

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

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

3 085 369

②① N° d'enregistrement national : **18 57846**

⑤① Int Cl⁸ : **B 82 Y 20/00** (2018.01), G 02 F 1/01, G 02 F 1/035

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ MODULATEUR ELECTRO-OPTIQUE.

②② Date de dépôt : 31.08.18.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 06.03.20 Bulletin 20/10.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 08.01.21 Bulletin 21/01.

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) : BAUDOT CHARLES.

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

⑦④ Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

FR 3 085 369 - B1



DESCRIPTION

TITRE : Modulateur électro-optique

Domaine technique

[0001] La présente description concerne de façon générale les circuits photoniques (optiques et/ou optoélectroniques), et plus particulièrement les modulateurs électro-optiques de ces circuits photoniques.

Technique antérieure

[0002] On connaît des modulateurs électro-optiques à absorption dans lesquels, en fonction de la polarisation d'un matériau traversé par un signal optique, on module le coefficient d'absorption du matériau, donc la puissance optique du signal.

Résumé de l'invention

[0003] Il serait souhaitable de disposer d'un modulateur électro-optique à absorption et d'un procédé de fabrication d'un tel modulateur palliant tout ou partie des inconvénients des modulateurs électro-optiques à absorption connus et de leurs procédés de fabrication.

[0004] Un mode de réalisation prévoit un procédé de fabrication d'un modulateur électro-optique à absorption compatible avec les techniques de fabrication de circuits intégrés, en particulier de type CMOS.

[0005] Un mode de réalisation prévoit un modulateur électro-optique à absorption dans lequel les pertes sont plus faibles que dans des modulateurs électro-optiques connus.

[0006] Un mode de réalisation prévoit un modulateur électro-optique plus compact que des modulateurs électro-optiques connus.

[0007] Un mode de réalisation prévoit un modulateur électro-optique à absorption adapté à moduler la puissance optique

B17228 – 18-GR3-0155

d'un signal dont la ou les longueurs d'onde sont de l'ordre de 1310 nm.

[0008] Ainsi, un mode de réalisation prévoit un modulateur électro-optique comprenant un guide d'onde comportant de multiples puits quantiques dans une cavité du guide d'onde.

[0009] Selon un mode de réalisation, la cavité traverse le guide d'onde transversalement.

[0010] Selon un mode de réalisation, la cavité débouche au niveau d'une face inférieure du guide d'onde.

[0011] Selon un mode de réalisation, la cavité a des parois inclinées par rapport à la normale à la face inférieure du guide d'onde.

[0012] Selon un mode de réalisation, le guide d'onde comprend deux régions semiconductrices, de préférence en silicium, de part et d'autre de la cavité, les deux régions étant dopées avec des types de conductivités différents.

[0013] Selon un mode de réalisation, les puits quantiques multiples sont constitués par une alternance de premières couches de barrières quantiques et de deuxièmes couches de puits quantiques.

[0014] Selon un mode de réalisation, les premières couches sont en silicium-germanium, les deuxièmes couches étant en germanium.

[0015] Selon un mode de réalisation, chacune des premières et deuxièmes couches affleure au niveau de la face inférieure du guide d'onde.

[0016] Selon un mode de réalisation, le guide d'onde repose sur et est en contact avec une troisième couche, la troisième couche étant de préférence une couche isolante d'une structure de type semiconducteur sur isolant.

B17228 – 18-GR3-0155

[0017] Selon un mode de réalisation, le guide d'onde comprend un ruban configuré pour guider un signal optique se propageant dans le guide d'onde.

[0018] Selon un mode de réalisation, la cavité traverse le ruban.

[0019] Un mode de réalisation prévoit un circuit photonique comprenant un modulateur tel que défini ci-dessus.

[0020] Un autre mode de réalisation prévoit un procédé de fabrication d'un modulateur tel que défini ci-dessus, le procédé comprenant les étapes successives suivantes : a) graver une cavité traversante dans un guide d'onde ; et b) remplir la cavité en y formant des puits quantiques multiples.

