

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

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

3 027 112

21 N° d'enregistrement national : 14 59774

51 Int Cl<sup>8</sup> : G 01 R 29/08 (2016.01), B 82 Y 20/00

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 13.10.14.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 15.04.16 Bulletin 16/15.

56 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-  
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES — FR et  
UNIVERSITE DE BOURGOGNE — FR.

72 Inventeur(s) : PICARD EMMANUEL, PIN  
CHRISTOPHE, CLUZEL BENOIT et HADJI EMMA-  
NUEL.

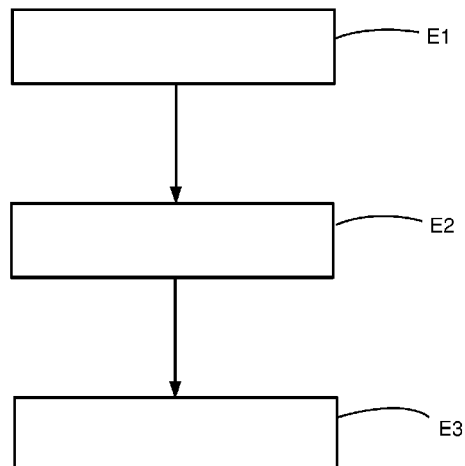
73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-  
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES, UNI-  
VERSITE DE BOURGOGNE.

74 Mandataire(s) : NOVAIMO.

54 PROCEDE DE CARACTERISATION D'UN CHAMP ELECTROMAGNETIQUE GENERE PAR L'INTERACTION  
D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE AVEC UNE STRUCTURE PHOTONIQUE ET/OU PLASMONIQUE.

57 Le procédé de caractérisation d'un champ électroma-  
gnétique obtenu par une interaction d'une onde électroma-  
gnétique avec une structure photonique et/ou plasmonique,  
comprend :

- une étape d'utilisation (E1) d'une partie du champ élec-  
tromagnétique, notamment un champ évanescent, pour pié-  
ger au moins un objet,
- une étape d'étude (E2) des mouvements dudit au  
moins un objet piégé,
- une étape de caractérisation (E3) dudit champ électro-  
magnétique utilisant des résultats de l'étape d'étude de  
mouvements.



FR 3 027 112 - A1



## **Procédé de caractérisation d'un champ électromagnétique généré par l'interaction d'une onde électromagnétique avec une structure photonique et/ou plasmonique**

5

### **Domaine technique de l'invention**

L'invention concerne le domaine de la caractérisation d'un champ électromagnétique obtenu par une interaction d'une onde électromagnétique avec une structure photonique et/ou plasmonique.

L'invention a notamment pour objet un procédé de caractérisation dudit champ électromagnétique.

15

### **État de la technique**

Les structures photoniques, notamment périodiques, ont ouvert la voie à de nouvelles façons de contrôler la lumière à l'échelle de la longueur d'onde. Ces structures sont de plus en plus utilisées dans le domaine des télécommunications, et ont vocation à être implantées dans les systèmes de microélectronique ou de biophotonique.

La propagation d'une onde électromagnétique au sein de ces structures génère un champ électromagnétique dont l'étude de la répartition à l'intérieur desdites structures est essentielle pour connaître des propriétés associées auxdites structures.

Afin de cartographier le champ électromagnétique dans une structure photonique interagissant avec une onde électromagnétique, il a été

développé une technique de microscopie en champ proche aussi connue sous l'acronyme SNOM (pour l'anglais : Scanning Near Field Optical Microscope). Cette technique nécessite le déplacement d'une fibre optique amincie à quelques dizaines de nanomètres de la surface de la structure optique de sorte à observer et enregistrer les variations de champ électromagnétique. La technique SNOM permet d'atteindre des résolutions 20 fois supérieures à la microscopie classique. Le document « An Air-slotted nanoresonator relying on coupled high Q small V Fabry-Perot nanocavities » de Foubert et al. publié dans APPLIED PHYSICS LETTER 94, 251111 (2009), le 24/06/2009 décrit une utilisation de la technique SNOM.

Cette technique permet des résolutions des mesures effectuées inférieures à la longueur d'onde utilisée, en général de l'ordre de  $\lambda/20$  avec  $\lambda$  la longueur d'onde de ladite onde considérée. Mais cela nécessite de recourir à une instrumentation lourde telle que des systèmes d'asservissement, antivibratoires, électroniques à faible bruit, etc. pour réaliser des mesures directement au niveau de la structure photonique. De plus, la résolution est imposée par la géométrie de la sonde de champ proche donc généralement usinée à l'échelle nanométrique.

### **Objet de l'invention**

Le but de la présente invention est de proposer une solution plus simple à instrumenter tout en maintenant des résolutions équivalentes à celles du SNOM.

On tend vers ce but notamment grâce à un procédé de caractérisation d'un champ électromagnétique obtenu par une interaction d'une onde

électromagnétique avec une structure photonique et/ou plasmonique, ledit procédé comprenant :

- une étape d'utilisation d'une partie du champ électromagnétique, notamment un champ évanescent, pour piéger au moins un objet,
- 5 - une étape d'étude des mouvements dudit au moins un objet piégé,
- une étape de caractérisation dudit champ électromagnétique utilisant des résultats de l'étape d'étude de mouvements.

En particulier, l'étape de caractérisation dudit champ électromagnétique comporte une étape de détermination de positions de un ou plusieurs  
10 pics d'intensité dudit champ électromagnétique.

