utiliser une ou plusieurs bulles dans chaque motif  $M_i$  permet d'obtenir un motif petit et donc de réduire substantiellement les pertes d'insertion.

[0230] Le fait d'utiliser plusieurs bulles disjointes permet d'obtenir un motif  $M_i$  suffisamment réfléchissant pour diminuer le nombre  $p$  de motifs et donc pour conserver la compacité du réseau 80 tout en limitant les pertes par insertion. En effet, lorsque les bulles se chevauchent, les zones de chevauchement entre plusieurs bulles sont soumises à plusieurs impulsions successives du laser femtoseconde. Il a été observé qu'une zone du cœur de la fibre optique qui est soumise à plusieurs impulsions du laser femtoseconde, se dégrade. Cette dégradation augmente les pertes par diffusion. A l'inverse, lorsque les bulles sont disjointes, de telles zones de chevauchement n'existent pas, ce qui limite les pertes par insertion.

## Revendications

[Revendication 1]

Dispositif de mesure d'une grandeur physique, ce dispositif comportant :

- un transducteur optique (4) dont le spectre de puissance présente au moins un pic de puissance dont la position varie, tout en restant à l'intérieur d'une plage de travail prédéterminée, en fonction de la grandeur physique à mesurer, cette plage de travail prédéterminée étant une plage de longueurs d'onde et cette plage de travail étant comprise entre 200 nm et 5000 nm,
- un étalon (6 ; 150) dont le spectre de puissance en réflexion comporte plusieurs pics de puissance répartis à l'intérieur de la plage de travail, l'intervalle spectral libre de cet étalon étant inférieur ou égal à 5 nm, cet étalon comportant :
  - un premier guide d'onde (34) contenant un cœur (110) qui s'étend le long d'un axe longitudinal et à l'intérieur duquel un signal optique guidé par ce premier guide d'onde est apte à se propager le long de l'axe longitudinal du premier guide d'onde, et
  - un premier réseau de Bragg (80) réalisé dans le cœur du premier guide d'onde, ce premier réseau de Bragg comportant au moins trois motifs ( $M_1, M_2, M_{N-1}, M_N$ ) identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe longitudinal du premier guide d'onde et séparés les uns des autres par un premier pas constant,
  - une structure isolante (82) apte à isoler le premier réseau de Bragg des variations de température et des variations de contrainte mécanique exercées par un milieu extérieur sur l'étalon,
- un analyseur spectral (20) configuré pour :
  - mesurer séparément la réponse spectrale du transducteur optique dans la plage de travail et la réponse spectrale de l'étalon dans la même plage de travail, puis
  - déterminer l'amplitude du déplacement du pic du transducteur optique à partir des réponses spectrales du transducteur optique et de l'étalon mesurées séparément l'une de l'autre, puis
  - établir une variation de la grandeur physique à partir de l'amplitude déterminée du déplacement du pic du transducteur optique, caractérisé en ce que le premier pas du premier réseau de Bragg (80) est configuré pour que le spectre de puissance du premier réseau de Bragg présente plusieurs harmoniques discernables d'ordre supérieur à cent

dans la plage de travail, ces harmoniques formant ainsi les pics de puissance du spectre de puissance de l'étalon à des longueurs d'onde connues.

[Revendication 2]

Dispositif selon la revendication 1, dans lequel :

- l'analyseur spectral (20) comporte une source optique accordable (50) apte à émettre un signal optique mono-fréquence qui interagit avec le transducteur optique et l'étalon, cette source optique étant commandable à l'aide d'un signal de commande pour faire varier la longueur d'onde du signal optique émis, la longueur d'onde du signal optique émis étant reliée au signal de commande par une fonction de transfert non-linéaire, et
- l'analyseur spectral (20) est également configuré pour :
  - estimer la fonction de transfert non-linéaire de la source optique commandable à partir de la réponse spectrale de l'étalon mesurée et des longueurs d'onde connues auxquelles se produisent les pics de puissance du spectre de puissance de l'étalon sur la plage de travail, puis
  - construire un signal de commande qui permet d'obtenir une variation, en fonction du temps, plus linéaire de la longueur d'onde du signal optique émis sur toute la plage de travail à partir de la fonction de transfert estimée, et
  - commander la source optique à l'aide de ce signal de commande construit.

