

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

①① N° de publication : **3 120 138**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **21 01744**

⑤① Int Cl⁸ : **G 02 B 5/02 (2020.12)**, G 02 B 27/00, H 01 L 27/146,
H 01 L 21/302

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Dispositif optique.

②② Date de dépôt : 23.02.21.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 26.08.22 Bulletin 22/34.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 03.11.23 Bulletin 23/44.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *STMICROELECTRONICS
(CROLLES 2) SAS Société par actions simplifiée —
FR.*

⑦② Inventeur(s) : ARNAUD Arthur.

⑦③ Titulaire(s) : *STMICROELECTRONICS (CROLLES
2) SAS Société par actions simplifiée.*

⑦④ Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

FR 3 120 138 - B1



Description

Titre de l'invention : *Dispositif optique*

Domaine technique

[0001] La présente description concerne de façon générale les dispositifs optiques, par exemple les pixels et les diffuseurs optiques.

Technique antérieure

[0002] Les pixels connus comprennent une couche semiconductrice dans laquelle est définie une zone photosensible, ou zone de photoconversion, généralement une photodiode, par exemple une photodiode pincée.

[0003] Afin d'augmenter l'efficacité quantique de ces pixels, il est souhaitable de prévoir, sur une face de la couche recevant la lumière, des structures modifiant la direction de propagation de la lumière, ce qui permet d'augmenter le chemin optique de la lumière dans la photodiode, et donc l'efficacité quantique du pixel. Cela est, par exemple, le cas lorsque la couche est en silicium et que la lumière reçue est de la lumière infrarouge, par exemple à une longueur d'onde de l'ordre de 940 nm.

[0004] En outre, des diffuseurs optiques connus comprennent une couche traversée par de la lumière. Une face de la couche par laquelle la lumière sort du diffuseur, c'est-à-dire la face de la couche configurée pour émettre de la lumière, comprend des structures modifiant la direction de propagation de la lumière. A titre d'exemple, ces diffuseurs optiques connus comprennent une couche de silicium lorsqu'ils sont prévus pour diffuser de la lumière infrarouge, par exemple à une longueur d'onde de l'ordre de 940 nm.

Résumé de l'invention

[0005] Il existe un besoin de pallier tout ou partie des inconvénients des dispositifs optiques (pixels et diffuseurs optiques) connus décrits ci-dessus.

[0006] Par exemple, il serait souhaitable de disposer de pixels ayant une efficacité quantique plus grande que celle des pixels connus décrits ci-dessus.

[0007] Par exemple, il serait souhaitable de disposer de diffuseurs optiques permettant une meilleure diffusion de la lumière émise par rapport aux diffuseurs optiques décrits ci-dessus.

[0008] Un mode de réalisation pallie tout ou partie des inconvénients des dispositifs optiques connus tels que décrits ci-dessus.

[0009] Un mode de réalisation prévoit un dispositif optique comprenant une couche ayant une face configurée pour être traversée par de la lumière à une longueur d'onde de fonctionnement du dispositif optique, dans lequel la face comprend une structure fractale dépourvue de symétrie de révolution, la structure fractale comprenant des

évidements pénétrant dans la couche sur une partie seulement de l'épaisseur de la couche.

- [0010] Selon un mode de réalisation, chaque évidement a, dans un plan de ladite face, des dimensions au moins deux fois plus faibles que la longueur d'onde de fonctionnement.
- [0011] Selon un mode de réalisation, les évidements sont des trous borgnes, de préférence ayant une forme cylindrique, cubique, parallélépipédique rectangle, ou pyramidale, ou des tranchées.
- [0012] Selon un mode de réalisation, la structure fractale correspond à une fractale qui, exprimée dans un L-système, est choisie parmi :
- une courbe de Hilbert, chaque segment de la courbe de Hilbert correspondant à un évidement de la structure fractale ;
 - une courbe de Peano, chaque segment de la courbe de Peano correspondant à un évidement de la structure fractale ; et
 - un arbre en H de Mandelbrot, chaque segment de l'arbre en H de Mandelbrot correspondant à un évidement de la structure fractale.
- [0013] Selon un mode de réalisation, la structure fractale correspond à une fractale qui, exprimée dans un L-système, est choisie parmi :
- une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire et dont l'axiome correspond à un grand carré divisé en neuf petits carrés, seul le petit carré central du grand carré correspondant à un évidement de la structure fractale ;
 - une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire et dont l'axiome correspond à un grand carré divisé en neuf petits carrés, seuls les petits carrés des diagonales du grand carré correspondant chacun à un évidement de la structure fractale ; et
 - une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire et dont l'axiome correspond à un grand carré divisé en neuf petits carrés, seuls les petits carrés des coins du grand carrés correspondant chacun à un évidement de la structure fractale.
- [0014] Selon un mode de réalisation, la structure fractale correspond à une fractale qui, exprimée dans un L-système, est choisie parmi :
- une fractale basée sur des règles de type Cantor binaire et dont l'axiome correspond à un grand carré divisé en quatre petits carrés, un seul des petits carrés correspondant à un évidement de la structure fractale ; et
 - une fractale basée sur des règles de type Cantor binaire et dont l'axiome correspond à un carré divisé en quatre petits carrés, seuls les petits carrés d'une diagonale du grand carré correspondant chacun à un évidement de la structure fractale.
- [0015] Selon un mode de réalisation, la structure fractale est au moins d'ordre 3.
- [0016] Selon un mode de réalisation, tous les évidements pénètrent sur une même profondeur dans la couche.
- [0017] Selon un mode de réalisation, une profondeur de chaque évidement dans la couche

diminue quand l'ordre auquel l'évidement est généré augmente.

- [0018] Selon un mode de réalisation, la couche est en silicium.
- [0019] Un mode de réalisation prévoit un pixel comprenant une zone photosensible disposée dans la couche d'un dispositif tel que décrit, ladite face de la couche étant configurée pour recevoir de la lumière et pour que de la lumière reçue par la zone photosensible traverse la structure fractale.
- [0020] Un mode de réalisation prévoit un diffuseur optique comprenant un dispositif tel que décrit, la couche étant configurée pour être traversée par la lumière et ladite face de la couche étant configurée pour émettre de la lumière ayant traversé la structure fractale.
- [0021] Un mode de réalisation prévoit un procédé de fabrication d'un dispositif optique tel que décrit, le procédé comprenant les étapes consistant à :
- prévoir la couche ; et
 - graver les évidements dans ladite couche.
- [0022] Selon un mode de réalisation, l'étape de gravure comprend une unique étape de gravure lors de laquelle tous les évidements sont gravés simultanément et jusqu'à une même profondeur.
- [0023] Selon un mode de réalisation, la gravure comprend des sous-étapes de gravure correspondant chacune à un ordre différent de la fractale et consistant à graver les évidements correspondant à cet ordre de la fractale, une profondeur de gravure de chaque sous-étape de gravure diminuant quand l'ordre correspondant à la sous-étape augmente.
- [0024] Selon un mode de réalisation, à chaque sous étape de gravure, les évidements précédemment gravés sont masqués.
- [0025] Selon un mode de réalisation, des évidements supplémentaires sont gravés au fond des évidements gravés à la sous étape de gravure précédente, et, à chaque sous étape de gravure, tous les évidements gravés ont des dimensions identiques.

Brève description des dessins

- [0026] Ces caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres, seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :
- [0027] la [Fig.1] représente, par une vue en coupe schématique, un exemple de mode de réalisation d'un pixel ;
- [0028] la [Fig.2] représente, par une vue de dessus schématique, le pixel de la [Fig.1] ;
- [0029] la [Fig.3] représente, par une vue en coupe schématique, un exemple d'une variante de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0030] la [Fig.4] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon un exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;

- [0031] la [Fig.5] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0032] la [Fig.6] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0033] la [Fig.7] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0034] la [Fig.8] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0035] la [Fig.9] illustre schématiquement un détail d'un exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0036] la [Fig.10] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0037] la [Fig.11] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0038] la [Fig.12] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0039] la [Fig.13] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1] ;
- [0040] la [Fig.14] illustre par une vue en coupe schématique une étape d'un mode de mise en œuvre d'un procédé de fabrication du pixel de la [Fig.1] ;
- [0041] la [Fig.15] illustre par une vue en coupe schématique une autre étape du procédé de fabrication de la [Fig.13], selon un mode de mise en œuvre ;
- [0042] la [Fig.16] illustre par une vue en coupe schématique, une variante de mise en œuvre de l'étape de la [Fig.15] ;
- [0043] la [Fig.17] illustre par une vue en coupe schématique une étape d'un mode de mise en œuvre d'un procédé de fabrication du pixel de la [Fig.3] ; et
- [0044] la [Fig.18] représente, par une vue en coupe schématique, une couche d'un diffuseur optique selon un mode de réalisation similaire au mode de réalisation du pixel de la [Fig.1].

Description des modes de réalisation

- [0045] De mêmes éléments ont été désignés par de mêmes références dans les différentes figures. En particulier, les éléments structurels et/ou fonctionnels communs aux différents modes de réalisation peuvent présenter les mêmes références et peuvent disposer de propriétés structurelles, dimensionnelles et matérielles identiques.
- [0046] Par souci de clarté, seuls les étapes et éléments utiles à la compréhension des modes de réalisation décrits ont été représentés et sont détaillés. En particulier, les applications usuelles dans lesquelles peuvent être prévus les dispositifs optiques décrits

dans la présente demande n'ont pas été détaillées, les dispositifs optiques décrits étant compatibles avec ces applications usuelles.