Par exemple, l'étape d'étude des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape d'identification de positions privilégiées dudit au moins un objet piégé adoptées au cours de son déplacement.

Avantageusement, l'étape de caractérisation dudit champ  
15 électromagnétique comporte une étape d'attribution des positions privilégiées identifiées aux positions du ou des pics d'intensité dudit champ électromagnétique.

En particulier, l'étape d'étude des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape d'acquisition d'une pluralité d'images  
20 successives permettant de déduire une cartographie des positions adoptées par ledit au moins un objet piégé correspondant.

Notamment, l'étape d'étude des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape de détermination d'un point de référence dudit au moins un objet piégé, et une étape de suivi des positions du point de référence à partir de la pluralité d'images successives acquises.

5 Avantageusement, l'étape d'identification de positions privilégiées comporte :

- une étape de détermination d'une grille associée à une zone de déplacement dudit au moins un objet piégé,
- une étape de comptage du nombre d'apparitions dudit au moins  
10 un objet piégé dans chaque case de la grille au cours d'un laps de temps,

et en ce que l'étape de caractérisation dudit champ électromagnétique comporte :

- une étape de détermination d'un potentiel de piégeage dudit au  
15 moins un objet piégé à partir d'une grille de probabilité de présence dudit au moins un objet piégé obtenue par traitement des résultats de l'étape de comptage,
- une étape de détermination d'une représentation du champ électromagnétique à partir du potentiel de piégeage déterminé.

20 L'invention est aussi relative à un dispositif de caractérisation d'un champ électromagnétique confiné et/ou exalté par une structure photonique et/ou plasmonique et obtenu par une interaction de ladite structure

photonique et/ou plasmonique avec une onde électromagnétique, ledit dispositif comportant :

- 5           - au moins un objet disposé par rapport à la structure photonique et/ou plasmonique de telle sorte que ledit au moins un objet (105) soit piégé par une partie du champ électromagnétique,
- un module d'étude des mouvements dudit au moins un objet piégé,
- 10       - un module de caractérisation dudit champ électromagnétique configuré de sorte à utiliser des données issues dudit module d'étude.

En particulier, le dispositif comporte un module fluide délimitant un contenant comprenant un fluide dans lequel se trouve ledit au moins un objet.

15       Le fond du contenant est notamment délimité au moins partiellement par une surface de la structure photonique et/ou plasmonique.

Selon une réalisation, la structure photonique comporte un élément allongé muni successivement, selon sa direction d'allongement, d'un premier miroir, d'une cavité optique et d'un deuxième miroir.

20       La structure peut être en tout ou partie une structure photonique réalisée à base de cristaux photoniques et/ou de cavités résonantes et/ou de guides d'onde.

La structure peut être en tout ou partie une structure plasmonique réalisée à base de cristaux plasmoniques et/ou de substrats SERS et/ou des guides plasmoniques et/ou des antennes.

## 5 Description sommaire des dessins

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs et représentés sur les  
10 dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement trois étapes du procédé de caractérisation,
- la figure 2 représente un exemple de dispositif de caractérisation
- la figure 3 représente en perspective un dispositif de  
15 caractérisation selon un mode de réalisation particulier de l'invention,
- la figure 4 illustre de manière schématique un objet piégé au dessus d'une coupe de la structure photonique.

20

## Description de modes préférentiels de l'invention

L'invention est relative à un procédé de caractérisation d'un champ électromagnétique obtenu par une interaction d'une onde  
25 électromagnétique avec une structure photonique et/ou plasmonique.

Dans la présente description, il a été fait référence à « une structure photonique et/ou plasmonique », ces termes peuvent être généralisés par « une structure optoélectronique ». En particulier, une structure optoélectronique fonctionne à base de la lumière et de la matière.

On comprend alors que la structure optoélectronique peut être en tout ou partie une structure photonique. De même la structure optoélectronique peut être en tout ou partie une structure plasmonique. Dans le cas où seule une partie de de la structure optoélectronique est une structure photonique, le reste peut être une structure plasmonique.

Une onde électromagnétique peut ici être une lumière se propageant dans la structure photonique et/ou plasmonique. Cette lumière peut être associée à une longueur d'onde particulière.

De préférence, l'onde électromagnétique est confinée et/ou exaltée (c'est-à-dire localement plus intense ou qui présente un ou plusieurs pics d'intensité) dans la structure photonique et/ou plasmonique. En fait, il y a deux phénomènes : la lumière peut être confinée par exemple dans un guide d'onde et en plus être exaltée, l'exaltation est une conséquence du confinement mais elle peut aussi être exaltée sans être confinée.

L'onde électromagnétique peut être de type stationnaire. Dans ce cas, le régime est établi, c'est-à-dire que l'intensité du champ, en tout point donné de la structure, est constante dans le temps. Ceci est alors plus facile à imager.

Comme illustré en figure 1, le procédé comprend une étape d'utilisation E1 d'une partie du champ électromagnétique pour piéger au moins un objet. En particulier, cette partie du champ électromagnétique est un champ évanescent. Le champ évanescent est la partie du champ électromagnétique qui s'étend localement hors de la structure photonique et/ou plasmonique.

De manière surprenante, il a été constaté que l'objet piégé n'était pas immobile mais qu'au contraire il adoptait au cours du temps des positions privilégiées. Autrement dit, par « objet piégé par ladite partie du champ électromagnétique et plus particulièrement par le champ évanescent » on entend que lorsque ledit au moins un objet est soumis audit champ électromagnétique/évanescent, les positions que ledit au moins un objet piégé va adopter au cours du temps seront influencées par ledit champ électromagnétique/évanescent.

