

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
6 octobre 2016 (06.10.2016)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2016/156587 A1

(51) Classification internationale des brevets :
B01J 13/02 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2016/057255

(22) Date de dépôt international :
1 avril 2016 (01.04.2016)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1552837 2 avril 2015 (02.04.2015) FR

(71) Déposants : COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25 Rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", 75015 Paris (FR). CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3, rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16 (FR). UNIVERSITE JEAN MONNET [FR/FR]; Maison de l'Université, 10, Rue Tréfilerie - CS 82301, 42023 Saint Etienne Cedex 2 (FR).

(72) Inventeurs : DELLEA, Olivier; 6 rue Jean Giono, 42350 La Talaudière (FR). SHAVDINA, Olga; 1 rue Royet, 42000 Saint Etienne (FR). KAMPFE, Thomas; 28 rue Raspail, 69100 Villeurbanne (FR). JOURLIN, Yves; 26 rue Bergson, 42000 Saint Etienne (FR).

(74) Mandataire : BREVALEX; 95, rue d'Amsterdam, 75378 Paris Cedex 8 (FR).

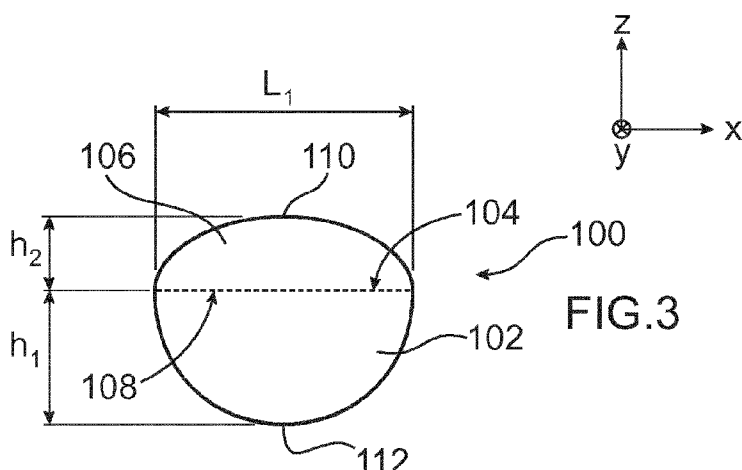
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : PROCESS FOR GENERATING PHOTONIC NANOJETS

(54) Titre : PROCEDE DE GENERATION DE NANOJETS PHOTONIQUES



(57) Abstract : Process for generating photonic nanojets including illuminating transparent dielectric particles (100) so as to form a photonic nanojet level with an exit region (112) of each particle, which includes: a first hemispherical section (102) forming the exit region; a second section (106) forming an axisymmetric flattened semi-ellipsoid and including a disk-shaped first flat area (108) placed against a flat area (104) of the first section, each particle being such that: the flat area of the first section and the first flat area of the second section are similar sizes; a height of the second section is smaller than a radius of the first flat area of the second section; and the exit region is formed by a portion of the first section that is opposite the flat area of the first section.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2016/156587 A1



SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :
— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

Procédé de génération de nanojets photoniques, comportant une illumination de particules (100) diélectriques transparentes, formant un nanojet photonique au niveau d'une région de sortie (112) de chaque particule qui comporte : - une première portion (102) hémisphérique formant la région de sortie, - une deuxième portion (106) formant un demi-ellipsoïde de révolution aplati et comportant une première surface plane (108) en forme de disque disposée contre une surface plane (104) de la première portion, chaque particule étant telle que : - la surface plane de la première portion et la première surface plane de la deuxième portion ont des dimensions similaires, - une hauteur de la deuxième portion est inférieure à un rayon de la première surface plane de la deuxième portion, - la région de sortie est formée par une partie de la première portion opposée à la surface plane de la première portion.

PROCEDE DE GENERATION DE NANOJETS PHOTONIQUES

DESCRIPTION

DOMAINE TECHNIQUE ET ART ANTÉRIEUR

L'invention concerne un procédé de génération de nanojets photoniques, ou jets photoniques, à partir de particules diélectriques. L'invention concerne également un procédé de structuration d'une surface de matériau par nanojets photoniques, ainsi qu'un procédé de photoréticulation d'une surface de matériau par nanojets photoniques.

La structuration de surfaces mise en œuvre aux échelles micrométriques et nanométriques joue un rôle majeur dans de nombreux domaines pour optimiser le rendement de dispositifs ou développer des surfaces multifonctionnelles, en exacerbant certaines propriétés de ces surfaces. Par exemple, dans le domaine de la mécanique, une telle structuration de surfaces permet d'optimiser le rendement d'un moteur grâce à une réduction des frottements des pièces dont les surfaces ont été structurées. Dans le domaine de l'optoélectronique, il est également possible de contrôler la diffusion lumineuse au sein de microcomposants électroniques dont certaines couches comportent des surfaces structurées. Ainsi, dans un dispositif microélectronique photovoltaïque, il est possible de texturer certaines couches du dispositif pour optimiser l'absorption du rayonnement solaire reçu par le dispositif. Dans un dispositif solaire thermique, il est également possible de réaliser une texturation de surface pour optimiser l'absorption du rayonnement électromagnétique reçu et contrôler l'émission thermique infrarouge. Dans d'autres domaines, il est également possible de texturer des surfaces pour leur conférer certaines propriétés physico-chimiques, comme par exemple pour rendre hydrophobes certaines surfaces telles que celles de pales d'éoliennes pour éviter la formation de glace sur celles-ci. D'autres applications sont également envisageables, comme par exemple la réalisation de marquages anti-contrefaçon via une texturation de surface de forme unique réalisée à l'échelle micrométrique ou nanométrique.

Une technique particulièrement intéressante pour réaliser une structuration de surface à l'échelle micrométrique ou nanométrique consiste à illuminer par une lumière de type faisceau gaussien ou onde plane, formée par exemple par un laser ou une source non-cohérente (spatialement ou temporellement), une monocouche
5 des particules colloïdales sphériques de dimensions micrométriques ou nanométriques et formées d'un matériau diélectrique transparent à la longueur d'onde de la lumière incidente. La figure 1 représente schématiquement une telle particule 10 illuminée par une lumière laser 12. La lumière 12 est reçue par la particule 10 au niveau d'une région d'entrée 14. Par un phénomène de renforcement, ou concentration, local du champ
10 lumineux en champ proche, l'énergie lumineuse reçue par la particule 10 se concentre au niveau d'une région de sortie 16 de la particule 10 en formant un nanojet photonique 18 de dimensions nanométriques ou micrométriques et dans lequel l'énergie est concentrée. Généralement, la longueur d'onde de la source considérée reste du même ordre de grandeur que le diamètre de la particule. Cette technique est par exemple décrite dans le
15 document « A novel self-assembled and maskless technique for highly uniform arrays of nano-holes and nano-pillars » de W. Wu et al., Nanoscale Res. Lett. ; 3(3) : 123-127, 2008.

L'énergie lumineuse ainsi concentrée à des échelles de grandeurs spatiales plus petites que la limite de diffraction, et donc plus petites que ce qui peut être obtenu par focalisation en optique conventionnelle (par exemple des lentilles), est
20 particulièrement intéressante dans le domaine de la structuration de surface à l'échelle micrométrique ou nanométrique. Le nanojet photonique 18 obtenu a notamment pour avantage d'avoir des dimensions latérales (dimensions perpendiculaires à la direction de propagation de la lumière 12) bien inférieures à celles du faisceau lumineux de la lumière 12. Il est par exemple possible d'obtenir un nanojet photonique 18 dont la largeur à mi-
25 hauteur (FWHM pour « Full Width at Half Maximum ») est égale à environ 200 nm à partir d'un particule 10 sphérique de diamètre égal à environ 1 μm et en utilisant un laser émettant un faisceau lumineux de diamètre supérieur à 5 μm comme lumière 12. L'énergie lumineuse ainsi concentrée peut conduire par exemple à l'ablation d'un substrat sur lequel les particules sont déposées.

Un autre avantage de cette technique est l'efficacité de concentration obtenue grâce aux particules, ce qui permet d'utiliser des lasers de plus faible puissance que ceux utilisés pour graver directement la matière considérée. Enfin, cette technique permet de réaliser une focalisation simultanée en plusieurs points. Ainsi, un seul tir laser
5 peut générer des centaines d'impacts simultanément. Dans ce cas, pour augmenter les fluences et permettre l'ablation, les sources considérées sont pulsées temporellement.

Selon cette technique, il est également possible de texturer des surfaces en exposant sous une lumière UV une monocouche de particules sphériques déposées au préalable sur une couche de matériau photosensible, puis en développant ensuite le
10 matériau photosensible. Dans ce cas, on peut considérer des sources UV non pulsées.