- [0047] Sauf précision contraire, lorsque l'on fait référence à deux éléments connectés entre eux, cela signifie directement connectés sans éléments intermédiaires autres que des conducteurs, et lorsque l'on fait référence à deux éléments reliés (en anglais "coupled") entre eux, cela signifie que ces deux éléments peuvent être connectés ou être reliés par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres éléments.
- [0048] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à des qualificatifs de position absolue, tels que les termes "avant", "arrière", "haut", "bas", "gauche", "droite", etc., ou relative, tels que les termes "dessus", "dessous", "supérieur", "inférieur", etc., ou à des qualificatifs d'orientation, tels que les termes "horizontal", "vertical", etc., il est fait référence sauf précision contraire à l'orientation des figures.
- [0049] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.
- [0050] Il est ici proposé des dispositifs optiques comprenant une couche munie d'une face destinée à être traversée par de la lumière, la face présentant, ou comprenant, une structure fractale.
- [0051] La structure fractale proposée est dépourvue de symétrie de révolution, c'est-à-dire ici qu'elle n'est pas invariante par rotation autour d'un axe de symétrie orthogonal à la face comprenant la structure fractale, ce qui la rend plus simple à mettre en œuvre qu'une structure fractale invariante par rotation autour d'un axe orthogonal à la face comprenant la structure fractale. On notera que l'on considère ici qu'une structure est invariante par rotation si et seulement si elle est invariante quel que soit l'angle de la rotation.
- [0052] En outre, la structure fractale proposée comprend des évidements ("recess" en anglais) pénétrant dans la couche sur une partie seulement de l'épaisseur de la couche, ce qui évite que la lumière puisse traverser la couche sans passer au travers du matériau de la couche.
- [0053] La structure fractale correspond à une fractale, ou, dit autrement, est obtenue à partir d'une fractale. On considère ici des fractales pouvant toutes être exprimées dans un L-système, ou système de Lindenmayer. De manière connue, un L-système comprend :
- un alphabet comprenant au moins deux caractères ou éléments,
 - un axiome, c'est-à-dire un tracé de départ, exprimé au moyen d'un ou plusieurs caractères de l'alphabet, et
 - un ensemble de règles de génération, chaque règle correspondant à une transformation d'un caractère de l'alphabet en un motif exprimé à l'aide de l'alphabet, cette transformation étant mise en œuvre à chaque itération de la génération de la fractale, ou, dit autrement, on passe d'une fractale d'ordre N à une fractale d'ordre N+1, avec N

entier supérieur ou égal à 0, en appliquant les règles de génération aux caractères de la fractale d'ordre N.

- [0054] Lorsque la structure fractale correspond à une fractale d'ordre $N=Z$, on appelle Z l'ordre final de la structure fractale et de la fractale correspondante, et on appelle fractales d'ordre N, avec N allant de 0 à Z-1, les fractales intermédiaires obtenues à chaque itération d'application des règles de génération pour obtenir la fractale d'ordre final Z. La fractale d'ordre 0 correspond alors à l'axiome de la fractale exprimé dans un L-système.
- [0055] Dans la suite de la description, lorsque les caractères d'une fractale ou de son axiome sont parcourus en partant du caractère en haut à gauche, et en se déplaçant initialement de gauche à droite. La règle '+' signifie tourner de 90° à droite par rapport au sens courant et à la direction courante de parcours des caractères, et la règle '-' signifie tourner de 90° à gauche par au sens courant et à la direction courante de parcours des caractères.
- [0056] La [Fig.1] représente, par une vue en coupe schématique, un exemple de mode de réalisation d'un dispositif optique, et, plus particulièrement, d'un pixel 1.
- [0057] Le pixel 1 est disposé dans et sur une couche semiconductrice 100, par exemple en silicium. Le pixel 1 comprend une zone photosensible, ou zone de photoconversion, PD disposée dans la couche 100. A titre d'exemple, la zone PD est une photodiode pincée. Le pixel 1, par exemple sa zone PD, est de préférence délimité latéralement par des tranchées isolantes 102, par exemple des tranchées d'isolation profondes capacitives ("Capacitive Deep Trench Isolation" – CDTI).
- [0058] La couche 100 comprend une face 104 comprenant une structure fractale 108, représentée en vue de dessus en [Fig.2], la [Fig.1] étant prise dans le plan de coupe AA de la [Fig.2].
- [0059] La face 104 est destinée à être traversée par de la lumière à la longueur d'onde de fonctionnement du pixel 1, ou, dit autrement, la structure fractale 108 est destinée à être traversée par cette lumière. Plus particulièrement, dans cet exemple où le dispositif optique est un pixel, la face 104, et plus particulièrement la structure fractale 108, est configurée pour recevoir de la lumière et pour que de la lumière reçue traverse la structure fractale 108 jusqu'à la zone PD du pixel 1.
- [0060] La structure fractale 108 comprend des évidements 110. Plus exactement, la structure fractale 108 correspond à une fractale dans laquelle le motif de la fractale est remplacé par des évidements 110. Dit encore autrement, lorsque la structure fractale 108 correspond à une fractale exprimée dans un L-système, pour au moins un des caractères de l'alphabet du L-système, chaque occurrence de ce caractère dans la fractale correspond à un évidement 110 dans la structure fractale 108, étant entendu qu'au moins un des caractères de la fractale n'est pas remplacé par un évidement 110. Dans la

vue de dessus de la [Fig.2], les évidements 110 sont représentés par des zones pleines en noir.

- [0061] Les évidements 110 pénètrent dans la couche 100, à partir de la face 104, sur une partie seulement de l'épaisseur de la couche. En effet, si certains des évidements 110 traversaient la couche 110, cela conduirait à une diminution de la stabilité mécanique du pixel 1, et, en outre, à des chemins optiques où la lumière pourrait se propager sans jamais rencontrer le matériau de la couche 100.
- [0062] Selon un mode de réalisation, dans le plan de la face 104, c'est-à-dire le plan de la feuille en [Fig.2], les dimensions des évidements sont au moins deux fois plus faibles que la longueur d'onde de fonctionnement. En effet, les phénomènes optiques utilisés ici ne sont pas des phénomènes diffractifs qui sont basés sur le passage de la lumière à travers une ouverture dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière passant par l'ouverture, et qui conduisent à l'obtention de figures de diffraction.
- [0063] La structure fractale 108, ou, dit autrement, la fractale qui lui correspond, est dépourvue de symétrie de révolution. Dit autrement, la structure fractale 108 n'est pas invariante par rotation autour d'un axe orthogonal à la face 104 et passant par le centre de la fractale. On considère ici qu'une fractale n'est pas invariante par rotation lorsque que la fractale n'est pas invariante par rotation pour au moins un angle de rotation. Ainsi, la structure fractale 108, bien que n'étant pas invariante par rotation, peut présenter des symétries de rotation pour seulement certains angles. Dit autrement, la structure fractale 108 n'est pas constituée d'évidements annulaires concentriques. En effet, de tels évidements annulaires concentriques sont difficiles à mettre en œuvre.
- [0064] A titre d'exemple, comme cela est représenté en [Fig.1] et en [Fig.2], les évidements 110 sont des trous borgnes, dans cet exemple de forme cubique. Dans d'autres exemples non illustrés, les évidements 110 sont des trous borgnes de forme parallélépipédique rectangle, pyramidale ou cylindrique. En variante, les évidements sont des tranchées ou des portions de tranchées. Par exemple, en reprenant l'exemple de la [Fig.2], on peut prévoir que chaque évidement cubique 110 soit remplacé par une tranchée correspondant au contour de l'évidement cubique 110, ou par une ou plusieurs tranchées, par exemple deux tranchées orthogonales formant une croix, disposées à la place de l'évidement cubique 110.
- [0065] La prévision de la structure fractale 108 au niveau de la face 104 du pixel 1 destinée à recevoir la lumière permet de diffuser la lumière reçue dans plusieurs directions dans la zone PD, d'où il en résulte une amélioration de l'efficacité quantique du pixel 1. Notamment, cela permet d'augmenter l'efficacité quantique du pixel 1 par rapport à un pixel similaire dans lequel la structure 108 serait remplacée par un unique plot, un unique trou ou un réseau périodique de plots ou de trous, par exemple, quand l'ordre final Z de la structure fractale 108 est au moins égal à 3. En effet, les motifs de la

structure fractale 108 permettent de combiner réflexions multiples, différences de marche et diffraction pour maximiser à la fois la dispersion directionnelle de la lumière transmise (augmentation du chemin optique), augmenter la transmission de la lumière dans le pixel et réduire la réflexion de la lumière incidente en augmentant la surface effective et la rugosité apparente du silicium. Cette rugosité apparente est associée à la dimension de Hausdorff des fractales supérieures à 2 (dimension d'une surface plane), qui confère aux surfaces fractales à la fois des propriétés de diffusion similaires à des surfaces rugueuse aléatoires, sans recourir à des algorithmes de génération aléatoires (construction par récurrence mathématique d'un même motif). Contrairement à des motifs de types réseaux périodiques requérant un nombre minimal de répétitions du même motif pour voir apparaître des figures de diffraction elles-mêmes périodiques, les fractales permettent de faire émerger des propriétés de symétrie dès l'ordre 2 du fait de leur caractère autosimilaire.

