

(10) Numéro de publication internationale
WO 2025/008545 A1

AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, 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))
in the stacking direction (Δ).

(57) Abrégé : L'invention concerne une puce photonique (10) à structure hétérogène de semi-conducteur III-V sur un deuxième semi-conducteur comprenant, suivant une direction d'empilement (Δ) : un guide d'onde (11) en un premier matériau semi-conducteur III-V, dit guide d'onde III-V, comportant une première couche de confinement (110), une couche active (111) et une deuxième couche de confinement (112), un guide d'onde (12) en un deuxième matériau semi-conducteur, dit guide d'onde SC, comportant une couche (120) du deuxième matériau semi-conducteur. La première couche de confinement (110) comprenant une première portion (110a) superposée à la couche active (111) et au moins une extension (110b), s'étendant latéralement au-delà de ladite couche active (111), ladite extension (110b) ayant une épaisseur (E_b) suivant la direction d'empilement qui est supérieure à celle (E_a) de la première portion (110a), de manière à définir une face de contact électrique (116) située avant la première portion (110a) suivant la direction d'empilement (Δ).

DESCRIPTION

Titre de l'invention : Puce photonique à structure hétérogène de semi-conducteur III-V sur un deuxième semi-conducteur

[0001] L'invention concerne une puce photonique à structure hétérogène de semi-conducteur III-V sur un deuxième semi-conducteur permettant une transmission efficace, notamment adiabatique, sans perte, d'un mode optique entre un guide d'onde en un premier matériau semi-conducteur III-V et un guide d'onde en un deuxième matériau semi-conducteur.

[0002] Il existe un intérêt pour des circuits photoniques intégrés sur des puces en silicium utilisant des guides optiques en silicium. De tels circuits photoniques ont pour avantage d'être réalisables avec les lignes de fabrication à grande échelle des technologies CMOS bien connues. Cependant, le silicium est un semi-conducteur qui se prête mal à une utilisation comme source laser ou amplificateur optique, du fait de certains de ses paramètres physiques, notamment son gap indirect.

[0003] Or, les structures en semi-conducteurs III-V sont connues pour la réalisation de sources optiques efficaces. Des structures hétérogènes sont donc développées qui intègrent des semi-conducteurs de type III-V sur des plaques de silicium. Ces structures hétérogènes combinent donc la versatilité, la haute densité, et la scalabilité de la technologie CMOS avec le gain optique des matériaux semi-conducteurs III-V.

[0004] La figure 1 illustre un exemple de structure hétérogène 50 selon l'art antérieur. La structure 50 comprend un premier guide d'onde 51 en matériau semi-conducteur III-V couplé à un deuxième guide d'onde 52 en matériau silicium. Le guide d'onde III-V 51 comprend une première couche de confinement 510 dopée p et une deuxième couche de confinement 512 dopée n, de part et d'autre d'une couche active 511 contenant des puits quantiques multiples (ou MQWs pour « Multi Quantum Wells » en anglais). La première couche de confinement dopée p 510 comprend sur sa face externe une couche de fort dopage p 508 de manière à améliorer un contact électrique avec une couche d'électrode 506. Des électrodes 534, 536 permettent une connexion électrique de la deuxième couche de confinement dopée n 512, notamment au niveau d'une zone fortement dopée n de la deuxième couche de confinement n. Le deuxième guide optique 52 comprend une couche de silicium 520.

Les guides 51, 52 sont séparés par un matériau 55 en oxyde de silicium SiO₂ et sont suffisamment proches pour permettre un couplage optique entre eux.

[0005] Typiquement, les structures III-V à puits quantiques sont sensibles au phénomène d'absorption de bande d'intervallence (ou IVBA pour « intervalence band absorption » en anglais) dans lequel le signal lumineux interagit avec le dopage p de la première couche de confinement dopée p. Cela entraîne des pertes optiques qui dégradent les performances du laser. Pour minimiser cet effet, la première couche de confinement dopée p 510 est relativement plus épaisse que la deuxième couche de confinement dopée n 512 afin d'éloigner de la couche active 511 la couche fortement dopée p 508. La première couche de confinement 510 peut en outre présenter un gradient de dopage de la couche fortement dopée 508 vers la couche active 511 pour atténuer encore le phénomène IVBA. Le signal optique produit par les puits quantiques de la couche active 511 interagit alors principalement avec les zones faiblement dopées p de la première couche de confinement 510, ce qui permet une absorption faible ou modérée.

[0006] Or, pour un transfert de mode optique efficace entre le guide d'onde III-V 51 et le guide d'onde silicium 52, une condition d'accord de phase doit être respectée. A cet effet, le guide d'onde III-V 51 et le guide d'onde silicium 52 doivent présenter des indices effectifs de propagation égaux dans la zone, dite zone de transition, où le transfert de mode optique doit se produire. L'indice effectif de propagation n_{eff} est aussi connu sous le nom de « constante de phase du mode ». Il est défini par la relation suivante :

[Math 1]

$$n_g = n_{eff} - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda}$$

où n_g est l'indice de groupe et λ est la longueur d'onde du signal optique guidé par le guide d'onde. L'indice effectif de propagation d'un guide d'onde dépend des dimensions du cœur de ce guide d'onde et des indices des matériaux formant le cœur et la gaine de ce guide d'onde. Il peut être déterminé expérimentalement ou par simulation numérique.

[0007] Les puces photoniques peuvent être fabriquées à partir d'un substrat silicium sur oxyde (ou SOI pour « Silicon On Insulator » en anglais). L'épaisseur de la couche

en silicium monocristallin d'un tel substrat SOI est typiquement compris entre 220 et 300 nm. Dans la structure de la figure 1, le guide d'onde III-V 51 a généralement une épaisseur entre 2 et 3 μm . Une telle épaisseur de guide d'onde III-V 51 ne permet pas d'obtenir une condition d'accord de phase avec un guide d'onde silicium d'épaisseur entre 220 et 300 nm. La transmission de mode optique entre le guide d'onde III-V et le guide d'onde silicium ne pourrait alors pas se faire sans pertes. Pour pallier cela, dans la figure 1, l'épaisseur de la couche silicium du guide silicium 52 est augmentée par rapport à l'épaisseur classique, pour atteindre une valeur E_2 comprise entre 400 et 500 nm. Dans la structure hétérogène 50 illustrée en figure 1, la couche de silicium a en particulier une épaisseur E_2 de 500 nm qui permet d'obtenir une condition d'accord de phase entre les guides 51, 52. Cependant, le fait d'avoir une couche de silicium plus épaisse que dans les puces photoniques en silicium classiques rend plus complexe le procédé de fabrication de la structure hétérogène 50, car il n'est pas compatible avec les procédés de fabrication standards qui définissent des couches de silicium d'épaisseur comprise entre 220 et 300 nm.

[0008] On connaît une puce photonique comprenant une structure hétérogène III-V/silicium à partir de la publication "Membrane buried-heterostructure DFB laser with an optically coupled III-V/Si waveguide," T. Aihara *et al.* *Optics Express*, vol. 27, no. 25, p. 36438, Dec. 2019, doi: 10.1364/oe.27.036438. Cette publication décrit une structure hétérogène qui ne nécessite pas l'ajout d'une surépaisseur de silicium dans le guide d'onde silicium au niveau de la zone de transition. Cependant, pour cela, l'injection de courant dans la couche active ne se fait plus suivant une direction verticale, comme c'est le cas dans l'exemple de la figure 1, mais suivant une direction horizontale. La structure de la puce photonique de cette publication n'est pas classique dans le domaine des composants photoniques, notamment ceux destinés aux télécommunications optiques. Le courant électrique circulant entre l'électrode de la deuxième couche de confinement dopée n et l'électrode de la première couche de confinement dopée p voit une résistance électrique plus grande que dans une structure verticale, telle que dans la structure de la figure 1 par exemple.

