

12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22) Date de dépôt : 10.03.00.

30) Priorité :

43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 14.09.01 Bulletin 01/37.

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 :

71) Demandeur(s) : FRANCE TELECOM Société anonyme — FR.

72) Inventeur(s) : FORNEL DE FREDERIQUE et FAVENEC PIERRE NOEL.

73) Titulaire(s) :

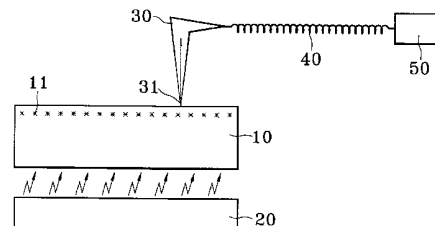
74) Mandataire(s) : FRANCE TELECOM.

54) SOURCE A PEU DE PHOTONS COMMANDABLE.

57) Source à peu de photons commandable et à longueur d'onde prédéterminée.

Selon l'invention, ladite source comprend un matériau solide (10) dans lequel sont implantés en concentration diluée des éléments luminescents (11) à ladite longueur d'onde prédéterminée, un dispositif (20) d'excitation desdits éléments luminescents, et une sonde (30) apte à capturer, par couplage en champ proche, au moins un photon émis par un des éléments luminescents.

Application aux télécommunications optiques.



La présente invention concerne une source à peu de photons commandable et à longueur d'onde prédéterminée.

L'invention trouve une application particulièrement avantageuse dans le domaine des télécommunications optiques, notamment les télécommunications à faible distance et privatives de haute sécurité.

Dans la suite de ce mémoire, on entendra par l'expression « source à peu de photons » un source lumineuse susceptible d'émettre un photon unique ou quelques photons

D'une manière générale, les télécommunications optiques classiques mettent en œuvre des équipements qui, comme les sources laser, sont prévus pour permettre l'utilisation de photons en grande concentration, ceci afin d'obtenir une puissance lumineuse maximale et la distance de communication la plus grande.

Cependant, des travaux sont actuellement menés en direction de systèmes de communications optiques à très faible flux de photons, allant même jusqu'à des systèmes à photon unique (voir les articles de J.P. Goedgebuer, L. Larger et D. Delorme, Phys. Rev. Lett., 82, 8, 1656, 1999 et de A. Muller, H. Zbinden et N. Gisin, Europhys. Lett., 33, 335, 1995). En effet, ces dispositifs à peu de photons sont particulièrement recherchés pour l'étude de la cryptographie quantique, laquelle repose sur les modifications de signature des photons lorsqu'ils sont détectés, en vertu du principe d'incertitude d'Eisenberg. Il faut alors pouvoir manipuler et identifier des photons uniques et, par conséquent, de disposer de véritables sources à un photon ou d'atténuer des flux de photons et de travailler sur des statistiques.

Les sources à peu de photons étudiées aujourd'hui partent généralement de structures relativement compliquées : structures complexes III-V en microcavités ou molécules chromophores très diluées. Mais, en tout état de cause, ces systèmes connus ne conduisent pas à des sources à peu de photons qui seraient utilisables en télécommunications optiques en vue du déploiement de la cryptographie quantique.

Aussi, le problème technique à résoudre par l'objet de la présente invention est de proposer une source à peu de photons commandable et à

longueur d'onde prédéterminée, qui présenterait une structure simple, dont le débit serait faible et commandable, et qui pourrait fonctionner à la température ambiante à des longueurs d'onde intéressantes pour les télécommunications optiques sur fibre, notamment dans le proche infrarouge autour de 1,5 μm .

5 La solution au problème technique posé consiste, selon la présente invention, en ce que ladite source comprend un matériau solide dans lequel sont implantés en concentration diluée des éléments luminescents à ladite longueur d'onde prédéterminée, un dispositif d'excitation desdits éléments luminescents, et une sonde apte à capturer, par couplage en champ proche,
10 au moins un photon émis par un des éléments luminescents.

Ainsi, dans la source conforme à l'invention, les photons sont émis par les éléments luminescents implantés dans le matériau solide en quantité connue et contrôlée en fonction de la concentration recherchée. Puis, ils sont capturés par la sonde selon des processus physiques liés à l'optique de
15 champ proche.