De manière encore plus surprenante, il a été constaté que ces positions privilégiées correspondaient à des maxima d'intensité du champ électromagnétique tel que l'on est capable de les mesurer par la technique SNOM.

Autrement dit, de manière plus générale, le procédé comporte une étape d'étude E2 des mouvements dudit au moins un objet piégé et une étape de caractérisation E3 dudit champ électromagnétique utilisant des résultats de l'étape d'étude de mouvements.

Selon un mode de réalisation préféré applicable à tout ce qui est décrit dans la présente description, ledit au moins un objet piégé peut être une particule en suspension dans un liquide. Ainsi, les mouvements étudiés sont en fait les mouvements browniens de la particule.

Plus particulièrement, l'étape d'étude E2 des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape d'identification de positions privilégiées dudit au moins un objet piégé adoptées au cours de son déplacement.

Ainsi, le procédé permet d'étudier le positionnement d'un objet par rapport à la structure photonique et/ou plasmonique pour déterminer des propriétés dudit champ électromagnétique. Ceci présente l'avantage de ne pas avoir à scanner avec une fibre optique toute une surface de la structure et de permettre l'utilisation de systèmes optiques moins onéreux et adaptés aux dimensions dudit au moins un objet piégé.

Avantageusement, les dimensions dudit au moins un objet piégé sont telles qu'elles sont par exemple deux à dix fois supérieures aux dimensions des sondes qui seraient utilisées dans le cas de la technique SNOM. En ce sens, il est possible d'utiliser des techniques de microscopie plus conventionnelles et moins coûteuses que dans l'art antérieur. Plus particulièrement, les dimensions dudit au moins un objet piégé sont telles que ce dernier puisse être visible par un microscope standard fonctionnant avec un objectif. Par exemple, la dimension maximale de l'objet piégé peut être comprise entre 500nm et 5 $\mu$ m. L'objet piégé peut, par exemple, adopter la forme d'une bille dont le diamètre est inférieur à 2 $\mu$ m, avantageusement inférieur à 500nm.

Préférentiellement, l'étape de caractérisation E3 dudit champ électromagnétique comporte une étape de détermination de positions de un ou plusieurs pics d'intensité dudit champ électromagnétique. Chaque pic d'intensité correspond à un maximum local d'intensité du champ électromagnétique, lesdits maximums locaux pouvant avoir des valeurs d'intensité différentes.

En combinaison avec l'étape d'identification de positions privilégiées, l'étape de caractérisation E3 dudit champ électromagnétique peut comporter une étape d'attribution des positions privilégiées identifiées aux positions du ou des pics d'intensité dudit champ électromagnétique.

Selon un mode de réalisation particulier, l'étape d'étude E2 des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape d'acquisition d'une pluralité d'images successives permettant de déduire une cartographie des positions adoptées par ledit au moins un objet piégé correspondant. Ces images successives peuvent être issues d'un film ou d'une succession de clichés. Les images successives ne sont pas nécessairement acquises à un intervalle régulier. Le traitement étant statistique, il faut un nombre suffisant d'images prises à des instants distincts, par exemple ce nombre d'images peut être compris entre 20 et 2000.

L'étape d'étude E2 des mouvements de l'objet piégé peut comporter une étape de détermination d'un point de référence dudit au moins un objet piégé et une étape de suivi des positions du point de référence à partir de la pluralité d'images successives acquises. En fait, l'objet piégé peut comporter un contour qui lui est associé et un point de référence, notamment son centre, dont les positions vont changer en fonction des mouvements décrits par ledit objet piégé. Le point de référence peut par exemple être déterminé à partir de l'identification du contour de l'objet piégé visible sur les images successives acquises. L'objet piégé peut, par exemple, avoir la forme d'une bille. L'identification d'un point de référence, notamment le centre, de l'objet piégé permet d'obtenir une meilleure résolution de mesure.

L'étape d'identification de positions privilégiées peut comporter une étape de détermination d'une grille associée à une zone de déplacement dudit au moins un objet piégé, et une étape de comptage du nombre d'apparitions dudit au moins un objet piégé dans chaque case de la grille au cours d'un laps de temps par exemple de 1 seconde à 5 minutes. En fait, il suffit que ce laps de temps soit suffisamment long pour obtenir le nombre d'images souhaité tel que décrit précédemment. Dans ce cas,

- l'étape de caractérisation E3 dudit champ électromagnétique peut comporter une étape de détermination du potentiel de piégeage dudit au moins un objet piégé à partir d'une grille de probabilité de présence dudit au moins un objet piégé obtenue par traitement des résultats de l'étape
- 5 de comptage et une étape de détermination d'une représentation du champ électromagnétique à partir du potentiel de piégeage déterminé. L'étape de comptage du nombre d'apparitions dudit au moins un objet piégé peut être réalisée par superposition de la grille associée à la zone de déplacement avec chaque image successive acquise.
- 10 Le potentiel de piégeage est directement lié à la forme de la distribution d'un histogramme des positions obtenu grâce à la grille de probabilités. Le document « Photonic force microscope calibration by thermal noise analysis » de E.-L. Florin et al. tiré de Applied Physics A 66, S75-S78 (1998) donne un exemple d'obtention du potentiel de piégeage.
- 15 Selon un exemple particulier de mise en œuvre, il est utilisé un logiciel permettant de quadriller une zone d'observation (assimilée à la zone de déplacement décrite ci-dessus) de manière à définir une grille dont chaque case correspond à une unité de surface. Ce logiciel peut être le programme 3D Single-Particle Tracking du module MosaicSuite
- 20 développé pour le logiciel de traitement d'image ImageJ (ou Fiji) dans sa version v1.46r. On attribue à chacune des cases le nombre de fois où le centre dudit au moins un objet y est détecté. On échantillonne ainsi la probabilité de présence dudit au moins un objet piégé dans le champ proche de la structure photonique. Cette grille de probabilité de présence
- 25 est ensuite représentée en échelle de couleur, ce qui permet d'obtenir une image du potentiel de piégeage ressenti par les particules. Ce potentiel de piégeage étant proportionnel à l'intensité du champ électromagnétique, l'image obtenue correspond bien à une représentation du champ proche optique de la structure photonique.