[0009] Il est donc recherché une puce photonique comprenant une structure hétérogène III-V/ silicium dont l'architecture reste compatible avec les procédés de

fabrication industrielle des circuits photoniques en silicium, tout en limitant les pertes optiques dans la structure III-V et les pertes dans la transmission d'un mode optique entre le guide d'onde III-V et le guide d'onde silicium.

[0010] A cet effet, l'invention propose une puce photonique à structure hétérogène de semi-conducteur III-V sur un deuxième semi-conducteur comprenant, suivant une direction d'empilement :

- i. un guide d'onde en un premier matériau semi-conducteur III-V, dit guide d'onde III-V, comportant une première couche de confinement, une couche active et une deuxième couche de confinement,
- ii. un guide d'onde en un deuxième matériau semi-conducteur, dit guide d'onde SC, comportant une couche du deuxième matériau semi-conducteur,

le guide d'onde III-V comprenant en outre une première électrode et une deuxième électrode configurées pour respectivement assurer un contact électrique avec une desdites couches de confinement, de sorte que la couche active émette une onde lumineuse lorsqu'un courant électrique circule entre lesdites électrodes à travers la couche active et les couches de confinement, la première couche de confinement comprenant une première portion superposée à la couche active et au moins une extension, s'étendant latéralement au-delà de ladite couche active, ladite extension ayant une épaisseur suivant la direction d'empilement qui est supérieure à celle de la première portion, de manière à définir une face de contact électrique située avant la première portion suivant la direction d'empilement, ladite première électrode comprenant une première couche de contact venant contre ladite face de contact électrique.

[0011] En décalant une partie de l'épaisseur de la première couche de confinement sur le côté par rapport à la couche active, on limite l'influence de cette partie sur l'indice effectif de propagation du guide d'onde III-V. L'indice effectif de propagation du guide d'onde III-V peut alors être inférieur à l'indice effectif de propagation du guide d'onde III-V 51 de la structure hétérogène III-V / silicium de l'art antérieur illustrée en figure 1. Ainsi, il n'est plus nécessaire de rajouter une surcouche sur la couche de silicium du guide d'onde SC pour équilibrer les indices effectifs de propagation entre le guide d'onde III-V et le guide d'onde SC. En outre, par rapport à la structure III-V de l'art antérieur dans laquelle l'injection de courant dans la couche

active est horizontale, la puce photonique selon l'invention garde une injection verticale qui la rend plus compatible avec les processus de fabrication industrielle des technologies CMOS, en particulier la technologie SOI.

[0012] Selon un mode de réalisation, l'épaisseur de l'extension définit au moins une partie en forme d'escalier comprenant un palier bas séparé d'un palier haut par une hauteur de marche, le palier bas comprenant une face externe de la première portion de la première couche de confinement, le palier haut comprenant la face de contact de la première couche de confinement, la distance entre le pied de la hauteur de marche et la première portion étant comprise entre 0 et 2 μm .

[0013] Selon une variante, la distance entre le pied de la hauteur de marche et la première portion de la première couche de confinement est égale à zéro.

[0014] Selon un mode de réalisation, l'épaisseur de l'extension est configurée pour éviter un phénomène d'absorption de bande d'intervallence dans le guide d'onde III-V ; et la première portion a une épaisseur configurée pour une condition d'accord de phase entre le guide d'onde III-V et le guide d'onde SC.

[0015] Selon un mode de réalisation, l'extension présente un profil de dopage diminuant depuis la face de contact suivant ladite direction d'empilement ; et la première portion de la première couche de confinement présente un dopage sensiblement constant.

[0016] Selon un mode de réalisation, les guides d'onde s'étendent suivant une direction longitudinale, ladite puce comprenant une zone de transition dans laquelle le guide d'onde III-V et/ou le guide d'onde SC présentent un profilage le long de ladite direction longitudinale permettant de transmettre un mode optique entre le guide d'onde III-V et le guide d'onde SC.

[0017] Selon une variante, la dite extension est au moins comprise dans ladite zone de transition.

[0018] Selon une variante, hors de ladite zone de transition, la première couche de confinement consiste en la première portion et a une épaisseur configurée pour éviter un phénomène d'absorption de bande d'intervallence dans le guide d'onde III-V.

[0019] Selon un mode de réalisation, la deuxième couche de confinement s'étend au moins en partie latéralement au-delà de la couche active et de la première couche de

confinement ; et la deuxième électrode comprend au moins un via s'étendant suivant la direction d'empilement, notamment du côté de la première couche de confinement et de la couche active.

[0020] Selon un mode de réalisation, la dite première couche de confinement comprend deux extensions s'étendant chacune depuis des bords opposés de ladite première portion de la première couche de confinement.

[0021] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit en relation aux figures annexées suivantes :

[Fig 1] : la figure 1, déjà décrite, représente un exemple de puce photonique de l'art antérieur ;

[Fig 2] : la figure 2 représente un exemple de puce photonique selon l'invention ;

[Fig 3] : la figure 3 représente des vues de dessus et des vues de coupe de la puce de la figure 2 ;

[Fig 4] : la figure 4 est un schéma explicatif d'un courant électrique circulant dans la puce illustrée en figure 2 ;

[Fig 5] : la figure 5 illustre une variante de la puce photonique de la figure 2 ;

[Fig 6] : la figure 6 illustre une autre variante de la puce photonique de la figure 2 ;

[Fig 7] : la figure 7 est une vue de dessous schématique de la puce photonique illustrée en figure 2 ;

[Fig 8a] : la figure 8a présente des vues successives d'un mode optique se propageant dans la puce photonique illustrée en figure 2 ;

[Fig 8b] : la figure 8b présente d'autres vues successives d'un mode optique se propageant dans la puce photonique illustrée en figure 2 ;

[Fig 9] : la figure 9 représente des étapes successives d'un exemple de procédé de fabrication de la puce photonique de la figure 2.

[0022] La figure 2 représente un exemple de puce photonique 10 selon un exemple de l'invention. La puce photonique 10 comprend une structure hétérogène de semi-conducteur III-V sur un deuxième semi-conducteur. Ainsi, la puce photonique 10 comprend un guide d'onde en matériau semi-conducteur III-V, désigné dans ce qui

suit guide d'onde III-V 11, et un guide d'onde en un deuxième matériau semi-conducteur. En particulier, le deuxième matériau semi-conducteur est du silicium. Le guide d'onde en deuxième matériau semi-conducteur est désigné dans ce qui suit guide d'onde SC 12. Les guides d'ondes 11, 12 comprennent des couches formant un empilement.

[0023] Suivant une direction d'empilement Δ , le guide d'onde III-V 11 comprend une première couche de confinement 110, une couche active 111, une deuxième couche de confinement 112. La couche active 111 comprend notamment des puits quantiques, en particulier des puits quantiques multiples, qui permettent d'obtenir un gain optique à partir d'un courant électrique circulant entre les couches de confinement 110, 112. De manière connue en soi, les puits quantiques produisent alors une onde lumineuse qui va être confinée dans la partie active 111. Les couches de confinement 110, 112 sont situées respectivement de part et d'autre de la couche active 111. Notamment, la première couche de confinement 110 est située d'un côté de la couche active 111 ; la deuxième couche de confinement 112 est située du côté opposé de la couche active 111. Les couches de confinement 110, 112 ont en particulier des indices de réfraction inférieurs à celui de la couche active 111, permettant ainsi de confiner l'onde lumineuse dans la couche active 111 et de la guider. En particulier, les couches de confinement 110, 112 présentent des dopages de types opposés. Par exemple, la première couche de confinement 110 a un dopage de type p ; et la deuxième couche de confinement 112 a un dopage de type n. En particulier, la première couche de confinement 110, la couche active 111, et la deuxième couche de confinement 112 forment une jonction PIN. Le matériau III-V est par exemple du phosphore d'indium InP.

[0024] Le guide d'onde SC 12 se trouve après le guide d'onde III-V 11 suivant la direction d'empilement Δ . Le guide d'onde SC 12 comprend une couche en silicium 120. La couche de silicium 120 sert notamment de milieu de propagation de l'onde lumineuse dans le circuit photonique en silicium. En particulier, la couche de silicium 120 est située en vis-à-vis de la deuxième couche de confinement 112 suivant la direction d'empilement Δ .