[Revendication 3]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :

- l'analyseur spectral comporte :
  - une source laser (50) équipée d'un port (54) de sortie par l'intermédiaire duquel un signal optique est émis, et
  - un coupleur optique (52) qui raccorde optiquement le transducteur optique et l'étalon simultanément à ce port de sortie, et
  - l'analyseur spectral est apte à mesurer simultanément les réponses spectrales du transducteur optique et de l'étalon obtenues en réponse au signal optique émis sur le port (54) de sortie.

[Revendication 4]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le guide d'onde (34) de l'étalon est une fibre optique.

[Revendication 5]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :

- chaque motif ( $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_{N-1}$ ,  $M_N$ ) du premier réseau de Bragg (80) s'étend principalement dans un plan, appelé « plan du motif », perpen-

diculaire à l'axe longitudinal du premier guide d'onde, et

- chaque motif est constitué d'une ou plusieurs bulles ( $B_1 - B_6$ ) disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif, et

- la surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 50 % de la surface de la section transversale du cœur (110) du premier guide d'onde.

[Revendication 6]

Dispositif selon la revendication 7, dans lequel chaque motif est constitué de plusieurs bulles ( $B_1 - B_6$ ) disjointes disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif.

[Revendication 7]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :

- le premier pas est supérieur ou égal à 20  $\mu\text{m}$ , et

- l'écart entre l'indice de réfraction du cœur (110) du premier guide d'onde et l'indice de réfraction de chaque motif du premier réseau de Bragg est supérieur à 0,3.

[Revendication 8]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel chaque motif ( $M_1, M_2, M_{N-1}, M_N$ ) est réalisé à l'aide d'une impulsion d'un laser femtoseconde.

[Revendication 9]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la grandeur physique est choisie dans le groupe constitué d'une température, d'une déformation mécanique et d'une pression hydrostatique.

[Revendication 10]

Étalon pour la réalisation d'un dispositif de mesure conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le spectre de puissance en réflexion de cet étalon comporte plusieurs pics de puissance répartis à l'intérieur d'une plage de travail prédéterminée, l'intervalle spectral libre de cet étalon étant inférieur ou égal à 5 nm et cette plage de travail prédéterminée étant une plage de longueurs d'onde et cette plage de travail étant comprise entre 200 nm et 5000 nm, cet étalon comportant :

- un premier guide d'onde (34) contenant un cœur (110) qui s'étend le long d'un axe longitudinal et à l'intérieur duquel un signal optique guidé par le guide d'onde est apte à se propager le long de l'axe longitudinal du guide d'onde, ce guide d'onde étant apte à être optiquement raccordé à un analyseur spectral,

- un premier réseau de Bragg (80) réalisé dans le cœur du premier guide d'onde, ce premier réseau de Bragg comportant au moins trois motifs identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe lon-

gitudinal du premier guide d'onde et séparés les uns des autres par un premier pas constant,

- une structure isolante (82) apte à isoler le premier réseau de Bragg des variations de température et des variations de contrainte mécanique exercées par un milieu extérieur sur l'étalon, cette structure isolante comportant :

- un capteur (90) de température,

- un élément (92) chauffant ou refroidissant commandable apte à chauffer ou à refroidir le premier guide d'onde, et

- un microcontrôleur (94) configuré pour commander l'élément chauffant en fonction d'une consigne de température et de la température mesurée par le capteur pour limiter les variations de température du premier guide d'onde autour de cette consigne de température, caractérisé en ce que le premier pas du premier réseau de Bragg (80) est configuré pour que le spectre de puissance du premier réseau de Bragg présente plusieurs harmoniques discernables d'ordre supérieur à cent dans la plage de travail, ces harmoniques formant ainsi les pics de puissance du spectre de puissance de l'étalon à des longueurs d'onde connues.

[Revendication 11]

Etalon selon la revendication 10, dans lequel l'étalon comporte un second réseau de Bragg (152) réalisé dans le cœur du premier guide d'onde, ce second réseau de Bragg comportant au moins trois motifs identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe longitudinal du premier guide d'onde et séparés les uns des autres par un second pas constant, ce second pas étant configuré pour que la longueur d'onde de la fréquence fondamentale de résonance du second réseau de Bragg soit située à l'intérieur de la plage de travail.