- [0066] Selon le mode de réalisation illustré par la [Fig.1], la profondeur de chaque évidement 100 diminue quand l'ordre auquel l'évidement 110 est généré augmente.
- [0067] Plus particulièrement, lorsque la structure fractale 108 correspond à une fractale d'ordre Z exprimée dans un L-système, la fractale d'ordre Z est générée en appliquant de manière itérative, et à partir de l'axiome du L-système, Z fois les règles du L-système. Lorsqu'un caractère de l'alphabet du L-système correspondant à un évidement apparaît dans la fractale d'ordre N inférieur à Z , c'est-à-dire à la N ième application des règles du L-système, et que ce caractère, donc l'évidement 110 lui correspondant, se retrouve dans toutes fractales d'ordres supérieurs jusqu'à l'ordre final Z , c'est-à-dire dans toutes les fractales d'ordre $N+1$ à Z , alors on dit que cet évidement 110 est généré à l'ordre N .
- [0068] Ainsi, un évidement 110 généré à l'ordre 0 est plus profond qu'un évidement 110 généré à l'ordre 1, lui-même étant plus profond qu'un évidement 110 généré à l'ordre 2, et ainsi de suite.
- [0069] Dit autrement, dans ce mode de réalisation, et comme cela se voit sur la [Fig.1] et la [Fig.2], la profondeur des évidements 110 diminue quand leurs dimensions latérales, prises dans un plan parallèle à la face 104, diminuent.
- [0070] La [Fig.3] représente, par une vue en coupe schématique, un exemple d'une variante de réalisation du pixel 1 de la [Fig.1].
- [0071] Dans cette variante, les évidements 110 pénètrent tous sur une même profondeur dans la couche 100. Cette variante de réalisation est plus simple à mettre en œuvre que le mode de réalisation décrit en relation avec la [Fig.1]. Toutefois, malgré la simplicité de mise en œuvre de la structure fractale de la [Fig.3], la structure fractale de la [Fig.1] présente l'avantage de permettre de générer une structure fractale dans la profondeur du silicium, et donc d'augmenter à chaque ordre d'itération la surface effective du

silicium ainsi que sa rugosité apparente. Cela permet de maximiser le nombre de réflexions vues par la lumière incidente. Cela permet également d'augmenter la quantité de lumière pénétrant dans le pixel et donc de diminuer la quantité de lumière réfléchi hors du pixel qui pourrait atteindre un pixel voisin, ce phénomène, non-désirable, étant couramment appelé "cross-talk" en anglais. L'augmentation de la rugosité apparente du silicium permet, en outre, d'augmenter le chemin optique dans le silicium.

[0072] Selon un mode de réalisation, la structure fractale 108 correspond à une fractale qui, exprimée dans un L-système, est basée sur des règles de type Cantor ternaire et dont l'axiome est un carré subdivisé en neuf sous-carrés. Dit autrement, l'axiome est un carré de trois caractères de côtés. Des règles de génération sont dites de type Cantor ternaire lorsque, à chaque itération, un caractère de la fractale d'ordre N est remplacé par un carré de trois caractères de côté. En outre, la surface qu'occuperait le caractère de la fractale d'ordre N et celle qu'occuperait le carré de neuf caractères qui le remplace dans la fractale d'ordre N+1 correspondent à la même surface dans la structure fractale 108. Des exemples d'axiomes et de règles de génération selon ce mode de réalisation vont maintenant être décrits en relation avec la [Fig.4], la [Fig.5], la [Fig.6] et la [Fig.7].

[0073] La [Fig.4] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon un exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus exactement, la [Fig.4] illustre une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire, à partir de laquelle est générée la structure fractale 108 selon exemple de mode de réalisation du pixel 1. La fractale présentée ici correspond à l'exemple de structure fractale 108 illustré par la [Fig.2].

[0074] Dans cet exemple, la fractale est exprimée dans le L-système déterminé par :

- un alphabet comprenant les caractères W et B,
- un axiome $I = WWW+W+BW-W-WW$, et
- des règles de génération correspondant à :
 - * $W \rightarrow WWW+W+BW-W-WW = I$, et
 - * $B \rightarrow BBB+B+BB-B-BB$.

[0075] A titre d'explication, en se référant à l'axiome I représenté à gauche en [Fig.4], en partant du caractère en haut à gauche, et en parcourant initialement les caractères de l'axiome I de gauche à droite, on a bien un caractère W (en haut et à gauche dans l'axiome I) suivi d'un caractère W (en haut et au milieu dans l'axiome I), suivi d'un caractère W (en haut et à droite dans l'axiome I). Puis on tourne de 90° vers la droite (+) et on a un caractère W (à droite et au milieu dans l'axiome I) avant de tourner de nouveau de 90° vers la droite (+) et d'avoir un caractère B (au milieu dans l'axiome I) puis un caractère W (à gauche et au milieu dans l'axiome I). Ensuite, on tourne vers la gauche (-) et on a un caractère W (en bas et à gauche dans l'axiome I) avant de tourner de nouveau de 90° vers la gauche (-) et d'avoir un caractère W (en bas et au milieu

dans l'axiome I) puis un caractère W (en bas et à droite dans l'axiome I).

- [0076] Toujours à titre d'explication, pour passer de l'ordre 0, c'est-à-dire de l'axiome I, à la fractale O1 d'ordre 1 (à droite en [Fig.4]), la règle $W \rightarrow WWW+W+BW-W-WW$ signifie que chaque caractère W de l'axiome est remplacé par l'axiome I, et la règle $B \rightarrow BBB+B+BB-B-BB$ signifie que chaque caractère B de l'axiome est remplacé par un carré de trois caractères de côté ne comprenant que des caractères B.
- [0077] Bien que la fractale O1 d'ordre A soit ici représentée comme étant plus grande que l'axiome I, en pratique, dans la structure fractale 108 ([Fig.1], [Fig.2] et [Fig.3]), l'axiome I et la fractale O1 d'ordre 0 correspondent à une même surface de la face 104.
- [0078] Bien que cela ne soit pas représenté ici, pour obtenir la fractale d'ordre 2 du L-système correspondant à la [Fig.4], il suffit d'appliquer les règles du L-système à chaque caractère de la fractale O1 d'ordre 1, et ainsi de suite.
- [0079] Pour obtenir la structure fractale 108, il suffit de remplacer, dans la fractale d'ordre Z final, pour au moins un caractère de l'alphabet, chaque occurrence de ce caractère par un évidement. Par exemple, la structure fractale 108 illustrée en [Fig.4] est obtenue à partir de la fractale d'ordre final $Z=2$ correspondant au L-système ci-dessus, en remplaçant chaque caractère B par un évidement 110, plusieurs caractères B pouvant correspondre à un même évidement 110. Dans ce cas, l'axiome I correspond à un carré subdivisé en neuf sous-carrés, seul le sous-carré central correspondant à un évidement.
- [0080] On notera que la personne du métier est en mesure de prévoir d'autres règles de génération de type Cantor ternaire à partir de l'axiome I décrit en relation avec la [Fig.4], et plus généralement à partir d'un axiome I correspondant à un carré de trois caractères de côté dans lequel seul le caractère central de l'axiome correspond à un évidement.
- [0081] La [Fig.5] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus exactement, la [Fig.5] illustre une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire, à partir de laquelle est générée la structure fractale 108 selon un autre exemple de mode de réalisation du pixel 1.
- [0082] Dans cet exemple, la fractale est exprimée dans le L-système déterminé par:
- un alphabet comprenant les caractères W, B et A
 - un axiome $I = AWA+W+BW-A-WA$, et
 - des règles de génération correspondant à :
 - * $W \rightarrow AWA+W+BW-A-WA = I$,
 - * $B \rightarrow BBB+B+WB-B-BB$, et
 - * $A \rightarrow BWB+W+BW-B-WB$.
- [0083] Comme précédemment, la [Fig.5] illustre l'axiome I de ce L-système (à gauche en [Fig.5]) et la fractale O1 d'ordre 1 correspondante (à droite en [Fig.5]). Comme précédemment, l'axiome I et la fractale O1 d'ordre 1 correspondent, en pratique, à une

même surface de la face 104.

- [0084] A titre d'explication, la règle $W \rightarrow AWA+W+BW-A-WA$ signifie que chaque caractère W est remplacé par l'axiome I , la règle $B \rightarrow BBB+B+WB-B-BB$ signifiant que chaque caractère B est remplacé par le complémentaire de l'axiome I dans lequel le complémentaire du caractère A est le caractère B , et la règle $A \rightarrow BWB+W+BW-B-WB$ signifiant que chaque caractère A est remplacé par une croix de caractères B sur fond de caractères W .
- [0085] Pour obtenir une structure fractale 108, il suffit de remplacer, dans la fractale d'ordre Z final, pour au moins un caractère W , B et A de l'alphabet, chaque occurrence de ce caractère par un évidement 110. De préférence, seul le caractère B est remplacé par un évidement 110, l'axiome I correspondant alors à un carré subdivisé en neuf sous-carrés dans lequel seul le sous-carré central correspond à un évidement 110.
- [0086] On notera que la personne du métier est en mesure de prévoir d'autres règles de génération de type Cantor ternaire à partir de l'axiome I décrit en relation avec la [Fig.5], et plus généralement à partir d'un axiome correspondant à un carré de trois caractères de côté dans lequel seul le caractère central de l'axiome correspond à un évidement.
- [0087] La [Fig.6] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus exactement, la [Fig.6] illustre une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire, à partir de laquelle est générée la structure fractale 108 selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel 1.
- [0088] Dans cet exemple, la fractale est exprimée dans le L-système déterminé par :
- un alphabet comprenant les caractères W et B ,
 - un axiome $I = BWB+W+BW-B-WB$, et
 - des règles de génération correspondant à :
 - * $W \rightarrow WWW+W+WW-W-WW$, et
 - * $B \rightarrow BWB+W+BW-B-WB = I$.
- [0089] Comme précédemment, la [Fig.6] illustre l'axiome I de ce L-système (à gauche en [Fig.6]) et la fractale $O1$ d'ordre 1 correspondante (à droite en [Fig.6]). Comme précédemment, l'axiome I et la fractale $O1$ d'ordre 1 correspondent, en pratique, à une même surface de la face 104.
- [0090] A titre d'explication, la règle $W \rightarrow WWW+W+WW-W-WW$ signifie que chaque caractère W est remplacé par neuf caractères W , la règle $B \rightarrow BWB+W+BW-B-WB$ signifiant que caractère B est remplacé par l'axiome I .
- [0091] Pour obtenir une structure fractale 108, il suffit de remplacer dans la fractale d'ordre Z final, pour au moins un caractère W et B de l'alphabet, chaque occurrence de ce caractère par un évidement 110. De préférence, seul le caractère B est remplacé par un évidement 110, l'axiome I correspondant alors à un carré subdivisé en neuf sous-carrés

dans lequel seuls les sous-carrés sur la diagonale de l'axiome correspondent à un évidement 110.