Cette technique de structuration par nanojets photoniques permet notamment de structurer de grandes surfaces de matériau sans avoir à réaliser chaque structuration individuellement puisque les particules, qui sont disposées sur la surface à texturer sous la forme d'une couche, peuvent être illuminées collectivement par une
15 même source lumineuse. Dans le cas d'un dépôt régulier de particules sphériques quasi-identiques, l'arrangement naturel des particules conduit à une structure périodique hexagonale. Il est possible d'obtenir de très nombreux motifs (plus de 10^9 dans le cas d'une monocouche) tels que des nano-trous (par phénomène d'ablation ou de photoréticulation d'une résine photosensible positive) ou des nanostructures en relief
20 (par photoréticulation d'une résine photosensible négative).

Le nanojet photonique 18 obtenu avec cette technique a une certaine longueur (dimension parallèle à la direction de propagation de la lumière 12), largeur (dimension perpendiculaire à la longueur) et une certaine position, ou distance, par rapport à la région de sortie 16 de la particule 10. Ces paramètres dépendent notamment
25 du diamètre de la particule 10 qui est sphérique. Il n'est toutefois pas possible de modifier la focalisation du nanojet photonique (correspondant au rapport de la longueur sur la largeur à mi-hauteur du nanojet photonique) lorsque de telles particules sphériques 10 sont utilisées.

De plus, la concentration de l'énergie lumineuse obtenue avec de telles
30 particules 10 n'est pas optimale car une partie de cette énergie peut être localisée à

l'intérieur même de la particule 10 et donc être perdue car cette partie de l'énergie ne peut être utilisée pour la structuration.

Le document « Highly confined photonic nanojet from elliptical particles » de T. Jalali et al., Journal of Modern Optics, 2014, vol. 61, n°13, pp. 1069-1076, décrit l'utilisation de particules de forme elliptique, ou plus précisément en forme d'ellipsoïde de révolution aplati (« oblate ellipsoïde of revolution »), ou sphéroïde aplati (« oblate spheroid »), pour générer des nanojets photoniques. L'utilisation de telles particules permet de modifier la position des nanojets photoniques par rapport aux régions de sortie des particules. Par contre, ces particules ne permettent pas d'optimiser la concentration d'énergie au sein des nanojets photoniques, une grande partie de cette énergie étant localisée dans les particules.

Le document « Preparation of non-spherical particles by shell-shield etching for near-field nanopatterning » de J. Ye et al., Nanotechnology 25 275303, 2014, décrit la mise en œuvre d'une méthode non conventionnelle appelée « Shell-shield etching » permettant de fabriquer des particules en polymère de formes variées, par exemple en forme de gouttes, de croissants ou encore correspondant à la réunion de deux hémisphères de dimensions différentes. Les formes proposées sont toutefois peu adaptées pour une disposition des particules en couche pour réaliser une texturation de surface.

Dans le document « Manipulation of lens-shaped objects in various materials to enhance photonic nanojet using MMP method » de T. Jalali, Journal of Optics 16 035705, 2014, des particules ayant une forme de lentilles et réalisées avec différents matériaux sont utilisées pour générer des nanojets photoniques. De telles particules permettent bien une mise en forme des nanojets. Toutefois, des pertes d'énergie importantes se produisent au sein des particules dans chacune des simulations présentées.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

Un but de la présente invention est de proposer un procédé de génération de nanojets photoniques dont les paramètres soient optimisés, notamment

en termes de concentration d'énergie, de focalisation, de dimensions (transverses et longitudinales) et de position par rapport aux particules utilisées pour les générer.

Pour cela, la présente invention propose un procédé de génération de nanojets photoniques, comportant au moins une illumination de particules de matériau diélectrique au moins partiellement transparentes vis-à-vis d'une lumière illuminant une région d'entrée de chaque particule, formant un nanojet photonique au niveau d'une région de sortie, opposée à la région d'entrée, de chaque particule, dans lequel chaque particule comporte au moins :

- une première portion sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution (ou demi-sphéroïde), et formant la région de sortie de la particule,

- une deuxième portion sensiblement en forme d'au moins une partie d'un demi-ellipsoïde de révolution et comportant une première surface plane sensiblement en forme de disque et disposée contre une surface plane de la première portion,

et dans lequel chaque particule est telle que :

- la surface plane de la première portion et la première surface plane de la deuxième portion ont des dimensions similaires,

- une dimension de la deuxième portion, qui est perpendiculaire à la première surface plane de la deuxième portion, est différente d'une dimension de la première portion qui est perpendiculaire à la première surface plane de la deuxième portion,

- la région de sortie est formée par une partie de la première portion opposée à la surface plane de la première portion.

La surface plane de la première portion est en forme de disque car la première portion correspond à une demi-sphère.

L'invention propose de faire appel à des particules de forme inédite pour générer des nanojets photoniques, permettant de contrôler et optimiser la focalisation, les dimensions et la position des nanojets photoniques par rapport aux particules utilisées pour les générer, et cela grâce à l'asymétrie de la forme des particules car pour chaque particule, la première portion a une forme différente de la deuxième

portion (du fait que la dimension de la deuxième portion, qui est perpendiculaire à la première surface plane de la deuxième portion, est différente de la dimension de la première portion qui est perpendiculaire à la première surface plane de la deuxième portion).

5 L'utilisation de telles particules permet également de bien contrôler la concentration d'énergie au sein des nanojets photoniques, et éviter notamment les pertes d'énergie au sein des particules.

Le terme « nanojet photonique » est utilisé ici pour désigner un jet photonique, caractérisé par une concentration du champ électrique ayant des dimensions
10 nanométriques et/ou micrométriques.

La deuxième portion peut avoir la forme d'un demi-ellipsoïde de révolution aplati, c'est-à-dire tel que la hauteur de ce demi-ellipsoïde soit inférieure au rayon de sa base qui correspond à la première surface plane, ou la forme d'un demi-ellipsoïde de révolution allongé, c'est-à-dire tel que la hauteur de ce demi-ellipsoïde soit
15 supérieure au rayon de sa base, ou une forme de demi-sphère. Un demi-ellipsoïde de révolution aplati ou allongé ne correspond pas à une forme de demi-sphère (qui correspond à un demi-ellipsoïde de révolution dont la hauteur est égale au rayon de sa base).

La première portion peut avoir la forme d'un demi-ellipsoïde de révolution, c'est-à-dire soit un demi-ellipsoïde de révolution aplati, soit un demi-ellipsoïde
20 de révolution allongé, soit une demi-sphère.

Dans tous les cas, pour chaque particule, la hauteur de la première portion est différente de la hauteur de la deuxième portion, conférant ainsi un caractère asymétrique à la forme de chaque particule.

25 Selon un premier mode de réalisation, chaque particule peut être telle que :

- la première portion soit sensiblement en forme de demi-sphère,
- la deuxième portion soit sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution aplati,

- la région d'entrée soit formée par une partie de la deuxième portion opposée à la première surface plane de la deuxième portion.

De telles particules selon ce premier mode de réalisation sont avantageusement utilisées pour la génération de nanojets photoniques de longueurs importantes.

Selon un deuxième mode de réalisation, le procédé peut être tel que :

- chaque particule est telle que la deuxième portion est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution tronqué comportant une deuxième surface plane, opposée à la première surface plane de la deuxième portion, de dimensions inférieures à celles de la première surface plane de la deuxième portion et qui est sensiblement en forme de disque,

- chaque particule comporte en outre une troisième portion sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution (c'est-à-dire aplati ou allongé ou en forme de demi-sphère), dont une première surface plane est disposée contre la deuxième surface plane de la deuxième portion et a des dimensions similaires à celles de la deuxième surface plane de la deuxième portion,

- chaque particule est telle que la région d'entrée est formée par une partie de la troisième portion opposée à la première surface plane de la troisième portion.

La première surface plane de la troisième portion est en forme de disque car la troisième portion correspond ici à un demi-ellipsoïde de révolution.

De telles particules selon ce deuxième mode de réalisation permettent notamment d'obtenir un bon compromis entre la longueur des nanojets photoniques et la concentration d'énergie au sein des nanojets photoniques.

Dans un cas avantageux de ce deuxième mode de réalisation :

- la première portion est sensiblement en forme de demi-sphère,
- la deuxième portion est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution aplati et tronqué,
- la troisième portion est sensiblement en forme de demi-sphère.

Selon un troisième mode de réalisation, le procédé peut être tel que :

- chaque particule est telle que la deuxième portion est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution tronqué comportant une deuxième surface plane, opposée à la première surface plane de la deuxième portion, de dimensions inférieures à celles de la première surface plane de la deuxième portion et qui est sensiblement en forme de disque,

- chaque particule comporte en outre une troisième portion sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution tronqué comportant une première surface plane sensiblement en forme de disque, de dimensions similaires à celles de la deuxième surface plane de la deuxième portion et qui est disposée contre la deuxième surface plane de la deuxième portion, et comportant une deuxième surface plane, opposée à la première surface plane de la troisième portion, sensiblement en forme de disque et de dimensions inférieures à celles de la première surface plane de la troisième portion,

- chaque particule comporte en outre une quatrième portion sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution dont une surface plane est disposée contre la deuxième surface plane de la troisième portion et a des dimensions similaires à celles de la deuxième surface plane de la troisième portion,

- chaque particule est telle que la région d'entrée est formée par une partie de la quatrième portion opposée à la surface plane de la quatrième portion.