Pour obtenir un source à peu de photons conforme à l'invention, on prévoit que la concentration surfacique des éléments luminescents dans le matériau solide est inférieure à 10 par μm^2 . Plus particulièrement, la concentration surfacique est inférieure à 1 par μm^2 pour une source à photon
20 unique.

La source à peu de photons commandable, objet de l'invention, permet donc de réaliser des communications totalement sécurisées par la cryptographie quantique, que ce soit sur fibre ou sans fil dans l'espace libre. Dans le premier cas, le photon capturé par ladite sonde est émis dans
25 l'espace libre, puis détecté par des transducteurs optiques. Ce type de mise en œuvre convient à des communications à courtes distances, de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Dans le deuxième cas, une fibre optique est couplée à ladite sonde pour le transport du photon capturé, jusqu'à un dispositif de détection. Ce mode de réalisation permet des communications
30 sur des sites plus étendus, de 20 km de rayon maximum, ou dans des immeubles d'affaires par exemple.

De manière avantageuse, l'élément luminescent est un ion de terre rare notamment pris dans la liste constituée par l'erbium, le praséodyme, le néodyme et l'ytterbium. On choisira plus spécialement l'ion Er^{3+} dont la
35 longueur d'onde d'émission située à 1,5 μm est très largement utilisée dans

les télécommunications optiques sur fibre. Les ions erbium sont de préférence implantés sous concentration diluée dans un matériau solide présentant une grande bande d'énergie interdite, les isolants électriques en particulier, car il a été établi (Electronics Letters, 25, 11, 718, 1989) que l'émission de l'erbium à 1,5 μm à la température ambiante est obtenue sous une excitation supérieure à 0,8 eV, ce qui impose des matériaux-hôtes dont la bande d'énergie interdite soit au moins égale à cette valeur.

De façon pratique, ladite sonde est formée par une pointe fine de taille inférieure à 1 μm . A titre d'exemple, elle est constituée par l'extrémité d'une fibre optique, en verre ou en silice.

Enfin, la source à peu de photons selon l'invention présente l'avantage de pouvoir être commandée. A cet effet, il est prévu qu'elle comprend des moyens de contrôle de la capture par la sonde du photon émis. Ces moyens peuvent être de moyens de contrôle de la distance entre la sonde et l'élément luminescent .

En conclusion, la source à peu de photons commandable, objet de l'invention, ouvre la voie à des systèmes de communications optiques quantiques sur fibre ou sans fil, à faibles distances et hautement sécurisées par l'utilisation de la cryptographie quantique.

La description qui va suivre en regard des dessins annexés, donnés à titre d'exemples non limitatifs, fera bien comprendre en quoi consiste l'invention et comment elle peut être réalisée.

La figure 1 est un schéma d'un mode de réalisation d'une source à photon unique commandable conforme à l'invention.

La figure 2 est un schéma d'un mode de réalisation d'une source à quelques photons conforme à l'invention.

Sur la figure 1 est représentée une source à photon unique commandable et à longueur d'onde prédéterminée, par exemple 1,5 μm , comprenant un matériau solide 10, ou matériau-hôte, dans lequel sont implantés des éléments luminescents 11 émettant à 1,5 μm quand ils sont soumis au rayonnement produit par un dispositif 20 d'excitation. L'élément luminescent de choix à cette longueur d'onde est l'ion erbium Er^{3+} .

Le matériau-hôte 10 sera de préférence de la silice se présentant sous forme de plaquette, facilement manipulable, diélectrique et donc à large bande d'énergie interdite, favorable à la luminescence de la terre rare à température

ambiante. La silice présente en outre l'avantage d'avoir de l'oxygène comme constituant principal. Il a en effet été démontré que, pour augmenter l'efficacité optique de l'impureté erbium, il était préférable d'utiliser des matériaux-hôtes ayant comme éléments principaux de l'oxygène ou du fluor (Japanese Journal of Applied Physics, 29, L524, 1990). De plus, ce matériau est stable chimiquement, il peut être facilement implanté et recuit jusqu'à des températures de 900°C sans dégradation.

L'implantation est effectuée conformément aux résultats des travaux de P.-N. Favennec et de ses collaborateurs (voir « L'implantation ionique pour la microélectronique et l'optoélectronique », Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Editions Masson, 1993).