L'utilisation de la détection du point de référence de l'objet tel que décrit ci-avant permet avantageusement de faciliter la détection de l'objet piégé dans une case de la grille telle que définie ci-dessus en cas de chevauchement de plusieurs cases de la grille par ledit objet piégé.

- 5 Les figures 2 à 4 illustrent un dispositif de caractérisation 100 d'un champ électromagnétique confiné et/ou exalté par une structure photonique et/ou plasmonique 101 telle que décrite précédemment dans le cadre du procédé, ledit champ électromagnétique étant obtenu par une interaction de ladite structure photonique et/ou plasmonique 101 avec une onde  
10 électromagnétique.

De façon générale, les champs électromagnétiques pouvant être observés par le procédé décrit ci-avant peuvent être générés par l'interaction d'une onde électromagnétique avec différentes sortes de structures :

- 15 - la structure, notamment optoélectronique, est en tout ou partie une structure photonique réalisée à base de cristaux photoniques, et/ou de cavités résonantes, et/ou de guides d'onde,
- la structure, notamment optoélectronique, est en tout ou partie une structure plasmonique réalisée à base de cristaux plasmoniques,  
20 et/ou de substrats SERS (acronyme de l'anglais « Surface Enhanced Raman Scattering » pour Surface à Spectroscopie Raman Renforcée) et/ou de guides plasmoniques et/ou d'antennes.

En ce sens, on comprend notamment des figures 2 à 4 que la structure  
25 photonique et/ou plasmonique (notamment optoélectronique) 101 reliée à

une source de l'onde électromagnétique peut être placée dans le dispositif de sorte à permettre la caractérisation dudit champ électromagnétique résultant.

En outre, le dispositif 100 peut comporter ledit au moins un objet 105  
5 disposé par rapport à la structure photonique et/ou plasmonique 101 de telle sorte que ledit au moins un objet 105 soit piégé par une partie dudit champ électromagnétique, notamment par le champ évanescent dudit champ électromagnétique. Ceci impliquant bien entendu que le dispositif de caractérisation soit dans un état de fonctionnement et que l'interaction  
10 susmentionnée entre l'onde électromagnétique et la structure photonique et/ou plasmonique soit mise en œuvre.

Selon un exemple de réalisation (figures 2 et 3), ledit objet 105 (se présentant par exemple sous la forme d'une particule) est disposé par exemple en suspension dans un liquide 106 lui-même disposé dans un  
15 contenant 107.

En outre, le dispositif de caractérisation 100 comporte un module d'étude 108 (figures 2 et 3) des mouvements dudit au moins un objet piégé 105. Ce module d'étude 108 peut comporter des moyens optiques d'acquisition d'images et de traitement desdites images. Par exemple, le  
20 module d'étude peut comporter un système de vision optique et une caméra CCD (acronyme de l'anglais Charge-Coupled Device) ainsi qu'un système d'éclairage.

Enfin, le dispositif de caractérisation 100 comporte un module de caractérisation 109 (figure 2) dudit champ électromagnétique configuré  
25 de sorte à utiliser des données issues dudit module d'étude 108. On comprend alors que les modules d'étude 108 et de caractérisation 109

peuvent être reliés entre eux de telle manière à permettre un échange de données.

Autrement dit, on comprend que le dispositif de caractérisation est notamment configuré de sorte à mettre en œuvre le procédé de  
5 caractérisation tel que décrit.

Comme évoqué précédemment, ledit au moins un objet 105 peut être placé en suspension dans un liquide. Plus particulièrement, dans ce cas, le dispositif de caractérisation 100 peut comporter un module fluide délimitant un contenant 107 comprenant un fluide dans lequel se trouve  
10 ledit au moins un objet 105. Ce contenant 107 peut avoir une contenance de quelques dizaines à quelques milliers de  $\mu\text{m}^3$ .

Le fond du contenant 107 est délimité au moins partiellement par une surface de la structure photonique 101 et/ou plasmonique. Les dimensions du contenant peuvent être dictées par les dimensions de la  
15 surface de la structure photonique et/ou plasmonique ou ce dernier peut aussi être plus grand. Ceci permet à l'objet d'être au plus proche de la partie du champ électromagnétique (notamment formée par le champ évanescent) de sorte à permettre son piégeage. On comprend alors que le champ électromagnétique sera caractérisé au niveau de ladite surface  
20 de la structure délimitant le fond. Avantagusement, une paroi latérale, par exemple réalisée en PDMS ou en verre, s'étend à partir dudit fond.