La surface plane de la quatrième portion est en forme de disque car la quatrième portion correspond à un demi-ellipsoïde de révolution.

De telles particules selon ce troisième mode de réalisation permettent notamment d'obtenir une forte concentration d'énergie au sein des nanojets photoniques.

Dans un cas avantageux de ce troisième mode de réalisation :

- la première portion est sensiblement en forme de demi-sphère,
- la deuxième portion est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution aplati et tronqué,
- la troisième portion est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution aplati et tronqué,

- la quatrième portion est sensiblement en forme de demi-sphère.

Le matériau diélectrique peut être un oxyde (par exemple du SiO_2) et/ou un polymère (par exemple du PS) et/ou un matériau hybride organique / inorganique (par exemple un matériau sol-gel organo-minéral). Ce matériau est essentiellement transparent à la longueur d'onde de la lumière d'illumination (silice, verre, etc.).

La lumière illuminant les régions d'entrée des particules peut être produite par un dispositif laser, formant par exemple un faisceau de profil Gaussien ou proche. La lumière illuminant les régions d'entrée des particules peut provenir d'une source de lumière incohérente (par exemple une lampe ou des LEDs). Le choix du type de lumière utilisée dépend du résultat à obtenir (ablation, fusion, réticulation) et peut être pulsée ou continue.

Les particules peuvent être disposées les unes à côté des autres en quinconce sur plusieurs lignes et plusieurs colonnes (disposition en monocouche de type hexagonale), et/ou disposées en contact les unes à côté des autres (disposition en monocouche de type compact). Une disposition en monocouche (c'est-à-dire une couche formée d'une seule épaisseur de particules) de type hexagonale compact a notamment pour avantage d'obtenir une forte densité de particules au sein de la couche, et donc de réaliser par exemple des structurations micrométriques et/ou nanométriques avec une forte densité et organisées de façon périodique.

L'invention concerne également un procédé de texturation d'une surface de matériau, comportant la mise en œuvre d'un procédé de génération de nanojets photoniques tel que décrit ci-dessus, et dans lequel les particules sont disposées en monocouche sur la surface de matériau avant l'illumination des particules.

L'illumination des particules peut être réalisée avec une lumière de type laser, par exemple produite par un laser impulsionnel nanoseconde, picoseconde ou femtoseconde tel qu'un laser impulsionnel picoseconde de longueur d'onde égale à 1064 nm ou encore un laser impulsionnel femtoseconde de longueur d'onde égale à 800 nm, telle que les nanojets photoniques gravent le matériau de la surface par ablation. Du fait que les nanojets photoniques obtenus peuvent avoir une densité d'énergie plus importante et/ou une meilleure définition en termes de dimensions, focalisation et

positionnement que dans le cas de nanojets photoniques obtenus selon les procédés de l'art antérieur, l'ablation peut être réalisée plus rapidement, plus efficacement, plus profondément, ou encore être mise en œuvre pour des matériaux à grande dureté.

En variante, l'illumination des particules peut être réalisée avec une lumière de type laser, par exemple infrarouge continue ou impulsionnelle, telle que les nanojets photoniques réalisent une fusion localisée des particules avec le matériau de la surface.

L'invention porte également sur un procédé de photoréticulation d'une surface de matériau, comportant la mise en œuvre d'un procédé de génération de nanojets photoniques tel que décrit ci-dessus, dans lequel les particules sont disposées en monocouche sur la surface de matériau avant l'illumination des particules, et dans lequel l'illumination des particules est réalisée avec une lumière UV cohérente (par exemple issue d'un laser) ou incohérente (par exemple issue d'une lampe UV ou de LEDs UV). Du fait que les nanojets photoniques obtenus peuvent avoir une densité d'énergie plus importante et/ou une meilleure définition en termes de dimensions, focalisation et positionnement que dans le cas de nanojets photoniques obtenus selon les procédés de l'art antérieur, la photoréticulation peut être réalisée plus rapidement, plus efficacement ou plus profondément dans le matériau (par exemple pour la réalisation de motifs avec un grand rapport de forme).

Le matériau de la surface peut être un matériau photosensible (positif ou négatif), le procédé de photoréticulation pouvant comporter en outre, après la mise en œuvre du procédé de génération des nanojets photoniques, des étapes du domaine de la photolithographie telles que des étapes de recuits thermiques et de développement du matériau photosensible.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés à titre purement indicatif et nullement limitatif en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement le principe de génération d'un nanojet photonique ;

- la figure 2 représente schématiquement une vue de dessus d'une pluralité de particules utilisées dans un procédé de génération de nanojets photoniques, objet de la présente invention ;

- les figures 3 à 5 représentent schématiquement des vues en coupe de profil d'une particule utilisée dans un procédé de génération de nanojets photoniques, objet de la présente invention, selon différents modes de réalisation.

Des parties identiques, similaires ou équivalentes des différentes figures décrites ci-après portent les mêmes références numériques de façon à faciliter le passage d'une figure à l'autre.

Les différentes parties représentées sur les figures ne le sont pas nécessairement selon une échelle uniforme, pour rendre les figures plus lisibles.

Les différentes possibilités (variantes et modes de réalisation) doivent être comprises comme n'étant pas exclusives les unes des autres et peuvent se combiner entre elles.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

On se réfère tout d'abord à la figure 2 qui représente schématiquement une vue de dessus d'une pluralité de particules 100 de matériau diélectrique utilisées pour la mise en œuvre d'un procédé de génération de nanojets photoniques.

Ce procédé est mis en œuvre à partir d'une pluralité de particules 100 disposées sur un substrat 101 les unes à côté des autres sous la forme d'une monocouche, et en quinconce sur plusieurs lignes et plusieurs colonnes (agencement de type hexagonal). Sur la figure 2, les particules 100 sont disposées selon 4 lignes et 8 colonnes. De plus, sur cette figure 2, les particules 100 sont espacées les unes des autres. En variante, les particules 100 voisines peuvent être en contact les unes avec les autres, en formant par exemple une monocouche de type hexagonal compact.

Les particules 100 sont réalisées en un matériau diélectrique au moins partiellement transparent vis-à-vis de la lumière destinée à illuminer les particules 100

pour générer les nanojets photoniques. Cette lumière correspond par exemple à un faisceau laser. Les particules 100 comportent par exemple un oxyde tel que du SiO_2 ou du verre, et/ou un polymère (PS, PMMA, etc.).

La figure 3 représente une particule 100 selon un premier mode de réalisation. Dans ce premier mode de réalisation, la particule 100 comporte une première portion 102 de forme sensiblement hémisphérique, ou sensiblement en forme de demi-sphère, correspondant à la partie inférieure de la particule 100. Cette première portion 102 comporte, à son sommet, une surface plane 104 comprenant une section, dans le plan (X,Y), en forme de disque et représentée symboliquement par des pointillés sur la figure 3.

La particule 100 comporte également une deuxième portion 106 sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution, ou demi-sphéroïde, aplati, dont une surface plane 108 est disposée contre la surface plane 104 de la première portion 102. Comme la surface plane 104, la surface plane 108 a une section, dans le plan (X,Y), en forme de disque. Les surfaces planes 104 et 108 ont, dans le plan (X,Y), des dimensions similaires. La dimension L_1 correspond au diamètre des surfaces planes 104 et 108. En variante, la deuxième portion 106 pourrait être sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution allongé (la forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati étant toutefois préférée et moins complexe à réaliser).

La première portion 102 étant ici de forme hémisphérique, elle a une hauteur h_1 (dimension perpendiculaire à la surface plane 104) égale à $L_1/2$. La deuxième portion 106 a une hauteur h_2 (dimension perpendiculaire à la surface plane 108) dont la valeur est indépendante de la valeur de L_1 (avec $h_2 < L_1/2$ dans le cas d'un demi-ellipsoïde de révolution aplati, ou $h_2 > L_1/2$ dans le cas d'un demi-ellipsoïde de révolution allongé). Les valeurs de L_1 et h_2 sont choisies en fonction des paramètres souhaités (dimensions, focalisation, position par rapport à la particule 100, concentration d'énergie) du nanojet photonique destiné à être obtenu à partir de cette particule 100.

La particule 100 est destinée à recevoir une lumière au niveau d'une région d'entrée 110 correspondant à la partie de la surface extérieure de la deuxième portion 106 opposée à la surface plane 108. Lors d'une telle illumination, un nanojet

photonique se forme alors au niveau d'une région de sortie 112 correspondant à la partie de la surface extérieure de la première portion 102 opposée à la surface plane 104.