[0092] On notera que la personne du métier est en mesure de prévoir d'autres règles de génération de type Cantor ternaire à partir de l'axiome I décrit en relation avec la [Fig.6] et plus généralement à partir d'un axiome I correspondant à un carré de trois caractères de côté dans lequel seuls les caractères sur les diagonales de l'axiome correspondent à des évidements.

[0093] Par exemple, en reprenant l'axiome I décrit en relation avec la [Fig.6], on pourra remplacer les règles de génération ci-dessus par les règles de génération suivantes :

W -> WWW+W+BW-W-WW, et

B -> BWB+W+BW-B-WB = I.

[0094] La [Fig.7] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus exactement, la [Fig.7] illustre une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire, à partir de laquelle est générée la structure fractale 108 selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel 1.

[0095] Dans cet exemple, la fractale est exprimée dans le L-système déterminé par :

- un alphabet comprenant les caractères W et B,

- un axiome I = BWB+W+WW-B-WB, et

- des règles de génération correspondant à :

* W -> BWB+W+WW-B-WB = I, et

* B -> BBB+B+WB-B-BB.

[0096] Comme précédemment, la [Fig.7] illustre l'axiome I de ce L-système (à gauche en [Fig.7]) et la fractale O1 d'ordre 1 correspondante (à droite en [Fig.7]). Comme précédemment, l'axiome I et la fractale O1 d'ordre 1 correspondent, en pratique, à une même surface de la face 104.

[0097] Pour obtenir une structure fractale 108, il suffit de remplacer dans la fractale d'ordre Z final, pour au moins un caractère W et B de l'alphabet, chaque occurrence de ce caractère par un évidement 110. De préférence, seul le caractère B est remplacé par un évidement 110, l'axiome I correspondant alors à un carré subdivisé en neuf sous-carrés dans lequel seuls les sous-carrés des coins de l'axiome correspondent chacun à un évidement 110.

[0098] On notera que la personne du métier est en mesure de prévoir d'autres règles de génération de type Cantor ternaire à partir de l'axiome I décrit en relation avec la [Fig.7], et plus généralement à partir d'un axiome correspondant à un carré de trois caractères de côté dans lequel seuls les caractères sur les coins de l'axiome correspondent à des évidements.

[0099] On a décrit, en relation avec la [Fig.4], la [Fig.5], la [Fig.6] et la [Fig.7], des

exemples d'un mode de réalisation dans lequel la structure fractale 108 correspond à une fractale qui, exprimée dans un L-système, est basée sur des règles de type Cantor ternaire. Selon un autre mode de réalisation, la structure fractale 108 est obtenue à partir d'une fractale qui, exprimée dans un L-système, est basée sur des règles de génération de type Cantor binaire. Dit autrement, l'axiome est un carré de deux caractères de côté. Des règles de génération sont dites de type Cantor binaire lorsque, à chaque itération, un caractère de la fractale d'ordre N est remplacé par un carré de deux caractères de côté pour obtenir la fractale d'ordre N+1. En outre, la surface qu'occuperait le caractère de la fractale d'ordre N et celle qu'occuperait le carré de quatre caractères qui le remplace dans la fractale d'ordre N+1 correspondent à la même surface dans la structure fractale 108. Des exemples d'axiomes et de règles de génération selon ce mode de réalisation vont maintenant être décrits en relation avec la [Fig.8], la [Fig.9] et la [Fig.10].

[0100] La [Fig.8] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon un exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus exactement, la [Fig.8] illustre une fractale basée sur des règles de type Cantor binaire, à partir de laquelle est générée la structure fractale 108 selon exemple de mode de réalisation du pixel 1.

[0101] Dans cet exemple, la fractale est exprimée dans le L-système déterminé par :

- un alphabet comprenant les caractères W et B,
- un axiome $I = BW+W+W$, et
- des règles de génération correspondant à :
 - * $W \rightarrow BW+W+W = I$, et
 - * $B \rightarrow BB+B+B$.

[0102] A titre d'explication, pour passer de l'ordre 0, c'est-à-dire de l'axiome I (à gauche en [Fig.8]), à la fractale O1 d'ordre 1 (à droite en [Fig.8]), la règle $W \rightarrow BW+W+W$ signifie que chaque caractère W de l'axiome est remplacé par l'axiome I, et la règle $B \rightarrow BB+B+B$ signifie que chaque caractère B de l'axiome est remplacé par un carré de deux caractères de côté ne comprenant que des caractères B.

[0103] Bien que la fractale O1 d'ordre 1 soit ici représentée comme étant plus grande que l'axiome I, en pratique, dans la structure fractale 108 ([Fig.1], [Fig.2] et [Fig.3]), l'axiome I et la fractale O1 d'ordre 0 correspondent à une même surface de la face 104.

[0104] Bien que cela ne soit pas représenté ici, pour obtenir la fractale d'ordre 2 du L-système correspondant à la [Fig.8], il suffit d'appliquer les règles du L-système à chaque caractère de la fractale O1 d'ordre 1, et ainsi de suite.

[0105] Pour obtenir une structure fractale 108, il suffit de remplacer, dans la fractale d'ordre Z final et pour au moins un caractère de l'alphabet, chaque occurrence de ce caractère par un évidement. De préférence, seul le caractère B est remplacé par un évidement 110, l'axiome I correspondant alors à un carré subdivisé en quatre sous-carrés dans

lequel un seul sous-carré de l'axiome correspond à un évidement 110.

- [0106] On notera que la personne du métier est en mesure de prévoir d'autres règles de génération de type Cantor binaire à partir de l'axiome I décrit en relation avec la [Fig.8], ou plus généralement, à partir d'un axiome I correspondant à un carré de deux caractères de côté dans lequel un seul caractère correspond à un évidement.
- [0107] Par exemple, on pourra remplacer les règles de génération ci-dessus par les règles de génération suivantes :
- $W \rightarrow BW+W+W = I$, et
 $B \rightarrow WB+B+B$.
- [0108] Selon un autre exemple, on pourra remplacer les règles de génération ci-dessus par les règles de génération suivantes :
- $W \rightarrow BW+W+W = I$, et
 $B \rightarrow WW+B+W$.
- [0109] Selon encore un autre exemple, on pourra remplacer les règles de génération ci-dessus par les règles de génération suivantes :
- $W \rightarrow BW+W+W = I$, et
 $B \rightarrow BB+W+B$.
- [0110] La [Fig.9] illustre schématiquement un détail d'un exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus particulièrement, la [Fig.9] illustre un détail d'un exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1], dans le cas où le pixel 1 comprend plusieurs structures fractales 108 obtenues à partir d'une même fractale.
- [0111] En effet, les fractales obtenues avec un L-système du type de celui décrit en relation avec la [Fig.8], c'est-à-dire dans lequel l'axiome I n'est pas symétrique par des rotations successives d'angle égal à 90° autour d'un axe passant par le centre de l'axiome, ne sont pas non plus symétriques par des rotations successives d'angle égal à 90° autour d'un axe passant par le centre de la fractale. Cela conduit à une structure fractale 108 qui n'est pas symétrique par des rotations successives d'angle égal à 90° autour d'un axe passant par le centre de la structure fractale 108. Or une telle symétrie est généralement souhaitable dans les dispositifs optiques où l'axe passant par le centre de la structure fractale 108 est l'axe optique du dispositif.
- [0112] Ainsi, selon un mode de réalisation, après avoir généré une fractale F à partir d'un axiome I du type de ceux décrits en relation avec la [Fig.8], une fractale F' est générée, la fractale F' présentant une symétrie par des rotations successives d'angle égal à 90° autour d'un axe passant par le centre de la fractale F'. Plus particulièrement, la fractale F' est obtenue en recopiant une première fois la fractale F après une rotation d'angle égal à 90° autour d'un axe passant par un coin 900 de la fractale F comme cela est illustré par une flèche 902, puis en recopiant une deuxième fois la fractale F après une rotation d'angle égal à 180° autour de l'axe passant par le coin 900 de la fractale F

comme cela est illustré par la flèche 904, et enfin en recopiant une troisième fois la fractale F après une rotation d'angle égal à 270° autour de l'axe passant par le coin 900 de la fractale F comme cela est illustré par la flèche 906.