[0021] Selon un mode de réalisation, l'étape b) comprend les étapes successives suivantes : b1) former, dans la cavité, une première couche d'un premier matériau par épitaxie sélective à partir du matériau du guide d'onde ; b2) former alternativement une couche d'un deuxième matériau et une couche du premier matériau par épitaxie à partir de la couche précédente.

[0022] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend, après l'étape b), une étape de polissage mécano-chimique au moins partielle des portions des couches des premier et de deuxième matériaux en saillie par rapport au guide d'onde.

Brève description des dessins

[0023] 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 :

[0024] [Fig. 1] la figure 1 est une vue de dessus, schématique et partielle d'un mode de réalisation d'un modulateur électro-optique ;

B17228 – 18-GR3-0155

[0025] [Fig. 2] la figure 2 représente des vues A, B et C, en coupe schématiques et partielles, du modulateur de la figure 1, selon des plans respectifs AA, BB et CC de la figure 1 ;

[0026] [Fig. 3] la figure 3 est une vue en coupe schématique et partielle d'une variante de réalisation du modulateur de la figure 1, selon le plan BB de la figure 1 ; et

[0027] [Fig. 4] la figure 4 représente des vues A et B, en coupe schématiques et partielles, illustrant des étapes d'un mode de réalisation d'un procédé de fabrication d'un modulateur électro-optique.

Description des modes de réalisation

[0028] 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.

[0029] 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 circuits photoniques dans lesquels peuvent être prévus un modulateur électro-optique n'ont pas été détaillés, les modulateurs décrits par la suite étant compatibles avec la plupart de ces circuits photoniques.

[0030] 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 ou couplés entre eux, cela signifie que ces deux éléments peuvent être connectés ou être reliés ou couplés par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres éléments.

B17228 – 18-GR3-0155

[0031] 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.

[0032] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.

[0033] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à une section transversale, sauf indication contraire, cette section transversale est orthogonale à la direction longitudinale d'un guide d'onde.

[0034] Dans la description qui suit, on considère un modulateur électro-optique configuré pour moduler la puissance optique d'un signal lumineux dont la ou les longueurs d'onde sont environ égales à 1310 nm, de préférence égale à 1310 nm. Les dimensions et les matériaux indiqués ci-après à titre d'exemple sont choisis en fonction de cette ou de ces longueurs d'onde, étant entendu que l'homme du métier est en mesure, à la lumière de la description qui suit, d'adapter ces dimensions et/ou ces matériaux à d'autres longueurs d'onde.

[0035] La figure 1 est une vue de dessus, schématique et partielle d'un mode de réalisation d'un modulateur électro-optique 1.

[0036] La figure 2 représente des vues A, B et C, en coupe schématiques et partielles, du modulateur 1 de la figure 1, selon des plans respectifs AA, BB et CC de la figure 1.

B17228 – 18-GR3-0155

[0037] Le modulateur 1 comprend un guide d'onde 101. Le guide d'onde 101 comporte un ruban 1010, par exemple en silicium. Le ruban 1010 a par exemple une section transversale rectangulaire dont les dimensions, à savoir la largeur (entre des faces latérales 1012 du ruban) et l'épaisseur (entre les faces supérieure 1013 et inférieure 1015 du ruban, figure 2), sont de préférence choisies de sorte qu'un signal destiné à être propagé dans le guide d'onde 101 reste confiné dans le ruban.

[0038] Le modulateur comprend en outre des puits quantiques multiples 103 ("Multiple Quantum Wells") dans une cavité 105 du guide d'onde 101.

[0039] La cavité 105 s'étend verticalement, c'est-à-dire dans une direction orthogonale à la face inférieure 1015 du guide d'onde 101, à travers toute l'épaisseur du guide d'onde 101. Plus particulièrement, le ruban 1010 comprend, dans sa longueur, une portion intermédiaire 1010A (délimitée par des traits pointillés verticaux en figure 1) traversée verticalement par la cavité 105. Ainsi, la cavité débouche au niveau de la face inférieure 1015 du ruban 1010 et au niveau de la face supérieure 1013 du ruban 1010. La cavité est entourée verticalement du matériau du ruban 1010, ou, autrement dit, dans des plans de coupe parallèles à la face inférieure 1015 du guide d'onde 101, la cavité 105 est entièrement entourée du matériau du ruban 1010. Dans des plans de coupe parallèles à la face inférieure 1015 du guide d'onde 101, la cavité 105 est de préférence allongée dans la direction principale (longitudinale) du guide d'onde 101, par exemple de forme rectangulaire.