Des simulations permettant de caractériser les nanojets photoniques obtenus avec les particules 100 sont par exemple réalisées par un logiciel de simulation basé sur la méthode RCWA (« Rigorous Coupled-Wave Analysis », ou méthode rigoureuse des ondes couplées), également appelée méthode modale de Fourier. Cette méthode, très largement utilisée dans le calcul électromagnétique des réseaux de diffraction, consiste à calculer l'expression complexe (module et phase) du champ électrique à l'intérieur d'un réseau sous la forme d'ondes couplées se propageant suivant l'axe normal au réseau, et permet de calculer les propriétés optiques d'un réseau périodique ayant une dimension infinie. L'utilisation d'une telle méthode est par exemple décrite dans le document « Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings » de M.G. Moharam et al., J. Opt. Soc. Am., vol.72, n°10, octobre 1982.

Même si la méthode de calcul de RCWA est rigoureuse, un nombre suffisant d'ordres de diffraction sont conservés lors des simulations, généralement entre 8 et 50, par exemple 12. En effet, même si le cas d'une onde incidente perpendiculaire est étudié avec une excitation de l'ordre 0 de diffraction, un certain nombre d'ordres de diffraction sont conservés pour ne pas tronquer trop sévèrement la précision des calculs. En théorie, un nombre infini d'ordres sont nécessaires mais les ordres supérieurs non excités correspondent à des ondes évanescentes et ne contiennent pas d'énergie. L'erreur commise en les supprimant du calcul est donc faible. Lorsque cette méthode est mise en œuvre pour la simulation des nanojets photoniques à partir de particules, elle utilise un découpage spatial du réseau de particules dans la direction orthogonale au réseau.

Les simulations réalisées permettent d'obtenir la distribution spatiale du champ électrique dans et autour des particules 100 à partir de laquelle la répartition de l'énergie des nanojets photoniques peut être calculée.

Les longueurs A des nanojets photoniques obtenus sont également calculées à partir des simulations réalisées. La longueur A d'un nanojet photonique est la dimension du nanojet photonique calculée à partir du profil du champ électrique

correspondant au nanojet photonique dans un plan P_1 qui est à la fois parallèle à la direction de propagation principale de l'énergie lumineuse depuis la région de sortie 112 (qui est parallèle à la direction de propagation de la lumière envoyée sur la région d'entrée 110 lorsque cette lumière est appliquée sur la particule 100 avec un angle d'incidence nul), perpendiculaire au substrat 101 (ou au plan de la surface sur laquelle les particules 100 sont symboliquement disposées du fait que les simulations sont ici réalisées en faisant abstraction du substrat 101), qui passe par le centre de la particule 100 qui produit le nanojet photonique, et dont l'abscisse est parallèle à la direction de propagation principale de l'énergie lumineuse depuis la région de sortie 112. Sur l'exemple de la figure 3, cette longueur A correspond à la dimension du nanojet photonique selon l'axe Z dans le plan P_1 , et le plan P_1 correspond à un plan parallèle au plan (Y,Z) qui passe par le centre de la particule 100. La longueur A correspond à la plus grande dimension du nanojet photonique. Cette longueur A est exprimée selon l'équation suivante :

$$A = (Z_{\text{max_extérieur}} - Z_{\text{sortie}}) + (Z_{\text{min_extérieur}} - Z_{\text{max_extérieur}})$$

avec $Z_{\text{max_extérieur}}$: position, hors de la particule 100, de la valeur maximale du champ électrique le long de l'abscisse du plan P_1 ;

Z_{sortie} : position du champ électrique en sortie de la particule 100 le long de l'abscisse du plan P_1 (c'est-à-dire la position de la région de sortie 112 dans le plan P_1) ;

$Z_{\text{min_extérieur}}$: position, hors de la particule 100, de la valeur minimale du champ électrique le long de l'abscisse du plan P_1 .

Les positions ΔZ des nanojets photoniques obtenus par rapport aux régions de sortie des particules 100 sont également calculées. La position ΔZ d'un nanojet photonique est calculée à partir du profil du champ électrique dans le plan P_1 , et est exprimée selon l'équation suivante :

$$\Delta Z = Z_{\text{max_extérieur}} - Z_{\text{sortie}}$$

Les largeurs à mi-hauteur B (FWHM) des nanojets photoniques obtenus sont également calculées à partir des simulations réalisées. La largeur B d'un nanojet photonique est calculée à partir du profil du champ électrique correspondant au nanojet photonique dans un plan P_2 qui est perpendiculaire à la direction de propagation

principale de l'énergie lumineuse depuis la région de sortie 112, qui passe par la position $Z_{\text{max_extérieur}}$, et dont l'abscisse est parallèle au substrat 101 ou au plan de la surface sur laquelle les particules 100 sont symboliquement disposées. La largeur à mi-hauteur B est égale à la largeur du profil du champ électrique dans le plan P_2 , à une hauteur
5 correspondant à la moitié de la valeur maximale du champ électrique dans ce plan P_2 . Sur l'exemple de la figure 3, largeur à mi-hauteur B correspond à la dimension du nanojet photonique selon l'axe X dans le plan P_2 , et le plan P_2 correspond à un plan parallèle au plan (X,Z) qui passe par la position $Z_{\text{max_extérieur}}$.

A partir de la largeur à mi-hauteur B et de la longueur A d'un nanojet
10 photonique, il est possible d'exprimer la focalisation F de ce nanojet photonique, telle que $F = 100 \cdot (A/B)$. Cette focalisation F peut être assimilée au rapport de forme du nanojet photonique, multiplié par 100.

Enfin, ces simulations permettent de déterminer la valeur du champ électrique à l'intérieur des particules 100.

15 Les résultats de simulation décrits ci-dessous sont obtenus pour les paramètres de simulation suivants :

- les particules 100 sont disposées en quinconce telles que chaque particule 100 est en contact avec les particules 100 voisines (formant donc une monocouche de type hexagonal compact), et en considérant qu'elles ne sont pas
20 disposées sur un substrat (c'est-à-dire en considérant un substrat et un superstrat théoriques identiques et d'indice optique égal à 1) ;

- les particules 100 sont illuminées avec une lumière incidente de longueur d'onde égale à 365 nm, polarisée linéairement et formant un angle d'incidence nul avec les régions d'entrée 110 des particules 100 (formant une onde plane par rapport
25 aux régions d'entrée 110) ; L'orientation du champ électrique de l'onde incidente est parallèle à une des trois directions du réseau hexagonal formé par la couche de particules 100 ;

- la première portion 102 est modélisée avec 17 couches discrétisées chacune de hauteur (dimension selon l'axe Z) égale à 28,57 nm, et la deuxième portion

106 est modélisée avec 18 couches discrétisées chacune de hauteur (dimension selon l'axe Z) dépendant de la hauteur h_2 désirée ;

- les portions 102 et 106 sont des portions de silice d'indice de réfraction égal à 1,45 et de permittivité égale à 2,1025 F/m ;

5 - les particules 100 sont entourées d'air de permittivité égale à 1 F/m et d'indice de réfraction égale à 1.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des nanojets photoniques obtenus à partir d'une monocouche de type hexagonal compact de particules 100 selon le premier mode de réalisation précédemment décrit, en faisant
10 varier la hauteur h_2 de la deuxième portion 106.

h_2 (nm)	Energie (10^{-17} J)	Focalisation F	ΔZ (nm)	B (nm)	A (nm)
450	212	315	26	221	697
360	249	397	0	190	756
256	275	385	117	213	822
180	265	297	354	305	906
90	238	257	400	357	919
0	2,28	204	426	497	1017

Dans le tableau ci-dessus, la valeur de l'énergie indiquée correspond au résultat d'une intégration de l'énergie, c'est-à-dire la somme de l'énergie présente dans le
15 nanojet photonique. Enfin, les valeurs ci-dessus sont obtenues en considérant que le diamètre L_1 des surfaces planes 104 et 108 est égal à 1 μm (et donc que $h_1 = 500$ nm).

Ce tableau montre que le meilleur compromis sur les paramètres des nanojets photoniques est obtenu lorsque $h_2 = 256$ nm, c'est-à-dire lorsque le rapport de h_2 sur $L_1/2$ est proche ou égal à environ 0,5.

Par comparaison, les nanojets photoniques obtenus à partir d'une couche de type hexagonal compact de particules sphériques de diamètre égale à 1 μm , avec les mêmes paramètres de simulation, ont les caractéristiques suivantes : $B = 359 \text{ nm}$, $A = 601 \text{ nm}$, $F = 167$, $\text{Energie} = 172 \cdot 10^{-17} \text{ J}$, $\Delta Z = 26$. Ainsi, l'utilisation des particules 100 selon le premier mode de réalisation permet d'obtenir des gains notables sur l'énergie (+60 % lorsque $h_2 = 256 \text{ nm}$), la focalisation (multipliée d'un facteur égal à 1,77 lorsque $h_2 = 256 \text{ nm}$), la largeur à mi-hauteur (-41 % lorsque $h_2 = 256 \text{ nm}$), la longueur (+37 % lorsque $h_2 = 256 \text{ nm}$) des nanojets photoniques obtenus, et permet d'avoir une position ΔZ des nanojets photoniques en dehors des particules 100.