[Fig. 1]

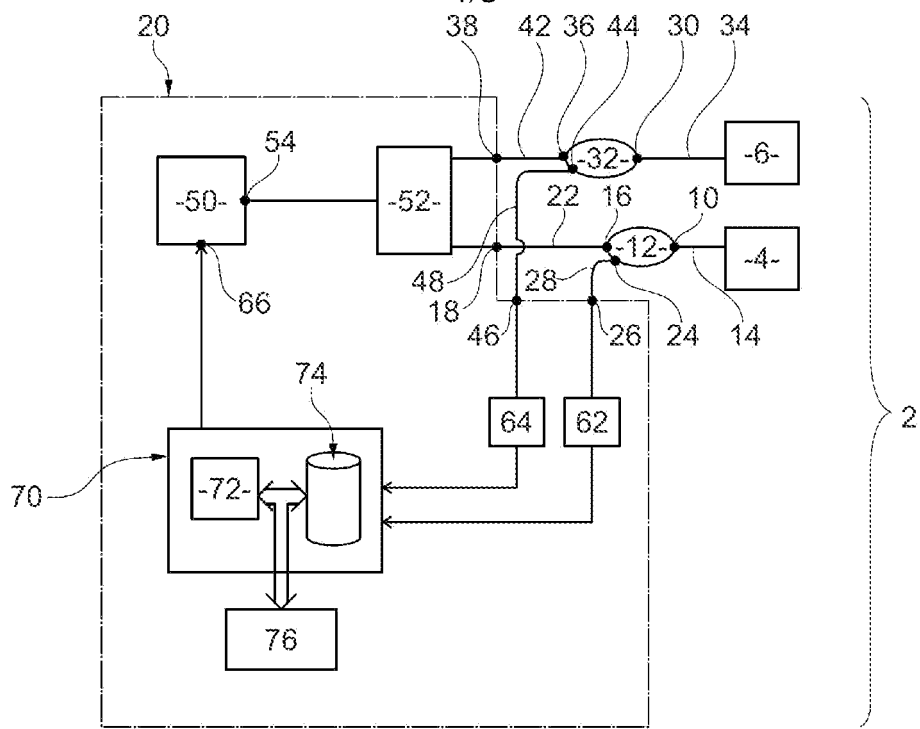


Fig. 1

[Fig. 2]

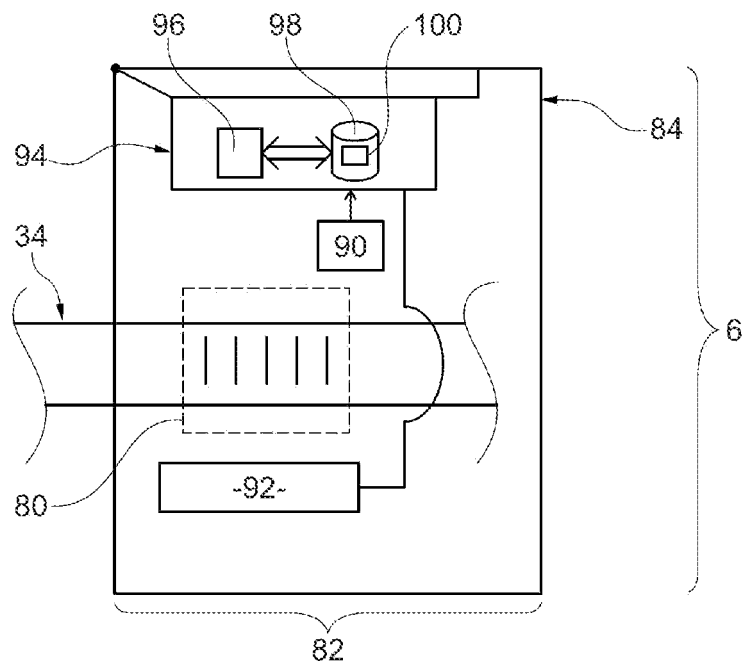


Fig. 2

[Fig. 3]