Les paramètres proprement dits d'implantation et les recuits sont conditionnés par le choix de la silice. L'énergie des ions utilisée peut varier de 10 keV à 800 keV. Les doses implantées devront être compatibles avec le résultat recherché. Pour une source à photon unique, la concentration d'erbium en surface du matériau solide sera de préférence inférieure à 1 par μm^2 . Les recuits sont nécessaires pour activer optiquement les ions erbium, c'est à dire pour qu'ils se mettent en site stable dans le matériau-hôte, et pour réarranger la silice perturbée par le bombardement ionique en évitant ainsi une absorption des photons par des défauts induits. L'optimisation des conditions de recuit des plaquettes de silice implantées donne les conditions suivantes : de 600 à 900°C pour les températures et de quelques secondes à quelques dizaines de minutes pour les temps de recuit.

Si l'erbium a été explicitement mentionné plus haut, c'est parce que sa longueur d'onde d'émission à 1,5 μm présente un fort intérêt en télécommunication optique. Mais il est bien entendu que d'autres espèces chimiques sont susceptibles d'être utilisées. Parmi les terres rares, on peut citer, en plus de l'erbium, le praséodyme (1,3 μm), le néodyme (1,06 μm) et l'ytterbium (1 μm). Mentionnons également l'uranium pour une émission à 2,5 μm . Enfin, les molécules organiques luminescentes peuvent aussi convenir.

Le matériau solide n'est pas non plus limité à la silice mais peut être étendu à d'autres matériaux, la règle pour le choix du couple matériau-hôte/élément luminescent étant que la bande d'énergie interdite du matériau soit inférieure à l'énergie de la transition radiative de l'élément luminescent.

Parmi les matériaux isolants électriques, on peut choisir, outre la silice, l'alumine, un nitrure, un polymère, un verre de silice ou fluoré, un cristal fluoré, un sol-gel. Conviennent également les semi-conducteurs cristallins (GaN, GaAs, GaP, GaSb, InP et leurs dérivés) ou non cristallins comme le silicium amorphe ou polycristallin.

Le dispositif 20 d'excitation doit fournir des photons de longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde de luminescence souhaitée. Ainsi, si l'on veut une émission de photons à 1,5 μm par excitation d'ions erbium, le faisceau excitateur devra contenir des photons de longueur d'onde inférieure à 1,5 μm , ce peut donc être un faisceau lumineux situé dans le proche infra-rouge, le visible ou l'ultra-violet.

L'excitation se fait par tout dispositif 20 commandable électroniquement en impulsions courtes dont le rayonnement est photonique et issu d'un laser, d'une source de lumière blanche, ou obtenu par bombardement électronique au moyen d'un canon à électrons par exemple.

Comme le montre la figure 1, un photon émis par un élément luminescent est capturé par une sonde 30 selon le mécanisme physique du couplage en champ proche. D'une manière générale, l'optique de champ proche résulte de l'interaction, à une distance inférieure à la longueur d'onde utilisée, entre un élément nanométrique et le champ total généré au voisinage de l'espèce luminescente (« Les ondes évanescentes en optique et en optoélectronique » par F. de Fornel, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Editions Eyrolles, 1997). Sur la figure 1, ledit élément nanométrique est constitué par la sonde 30, laquelle est formée par une pointe effilée 31 de taille inférieure à 1 μm placée à moins de 100 nm de la surface du matériau solide 10. La fonction de la sonde 30 est donc de capturer le photon émis par un élément luminescent et de le guider jusqu'à une fibre optique 40 terminée par un détecteur 50.

La pointe effilée 31 de la sonde 30 peut être une extrémité de fibre optique de silice, de verre fluoré, de silice dopée à l'erbium ou une autre terre rare. Elle peut être également diélectrique ou semiconductrice, en carbone ou en silicium. Enfin, elle peut être revêtue totalement ou superficiellement d'autres matériaux diélectriques ou métalliques.

La source de la figure 1 est commandée en intensité par des moyens de contrôle de la capture par la sonde 30 du photon émis. Ces moyens

peuvent être des moyens de contrôle de la distance entre la sonde 30 et l'élément luminescent, comme des composants piézoélectriques, photoélastiques, microélectromécaniques.