Selon un exemple de réalisation, le contenant peut être réalisé à partir d'un film de PDMS de  $70\mu\text{m}$  d'épaisseur dans lequel est formé un trou de quelques millimètres de diamètre. Cet élément est placé sur la structure  
25 photonique et/ou plasmonique, et peut être fermé par exemple par une lame de verre après remplissage.

Bien entendu, le dispositif de caractérisation 100 comporte un élément de génération 110 de l'onde électromagnétique à une longueur d'onde désirée. La longueur d'onde de l'onde électromagnétique peut être comprise entre  $0,4\mu\text{m}$  et  $2\mu\text{m}$ .

- 5 Les figures 3 et 4 montrent un exemple particulier de structure photonique 101 comportant une cavité optique 102 disposée entre deux miroirs 103a, 103b (de préférence ici la structure peut être uniquement photonique). On comprend ici que le terme cavité optique 102 définit une zone où la lumière (c.-à-d. l'onde électromagnétique) est réfléchie et  
10 donc confinée et exaltée. Une telle cavité optique 102 permet par exemple de ralentir, de contrôler, ou encore de confiner de la lumière dans un volume très faible. Plus particulièrement, la structure photonique 101 peut comporter un élément allongé, par exemple en, ou à base, de silicium, où l'on retrouve successivement selon la direction d'allongement  
15 un premier miroir 103a, la cavité optique 102 et un deuxième miroir 103b. La cavité 102 peut avoir une longueur  $d_1$  de  $500\text{nm}$  et la hauteur  $d_2$  de l'élément allongé peut être de  $340\text{nm}$ . En outre, la structure photonique 101 peut reposer sur un substrat de support 104 d'épaisseur  $d_3$  de  $700\mu\text{m}$  et par exemple réalisé en silicium.
- 20 Préférentiellement, les premier et deuxième miroirs 103a, 103b sont formés par des trous pratiqués dans l'élément allongé, et ces trous sont préférentiellement remplis d'air.

Une structure photonique telle que décrite permet de délimiter une cavité optique de type Fabry-Pérot.

- 25 Plus particulièrement, la structure photonique 101 peut être du type de celle décrite dans le document « An Air-slotted nanoresonator relying on

coupled high Q small V Fabry-Perot nanocavities » de Foubert et al. publié dans APPLIED PHYSICS LETTER 94, 251111 (2009), le 24/06/2009, à laquelle on applique le procédé selon l'invention.

5 Sur la figure 4, l'objet 105 représenté comporte le contour 105a évoqué précédemment ainsi que le point de référence 105b évoqué précédemment formé dans le cas présent par le centre de l'objet 105. Dans cet exemple, on voit que l'objet peut écranter tout ou partie de la cavité optique 102 et que le suivi du déplacement du centre 105b permet d'identifier les pics 111 représentatifs des positions préférées du centre  
10 associées à des maximums locaux d'intensité du champ électromagnétique.

Dans la présente description, il a été fait référence à « au moins un objet piégé ou destiné à être piégé ». En ce sens, l'invention peut s'intéresser à un unique objet piégé, ou destiné à être piégé, dont on étudie les  
15 mouvements ou à une pluralité d'objets. Dans le cas de la pluralité d'objet, ils sont préférentiellement différents en forme et/ou en couleur (associé à un marqueur) pour permettre d'assurer leurs identifications et leurs suivis à partir des contours associés. Alternativement, les objets de la pluralité d'objets peuvent être identiques, ils demandent alors à être  
20 suivis continûment.

Généralement, lorsque l'objet est piégé, il est situé au dessus de la structure photonique selon la gravité terrestre.

De manière générale, l'observation et l'étude des mouvements dudit au moins un objet piégé permettent de décrire la forme de ce champ avec  
25 une résolution dix fois plus petite que la taille de l'objet.

La puissance nécessaire pour piéger un objet est au moins de l'ordre de la dizaine de microwatt à l'intérieur du piège, cette valeur dépendant de la structure à étudier.

## **REVENDEICATIONS**

1. Procédé de caractérisation d'un champ électromagnétique obtenu par une interaction d'une onde électromagnétique avec une structure photonique et/ou plasmonique, ledit procédé comprenant :

- une étape d'utilisation (E1) d'une partie du champ électromagnétique, notamment un champ évanescent, pour piéger au moins un objet,
- une étape d'étude (E2) des mouvements dudit au moins un objet piégé,
- une étape de caractérisation (E3) dudit champ électromagnétique utilisant des résultats de l'étape d'étude de mouvements.

2. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'étape de caractérisation (E3) dudit champ électromagnétique comporte une étape de détermination de positions de un ou plusieurs pics d'intensité dudit champ électromagnétique.

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape d'étude (E2) des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape d'identification de positions privilégiées dudit au moins un objet piégé adoptées au cours de son déplacement.

4. Procédé selon les revendications 2 et 3, caractérisé en ce que l'étape de caractérisation (E3) dudit champ électromagnétique comporte une étape d'attribution des positions privilégiées identifiées aux positions du ou des pics d'intensité dudit champ électromagnétique.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape d'étude (E2) des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape d'acquisition d'une pluralité d'images successives permettant de déduire une cartographie des positions adoptées par ledit au moins un objet piégé correspondant.

6. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'étape d'étude (E2) des mouvements dudit au moins un objet piégé comporte une étape de détermination d'un point de référence dudit au moins un objet piégé, et une étape de suivi des positions du point de référence à partir de la pluralité d'images successives acquises.