[0025] La couche de silicium 120 est notamment comprise dans une couche de matériau diélectrique 14 servant de gaine pour le guide d'onde SC 12. Le matériau diélectrique est notamment de l'oxyde de silicium SiO₂. En particulier, une mince

couche du matériau diélectrique 14 sépare la deuxième couche de confinement 112 du guide d'onde III-V 11 de la couche de silicium 120 du guide d'onde SC 12, de façon à permettre un couplage optique entre le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12. L'épaisseur de matériau diélectrique 14 séparant la deuxième couche de confinement 112 et la couche de silicium 120 peut être comprise entre 5 nm et 200 nm, voire est égale à 50 nm. L'épaisseur de matériau diélectrique 14 peut être plus grande en allongeant la longueur d'une zone de transition optique décrite plus loin.

[0026] Ainsi, la première couche de confinement 110, la couche active 111, la deuxième couche de confinement 112 du guide d'onde III-V 11, la couche de silicium 120 du guide d'onde SC 12 forment au moins en partie un empilement de couches. Au sein de cet empilement, les couches s'étendent notamment suivant des plans parallèles, qui sont en particulier perpendiculaires à la direction d'empilement Δ .

[0027] Le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12 sont donc en particulier situés en vis-à-vis l'un de l'autre suivant la direction d'empilement Δ des couches de sorte à permettre un couplage optique entre les deux guides d'ondes.

[0028] Toujours suivant la direction d'empilement Δ , la puce photonique 10 comprend notamment un substrat 16 servant de support à la puce photonique 10. Ce substrat 16 est en particulier en silicium. Le substrat 16 peut servir de support à d'autres structures III-V ou d'autres composants photoniques en silicium, tels que par exemple un modulateur de phase ou un interféromètre de Mach-Zehnder.

[0029] Le guide d'onde III-V 11 comprend en outre une première électrode B1 qui assure un contact électrique avec la première couche de confinement 110 ; et une deuxième électrode B2 qui assure un contact électrique avec la deuxième couche de confinement 112. Ainsi, la couche active 11 peut émettre une onde lumineuse lorsqu'un courant circule entre les électrodes B1, B2 à travers les couches de confinement 110, 112.

[0030] La puce photonique 10 est particulière en ce que, de par la forme de la première couche de confinement 110, elle ne nécessite pas une surépaisseur de la couche de silicium pour un transfert de mode optique efficace entre le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12.

[0031] En effet, la première couche de confinement 110 comprend une première portion 110a superposée à la couche active 111, et une extension 110b qui s'étend latéralement au-delà de la couche active 111. Autrement dit, l'extension 110b forme une deuxième portion de la première couche de confinement 110, et s'étend depuis un côté de la première portion 110a de la première couche de confinement 110. En particulier, l'extension 110b s'étend depuis la première portion 110a suivant une direction transversale, notamment perpendiculaire, à la direction d'empilement Δ . L'extension 110b a une épaisseur E_b suivant la direction d'empilement Δ qui est supérieure à l'épaisseur E_a de la première portion 110a. L'extension 110b définit ainsi une face de contact électrique 116 située avant la première portion 110a suivant la direction d'empilement Δ . Ainsi, notamment, les faces ou interfaces suivantes sont situées l'une après l'autre suivant la direction d'empilement Δ : la face de contact 116 de la première couche d'empilement 110, une face supérieure 117 de la première portion 110a de la première couche de confinement, l'interface entre la première couche de confinement 110 et la couche active 111, l'interface entre la couche active 111 et la deuxième couche de confinement 112, l'interface entre le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12. La première électrode B1 comprend une première couche de contact B10 qui vient contre la face de contact 116 de la première couche de confinement 110 pour une connexion électrique de celle-ci.

[0032] Grâce à la première couche de confinement 110 en deux parties 110a, 110b, lors d'une transmission de mode optique entre le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12, l'indice effectif de propagation du mode optique n'est sensible qu'à la première portion 110a. Contrairement à l'art antérieur illustré en figure 1, il n'est donc pas nécessaire de rajouter une surépaisseur à la couche de silicium 120 par rapport à une puce photonique en silicium classique. L'épaisseur E_a de la première portion 110a peut être adaptée pour assurer une condition d'accord de phase entre le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12. En particulier, l'épaisseur de la première portion 110a peut être suffisamment petite pour permettre une condition d'accord de phase entre le guide III-V 11 et le guide d'onde SC 12. Par exemple, pour une épaisseur de couche de silicium 120 d'environ 220 nm, l'épaisseur E_a de la première portion 110a de la première couche de confinement 110 peut être comprise entre 200 et 500 nm. D'autre part, l'extension 110b permet d'éloigner de la couche active 111 une couche fortement dopée de la première couche de confinement 110.

L'extension 110b peut alors avoir une épaisseur E_b qui permet d'éviter ou de fortement limiter le phénomène d'absorption de bande d'intervale. Notamment, l'épaisseur de l'excroissance 110b est suffisamment grande pour éviter le phénomène d'absorption de bande d'intervale. Par exemple, l'épaisseur E_b de l'extension 110b peut être comprise entre 1 et 3 μm . Les épaisseurs E_a , E_b sont notamment définies suivant la direction d'empilement Δ . En outre, du fait de sa structure III-V qui permet une injection de courant verticale dans la couche active, la puce photonique 10 est plus compatible avec les technologies de fabrication CMOS que la puce de l'art antérieur qui comprend une structure III-V dans laquelle l'injection est horizontale.

[0033] Notamment, l'extension 110b s'étend depuis un bord de la première portion 110a qui est dans le prolongement d'un bord de la couche active 111. Autrement dit, vu selon la direction d'empilement Δ , l'extension 110b ne recouvre pas la couche active 111, ce qui limite le phénomène d'absorption de bande d'intervale. En particulier, une partie en forme d'escalier est définie par l'épaisseur E_b de l'extension 110b, notamment par la première portion 110a et la deuxième portion 110b. Un palier bas de la forme en escalier comprend la face externe 117 de la première portion 110a de la première couche de confinement 110. Notamment, la face externe 117 de la première portion 110a est sa face opposée par rapport à son interface avec la couche active 111. Un palier haut de la forme en escalier comprend la face de contact 116. Le palier haut et le palier bas sont séparés par une hauteur de marche, qui est notamment égale à la différence entre les épaisseurs E_a , E_b de la première portion 110a et de la deuxième portion 110b. De préférence, la distance entre le pied de la hauteur de marche et la première portion 110a est égale à zéro, aux incertitudes de positionnement près. Autrement dit, la hauteur de marche s'étend notamment depuis un bord de la première portion 110a qui est dans le prolongement d'un bord de la couche active 111. Cependant, la distance entre le pied de la hauteur de marche et la première portion 110a peut être supérieure ou égale à zéro, depuis le bord de la première portion 110a en s'éloignant de la couche active 111. La distance entre le pied de la hauteur de marche et la première portion 110a peut être comprise entre 0 et 2 μm , en fonction de l'encombrement de la puce photonique 10.

[0034] Afin de limiter le phénomène d'absorption de bande d'intervale, l'extension 110b de la première couche de confinement 110 peut présenter un profil de dopage

qui diminue depuis la face de contact 116 suivant la direction d'empilement Δ . Notamment, l'extension 110b est fortement dopée au niveau de la face de contact 116 pour permettre un bon contact électrique avec la première couche de contact B10. Le dopage de l'extension 110b peut aller de $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ à proximité de la face de contact 116 à $7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ à proximité de la couche active 111. La première portion 110a de la première couche de confinement 110 peut présenter un dopage sensiblement constant, notamment sensiblement égal à la plus petite valeur de dopage dans l'extension 110b. Par exemple, la première portion 110a présente un dopage de $7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$.