5 La source de la figure 2 diffère de celle de la figure 1 en ce qu'il s'agit d'une source à quelques photons dans laquelle la concentration en surface des éléments luminescents est plus élevée mais inférieure à 10 par μm^2 . Une autre différence réside dans le fait que les photons capturés par la sonde 30 sont émis sans fil à l'air libre jusqu'au détecteur 50. La portée d'une telle source est bien entendu inférieure à celle d'une source guidée par fibre
10 comme dans le cas de la figure 1.

REVENDEICATIONS

1. Source à peu de photons commandable et à longueur d'onde prédéterminée, caractérisée en ce que ladite source comprend un matériau solide (10) dans lequel sont implantés en concentration diluée des éléments luminescents (11) à ladite longueur d'onde prédéterminée, un dispositif (20) d'excitation desdits éléments luminescents, et une sonde (30) apte à capturer, par couplage en champ proche, au moins un photon émis par un des éléments luminescents.
2. Source selon la revendications 1, caractérisée en ce que la concentration surfacique des éléments luminescents dans le matériau solide est inférieure à 10 par μm^2 .
3. Source selon la revendication 2, caractérisée en ce que la concentration surfacique est inférieure à 1 par μm^2 pour une source à photon unique.
4. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que le photon capturé par ladite sonde (30) est émis dans l'espace libre.
5. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce qu' une fibre optique (40) est couplée à ladite sonde (30) pour le transport du photon capturé.
6. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que ledit élément luminescent est un ion de terre rare.
7. Source selon la revendication 6, caractérisée en ce que ladite terre rare est choisie dans la liste constituée par l'erbium, le praséodyme, le néodyme, et l'ytterbium.
8. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que ledit élément luminescent est de l'uranium.
9. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que ledit élément luminescent est une molécule organique.

10. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisée en ce que ledit matériau solide (10) est un isolant électrique.

5 11. Source selon la revendication 10, caractérisée en ce que ledit isolant électrique est choisi dans la liste constituée par la silice, l'alumine, un nitrure, un polymère, un verre, un cristal fluoré, un sol-gel.

12. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisée en ce que ledit matériau solide (10) est un semi-conducteur.

10 13. Source selon la revendication 12, caractérisée en ce que ledit semi-conducteur est choisi dans la liste constituée par le silicium amorphe, le silicium polycristallin, ainsi que par GaN, GaAs, GaP, GaSb, InP et leurs dérivés.

15 14. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens de contrôle de la capture par la sonde (30) du photon émis.

15 15. Source selon la revendication 14, caractérisée en ce que lesdits moyens de contrôle sont des moyens de contrôle de la distance entre la sonde (30) et l'élément luminescent.

20 16. Source selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, caractérisée en ce que ladite sonde (30) est formée par une pointe effilée (31) de taille inférieure à 1 μm .

17. Source selon la revendication 16, caractérisée en ce que ladite pointe effilée (31) est en un matériau diélectrique ou semiconducteur.

25 18. Source selon la revendication 16, caractérisée en ce que ladite pointe effilée (31) est en carbone ou en silicium.

19. Source selon l'une quelconque des revendications 16 à 18, caractérisée en ce que ladite pointe effilée (31) est constituée par l'extrémité d'une fibre optique.