7. Procédé selon la revendication 3 et l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape d'identification de positions privilégiées comporte :

- une étape de détermination d'une grille associée à une zone de déplacement dudit au moins un objet piégé,
- une étape de comptage du nombre d'apparitions dudit au moins un objet piégé dans chaque case de la grille au cours d'un laps de temps,

et en ce que l'étape de caractérisation (E3) dudit champ électromagnétique comporte :

- une étape de détermination d'un potentiel de piégeage dudit au moins un objet piégé à partir d'une grille de probabilité de présence dudit au moins un objet piégé obtenue par traitement des résultats de l'étape de comptage,

- une étape de détermination d'une représentation du champ électromagnétique à partir du potentiel de piégeage déterminé.
8. Dispositif de caractérisation (100) d'un champ électromagnétique confiné et/ou exalté par une structure photonique et/ou plasmonique (101) et obtenu par une interaction de ladite structure photonique et/ou plasmonique (101) avec une onde électromagnétique, ledit dispositif comportant :
- au moins un objet (105) disposé par rapport à la structure photonique et/ou plasmonique (101) de telle sorte que ledit au moins un objet (105) soit piégé par une partie du champ électromagnétique,
  - un module d'étude (108) des mouvements dudit au moins un objet piégé (105),
  - un module de caractérisation (109) dudit champ électromagnétique configuré de sorte à utiliser des données issues dudit module d'étude (108).
9. Dispositif selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comporte un module fluide délimitant un contenant (107) comprenant un fluide (106) dans lequel se trouve ledit au moins un objet (105).
10. Dispositif selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le fond du contenant (107) est délimité au moins partiellement par une surface de la structure photonique et/ou plasmonique (101).

11. Dispositif selon l'une des revendications 8 à 10, caractérisé en ce que la structure photonique (101) comporte un élément allongé muni successivement, selon sa direction d'allongement, d'un premier miroir (103a), d'une cavité optique (102) et d'un deuxième miroir (103b).
- 5 12. Dispositif selon l'une des revendications 8 à 10, caractérisé en ce que la structure est en tout ou partie une structure photonique réalisée à base de cristaux photoniques et/ou de cavités résonantes et/ou de guides d'onde.
- 10 13. Dispositif selon l'une des revendications 8 à 10 ou la revendication 12, caractérisé en ce que la structure est en tout ou partie une structure plasmonique réalisée à base de cristaux plasmoniques et/ou de substrats SERS et/ou des guides plasmoniques et/ou des antennes.