[0040] Dans ce mode de réalisation, la cavité 105 a des parois verticales sensiblement orthogonales, de préférence orthogonales, à la face inférieure 1015 du guide d'onde 101.

B17228 – 18-GR3-0155

[0041] Les puits quantiques multiples 103 sont réalisés par une alternance de couches de barrières quantiques 1030, par exemple en silicium-germanium, de préférence avec une concentration en germanium d'au moins 85%, et de couches de puits quantiques 1032, par exemple en germanium. La cavité 105 est entièrement remplie par les couches 1030 et 1032. Plus particulièrement, dans la cavité 105, chaque couche 1030 et 1032, à l'exception de la couche 1030 ou 1032 disposée contre les parois verticales de la cavité 105, est entourée verticalement par une couche respectivement 1032 ou 1030. Autrement dit, dans des plans de coupe parallèles à la face inférieure 1015 du guide d'onde 101, chaque couche 1030 et 1032 forme un anneau, chaque couche 1032 étant de préférence intercalée entre deux couches 1030. Chaque couche 1030 et 1032 affleure au niveau de la face inférieure 1015 du guide d'onde 101. Dans le mode de réalisation représenté, chaque couche 1030 et 1032 affleure au niveau de la face supérieure 1013 du guide d'onde 101. Dans une variante de réalisation non représentée, des portions des couches 1030 et 1032 peuvent être en saillie par rapport à la face supérieure 1013 du guide d'onde 101.

[0042] Dans le mode de réalisation représenté, la portion 1010A du ruban 1010 a une section transversale plus large que celle de portions 1010B et 1010C disposées respectivement en amont (par exemple à gauche en figure 1) et en aval (par exemple à droite en figure 1) de la portion 1010A par rapport au sens de propagation d'un signal dans le guide d'onde 101. Dans cet exemple particulier de mode de réalisation, le ruban 1010 comprend (figure 1), dans le sens de sa longueur, la portion amont 1010B, une portion intermédiaire 1010D optionnelle, la portion 1010A traversée par la cavité 105, une portion intermédiaire 1010E optionnelle et la portion avale 1010C. Les portions 1010B, 1010D, 1010A, 1010E et 1010C (délimitées par des traits pointillés verticaux en figure 1)

B17228 – 18-GR3-0155

sont bout à bout. Afin de limiter, voire supprimer, des réflexions parasites d'un signal optique se propageant de la portion 1010B vers la portion 1010C, le guide d'onde 101 est ici configuré pour que son indice optique effectif, pour un mode optique donné d'un signal se propageant dans le guide d'onde 101, varie progressivement depuis ou jusqu'à la portion 1010A. L'indice effectif d'un mode optique est défini comme étant le rapport de la constante de propagation de ce mode optique sur le vecteur d'onde dans le vide à la longueur d'onde considérée. La variation progressive de l'indice effectif est par exemple obtenue grâce à des variations progressives de la largeur de la portion 1010D depuis la portion 1010B jusqu'à la portion 1010A, et de la portion 1010E depuis la portion 1010A jusqu'à la portion 1010C, comme cela est représenté en figure 1.

[0043] Dans une variante de réalisation non illustrée, les portions optionnelles 1010D et 1010E sont omises, les portions 1010B, 1010A et 1010C étant alors bout à bout. Il en résulte que le guide d'onde est plus simple à fabriquer. Dans cette variante, les dimensions des sections transversales des portions 1010B, 1010A et 1010C sont de préférences identiques.