- [0113] Dit autrement, la fractale F' est obtenue par des symétries successives par rotation d'angle égal à 90° autour de l'axe passant par le coin 900 de la fractale F.
- [0114] Dit encore autrement, cela revient à générer quatre fractales à partir de quatre axiomes I, I1, I2 et I3 correspondants, les axiomes I, I1, I2 et I3 étant symétriques deux à deux par rapport à deux plans BB et CC orthogonaux entre eux. Les règles de génération appliquées à chaque axiome I, I1, I2 et I3 sont alors déterminées pour conserver, à chaque ordre, la même symétrie entre les fractales issues des axiomes respectifs I, I1, I2 et I3 que celle qu'il y a entre les axiomes I, I1, I2 et I3. La structure fractale 108 est obtenue à partir de la fractale F' ou, vu autrement, les quatre fractales obtenues à partir des axiomes respectifs I, I1, I2 et I3 conduisent chacune à une structure 108 correspondante, et le dispositif 1 comprend alors quatre structures 108 différentes mais symétriques deux à deux par des rotations successives d'angle égal à 90° .
- [0115] La construction d'une fractale F' à partir d'une fractale F par des rotations successives d'angle égal à 90° autour d'un axe passant par un coin de la fractale F peut être appliquée au mode de réalisation décrit en relation avec la [Fig.4], la [Fig.5], la [Fig.6] et la [Fig.7], mais aussi aux modes de réalisation qui seront décrits en relation avec la [Fig.10], la [Fig.11], la [Fig.12] et la [Fig.13].
- [0116] La [Fig.10] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon un exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus exactement, la [Fig.10] illustre une fractale basée sur des règles de type Cantor binaire, à partir de laquelle est générée la structure fractale 108 selon exemple de mode de réalisation du pixel 1.
- [0117] Dans cet exemple, la fractale est exprimée dans le L-système déterminé par :
- un alphabet comprenant les caractères W et B,
 - un axiome $I = BW+B+W$, et
 - des règles de génération correspondant à :
 - * $W \rightarrow WB+W+B$, et
 - * $B \rightarrow BW+B+W = I$.
- [0118] A titre d'explication, pour passer de l'ordre 0, c'est-à-dire de l'axiome I (à gauche en [Fig.10]), à la fractale O1 d'ordre 1 (à droite en [Fig.10]), la règle $W \rightarrow WB+W+B$ signifie que chaque caractère W de l'axiome est remplacé par le complémentaire de l'axiome I, et la règle $B \rightarrow BW+B+W$ signifie que chaque caractère B de l'axiome est remplacé par l'axiome I.
- [0119] Bien que la fractale O1 d'ordre 1 soit ici représentée comme étant plus grande que l'axiome I, en pratique, dans la structure fractale 108 ([Fig.1], [Fig.2] et [Fig.3]),

l'axiome I et la fractale O1 d'ordre 0 correspondent à une même surface de la face 104.

- [0120] Bien que cela ne soit pas représenté ici, pour obtenir la fractale d'ordre 2 du L-système correspondant à la [Fig.10], il suffit d'appliquer les règles du L-système à chaque caractère de la fractale O1 d'ordre 1, et ainsi de suite.
- [0121] Pour obtenir une structure fractale 108, il suffit de remplacer, dans la fractale d'ordre Z final et pour au moins un caractère de l'alphabet, chaque occurrence de ce caractère par un évidement. De préférence, seul le caractère B est remplacé par un évidement 110, l'axiome I correspondant alors à un carré subdivisé en quatre sous-carrés dans lequel seuls les sous-carrés d'une diagonale de l'axiome I correspondent chacun à un évidement 110.
- [0122] On notera que la personne du métier est en mesure de prévoir d'autres règles de génération de type Cantor binaire à partir de l'axiome I décrit en relation avec la [Fig.10], ou, plus généralement, à partir d'un axiome I correspondant à un carré de deux caractères de côté dans lequel seuls les caractères sur une diagonale de l'axiome correspondent à des évidements.
- [0123] Dans les modes de réalisation décrits précédemment, la structure fractale 108 est obtenue à partir d'une fractale basée sur des règles de génération de type Cantor ternaire, ou Cantor binaire. Dans un autre mode de réalisation, la structure fractale est obtenue à partir d'une fractale choisie parmi une courbe de Hilbert, une courbe de Peano et un arbre en H de Mandelbrot, chaque segment respectivement de la courbe de Hilbert, de la courbe de Peano et de l'arbre en H de Mandelbrot correspondant de préférence à un évidement de la structure fractale 108, par exemple à une tranchée.
- [0124] La [Fig.11] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus particulièrement, la [Fig.11] illustre schématiquement l'axiome I d'une fractale correspondant à un arbre en H de Mandelbrot et la fractale O1 d'ordre 1 correspondante. L'expression d'une fractale en H de Mandelbrot dans un L-système est bien connue et ne sera pas détaillée ici.
- [0125] La [Fig.12] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus particulièrement, la [Fig.12] illustre schématiquement l'axiome I d'une fractale de Peano et la fractale O1 d'ordre 1 correspondante. L'expression d'une fractale de Peano dans un L-système est bien connue et ne sera pas détaillée ici.
- [0126] La [Fig.13] illustre schématiquement une génération d'une fractale selon encore un autre exemple de mode de réalisation du pixel de la [Fig.1]. Plus particulièrement, la [Fig.13] illustre schématiquement l'axiome I d'une fractale de Hilbert et la fractale O1 d'ordre 1 correspondante. L'expression d'une fractale de Hilbert dans un L-système est bien connue et ne sera pas détaillée ici.
- [0127] On a décrit précédemment des exemples de modes de réalisation d'un pixel 1 du type

décrit en relation avec la [Fig.1], et plus particulièrement des exemples de fractales à partir desquelles peuvent être générées des structures fractales 108 correspondantes. Ces exemples de modes de réalisation s'appliquent au pixel 1 décrit en relation avec la [Fig.3].

- [0128] La [Fig.14] illustre par une vue en coupe schématique une étape d'un mode de mise en œuvre d'un procédé de fabrication du pixel 1 de la [Fig.1]. Dans cet exemple, le procédé est décrit pour le cas où la structure fractale 108 est celle décrite en relation avec la [Fig.1] et la [Fig.2], bien que ce procédé s'adapte aux autres exemples de modes de réalisation décrits précédemment.
- [0129] A l'étape de la [Fig.14], un évidement 110 a été gravé dans la couche 100, à partir de la face 104. Cet évidement 110 correspond au caractère B de l'axiome I (ordre 0), la surface occupée par le caractère B à l'ordre 0 étant toujours occupée par des caractères B dans la fractale d'ordre 2 (zone en noir centrale sur la structure fractale 108 de la [Fig.2]).
- [0130] Dit autrement, lors de cette première étape de gravure, on grave les plus gros évidements 110 de la structure fractale 108.
- [0131] Dit encore autrement, lors de cette première étape de gravure, on grave les évidements 110 qui sont générés à l'ordre 0 et qui sont toujours présents dans la fractale d'ordre final Z à partir de laquelle est générée la structure fractale 108.
- [0132] La [Fig.15] illustre par une vue en coupe schématique une autre étape du procédé de fabrication de la [Fig.14], selon un mode de mise en œuvre. Plus particulièrement, la [Fig.15] illustre une étape suivant celle décrite en relation avec la [Fig.14].
- [0133] A l'étape de la [Fig.15], des évidements 110 ont été gravés dans la couche 100, à partir de la face 104. Ces évidements 110 correspondent aux caractères B de la fractale O1 d'ordre 1 ([Fig.4]), et plus particulièrement aux caractères B qui sont générés à l'ordre 1 et pour lesquels la surface occupée par chaque caractère B à l'ordre 1 est toujours occupée par des caractères B dans la fractale d'ordre final 2 (les neuf zones en noir périphériques sur la structure fractale 108 de la [Fig.2]).
- [0134] Dit autrement, lors de cette étape de gravure, on grave les évidements 110 de la structure fractale 108 qui ont, dans le plan de la face 104, des dimensions inférieures à celles du ou des évidements 110 gravés à l'étape de gravure précédente ([Fig.14]) et supérieures à celles du ou des évidements 110 qui seront gravés à des étapes ultérieures.
- [0135] Dit encore autrement, lors de cette première étape de gravure, on grave les évidements 110 qui sont générés à l'ordre 1 et qui sont toujours présents dans la fractale d'ordre final Z à partir de laquelle est générée la structure fractale 108.
- [0136] Dans ce mode de réalisation, la profondeur de gravure des évidements 110 diminue avec l'ordre auquel ces évidements sont gravés. Ainsi, les évidements gravés à l'étape de gravure de la [Fig.15] sont moins profonds que celui ou ceux gravés à l'étape de

gravure précédente décrite en relation avec la [Fig.14].

- [0137] Dans ce mode de réalisation, à chaque étape de gravure, on ne grave que des évidements 110 ayant, dans le plan de la face 104, les mêmes dimensions, avec une même profondeur de gravure pour tous les évidements gravés à cette étape.
- [0138] Dans ce mode de réalisation, les évidements 110 gravés à des étapes de gravure antérieures sont masqués par un masque de gravure 1500. Ainsi, dans cet exemple, l'évidement 110 gravé à l'étape de la [Fig.14] est masqué par le masque 1500 lorsque des évidements 110 plus petits sont gravés à l'étape de la [Fig.15].
- [0139] La [Fig.16] illustre une variante de mise en œuvre de l'étape de la [Fig.15]. Seules les différences entre l'étape décrite en relation avec la [Fig.15] et celle décrite en relation avec la [Fig.16] sont ici mises en exergue.
- [0140] Par rapport à la [Fig.15], en [Fig.16], lors de l'étape de gravure des évidements 110 ayant des dimensions plus faibles que celles de l'évidement gravé à l'étape de la [Fig.14], mais plus grandes que celles du ou des évidements 110 qui seront gravés lors d'étapes de gravure ultérieures, au moins un évidement supplémentaire 110', de même dimension que les évidements 110 gravés à l'étape courante illustrée par la [Fig.15], est gravé au fond des évidements 110 gravés lors de l'étape de gravure précédente décrite en relation avec la [Fig.14]. Ainsi, dans cet exemple, un évidement 110' est gravé au fond de l'évidement 110 central gravé à l'étape de la [Fig.14]. Le masque de gravure 1600 utilisé ici comprend donc une ouverture sur le fond de cet évidement 110.
- [0141] Bien que cela ne soit pas illustré, l'étape décrite en relation avec la [Fig.15], respectivement la [Fig.16], est ensuite mise en œuvre de manière récursive jusqu'à la fractale d'ordre final Z, de manière à obtenir la structure 108 correspondante.
- [0142] Dit autrement, dans le mode de réalisation de la [Fig.14] et de la [Fig.15], comme dans le mode de réalisation de la [Fig.14] et de la [Fig.16], plusieurs sous-étapes de gravure correspondant chacune à un ordre différent de la fractale et consistant à graver les évidements correspondant à cet ordre de la fractale sont mises en œuvre. Ces sous-étapes de gravure successives sont mises en œuvre en suivant l'ordre croissant de l'ordre de la fractale à laquelle correspond chaque étape sous-étapes de gravure.
- [0143] En outre, pour chaque sous-étape de gravure, tous les évidements 110, et 110' le cas échéant, gravés lors de cette sous-étape de gravure ont, dans le plan de la face 104, les mêmes dimensions, ces dimensions diminuant d'une sous-étape de gravure à une sous-étape de gravure suivante.
- [0144] En outre, à chaque sous-étape de gravure, la profondeur de gravure des évidements 110, et 110' le cas échéant, diminue par rapport à la profondeur de gravure des évidements 110, et 110' le cas échéant, de la sous-étape de gravure précédente.
- [0145] La [Fig.17] illustre par une vue en coupe schématique une étape d'un mode de mise en œuvre d'un procédé de fabrication du pixel de la [Fig.3]. Dans cet exemple, le

procédé est décrit pour le cas où la structure fractale 108 est celle décrite en relation avec la [Fig.2] et la [Fig.3], bien que ce procédé s'adapte aux autres exemples de modes de réalisation décrits précédemment.