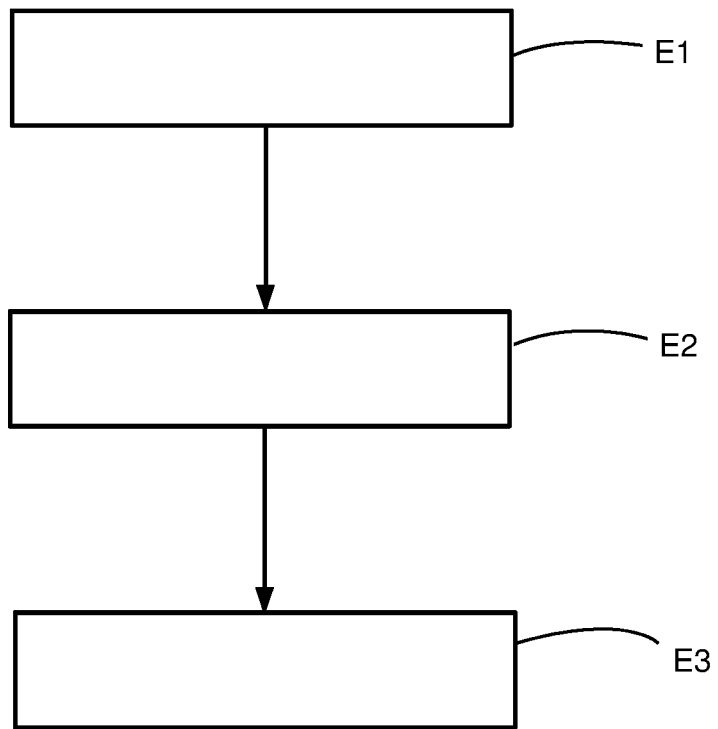
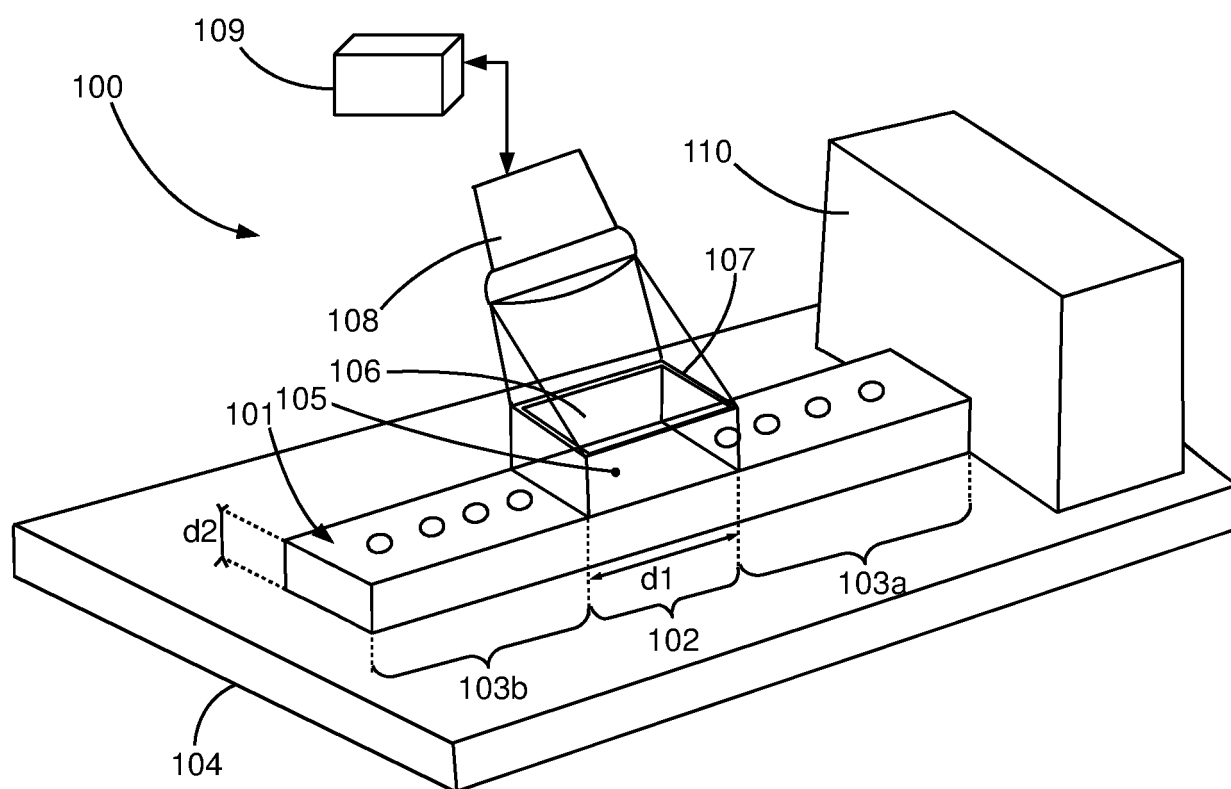
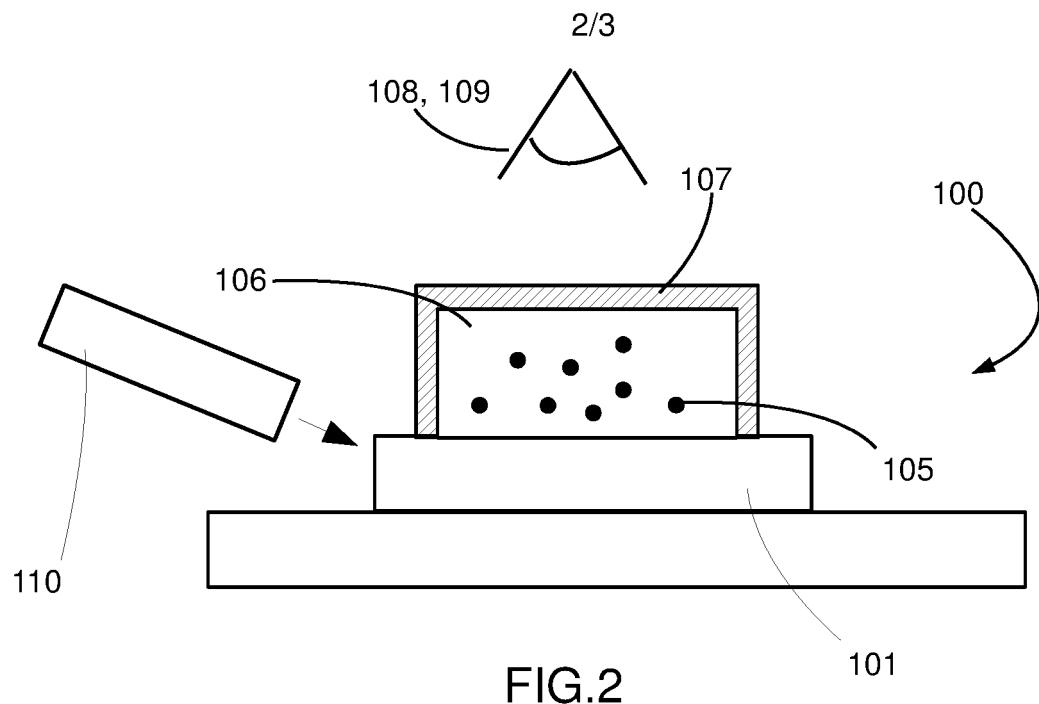