[0044] Dans ce mode de réalisation, le guide d'onde 101 comporte deux bandes 1014, de préférence en le même matériau que le ruban 1010, de part et d'autre du ruban 1010. Le ruban 1010 et les bandes 1014 ont des directions principales (longitudinales) identiques. Chaque bande 1014 est au contact d'une face latérale 1012 différente. L'épaisseur des bandes 1014, par exemple mesurée dans une direction orthogonale à la face inférieure 1015 du ruban 1010, est inférieure à l'épaisseur du ruban 1010, par exemple environ égale, de préférence égale, à la moitié de l'épaisseur du ruban 1010.

B17228 – 18-GR3-0155

[0045] Dans ce mode de réalisation, le guide d'onde 101 comprend en outre, au moins le long de la cavité 105 deux rubans 1016 optionnels, de préférence en même matériau que le ruban 1010. Les rubans 1016 sont disposés le long des bandes 1014. Chaque ruban 1016 est au contact d'une bande 1014 différente. Les rubans 1016 ont des directions principales (longitudinales) identiques à celle du ruban 1010 et des bandes 1014. L'épaisseur des rubans 1016 est par exemple sensiblement égale, de préférence égale, à l'épaisseur du ruban 1010.

[0046] Le guide d'onde 101 est noyé dans un matériau, par exemple de l'oxyde de silicium, d'indice optique différent de celui du ruban 1010. Dans l'exemple représenté, le guide d'onde 101 repose sur et en contact avec une couche 107 (figure 2), par exemple une couche d'oxyde de silicium. De préférence, la couche 107 constitue la couche isolante d'une structure de type semiconducteur sur isolant (SOI - Semiconductor On Insulator), et repose par exemple sur un support 108 (figure 2) tel qu'un substrat de silicium. Une couche non représentée, de préférence en le même matériau que la couche 107, recouvre le guide d'onde 101.

[0047] Le modulateur 1 comprend des contacts 111, dans cet exemple des vias conducteurs, disposés le long et de part et d'autre de la cavité 105. Les vias 111 sont en contact avec des régions conductrices et/ou semiconductrices du guide d'onde 101 s'étendant latéralement depuis la cavité 105 de manière à permettre l'application d'une tension de commande aux puits quantiques multiples 103. Dans l'exemple représenté, les vias 111 traversent la couche (non représentée) recouvrant le guide d'onde jusqu'à la face supérieure des rubans 1016. En outre, dans l'exemple représenté, le silicium des rubans 1010 et 1014 et des bandes 1012 est, en section transversale, dopé d'un premier type de

B17228 – 18-GR3-0155

conductivité, par exemple de type P, d'un côté de la cavité 105 (à gauche en figure 2, vue B) et d'un deuxième type de conductivité, par exemple de type N, de l'autre côté de la cavité 105 (à droite en figure 2, vue B). De préférence, le sommet des rubans 1014 est en siliciure 113 (figure 2), au moins au niveau des contacts avec les vias 111.

[0048] En fonctionnement, une tension de commande est appliquée entre les vias 111 disposés d'un côté de la cavité 105 et les vias 111 disposés de l'autre côté de la cavité 105. Un signal optique est fourni au guide d'onde 101 et se propage de manière guidé dans le ruban 101, les puits quantiques 103 étant traversés par le signal. Pour une tension de commande nulle, les puits quantiques 103 ne sont pas absorbants. Autrement dit, la puissance du signal optique entrant dans la portion 1010A est sensiblement égale à celle du signal sortant de la portion 1010A. En revanche, pour une tension de commande non nulle, les puits quantiques deviennent absorbants. Il en résulte que la puissance du signal optique entrant dans la portion 1010A est réduite, par exemple d'au moins 3 dB, de préférence d'au moins 3 dB par rapport à la puissance du signal entrant dans la portion 1010A.

[0049] La figure 3 est une vue en coupe, schématique et partielle d'une variante de réalisation du modulateur 1 de la figure 1, selon le plan BB de la figure 1.

[0050] Le modulateur de la figure 3 diffère de celui décrit en relation avec la figure 2 en ce que les parois verticales de la cavité 105 sont inclinées par rapport à la normale 115 à la face inférieure 1015 du guide d'onde 101. De préférence, la cavité 105 est évasée du côté de la face supérieure 1013 du guide d'onde 101. A titre d'exemple, l'angle α entre la normale 115 et chacune des parois de la cavité 105 est compris entre 5 et 20°, par exemple sensiblement égal à 10°, de

B17228 – 18-GR3-0155

préférence égal à 10° . De préférence, l'angle α est identique pour chaque paroi de la cavité.