1/1

FIG. 1

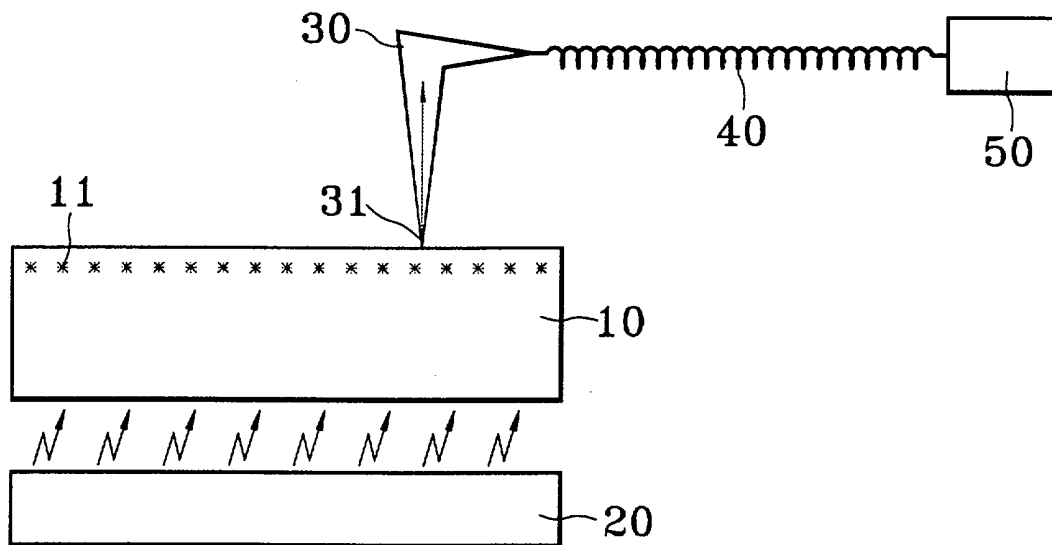
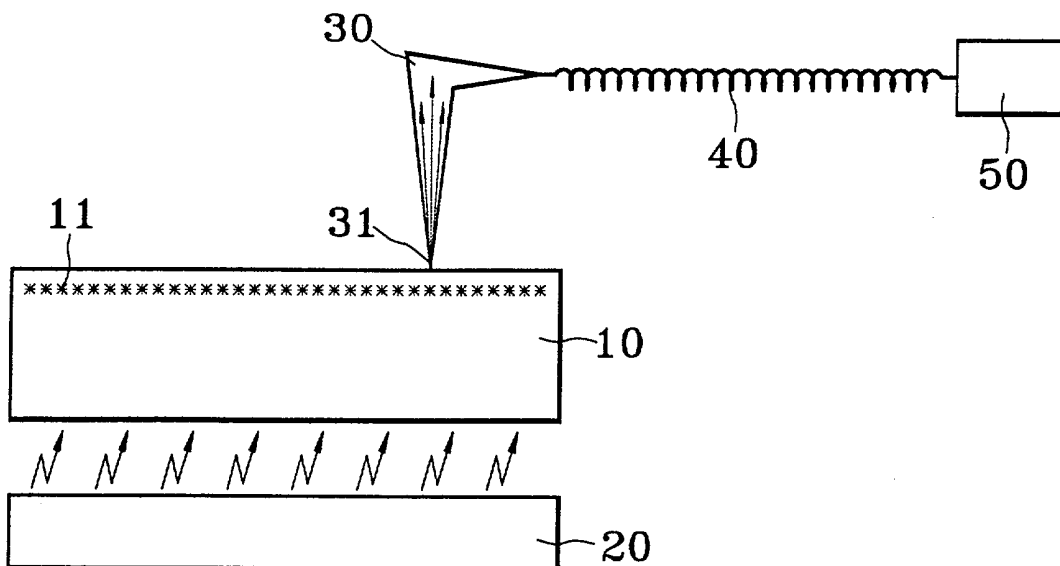


FIG. 2





**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

2806171

N° d'enregistrement
national

FA 584114
FR 0003096

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		
A	US 5 675 648 A (TOWNSEND PAUL DAVID) 7 octobre 1997 (1997-10-07) * colonne 5, ligne 10 - ligne 45; figure 5 * ---	1	G02F1/01 G01J1/06 H04L9/00 H04J14/00
A	WO 98 11457 A (REMO JOHN L ;STANGER LEO (US)) 19 mars 1998 (1998-03-19) * page 7, ligne 9 - ligne 25; figure 1 * ---	1	
A	WO 97 44936 A (TOWNSEND PAUL DAVID ;BRITISH TELECOMM (GB)) 27 novembre 1997 (1997-11-27) * page 6, ligne 1 - ligne 20; figure 1 * ---	1	
A	LAPORTA P ET AL: "10 KHZ-LINEWIDTH DIODE-PUMPED ER: YB: GLASS LASER" ELECTRONICS LETTERS,GB,IEE STEVENAGE, vol. 28, no. 22, 22 octobre 1992 (1992-10-22), pages 2067-2069, XP000320718 ISSN: 0013-5194 * le document en entier * -----	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) H04L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
29 novembre 2000		Hervé, D	
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 12.98 (P04C14)