- [0146] A l'étape de la [Fig.17], tous les évidements 110 de la structure fractale 108 sont gravés simultanément, avec la même profondeur de gravure. Contrairement aux modes de réalisation de la [Fig.14], de la [Fig.15] et de la [Fig.16], le mode de réalisation de la [Fig.17] ne nécessite qu'un seul masque de gravure 1700, et est donc plus simple à mettre en œuvre. De préférence, les structures fractales 108 obtenues à partir d'une fractale telle que décrite en relation avec la [Fig.11], la [Fig.12] ou la [Fig.13] sont gravées avec le procédé de la [Fig.17].
- [0147] On a décrit ci-dessus des modes de réalisation et variantes dans le cas d'un pixel 1, toutefois ces modes de réalisation et variantes s'adaptent à d'autres dispositifs optiques qu'un pixel. Par exemple, on peut prévoir que le dispositif optique soit un diffuseur optique, c'est-à-dire un dispositif optique comprenant une couche dont une première face est destinée à recevoir de la lumière, et dont une deuxième face est destinée à émettre de la lumière de sorte que la lumière émise soit diffuse. La lumière émise correspond à la lumière reçue par la première face, qui a traversé la couche et qui a été diffusée par une structure fractale 108 de la deuxième face.
- [0148] La [Fig.18] représente, par une vue en coupe schématique, une couche 200 d'un diffuseur optique 1' selon un mode de réalisation similaire au mode de réalisation du pixel 1 de la [Fig.1]. Toutefois, la personne du métier est en mesure de prévoir un diffuseur optique 1' selon un mode de réalisation similaire au mode de réalisation du pixel 1 de la [Fig.3].
- [0149] Le diffuseur optique 1' comprend une couche 200. Une face 202 de la couche 200 est destinée à recevoir de la lumière 204 et une face 206, opposée à la face 202, est destinée à émettre de la lumière 208, la lumière 208 étant plus diffuse que la lumière 204. La face 206 comprend une structure fractale 108.
- [0150] La structure 108 est du type de celles décrites précédemment en relation avec la [Fig.1], la [Fig.2], la [Fig.3], la [Fig.4], la [Fig.5], la [Fig.7], la [Fig.8], la [Fig.9], la [Fig.10], la [Fig.11], la [Fig.12] et la [Fig.13], et peut être fabriquée avec les modes de mise en œuvre et variantes de procédé de fabrication décrits en relation avec la [Fig.14], la [Fig.15], la [Fig.16] et la [Fig.17], en remplaçant la face 104 et la couche 100 du dispositif 1 par la face 206 et la couche 200 du dispositif 1'.
- [0151] A titre d'exemple, dans le pixel 1, respectivement dans le diffuseur 1', la couche 100, respectivement la couche 200, est une couche de silicium lorsque la longueur d'onde de fonctionnement du pixel 1, respectivement du diffuseur 1', est comprise dans l'infrarouge, par exemple lorsque cette longueur d'onde est de l'ordre de 940 nm.
- [0152] Divers modes de réalisation et variantes ont été décrits. La personne du métier

comprendra que certaines caractéristiques de ces divers modes de réalisation et variantes pourraient être combinées, et d'autres variantes apparaîtront à la personne du métier. Toutefois, la personne du métier est en mesure de prévoir des axiomes et des règles de génération excluant l'obtention d'une fractale correspondant à un réseau périodique.

[0153] Enfin, la mise en oeuvre pratique des modes de réalisation et variantes décrits est à la portée de la personne du métier à partir des indications fonctionnelles données ci-dessus.

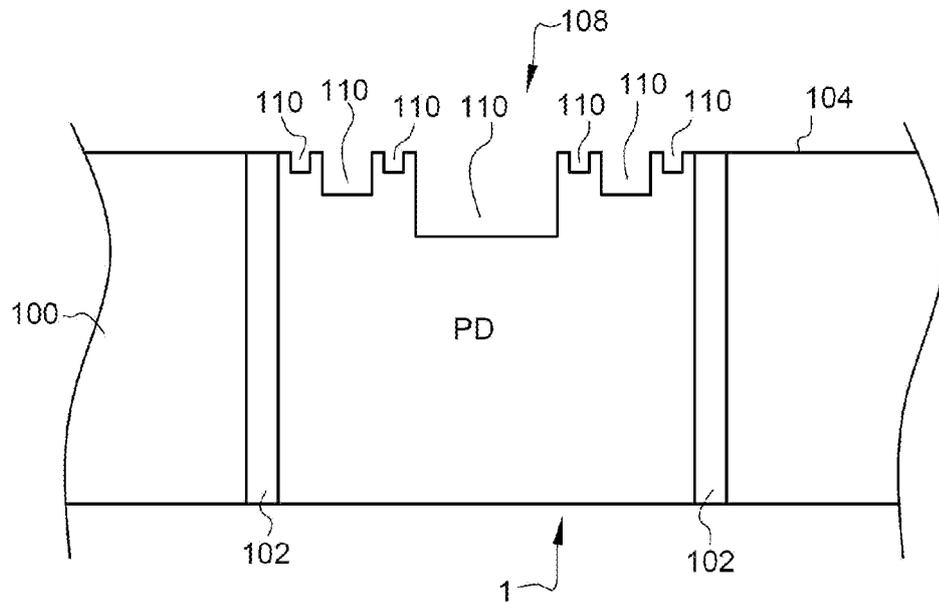
Revendications

- [Revendication 1] Dispositif optique (1 ; 1') comprenant une couche (100 ; 200) ayant une face (104 ; 206) configurée pour être traversée par de la lumière à une longueur d'onde de fonctionnement du dispositif optique, dans lequel : la face (104 ; 206) comprend une structure fractale (108) dépourvue de symétrie de révolution, la structure fractale (108) correspond à une fractale exprimée dans un L-système, la structure fractale comprend une pluralité d'évidements (110, 110'), et les évidements pénètrent dans la couche (100 ; 200) depuis ladite face et sur une partie seulement de l'épaisseur de la couche.
- [Revendication 2] Dispositif selon la revendication 1, dans lequel chaque évidement (110 ; 110') a, dans un plan de ladite face (104 ; 206), des dimensions au moins deux fois plus faibles que la longueur d'onde de fonctionnement.
- [Revendication 3] Dispositif selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les évidements (110, 110') sont des trous borgnes, de préférence ayant une forme cylindrique, cubique, parallélépipédique rectangle, ou pyramidale, ou des tranchées.
- [Revendication 4] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la fractale exprimée dans un L-système est choisie parmi : une courbe de Hilbert, chaque segment de la courbe de Hilbert correspondant à un évidement de la structure fractale (108) ; une courbe de Peano, chaque segment de la courbe de Peano correspondant à un évidement de la structure fractale (108) ; et un arbre en H de Mandelbrot, chaque segment de l'arbre en H de Mandelbrot correspondant à un évidement de la structure fractale (108).
- [Revendication 5] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la fractale exprimée dans un L-système est choisie parmi : une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire et dont l'axiome (I) correspond à un grand carré divisé en neuf petits carrés, seul le petit carré central du grand carré correspondant à un évidement (110) de la structure fractale (108) ; une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire et dont l'axiome (I) correspond à un grand carré divisé en neuf petits carrés, seuls les petits carrés des diagonales du grand carré correspondant chacun à un évidement (110) de la structure fractale (108) ; et une fractale basée sur des règles de type Cantor ternaire et dont l'axiome