En éloignant les particules 100 les unes des autres telles que les centres de deux particules 100 voisines soient espacés d'une distance égale à 1,2 μm , ce qui correspond à des particules voisines éloignées de 200 nm les unes des autres, et en choisissant $h_2 = 256 \text{ nm}$, l'énergie obtenue est égale à $225 \cdot 10^{-17} \text{ J}$, la focalisation F obtenue est égale à 162, la position ΔZ est égale à 17, la largeur à mi-hauteur B est égale à 351 nm et la longueur A est égale à 569 nm.

En variante, il est possible que la première portion 102 de chaque particule 100 soit en forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati ou allongé, c'est-à-dire telle que $h_1 \neq L_1/2$. L'asymétrie de chaque particule 100 est obtenue du fait que l'on a toujours $h_1 \neq h_2$. Dans cette variante, la deuxième portion 106 peut être en forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati ou allongé, ou bien en forme de demi-sphère.

La figure 4 représente un deuxième mode de réalisation de particule 100. Dans ce deuxième mode de réalisation, la particule 100 comporte la première portion 102 sensiblement en forme de demi-sphère, correspondant à la partie inférieure de la particule 100, similaire à celle précédemment décrite pour la particule 100 selon le premier mode de réalisation. Cette première portion 102 comporte la surface plane 104.

La particule 100 selon ce deuxième mode de réalisation comporte également la deuxième portion 106 sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution, ou demi-sphéroïde, aplati et tronqué, dont la surface plane 108, appelée première surface plane 108, est disposée contre la surface plane 104 de la première portion 102. Comme la surface plane 104, la première surface plane 108 a une section,

dans le plan (X,Y), en forme de disque. Les surfaces planes 104 et 108 ont, dans le plan (X,Y), des dimensions similaires, et notamment un même diamètre L_1 .

Dans ce deuxième mode de réalisation, une partie de la deuxième portion 106 est tronquée en formant une deuxième surface plane 114 opposée à la première surface plane 108. La deuxième surface plane 114 est sensiblement parallèle à la première surface plane 108 et a une forme de disque. Les dimensions de la deuxième surface plane 114 (le diamètre), dans le plan (X,Y), sont inférieures à celles de la première surface plane 108. En variante, la deuxième portion 106 pourrait être sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution allongé (la forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati étant toutefois préférée et moins complexe à réaliser).

La particule 100 comporte en outre une troisième portion 116 sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution, c'est-à-dire aplati ou allongé ou en forme de demi-sphère, dont une surface plane 118 (en forme de disque) est disposée contre la deuxième surface plane 114 de la deuxième portion 106. La deuxième surface plane 114 de la deuxième portion 106 et la surface plane 118 de la troisième portion 116 ont des dimensions similaires. La dimension L_2 (parallèle au plan (X,Y)) correspond au diamètre du disque formé au niveau des surfaces planes 114 et 118. La valeur de h_2 est indépendante de celles de L_1 et L_2 .

La troisième portion 116 étant sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution, elle a une hauteur h_3 (dimension perpendiculaire à la surface plane 118 et parallèle à l'axe Z) proche de ou égale à $L_2/2$. Les valeurs L_1 , h_2 , L_2 et h_3 sont choisies en fonction des paramètres souhaités du nanojet photonique destiné à être obtenu à partir de cette particule 100.

Dans ce deuxième mode de réalisation, la particule 100 est destinée à recevoir une lumière au niveau de la région d'entrée 110 correspondant à la partie de la surface extérieure de la troisième portion 116 opposée à la surface plane 118. Lors d'une telle illumination, un nanojet photonique se forme alors au niveau de la région de sortie 112 qui correspond, comme dans le premier mode de réalisation, à la partie de la surface extérieure de la première portion 102 qui est opposée à la surface plane 104.

Des simulations, dans des conditions similaires à celles précédemment décrites pour la particule 100 selon le premier mode de réalisation, sont mises en œuvre afin de caractériser les nanojets photoniques obtenus à partir de telles particules 100. De plus, pour les simulations décrites ci-dessous, la troisième portion 116 est modélisée avec 15 couches discrétisées. Le paramètre N_2 correspond au nombre de couches discrétisées avec lesquelles la deuxième portion 106 est modélisée.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des nanojets photoniques obtenus à partir d'une monocouche de type hexagonal compact de particules 100 selon le deuxième mode de réalisation, en faisant varier notamment la hauteur h_3 de la troisième portion 116.

h_3 (nm)	42,75	85,65	128,55	213	257	300
h_2 (nm)	256	256	242	228	228	199
N_2	18	18	17	16	15	14
L_2 (nm)	100	200	300	500	600	700
Energie (10^{-17} J)	203	203	240	242	238	212
Focalisation F	216	381	452	468	410	381
ΔZ (nm)	44	61	247	0	0	0
B (nm)	374	183	185	167	183	190
A (nm)	810,22	698	837	783	754	724

Dans le tableau ci-dessus, la valeur de l'énergie indiquée correspond au résultat d'une intégration de l'énergie, c'est-à-dire la somme de l'énergie présente dans le nanojet photonique. Les valeurs ci-dessus sont obtenues en considérant que le diamètre L_1 des surfaces planes 104 et 108 est égal à 1 μm .

Ce tableau montre que le meilleur compromis sur les paramètres des nanojets photoniques est obtenu lorsque $h_3 = 213$ nm et $L_2 = 500$ nm.

Ainsi, par rapport à la génération de nanojets photoniques à partir d'une couche de type hexagonal compact de particules sphériques de diamètre égale à 1 μ m et avec les mêmes paramètres de simulation, l'utilisation des particules 100 selon ce deuxième mode de réalisation permet d'obtenir des gains notables sur l'énergie (+41 % lorsque $h_3 = 213$ nm), la focalisation (multipliée d'un facteur égal à 2,8 lorsque $h_3 = 213$ nm), la largeur à mi-hauteur (-53 % lorsque $h_3 = 213$ nm), la longueur (+30 % lorsque $h_3 = 213$ nm) des nanojets photoniques obtenus, et permet d'avoir une position ΔZ des nanojets en dehors des particules 100.

En éloignant les particules 100 les unes des autres telles que les centres de deux particules 100 voisines soient espacés d'une distance égale à 1,2 μ m, et en choisissant $h_3 = 213$ nm, $h_2 = 228$ nm et $N_2 = 16$, l'énergie obtenue est égale à $208 \cdot 10^{-17}$ J, la focalisation F obtenue est égale à 384, la position ΔZ est égale à 0, la largeur à mi-hauteur B est égale à 144 nm et la longueur A est égale à 553 nm.

En variante, il est possible que la première portion 102 de chaque particule 100 soit en forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati ou allongé. Dans cette variante, la deuxième portion 106 peut être en forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati ou allongé, ou bien en forme de demi-sphère.

La figure 5 représente un troisième mode de réalisation de particule 100. Dans ce troisième mode de réalisation, la particule 100 comporte la première portion 102 sensiblement en forme de demi-sphère, correspondant à la partie inférieure de la particule 100, comme dans les deux précédents modes de réalisation. Cette première portion 102 comporte la surface plane 104.

La particule 100 selon ce troisième mode de réalisation comporte également la deuxième portion 106 sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution, ou demi-sphéroïde, aplati et tronqué, comme dans le deuxième mode de réalisation, dont la première surface plane 108 est disposée contre la surface plane 104 de la première portion 102. Comme la surface plane 104, la première surface plane 108 (en forme de disque) a une section, dans le plan (X,Y), en forme de disque. Les surfaces

planes 104 et 108 ont, dans le plan (X,Y), des dimensions similaires, et notamment un même diamètre L_1 .

Comme précédemment, la deuxième portion 106 est tronquée en formant la deuxième surface plane 114 opposée à la première surface plane 108. La deuxième surface plane 114 est sensiblement parallèle à la première surface plane 108, et a une forme de disque. Les dimensions de la deuxième surface plane 114 (le diamètre), dans le plan (X,Y), sont inférieures à celles de la première surface plane 108.

La particule 100 comporte également la troisième portion 116 qui est ici sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution tronqué aplati ou en forme de demi-sphère tronquée, dont une première surface plane 118 (en forme de disque) est disposée contre la deuxième surface plane 114 de la deuxième portion 106. La deuxième surface plane 114 de la deuxième portion 106 et la première surface plane 118 de la troisième portion 116 ont des dimensions similaires.

Dans ce troisième mode de réalisation, une partie de la troisième portion 116 est tronquée en formant une deuxième surface plane 120 opposée à la première surface plane 118. La deuxième surface plane 120 est sensiblement parallèle à la première surface plane 118 et a une forme de disque. Les dimensions de la deuxième surface plane 120 (le diamètre), dans le plan (X,Y), sont inférieures à celles de la première surface plane 118.

La particule 100 comporte en outre une quatrième portion 122 sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati ou en forme de demi-sphère, dont une surface plane 124 (en forme de disque) est disposée contre la deuxième surface plane 120 de la troisième portion 116. La deuxième surface plane 120 de la troisième portion 116 et la surface plane 124 de la quatrième portion 122 ont des dimensions similaires. La dimension L_3 (parallèle au plan (X,Y)) correspond au diamètre du disque formé au niveau des surfaces planes 120 et 124.