[0035] La couche active 111 peut être délimitée sur les côtés par une couche de matériau isolant 118. La couche de matériau isolant 118 permet de confiner sur les côtés l'onde lumineuse issue de la couche active 111. La couche de matériau isolant 118 s'étend notamment latéralement depuis un bord de la couche active 111. En particulier, l'extension 110b de la première couche de confinement 110 vient contre la couche de matériau isolant 118. La couche de matériau isolant 118 s'étend en particulier entre l'extension 110b de la première couche de confinement 110 et la couche en matériau diélectrique 14. La couche de matériau isolant 118 peut être en polymère, tel que le benzocyclobutène (ou BCB) par exemple, ou de la silice SiO_2 ou encore du nitrure d'aluminium AlN . La couche de matériau isolant 118 peut être en un matériau formant une hétérostructure semi-isolante enterrée (ou SIBH pour « semi insulating buried heterostructure »), tel que le phosphore d'indium semi-isolant, notamment un matériau InP:Fe .

[0036] La deuxième couche de confinement 112 peut s'étendre latéralement au-delà de la couche active 111 et de la première couche de confinement 110 pour un contact électrique. Notamment, la deuxième électrode B2 du guide d'onde III-V comprend un via qui s'étend suivant la direction d'empilement Δ , en particulier du côté de la première couche de confinement 110. Une couche de contact électrique B20 est en particulier déposée au fond du via sur la deuxième couche de confinement 112 pour un contact électrique de celle-ci.

[0037] Une couche de passivation 113 peut recouvrir la structure hétérogène III-V/silicium. La couche de passivation 113 peut être en polymère, tel que le benzocyclobutène (ou BCB) par exemple, ou de la silice SiO_2 ou encore du nitrure d'aluminium AlN .

[0038] La figure 3 présente une vue de dessus partielle 1 de la puce photonique 10. Pour rendre la représentation lisible, dans la vue 1, la couche de passivation 113, les électrodes B1, B2, la première portion 110a de la première couche de confinement 110 et la deuxième couche de confinement 112 ne sont pas représentées. Les autres vues a, b, c, d de la figure 3 présentent des vues de coupe de la puce photonique 10 prises le long des droites correspondantes de la vue 1.

[0039] Le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12 s'étendent notamment suivant une direction longitudinale correspondant à une direction de propagation des ondes lumineuses. Notamment, la direction longitudinale est perpendiculaire à la direction d'empilement Δ . De manière connue en soi, la puce photonique 10 comprend une zone de transition optique 17 dans laquelle le guide d'onde SC 12 ou le guide d'onde III-V 11 présentent un profil le long de la direction longitudinale permettant un transfert ou couplage de mode optique d'un guide à l'autre. Par exemple, la section transversale du guide d'onde SC 12, notamment de la couche de silicium 120, diminue progressivement alors que la section transversale du guide d'onde III-V 11, notamment de la couche active 111, augmente progressivement. En particulier lorsque la couche isolante 118 du guide d'onde III-V forme une hétérostructure semi-isolante, elle présente elle-même une section transversale qui augmente progressivement, comme par exemple représenté dans les vues a, b. Ensuite, la section de la couche active 11 augmente progressivement comme par exemple représenté dans les vues c, d. La première couche de confinement 110 comprend l'extension 110b au moins dans la zone de transition 17, afin d'améliorer le transfert de mode optique.

[0040] Au-delà de la zone de transition 17, notamment en allant vers la droite dans la vue 1 de la figure 3, le guide d'onde III-V 11 et le guide d'onde SC 12 présentent notamment des sections transversales constantes. En particulier, le mode optique est alors confiné dans le guide d'onde III-V 11. Le guide d'onde III-V 11 peut avoir une fonction d'amplificateur optique semi-conducteur. Un courant électrique circule alors entre les électrodes B1, B2 du guide d'onde III-V 11 pour amplifier l'onde lumineuse III-V se propageant dans le guide d'onde III-V 11. La première couche de confinement 110 peut encore comprendre l'extension 110b au-delà de la zone de transition 17. Le chemin du courant électrique i circulant dans la structure III-V est par exemple illustré en figure 4.

[0041] Pour une puce photonique de l'art antérieur ayant une injection de courant verticale, dans laquelle le guide d'onde III-V a une longueur de 600 μm , et la première couche de confinement est intégralement superposée à la couche active, avec une épaisseur de 2 μm et une largeur de 2,4 μm , la résistance électrique R1 à travers la première couche de confinement peut être d'environ 6 Ω . Dans la puce photonique 10, l'injection de courant est verticale ; mais le courant électrique circule aussi latéralement à travers la section S à l'interface de la première portion 110a et de la deuxième portion 110b, ce qui limite notamment le courant par rapport à l'art antérieur. Par exemple, lorsque le guide d'onde III-V 11 a une longueur de 600 μm , une épaisseur Ea de la première portion 110a de 500 nm et une épaisseur Eb de l'extension 110b de 2 μm , la résistance Rs de la section S peut être d'environ 5,8 Ω . La résistance totale à travers la première couche de confinement 110 peut être alors de 11,8 Ω . Cependant, la puce photonique 10 reste plus avantageuse que la puce de l'art antérieur car la couche de silicium peut avoir une épaisseur E de 220 nm. En outre, la puce photonique 10 reste plus avantageuse qu'une puce photonique de l'art antérieur décrite précédemment dans laquelle l'injection de courant dans la structure III-V est suivant une direction horizontale. Pour un guide d'onde III-V de longueur 500 μm , celle-ci a une résistance d'environ 25 Ω .

[0042] Dans une variante illustrée en figure 5, hors de la zone de transition optique 17, la puce photonique 20 a une architecture classique de structure hétérogène III-V/silicium. La première couche de confinement 110 ne comprend que la première portion et est dépourvue de l'extension 110b. La première couche de confinement 110 peut alors avoir une épaisseur et un gradient de dopage configurés pour éviter le phénomène d'absorption de bande d'intervallence dans le guide d'onde III-V 11. La puce photonique 20 de la figure 5 est par ailleurs identique à la puce photonique 10 décrite précédemment. Cette variante a une résistance électrique similaire à celle de la puce de l'art antérieur décrite dans le paragraphe précédent, car le courant électrique circule en grande majorité à travers la partie du guide d'onde III-V qui est de section constante.

[0043] La figure 6 illustre un exemple de puce photonique 30 selon une variante dans laquelle la première couche de confinement 310 comprend deux extensions 310b. La puce photonique 30 est par ailleurs identique à la puce photonique 10 décrite en relation avec les figures précédentes. Chacune des extensions 310b est similaire à

l'extension 110b de la puce photonique 10 décrite en relation avec les figures précédentes. Dans cette variante, la présence de deux extensions 310b permet de diminuer d'un facteur 2 la contribution de la partie dopée p dans la résistance électrique totale vue par le courant injecté dans la structure III-V.

[0044] La figure 7 présente une vue de dessous partielle de la puce photonique 10, dans laquelle seule la couche de silicium 120 du guide d'onde SC 12 et les bords de l'ensemble formé par la couche active 111 et la couche de matériau isolant 118 sont représentés. La puce photonique 10 s'étend suivant un plan (X, Z) perpendiculaire à la direction d'empilement Δ . La direction Z correspond à la direction longitudinale de puce photonique 10 ; la direction X correspond à une direction transversale de la puce photonique 10. Chaque axe X, Z porte une échelle en μm . De manière similaire à la figure 3, dans la zone de transition, sur une première longueur L1 la couche de silicium 120 est profilée de sorte que sa section diminue ; sur une deuxième longueur L2, l'ensemble formé par la couche active 111 et la couche de matériau isolant 118 est profilé.