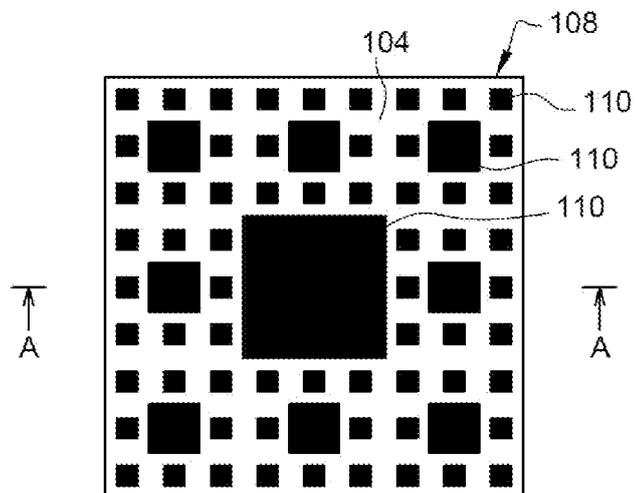
- (I) correspond à un grand carré divisé en neuf petits carrés, seuls les petits carrés des coins du grand carrés correspondant chacun à un évidement (110) de la structure fractale (108).
- [Revendication 6] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la fractale exprimée dans un L-système est choisie parmi :
- une fractale basée sur des règles de type Cantor binaire et dont l'axiome (I) correspond à un grand carré divisé en quatre petits carrés, un seul des petits carrés correspondant à un évidement de la structure fractale (108) ; et
 - une fractale basée sur des règles de type Cantor binaire et dont l'axiome (I) correspond à un carré divisé en quatre petits carrés, seuls les petits carrés d'une diagonale du grand carré correspondant chacun à un évidement (110) de la structure fractale (108).
- [Revendication 7] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, dans lequel la structure fractale (108) est au moins d'ordre 3.
- [Revendication 8] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 4 à 7, dans lequel tous les évidements (110) pénètrent sur une même profondeur dans la couche (100 ; 200).
- [Revendication 9] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 4 à 7, dans lequel une profondeur de chaque évidement (110, 110') dans la couche (100 ; 200) diminue quand l'ordre auquel l'évidement est généré augmente.
- [Revendication 10] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel la couche (100 ; 200) est en silicium.
- [Revendication 11] Pixel comprenant une zone photosensible (PD) disposée dans la couche (100) d'un dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, ladite face (104) de la couche (100) étant configurée pour recevoir de la lumière et pour que de la lumière reçue par la zone photosensible (PD) traverse la structure fractale (108).
- [Revendication 12] Diffuseur optique comprenant un dispositif (1') selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, la couche (200) étant configurée pour être traversée par la lumière (204) et ladite face de la couche (200) étant configurée pour émettre de la lumière (208) ayant traversé la structure fractale (108).
- [Revendication 13] Procédé de fabrication d'un dispositif optique (1 ; 1') selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, comprenant les étapes consistant à :
- prévoir la couche (100 ; 200) ; et
 - graver les évidements (110, 110') dans ladite couche.

- [Revendication 14] Procédé selon la revendication 13, dans lequel l'étape de gravure comprend une unique étape de gravure lors de laquelle tous les évidements (110) sont gravés simultanément et jusqu'à une même profondeur.
- [Revendication 15] Procédé selon la revendication 13 prise dans sa dépendance à l'une quelconque des revendications 4 à 9, dans lequel la gravure comprend des sous-étapes de gravure correspondant chacune à un ordre différent de la fractale et consistant à graver les évidements (110) correspondant à cet ordre de la fractale, une profondeur de gravure de chaque sous-étape de gravure diminuant quand l'ordre correspondant à la sous-étape augmente.
- [Revendication 16] Procédé selon la revendication 15, dans lequel, à chaque sous étape de gravure, les évidements (110) précédemment gravés sont masqués (1500).
- [Revendication 17] Procédé selon la revendication 15, dans lequel, à chaque sous étape de gravure, des évidements supplémentaires (110') sont gravés au fond des évidements (110) gravés à la sous étape de gravure précédente, et dans lequel, à chaque sous étape de gravure, tous les évidements (110', 110) gravés ont des dimensions identiques.

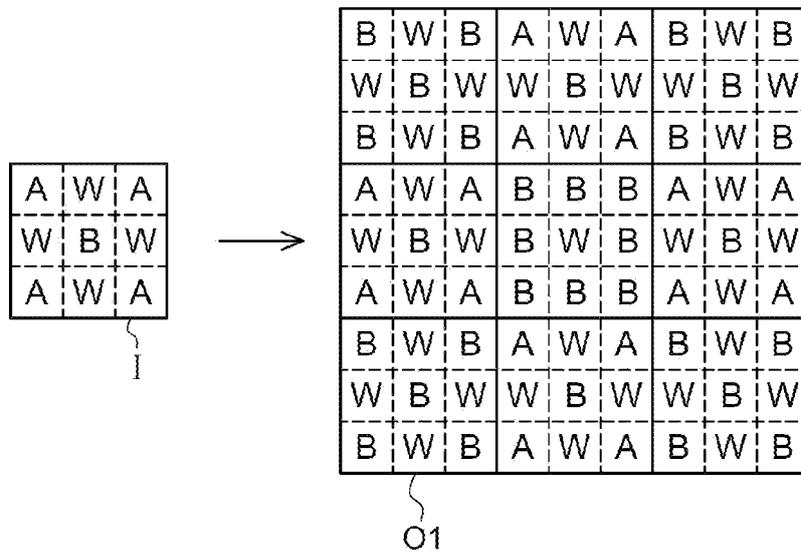
[Fig. 1]

Fig. 1

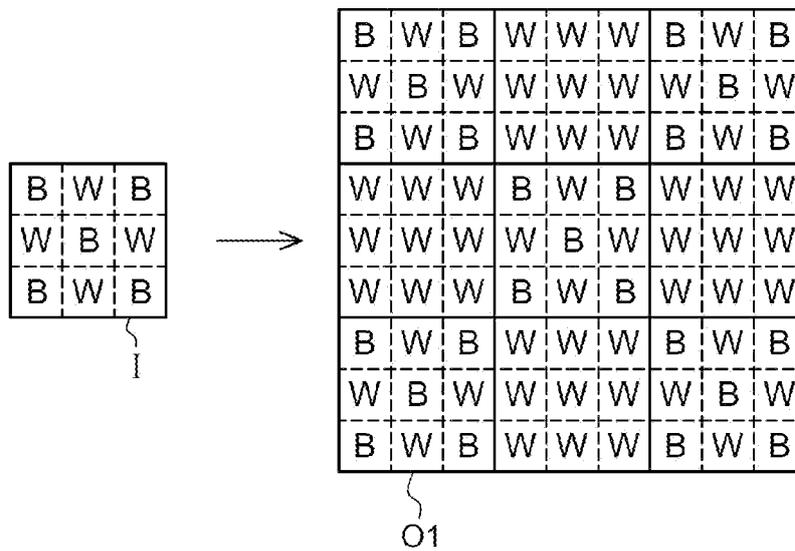
[Fig. 2]

Fig. 2

[Fig. 5]

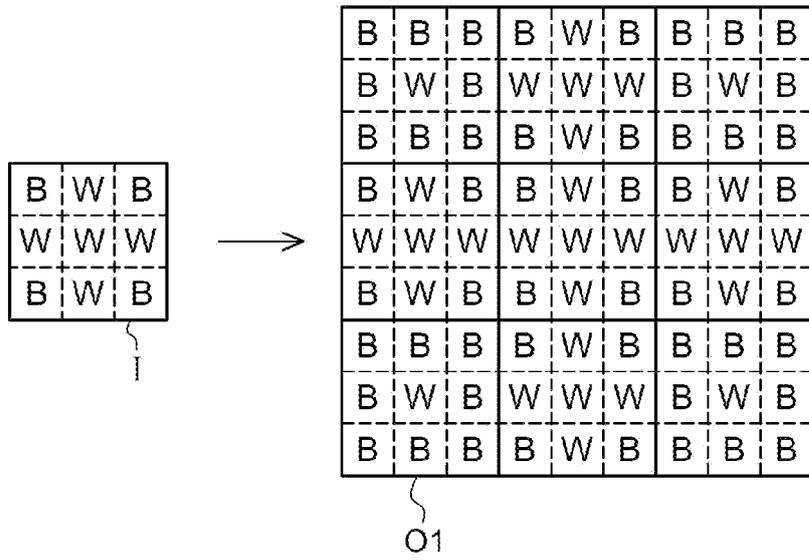
Fig. 5

[Fig. 6]

Fig. 6

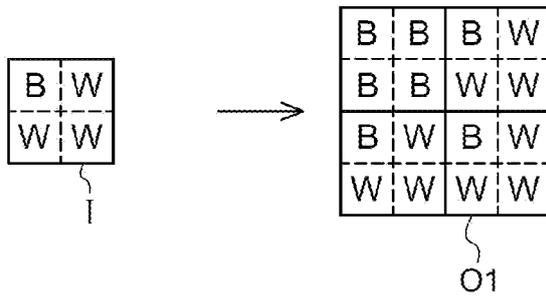
[Fig. 7]

Fig. 7



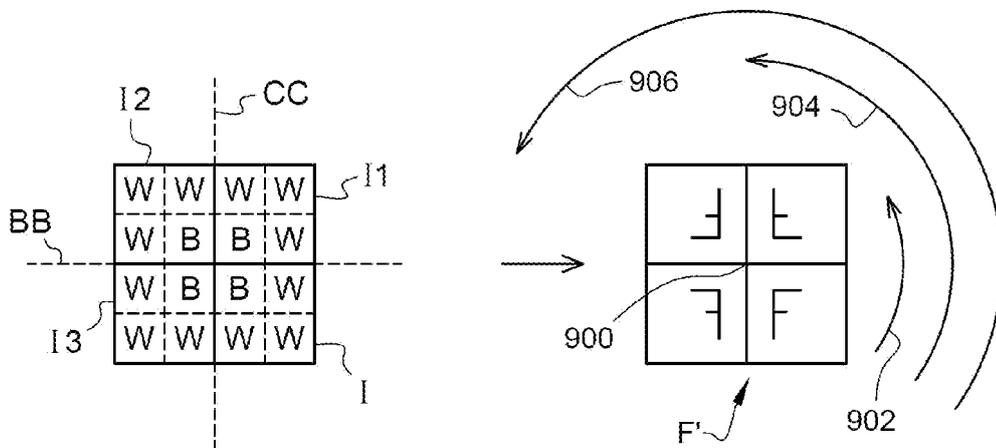
[Fig. 8]