FIG.1



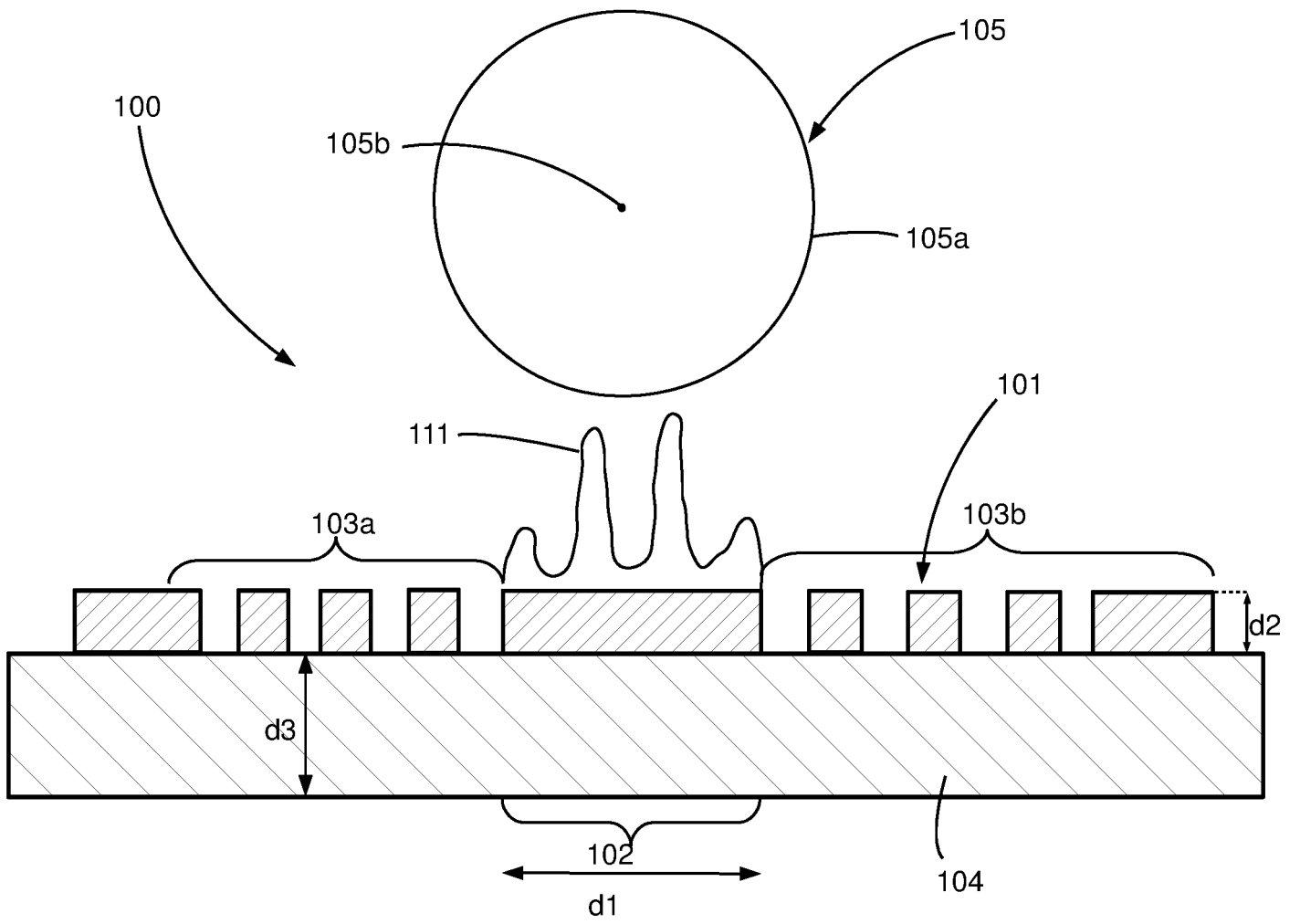


FIG.4



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FA 801730  
FR 1459774

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	SOLTY S I V ET AL: "About the problems of optical fields and medium nanodiagnos tics", OPTICAL MEMORY AND NEURAL NETWORKS, ALLERTON PRESS, NEW YORK, NY, US, vol. 23, no. 3, 1 juillet 2014 (2014-07-01), pages 140-148, XP035404574, ISSN: 1060-992X, DOI: 10.3103/S1060992X14030114 [extrait le 2014-10-08]	1,2,8	G01R29/08 B82Y20/00
Y	* figures 4-10 * * alinéa [0001] * * alinéa [0004] *	3-7,9-13	
Y	----- ANNA ZELENINA ET AL: "Optical forces on a Rayleigh dielectric particle in a patterned near-field landscape", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 5840, 9 mai 2005 (2005-05-09), pages 304-314, XP055197391, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.608337 * figures 1,3-5 * * alinéa [0003] *	3-7,13	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Y	----- GIOVANNI VOLPE ET AL: "Measurement of radiation forces generated by plasmon fields", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 5930, 31 juillet 2005 (2005-07-31), page 59301D, XP055197389, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.614328 * figure 1 * * alinéa [0002] *	9,10	G21K G01M G01N G01Q
	----- -/--		
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
24 juin 2015		Polesello, Paolo	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 801730  
FR 1459774

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y,D	FOUBERT KEVIN ET AL: "An air-slotted nanoresonator relying on coupled high Q small V Fabry-Perot nanocavities", APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, US, vol. 94, no. 25, 24 juin 2009 (2009-06-24), pages 251111-251111, XP012121763, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.3159820 * figure 1 *	11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Y	----- BENYATTOU T ET AL: "Slow bloch mode cavity for optical trapping", 2013 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), IEEE, 23 juin 2013 (2013-06-23), pages 1-5, XP032484097, ISSN: 2161-2056, DOI: 10.1109/ICTON.2013.6602774 [extrait le 2013-09-17] * figures 1,8 * * alinéa [03.2] *	12	
A	----- LIANGCHENG ZHOU ET AL: "3D In situ mapping of focused cylindrical vector beam using trapped Rayleigh nanoparticles", LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO), LASER SCIENCE TO PHOTONIC APPLICATIONS)-CLEO: 2011 - LASER SCIENCE TO PHOTONIC APPLICATIONS- 1-6 MAY 2011, BALTIMORE, MD, USA, IEEE, US, 1 mai 2011 (2011-05-01), pages 1-2, XP031892065, ISBN: 978-1-4577-1223-4 * le document en entier *	1-13	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
24 juin 2015		Polesello, Paolo	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		.....	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)