[0045] Les figures 8a, 8b représentent la répartition spatiale du mode optique dans des sections transversales prises à des positions Z successives de la figure 7, lors d'une transmission d'un mode optique du guide d'onde SC 12 vers le guide d'onde III-V 11. Dans ces vues transversales, l'origine de l'axe X correspond au point de coordonnée 4,5 sur l'axe X de la figure 7. Le long de l'axe longitudinal Z, on observe une transmission progressive du mode optique depuis le guide d'onde SC 12 vers le guide d'onde III-V 11. La puce photonique 10 permet notamment un transfert de mode optique efficace entre le guide d'onde III-V et le guide d'onde SC, notamment une transmission à 97%.

[0046] Un exemple de procédé de fabrication de la puce photonique 10 va être décrit en relation avec la figure 9. Une structure III-V formée d'une couche dopée p 4, une couche intermédiaire 3 et une couche dopée n 2 est d'abord formée par croissance sur un substrat III-V, notamment de phosphure d'indium InP. L'ensemble est alors fixé par collage sur une puce photonique en silicium. Le substrat III-V est ensuite enlevé. Alternativement, une fine couche de substrat III-V peut être collée sur la puce photonique en silicium. La croissance se fait alors depuis cette fine couche de substrat III-V directement sur le substrat en silicium (vue a). Puis, un masque diélectrique M est déposé sur la couche dopée p 4 (vue b). Ce masque M permet de

définir par gravure, la couche active 111 dans la couche intermédiaire 3. La couche dopée n forme alors la deuxième couche de confinement 112. Un matériau isolant, est épitaxié autour de la couche active 111 pour former la couche de matériau isolant 118 (vue c). Le masque M est retiré. Puis, on procède à la croissance d'une couche dopée p additionnelle de la couche 4 (vue d). Préalablement à la croissance, une couche facultative de matériau quaternaire 5 peut être déposée pour recouvrir la couche dopée p 4 initiale. Cette couche de matériau quaternaire 5 est notamment en un alliage GaInAsP. Elle forme une couche sacrificielle qui facilite le procédé de fabrication. Elle sert notamment de couche d'arrêt pour la gravure ultérieure de la couche dopée p 4. La première couche de confinement 110 est alors définie par gravure (vue e). Une partie du matériau isolant 118 est alors enlevée pour définir des emplacements où la couche de contact B20 est déposée sur la deuxième couche de confinement 112 ; et la couche de contact B10 est déposée sur la face de contact 116 de la première couche de confinement 110.

[0047] Dans le guide d'onde décrit en relation avec les figures, le deuxième matériau semi-conducteur est par exemple du silicium, du germanium, du nitrure de silicium ou du niobate de lithium ou un alliage de ceux-ci. Le deuxième matériau semi-conducteur peut être tout matériau semi-conducteur adapté pour le confinement et la propagation d'un mode optique dans le guide d'onde SC. Notamment, un tel matériau présente un indice de réfraction suffisamment élevé pour confiner un mode optique, en particulier un indice de réfraction supérieur ou égal à 2.

[0048] Par exemple, le deuxième matériau est un semi-conducteur à gap indirect, ce qui le rend défavorable pour la réalisation de composants laser ou d'une amplification optique. Le deuxième matériau peut-être un matériau à gap direct, mais dont les caractéristiques physiques sont défavorables à la génération d'un laser ou à une amplification optique. Dans ces deux cas, la structure III-V pallie les insuffisances du deuxième matériau semi-conducteur.

REVENDICATIONS

1. Puce photonique (10,20,30) à structure hétérogène de semi-conducteur III-V sur un deuxième semi-conducteur comprenant, suivant une direction d'empilement (Δ) :

- i. un guide d'onde (11) en un premier matériau semi-conducteur III-V, dit guide d'onde III-V, comportant une première couche de confinement (110), une couche active (111) et une deuxième couche de confinement (112),
- ii. un guide d'onde (12) en un deuxième matériau semi-conducteur, dit guide d'onde SC, comportant une couche (120) du deuxième matériau semi-conducteur,

le guide d'onde III-V (11) comprenant en outre une première électrode (B1) et une deuxième électrode (B2) configurées pour respectivement assurer un contact électrique avec une desdites couches de confinement, de sorte que la couche active (111) émette une onde lumineuse lorsqu'un courant électrique (i) circule entre lesdites électrodes à travers la couche active (111) et les couches de confinement,

la première couche de confinement (110) comprenant une première portion (110a) superposée à la couche active (111) et au moins une extension (110b), s'étendant latéralement au-delà de ladite couche active (111),

ladite extension (110b) ayant une épaisseur (E_b) suivant la direction d'empilement (Δ) qui est supérieure à celle (E_a) de la première portion (110a), de manière à définir une face de contact électrique (116) située avant la première portion (110a) suivant la direction d'empilement (Δ), ladite première électrode (B1) comprenant une première couche de contact (B10) venant contre ladite face de contact électrique (116).

2. Puce photonique (10, 20, 30) selon la revendication 1, dans laquelle l'épaisseur (E_b) de l'extension (110b) définit au moins une partie en forme d'escalier comprenant un palier bas séparé d'un palier haut par une hauteur de marche, le palier bas comprenant une face externe (117) de la première portion (110a) de la première couche de confinement (110), le palier haut comprenant la face de contact

(116) de la première couche de confinement (110), la distance entre le pied de la hauteur de marche et la première portion (110a) étant comprise entre 0 et 2 μm .

3. Puce photonique (10, 20, 30) selon la revendication précédente, dans laquelle la distance entre le pied de la hauteur de marche et la première portion (110a) de la première couche de confinement (110) est égale à zéro.

4. Puce photonique (10, 20, 30) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle l'épaisseur (E_b) de l'extension (110b) est configurée pour éviter un phénomène d'absorption de bande d'intervallence dans le guide d'onde III-V (11) ; et la première portion (110a) a une épaisseur (E_a) configurée pour une condition d'accord de phase entre le guide d'onde III-V (11) et le guide d'onde SC (12).

5. Puce photonique (10, 20, 30) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle l'extension (110b) présente un profil de dopage diminuant depuis la face de contact (116) suivant ladite direction d'empilement (Δ) ; et la première portion (110a) de la première couche de confinement (110) présente un dopage sensiblement constant.

6. Puce photonique (10, 20, 30) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle les guides d'onde (11, 12) s'étendent suivant une direction longitudinale, ladite puce comprenant une zone de transition (17) dans laquelle le guide d'onde III-V (11) et/ou le guide d'onde SC (12) présentent un profilage le long de ladite direction longitudinale permettant de transmettre un mode optique entre le guide d'onde III-V (11) et le guide d'onde SC (12).

7. Puce photonique (10, 20, 30) selon la revendication précédente, dans laquelle la dite extension (110b) est au moins comprise dans ladite zone de transition (17).