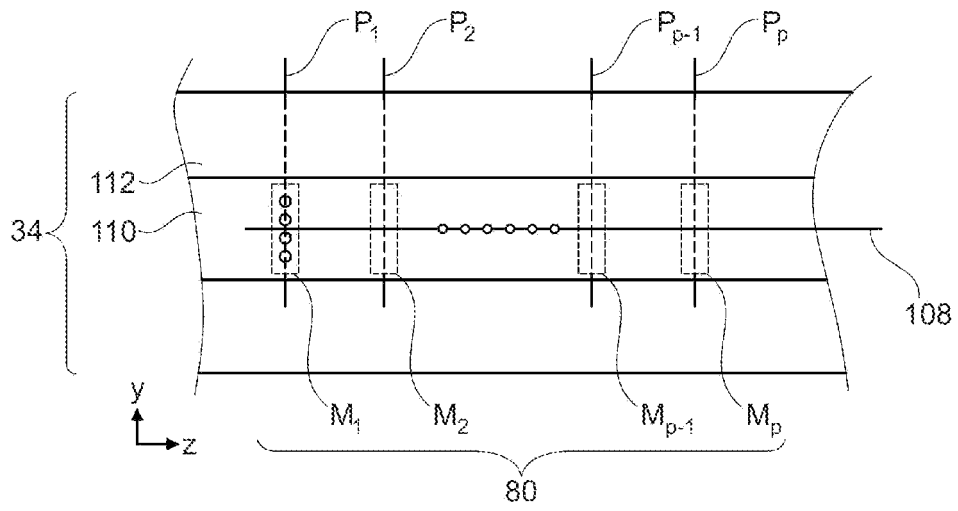


Fig. 3

[Fig. 4]

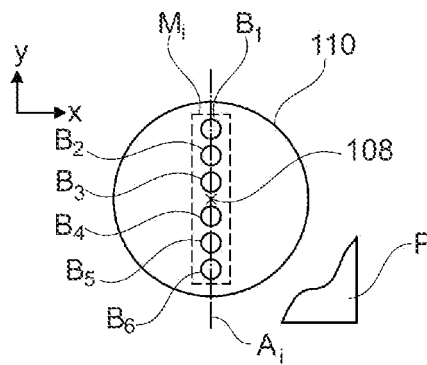


Fig. 4

[Fig. 5]

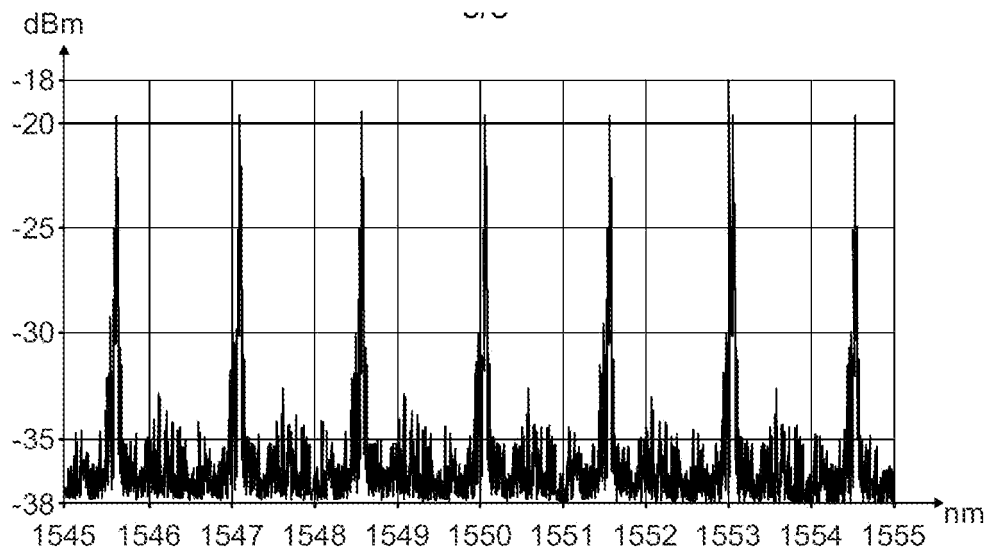


Fig. 5



# 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**

NEANT

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

CN 102 879 022 A (HANGZHOU UNIONOPT LTD)  
16 janvier 2013 (2013-01-16)

US 2019/178688 A1 (JIANG JUNFENG [CN] ET AL)  
13 juin 2019 (2019-06-13)

US 2020/271485 A1 (SEELEY RYAN [US])  
27 août 2020 (2020-08-27)

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

NEANT