La valeur de h_2 est indépendante de celles de L_1 , L_2 et L_3 .

La quatrième portion 122 étant sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution, elle a une hauteur h_4 (dimension perpendiculaire à la surface plane 124 et parallèle à l'axe Z) proche de ou égale à $L_3/2$. Les valeurs L_1 , h_2 , L_2 , L_3 , h_3 et h_4

sont choisies en fonction des paramètres souhaités du nanojet photonique destiné à être obtenu à partir de cette particule 100.

Dans ce troisième mode de réalisation, la particule 100 est destinée à recevoir une lumière au niveau de la région d'entrée 110 correspondant à la partie de la surface extérieure de la quatrième portion 122 opposée à la surface plane 124. Lors d'une telle illumination, un nanojet photonique se forme alors au niveau de la région de sortie 112 qui correspond, comme dans les précédents modes de réalisation, à la partie de la surface extérieure de la première portion 102 qui est opposée la surface plane 104.

Des simulations, dans des conditions similaires à celles précédemment décrites pour la particule 100 selon les premier et deuxième modes de réalisation, sont mises en œuvre afin de caractériser les nanojets photoniques obtenus à partir de telles particules 100. De plus, pour les simulations décrites ci-dessous, la quatrième portion 122 est modélisée avec 15 couches discrétisées, et les paramètres suivants sont appliqués : $L_2 = 700$ nm, $N_2 = 13$ et $h_2 = 260$ nm. Le paramètre N_3 correspond au nombre de couches discrétisées avec lesquelles la deuxième portion 106 est modélisée.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des nanojets photoniques obtenus à partir d'une monocouche de type hexagonal compact de particules 100 selon le troisième mode de réalisation, en faisant varier notamment la hauteur h_4 de la quatrième portion 122.

h_4 (nm)	42,75	85,65	128,55	171	214
h_3 (nm)	300	280	220	220	220
N_3	15	14	11	11	11
Energie (10^{-17} J)	235	232	243	215	162
Focalisation F	177	374	200	354	342
ΔZ (nm)	7	7	8	4	0
B (nm)	397	190	359	198	190

A (nm)	703	712	721	701	651
--------	-----	-----	-----	-----	-----

Dans le tableau ci-dessus, la valeur de l'énergie indiquée correspond au résultat d'une intégration de l'énergie, c'est-à-dire la somme de l'énergie présente dans le nanojet photonique. Les valeurs ci-dessus sont obtenues en considérant que le diamètre L_1 des surfaces planes 104 et 108 est égal à 1 μm .

En éloignant les particules 100 les unes des autres telles que les centres de deux particules 100 voisines soient espacés d'une distance égale à 1,2 μm , et en choisissant $h_4 = 128,55 \text{ nm}$, $h_3 = 260 \text{ nm}$, $N_3 = 13$, $h_2 = 240 \text{ nm}$ et $N_2 = 12$, l'énergie obtenue est égale à 397.10^{-17} J , la focalisation F obtenue est égale à 296, la position ΔZ est égale à 90, la largeur à mi-hauteur B est égale à 160 nm et la longueur A est égale à 475 nm. Ce cas correspond au meilleur compromis des paramètres des nanojets photoniques obtenus pour des particules 100 selon ce troisième mode de réalisation.

Ainsi, par rapport à la génération de nanojets photoniques à partir d'une couche de type hexagonal compact de particules sphériques de diamètre égale à 1 μm et avec les mêmes paramètres de simulation, l'utilisation des particules 100 selon ce troisième mode de réalisation permet d'obtenir des gains notables sur l'énergie (+131 % lorsque $h_4 = 128,55 \text{ nm}$ avec des particules éloignées de 200 nm les unes des autres), la focalisation (multipliée d'un facteur égal à 1,77 lorsque $h_4 = 128,55 \text{ nm}$ avec des particules éloignées de 200 nm les unes des autres), la largeur à mi-hauteur (-55,4 % lorsque $h_4 = 128,55 \text{ nm}$ avec des particules éloignées de 200 nm les unes des autres) et permet d'avoir une position ΔZ des nanojets en dehors des particules 100.

Les simulations ci-dessus réalisées pour les trois modes de réalisation des particules 100 montrent que selon les paramètres souhaités pour les nanojets photoniques, les particules 100 servant à générer ces nanojets photoniques sont réalisées selon l'un des trois modes de réalisation précédemment décrit choisi en fonction des caractéristiques souhaitées. Par exemple, si l'objectif technologique nécessite de générer des nanojets photoniques relativement long, il est avantageux de réaliser les particules 100 selon le premier mode de réalisation, c'est-à-dire comportant les deux portions 102 et 106. Si l'énergie est le critère privilégié, il est avantageux de réaliser les particules 100

selon le troisième mode de réalisation, c'est-à-dire comportant les quatre portions 102, 106, 116 et 122. Si la focalisation est le critère privilégié, il est avantageux de réaliser les particules 100 selon le deuxième mode de réalisation, c'est-à-dire comportant les trois portions 102, 106 et 116.

5 En variante, il est possible que la première portion 102 de chaque particule 100 soit en forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati ou allongé. Dans cette variante, la deuxième portion 106 peut être en forme de demi-ellipsoïde de révolution aplati ou allongé, ou bien en forme de demi-sphère.

10 Dans les différents modes de réalisation ci-dessus, la particule 100 est décrite comme étant formée de plusieurs portions. Cette description en plusieurs portions distinctes permet de décrire géométriquement la particule 100. Toutefois, la particule 100 n'est formée physiquement que par une seule portion de matériau diélectrique dont la forme générale correspond à l'ensemble formé de ces différentes portions réunies. Ainsi, les traits pointillés représentant les surfaces au niveau des
15 jonctions de ces différentes portions sont des séparations théoriques de ces portions et ne correspondent pas à des délimitations physiques séparant les différentes portions les unes des autres.

 Bien que les dimensions des nanojets photoniques décrits précédemment soient nanométriques, il est possible de générer des jets photoniques de
20 dimensions micrométriques en adaptant les dimensions des particules 100, notamment la dimension L_1 .

 Quel que soit le mode de réalisation choisi, les particules 100 peuvent être réalisées par gravure RIE (gravure ionique réactive) du matériau diélectrique choisi pour former les particules 100, cette gravure pouvant être mise en œuvre à partir de
25 particules sphériques synthétisées par exemple par réaction d'oxydoréduction, précipitation ou encore polymérisation, ou toute autre technique adaptée. Le document « Synthèse et valorisation de particules colloïdales de morphologie et de fonctionnalités de surface contrôlées » de A. Perro, thèse de l'université Bordeaux 1, n° de l'ordre : 3251, 2006, décrit par exemple différentes techniques de synthèse de particules sphériques à
30 partir desquelles il est possible de réaliser les particules 100. D'autres techniques peuvent

également être combinées pour la réalisation des particules 100, comme par exemple la gravure RIE, l'ablation laser, le dépôt sous vide, la gravure chimique, le greffage, etc.

Dans la description ci-dessus des particules 100 selon les différents modes de réalisation, les formes géométriques utilisées pour définir les particules 100 doivent être comprises comme n'étant pas parfaites, en raison des tolérances et imprécisions dues notamment aux techniques mises en œuvre et aux matériaux utilisés pour réaliser les particules 100.

Une monocouche de particules 100 est par exemple réalisée via un dépôt au déroulé dont un exemple est donné ci-dessous.

Les particules 100 sont disposées dans une solution se trouvant dans un système de dispense. Les particules 100 flottent à la surface du liquide porteur. Les particules 100 sont envoyées sur un convoyeur liquide permettant de transporter et agencer les particules 100 afin de former une couche compacte de particules 100. Ce convoyeur liquide s'écoule tout d'abord sur un plan incliné puis dans une zone horizontale appelée zone de transfert où les particules 100 s'accumulent. La liaison entre le liquide porteur et le substrat est assurée par un pont capillaire. Un substrat flexible ou rigide est mis en mouvement par un autre convoyeur (par exemple un rouleau d'entraînement dans le cas d'un substrat flexible, ou par une platine de translation verticale dans le cas d'un substrat rigide) au niveau du pont capillaire, disposant ainsi les particules 100 sur le substrat sous la forme d'une monocouche.

En variante, une couche de particules 100 peut être réalisée par dépôt par électrophorèse, ou bien les particules 100 peuvent être réparties par forces de capillarité de flottaison ou d'immersion sur le substrat.

Selon une autre variante, la monocouche de particules 100 peut être formée par un procédé de type Langmuir-Blodgett. Dans ce cas, les particules 100 sont dispensées à la surface d'un liquide. Une barrière vient ensuite compresser les particules 100 afin de les ordonner. La couche de particules 100 est ensuite déposée par tirage du substrat de manière verticale, la barrière accompagnant le mouvement du substrat pour garder une compression constante sur les particules 100. Le document « A Straightforward Way to Form Close-Packed TiO₂ Particle Monolayers at an Air/Water

Interface » de E. Cathy et al., Langmuir 2011, 27(3), pp. 887-894 décrit par exemple un tel procédé.