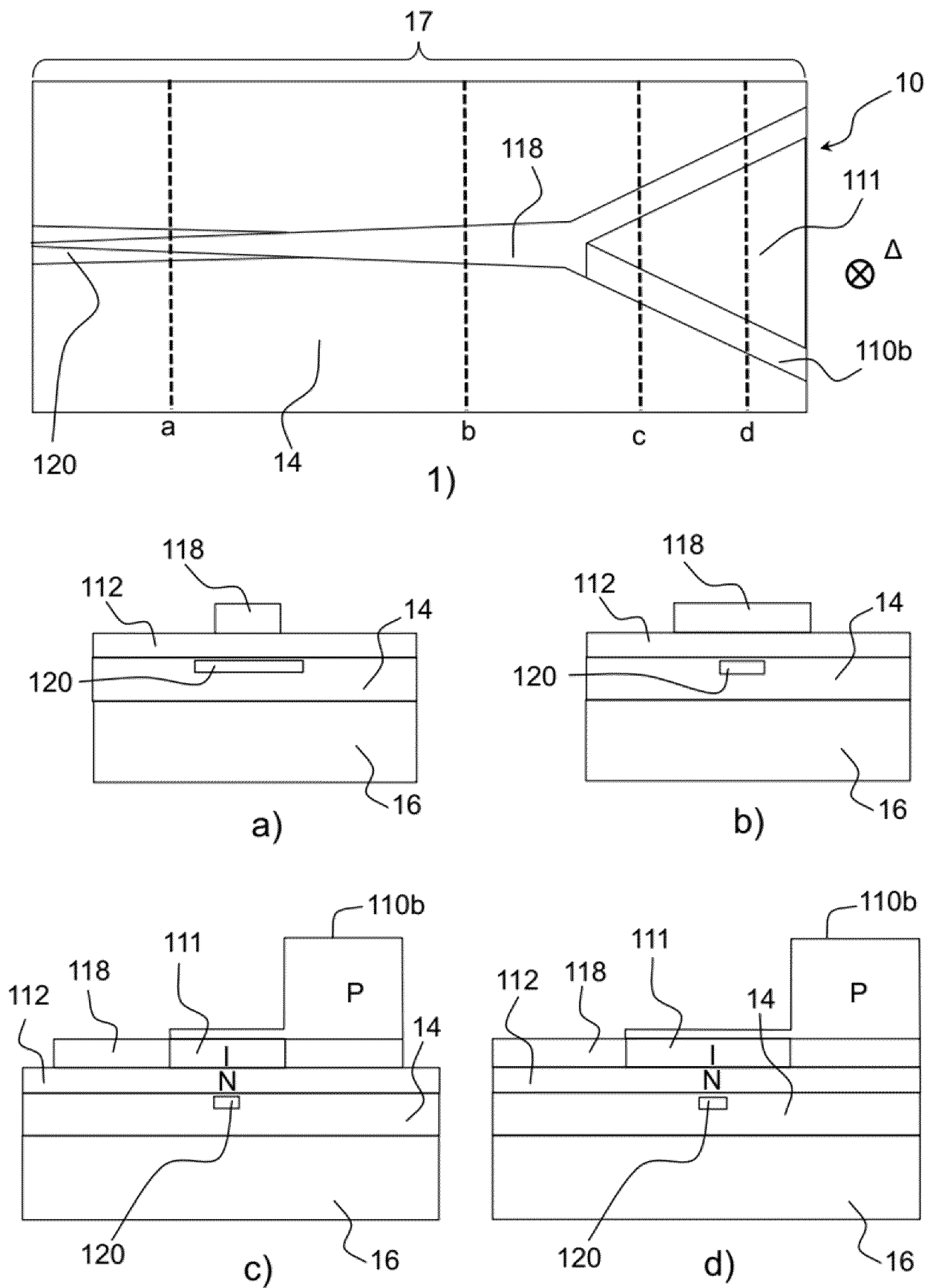
8. Puce photonique (20) selon la revendication 6 ou 7, dans laquelle, hors de ladite zone de transition (17), la première couche de confinement (110) consiste en la première portion (110a) et a une épaisseur (E_a) configurée pour éviter un phénomène d'absorption de bande d'intervallence dans le guide d'onde III-V (11).

9. Puce photonique (10, 20, 30) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la deuxième couche de confinement (112) s'étend au moins en partie latéralement au-delà de la couche active (111) et de la première couche de confinement (110) ; et la deuxième électrode (B2) comprend au moins un via

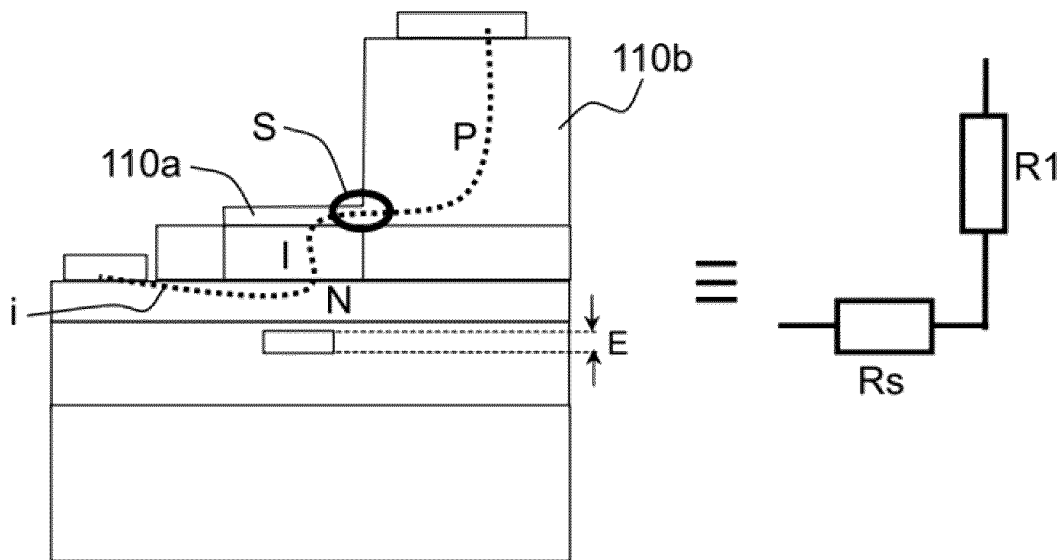
s'étendant suivant la direction d'empilement (Δ), notamment du côté de la première couche de confinement (110) et de la couche active (111).

10. Puce photonique (30) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la dite première couche de confinement (110) comprend deux extensions (310b) s'étendant chacune depuis des bords opposés de ladite première portion (110a) de la première couche de confinement (110).

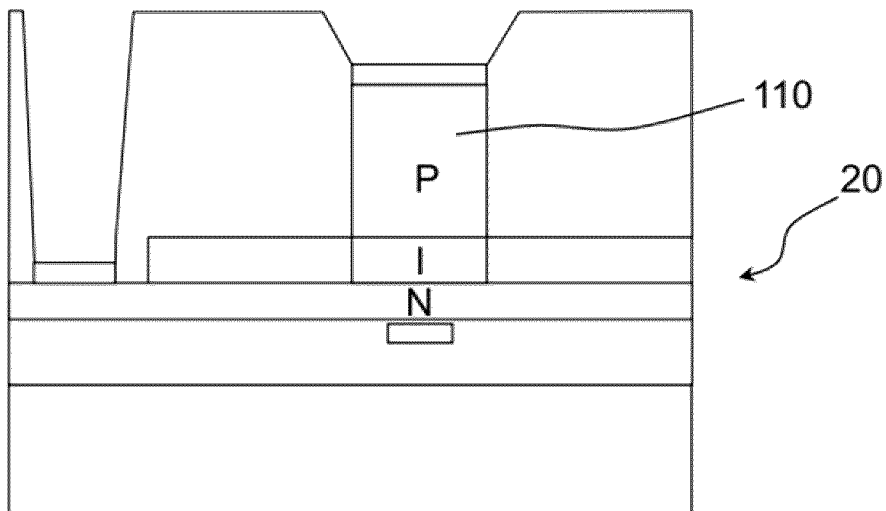
[Fig. 3]



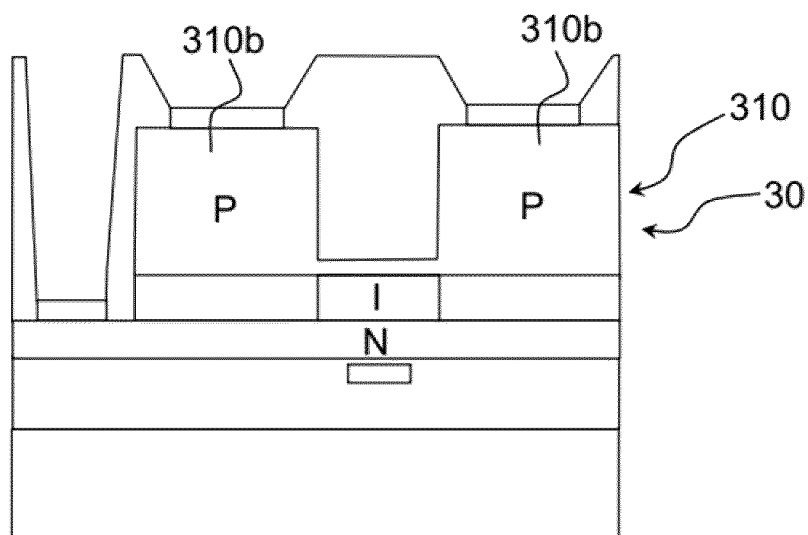
[Fig. 4]