Fig. 8

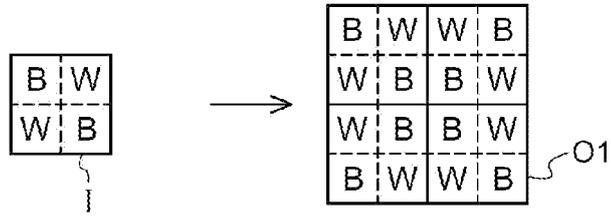


[Fig. 9]

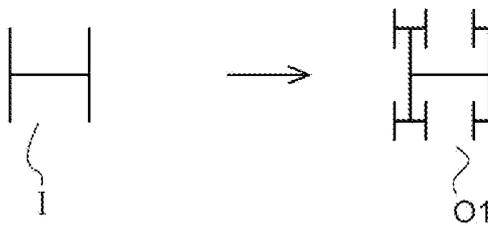
Fig. 9



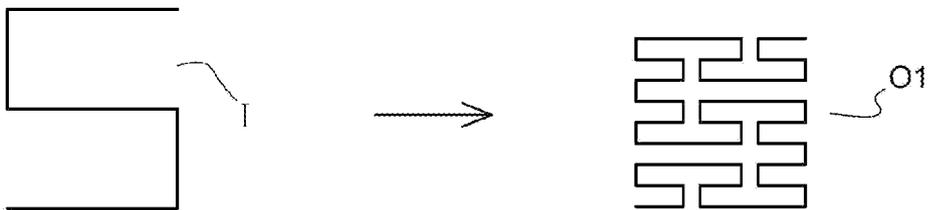
[Fig. 10]

Fig. 10

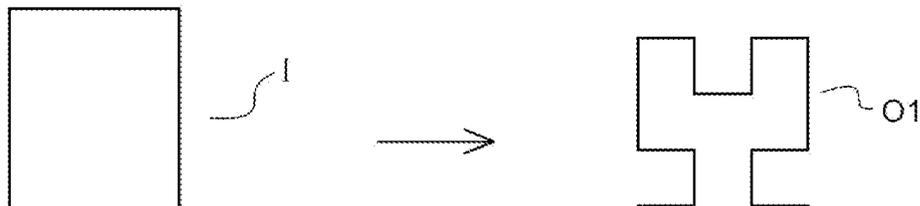
[Fig. 11]

Fig. 11

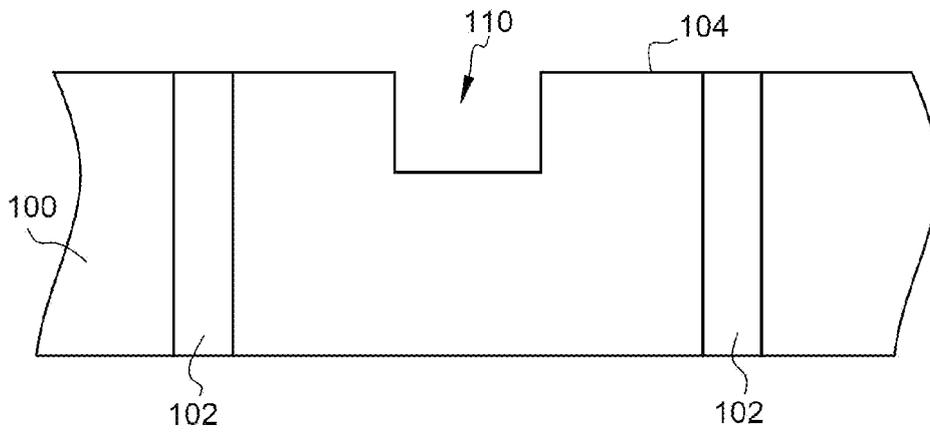
[Fig. 12]

Fig. 12

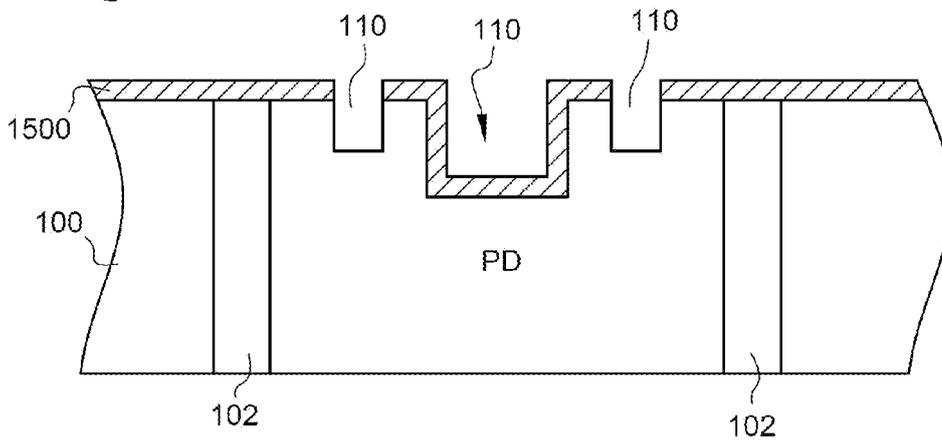
[Fig. 13]

Fig. 13

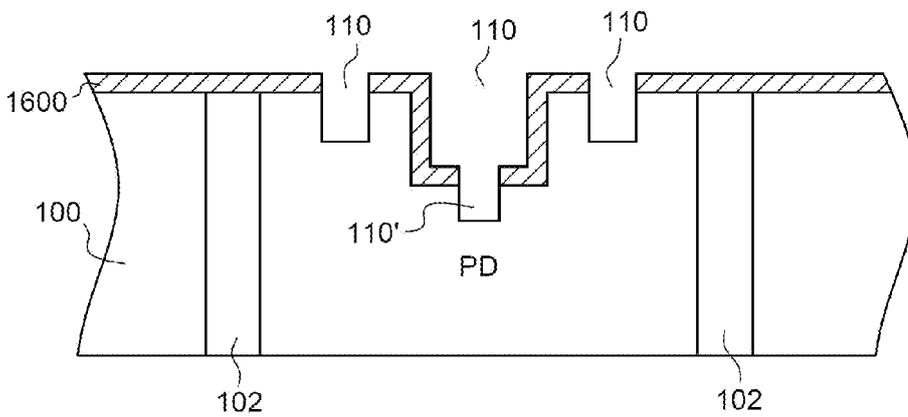
[Fig. 14]

Fig. 14

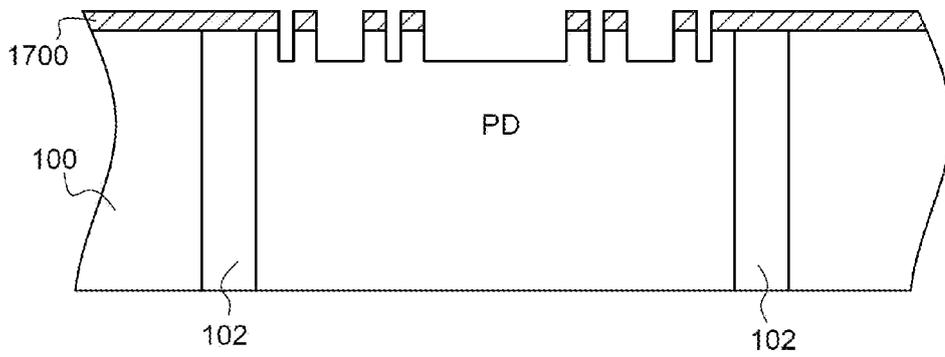
[Fig. 15]

Fig. 15

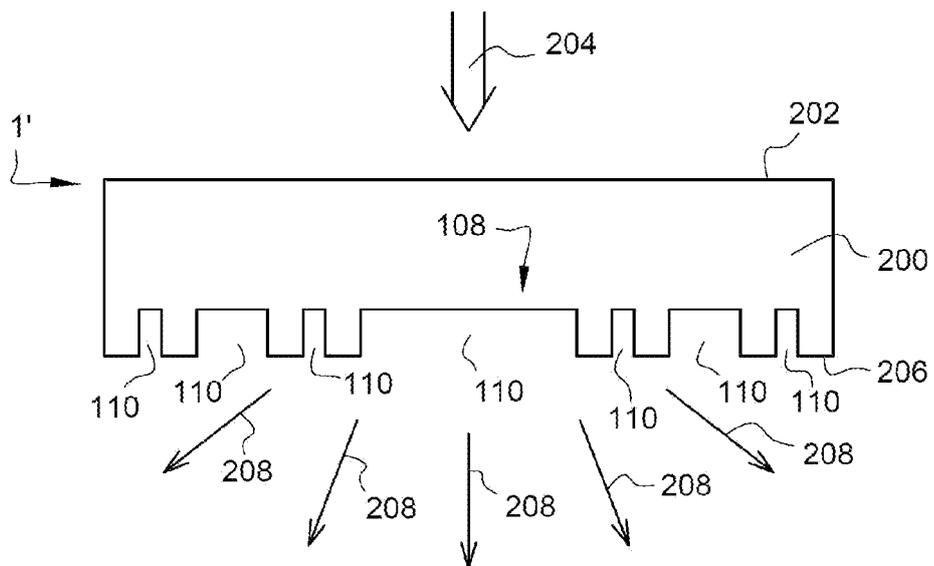
[Fig. 16]

Fig. 16

[Fig. 17]

Fig. 17

[Fig. 18]

Fig. 18

RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

US 2019/288132 A1 (WANG SHIH-YUAN [US] ET
AL) 19 septembre 2019 (2019-09-19)

EP 2 523 226 A1 (NUSOLA INC [JP])
14 novembre 2012 (2012-11-14)

CN 110 429 156 A (CHONGQING LIANXIN
PHOTOELECTRIC TECH RESEARCH INSTITUTE CO
LTD) 8 novembre 2019 (2019-11-08)

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

NEANT

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

NEANT