REVENDICATIONS

1. Procédé de génération de nanojets photoniques, comportant au moins une illumination de particules (100) de matériau diélectrique au moins partiellement transparentes vis-à-vis d'une lumière illuminant une région d'entrée (110) de chaque particule (100), formant un nanojet photonique au niveau d'une région de sortie (112), opposée à la région d'entrée (110), de chaque particule (100), dans lequel chaque particule (100) comporte au moins :

- une première portion (102) sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution et formant la région de sortie (112) de la particule (100),

- une deuxième portion (106) sensiblement en forme d'au moins une partie d'un demi-ellipsoïde de révolution et comportant une première surface plane (108) sensiblement en forme de disque et disposée contre une surface plane (104) de la première portion (102),

et dans lequel chaque particule (100) est telle que :

- la surface plane (104) de la première portion (102) et la première surface plane (108) de la deuxième portion (106) ont des dimensions similaires,

- une dimension de la deuxième portion (106), qui est perpendiculaire à la première surface plane (108) de la deuxième portion (106), est différente d'une dimension de la première portion (102) qui est perpendiculaire à la première surface plane (108) de la deuxième portion (106),

- la région de sortie (112) est formée par une partie de la première portion (102) opposée à la surface plane (104) de la première portion (102).

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel chaque particule (100) est telle que :

- la première portion (102) est sensiblement en forme de demi-sphère,
- la deuxième portion (106) est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution aplati,

- la région d'entrée (110) est formée par une partie de la deuxième portion (106) opposée à la première surface plane (108) de la deuxième portion (106).

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel :

- 5 - chaque particule (100) est telle que la deuxième portion (106) est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution tronqué comportant une deuxième surface plane (114), opposée à la première surface plane (108) de la deuxième portion (106), de dimensions inférieures à celles de la première surface plane (108) de la deuxième portion (106) et qui est sensiblement en forme de disque,
- 10 - chaque particule (100) comporte en outre une troisième portion (116) sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution, dont une première surface plane (118) est disposée contre la deuxième surface plane (114) de la deuxième portion (106) et a des dimensions similaires à celles de la deuxième surface plane (114) de la deuxième portion (106),
- 15 - chaque particule (100) est telle que la région d'entrée (110) est formée par une partie de la troisième portion (116) opposée à la première surface plane (118) de la troisième portion (116).

4. Procédé selon la revendication 1, dans lequel :

- 20 - chaque particule (100) est telle que la deuxième portion (106) est sensiblement en forme d'un demi-ellipsoïde de révolution tronqué comportant une deuxième surface plane (114), opposée à la première surface plane (108) de la deuxième portion (106), de dimensions inférieures à celles de la première surface plane (108) de la deuxième portion (106) et qui est sensiblement en forme de disque,
- 25 - chaque particule (100) comporte en outre une troisième portion (116) sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution tronqué comportant une première surface plane (118) sensiblement en forme de disque, de dimensions similaires à celles de la deuxième surface plane (114) de la deuxième portion (106) et qui est disposée contre la deuxième surface plane (114) de la deuxième portion (106), et
- 30 comportant une deuxième surface plane (120), opposée à la première surface plane (118)

de la troisième portion (116), sensiblement en forme de disque et de dimensions inférieures à celles de la première surface plane (118) de la troisième portion (116),

- chaque particule (100) comporte en outre une quatrième portion (122) sensiblement en forme de demi-ellipsoïde de révolution dont une surface plane (124) est disposée contre la deuxième surface plane (120) de la troisième portion (116) et a des dimensions similaires à celles de la deuxième surface plane (120) de la troisième portion (116),

- chaque particule (100) est telle que la région d'entrée (110) est formée par une partie de la quatrième portion (122) opposée à la surface plane (124) de la quatrième portion (122).

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le matériau diélectrique est un oxyde et/ou un polymère et/ou un matériau hybride organique / inorganique.

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la lumière illuminant les régions d'entrée (110) des particules (100) est produite par un dispositif laser.

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les particules (100) sont disposées les unes à côté des autres en quinconce sur plusieurs lignes et plusieurs colonnes, et/ou disposées en contact les unes à côté des autres.

8. Procédé de texturation d'une surface de matériau, comportant la mise en œuvre d'un procédé de génération de nanojets photoniques selon l'une des revendications précédentes, et dans lequel les particules (100) sont disposées en monocouche sur la surface de matériau avant l'illumination des particules (100).

9. Procédé de texturation selon la revendication 8, dans lequel l'illumination des particules (100) est réalisée avec une lumière de type laser telle que les nanojets photoniques gravent le matériau de la surface par ablation.

5 10. Procédé de texturation selon la revendication 8, dans lequel l'illumination des particules (100) est réalisée avec une lumière de type laser telle que les nanojets photoniques réalisent une fusion localisée des particules (100) avec le matériau de la surface.

10 11. Procédé de photoréticulation d'une surface de matériau, comportant la mise en œuvre d'un procédé de génération de nanojets photoniques selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel les particules (100) sont disposées en monocouche sur la surface de matériau avant l'illumination des particules (100), et dans lequel l'illumination des particules (100) est réalisée avec une lumière UV cohérente ou
15 incohérente.

12. Procédé de photoréticulation selon la revendication 11, dans lequel le matériau de la surface est un matériau photosensible, le procédé de photoréticulation comportant en outre, après la mise en œuvre du procédé de génération
20 des nanojets photoniques, une étape de développement du matériau photosensible.