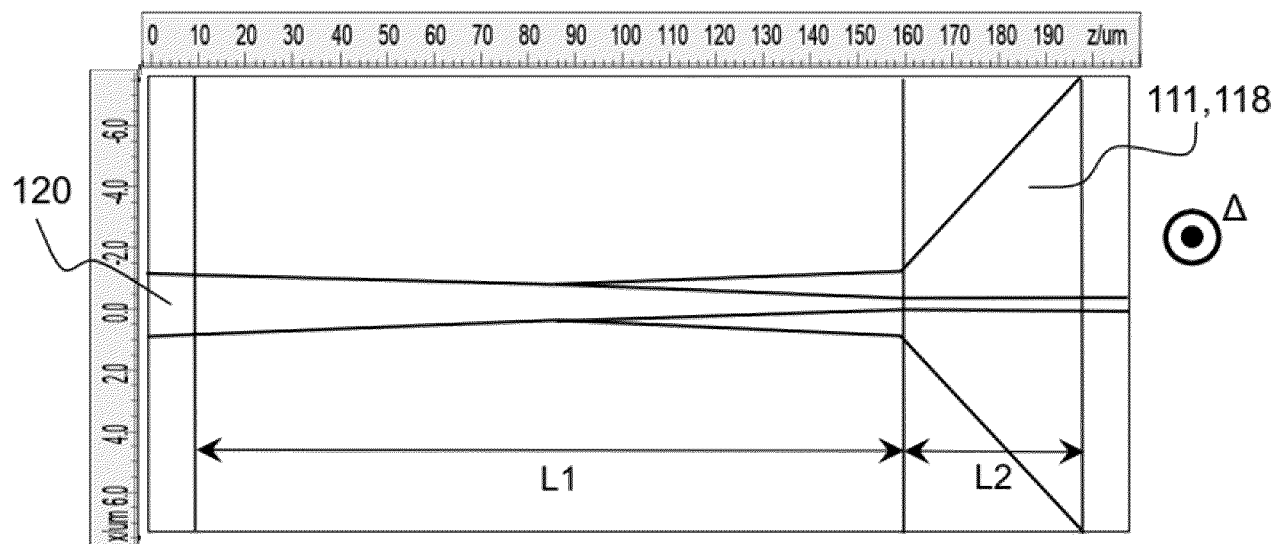
[Fig. 5]



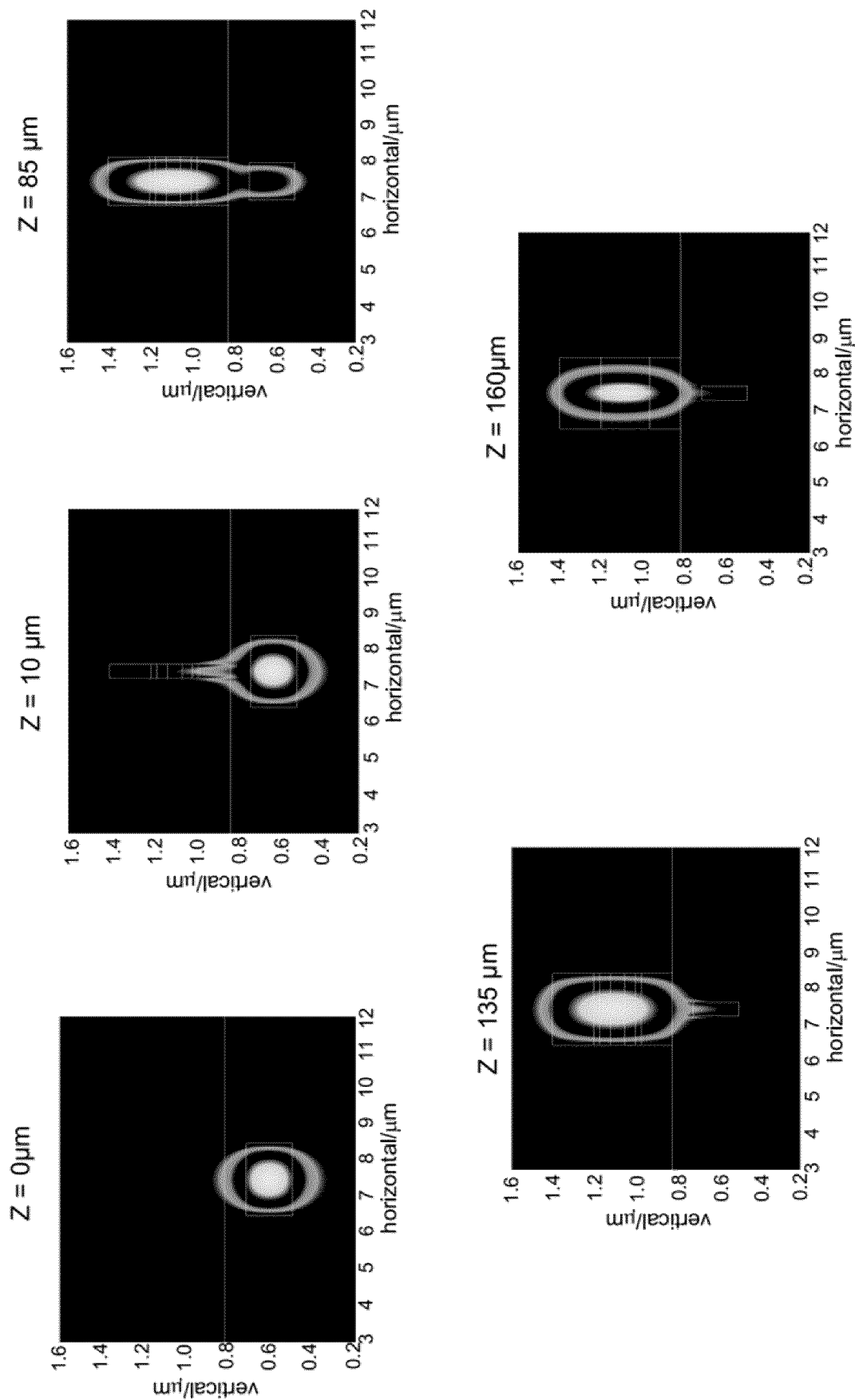
[Fig. 6]



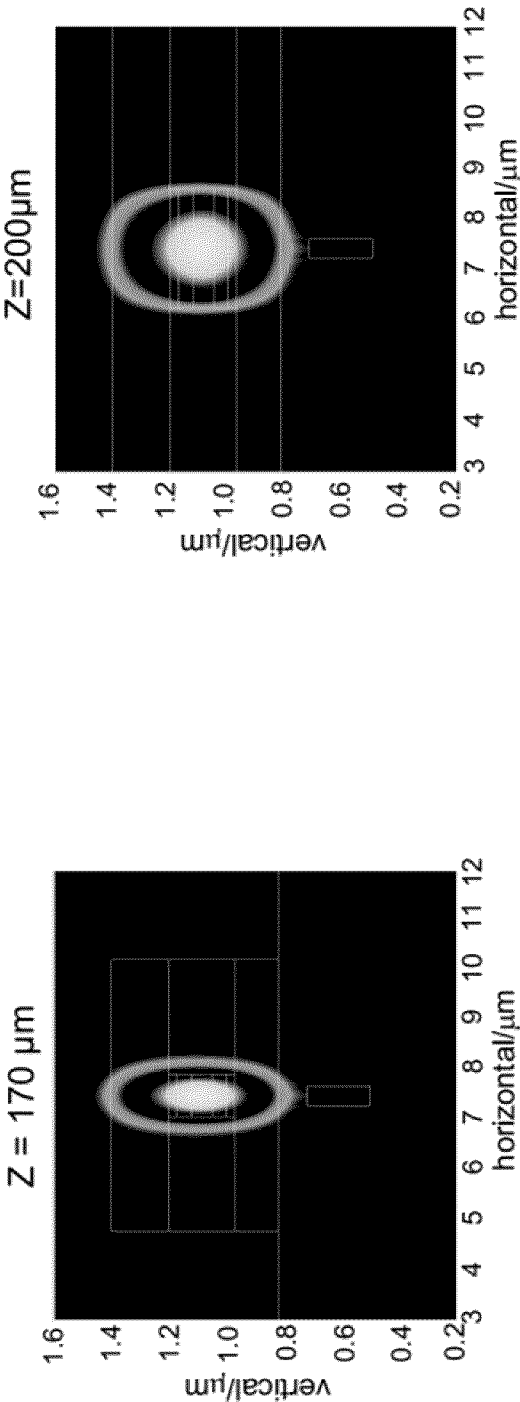
[Fig. 7]



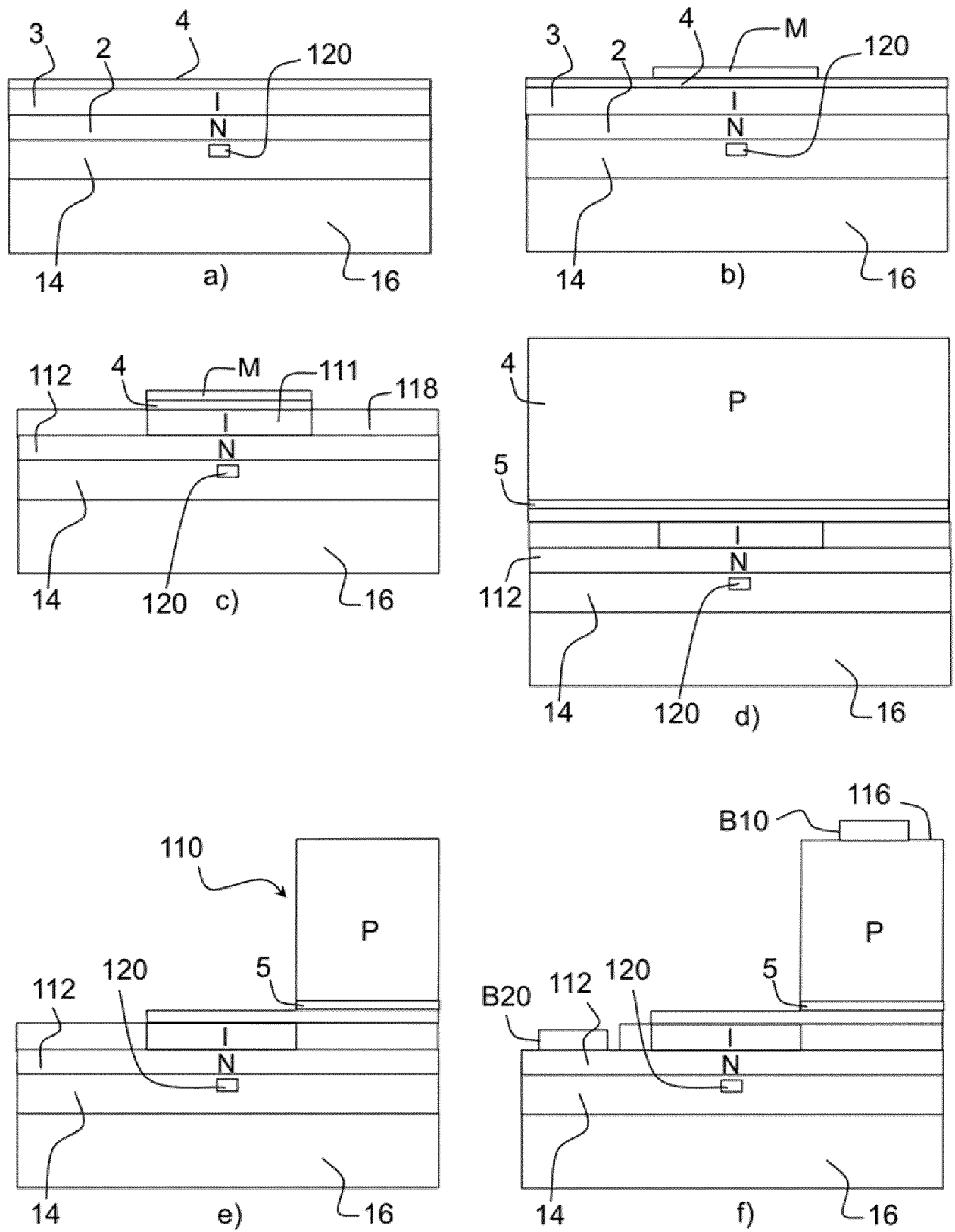
[Fig. 8a]



[Fig. 8b]



[Fig. 9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/069135

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01S 5/02 (2006.01)i; H01S 5/10 (2021.01)i; H01S 5/042 (2006.01)i; H01S 5/20 (2006.01)i; H01S 5/22 (2006.01)i; H01S 5/32 (2006.01)i; H01S 5/227 (2006.01)i 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) H01S 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		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 3074372 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 31 May 2019 (2019-05-31) page 8 - page 10 page 16, line 20 - page 19; figure 3 page 29 - page 33; figures 8A, 8B, 9	1-10
A	US 2007153868 A1 (WEST LAWRENCE C [US] ET AL) 05 July 2007 (2007-07-05) paragraph [0040] - paragraph [0051]; figures 1A,1B	1-10
A	US 2021336412 A1 (NAKAO RYO [JP] ET AL) 28 October 2021 (2021-10-28) paragraph [0107] - paragraph [0118]; figures 18, 19 paragraph [0096] - paragraph [0103]; figures 14, 15	1-10
☐ 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 06 September 2024		Date of mailing of the international search report 20 September 2024
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands (Kingdom of the) Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Hervé, Denis Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2024/069135

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
FR	3074372	A1	31 May 2019	NONE			
US			2007153868	A1			05 July 2007
				TW	200737628	A	01 October 2007
				US	2007153868	A1	05 July 2007
				WO	2007059147	A2	24 May 2007
US			2021336412	A1			28 October 2021
				CN	110637400	A	31 December 2019
				JP	6738488	B2	12 August 2020
				JP	WO2018212195	A1	07 November 2019
				US	2021336412	A1	28 October 2021
				WO	2018212195	A1	22 November 2018

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2024/069135

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE					
INV.	H01S5/02 H01S5/32	H01S5/10 H01S5/227	H01S5/042	H01S5/20	H01S5/22
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) H01S					
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					
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS					
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents				no. des revendications visées
A	FR 3 074 372 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 31 mai 2019 (2019-05-31) page 8 - page 10 page 16, ligne 20 - page 19; figure 3 page 29 - page 33; figures 8A, 8B, 9 -----				1 - 10
A	US 2007/153868 A1 (WEST LAWRENCE C [US] ET AL) 5 juillet 2007 (2007-07-05) alinéa [0040] - alinéa [0051]; figures 1A, 1B -----				1 - 10
A	US 2021/336412 A1 (NAKAO RYO [JP] ET AL) 28 octobre 2021 (2021-10-28) alinéa [0107] - alinéa [0118]; figures 18, 19 alinéa [0096] - alinéa [0103]; figures 14, 15 -----				1 - 10
☐ 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		
6 septembre 2024			20/09/2024		
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 Hervé, Denis		

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2024/069135

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 3074372	A1	31-05-2019	AUCUN	

US 2007153868	A1	05-07-2007	TW 200737628 A	01-10-2007
			US 2007153868 A1	05-07-2007
			WO 2007059147 A2	24-05-2007

US 2021336412	A1	28-10-2021	CN 110637400 A	31-12-2019
			JP 6738488 B2	12-08-2020
			JP WO2018212195 A1	07-11-2019
			US 2021336412 A1	28-10-2021
			WO 2018212195 A1	22-11-2018