1/2

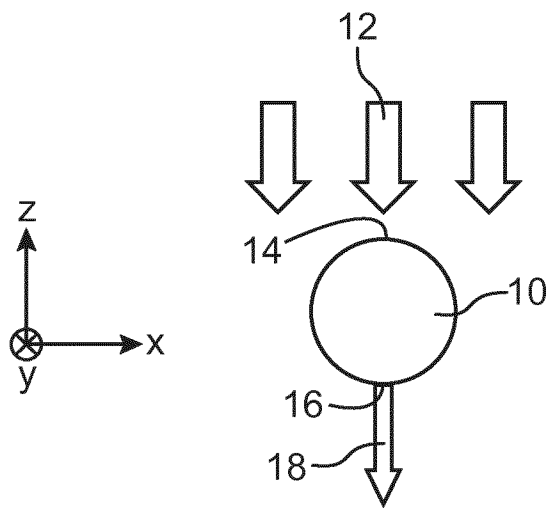


FIG. 1

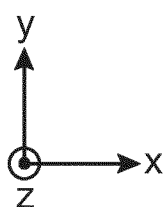
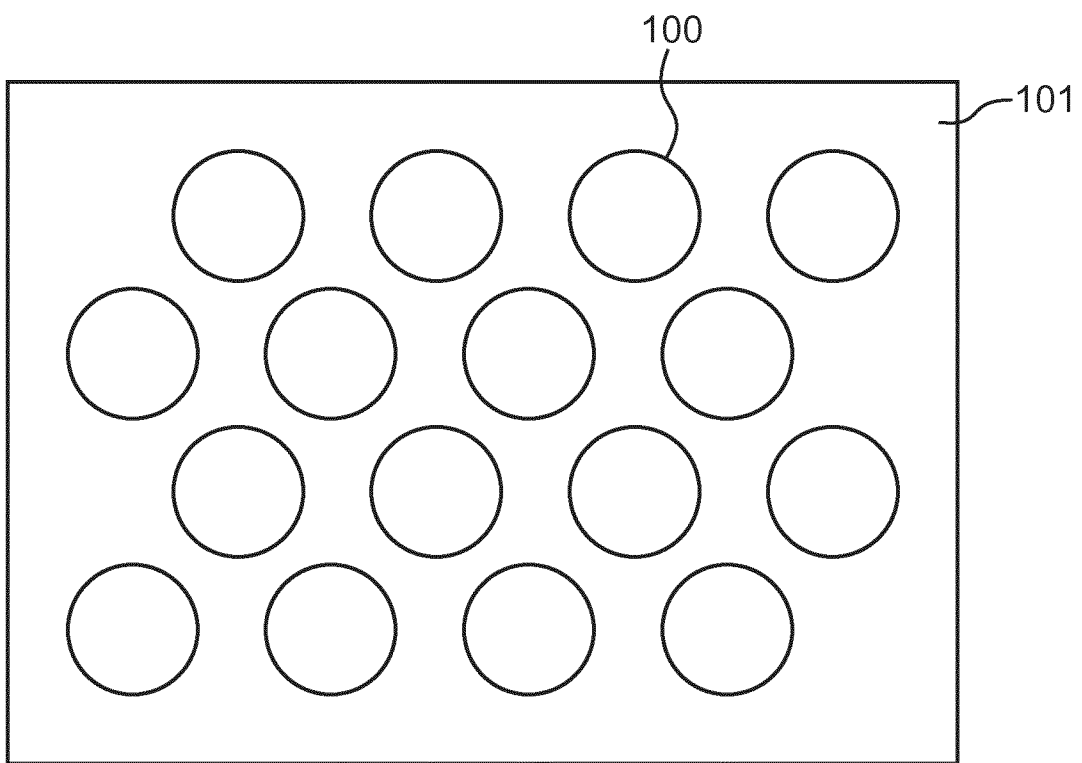
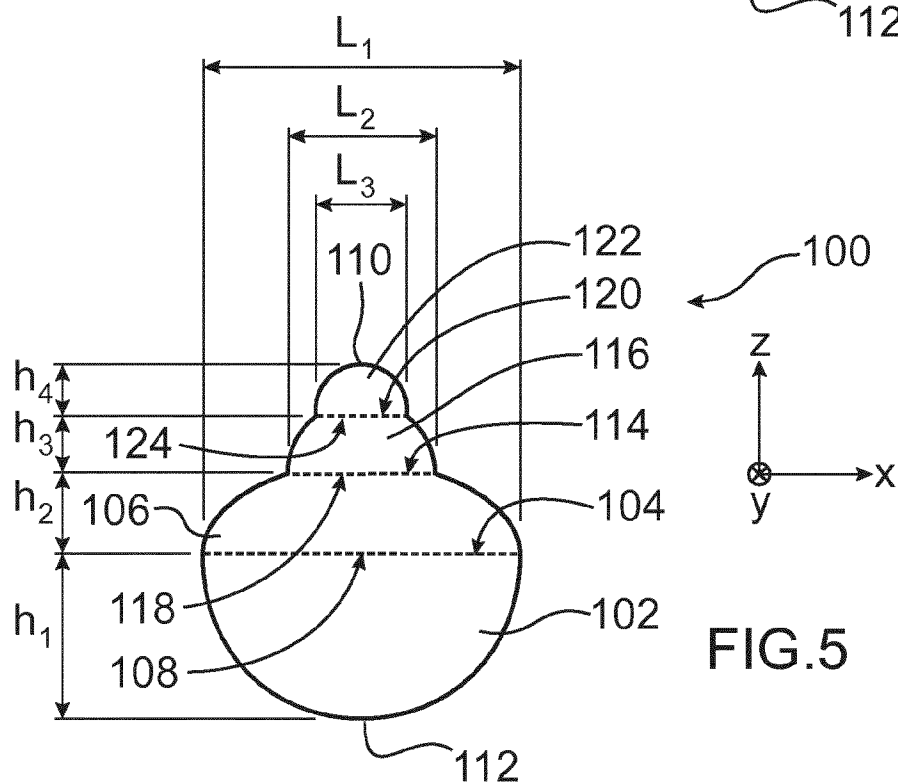
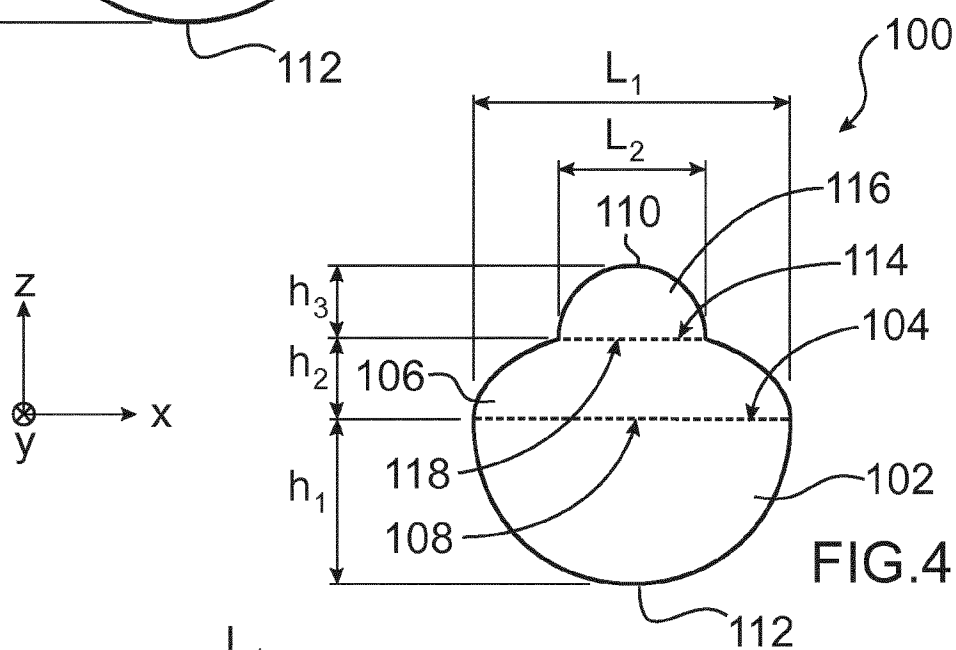
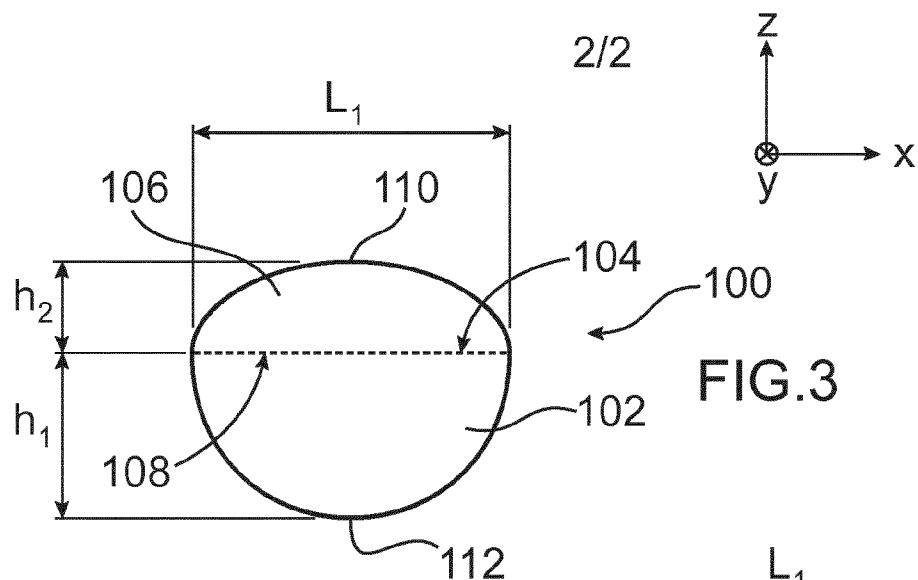


FIG. 2



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/057255

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. B01J13/02
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
B01J G02B G02F B82Y H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CHENG-YANG LIU: "Photonic nanojet shaping of dielectric non-spherical microparticles", PHYSICA E: LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS AND NANOSTRUCTURES ELSEVIER B.V. NETHERLANDS, vol. 64, 5 July 2014 (2014-07-05), pages 23-28, XP002753372, ISSN: 1386-9477 page 24; figure 1	1-12
A	JALALI T ET AL: "Highly confined photonic nanojet from elliptical particles", JOURNAL OF MODERN OPTICS TAYLOR & FRANCIS UK, vol. 61, no. 13, 2014, pages 1069-1076, XP002753373, ISSN: 0950-0340 page 1070; figure 1	1-12
	----- -/--	



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

8 June 2016

Date of mailing of the international search report

17/06/2016

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Quertemont, Eric

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2016/057255

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JIAN YE ET AL: "Preparation of non-spherical particles by shell-shield etching for near-field nanopatterning", NANOTECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, vol. 25, no. 27, 24 June 2014 (2014-06-24), page 275303, XP020266879, ISSN: 0957-4484, DOI: 10.1088/0957-4484/25/27/275303 [retrieved on 2014-06-24] figure 1 -----	1-12

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. B01J13/02 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) B01J G02B G02F B82Y H01L		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, INSPEC		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	CHENG-YANG LIU: "Photonic nanojet shaping of dielectric non-spherical microparticles", PHYSICA E: LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS AND NANOSTRUCTURES ELSEVIER B.V. NETHERLANDS, vol. 64, 5 juillet 2014 (2014-07-05), pages 23-28, XP002753372, ISSN: 1386-9477 page 24; figure 1	1-12
A	JALALI T ET AL: "Highly confined photonic nanojet from elliptical particles", JOURNAL OF MODERN OPTICS TAYLOR & FRANCIS UK, vol. 61, no. 13, 2014, pages 1069-1076, XP002753373, ISSN: 0950-0340 page 1070; figure 1	1-12
----- -/-		
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☐ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
8 juin 2016		17/06/2016
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Quertemont, Eric

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	JIAN YE ET AL: "Preparation of non-spherical particles by shell-shield etching for near-field nanopatterning", NANOTECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, vol. 25, no. 27, 24 juin 2014 (2014-06-24), page 275303, XP020266879, ISSN: 0957-4484, DOI: 10.1088/0957-4484/25/27/275303 [extrait le 2014-06-24] figure 1 -----	1-12