[0051] Par rapport à un modulateur électro-optique à absorption qui comprendrait un empilement de couches de barrières quantiques et de couches de puits quantiques sur une couche intermédiaire reposant sur la face supérieure du ruban 1010, le modulateur 1 est plus compact, notamment moins épais. En outre, dans un tel modulateur, le signal optique à moduler devrait sortir du ruban, traverser la couche intermédiaire, traverser les puits quantiques, traverser de nouveau la couche intermédiaire avant de regagner le ruban, d'où il résulterait des pertes optiques plus importantes que dans le modulateur 1 où les puits quantiques multiples sont disposés dans le ruban 1010, directement sur le passage du signal lumineux. Par ailleurs, dans un tel modulateur, la réalisation de contacts pour appliquer une tension de commande aux puits quantiques multiples serait plus complexe que dans le modulateur 1.

[0052] La figure 4 représente des vues A et B en coupe, schématiques et partielles illustrant des étapes d'un mode de réalisation d'un procédé de fabrication d'un modulateur électro-optique, par exemple le modulateur 1 des figures 1 et 2. On notera que les vues A et B sont prises dans un plan correspondant au plan BB de la figure 1.

[0053] A l'étape illustrée en figure 4, vue A, le guide d'onde 101 a été défini par gravure dans une couche 117, par exemple une couche de silicium, reposant ici sur une couche 107, par exemple une couche d'oxyde de silicium. De préférence, les couches 117 et 107 correspondent respectivement à la couche semiconductrice et à la couche isolante d'une structure de type SOI.

[0054] Une portion du guide d'onde 101 s'étendant en longueur sur tout ou partie de la longueur de l'emplacement où l'on

B17228 – 18-GR3-0155

souhaite former la cavité 105 a été dopée d'un premier type, par exemple de type P (à gauche en figure 4) d'un côté de cet emplacement, et d'un deuxième type, par exemple de type N (à droite en figure 4), de l'autre côté de cet emplacement.

[0055] La cavité 105 a ensuite été gravée dans le ruban 1010 du guide d'onde 101. Plus particulièrement, dans cet exemple, une couche de masquage 121, de préférence en oxyde de silicium, a été déposée de manière à recouvrir le guide d'onde 101 et une ouverture 123 a été gravée dans la couche 121, en regard de l'emplacement où l'on souhaite former la cavité 105. Le ruban 1010 a ensuite été gravé à travers l'ouverture 123, sur toute son épaisseur, la gravure étant de préférence arrêtée sur la couche 107. A titre d'exemple, l'ouverture 123 dans la couche 121 peut être réalisée en gravant la couche 121 à travers une ouverture correspondante d'un masque, par exemple en résine, déposé sur la couche 121.

[0056] Ainsi, comme cela est représenté en figure 4, vue A, la cavité 105 est, en section transversale, bordée latéralement d'un côté par une région semiconductrice de type P, et de l'autre côté par une région semiconductrice de type N.

[0057] Dans une variante de réalisation non illustrée, les étapes de dopage du guide d'onde 101 peuvent être réalisées après la gravure de la cavité 105.

[0058] Dans une autre variante de réalisation non illustrée, lorsque l'on souhaite fabriquer un modulateur 1 du type de celui décrit en relation avec la figure 3, la gravure du ruban 1010 à travers l'ouverture 123 est réalisée de manière que la cavité 105 soit évasée vers la face supérieure 1013 du ruban 1010.

[0059] A l'étape illustrée en figure 4, vue B, les puits quantiques multiples 103 ont été formés dans la cavité 105,

B17228 – 18-GR3-0155

de manière à remplir entièrement la cavité 105. Plus particulièrement, une première couche 1030 de barrière quantique est formée par épitaxie sélective à partir du matériau exposé du ruban 1010. Ainsi, dans la cavité 105, cette première couche 1030 recouvre entièrement le matériau du ruban 1010, mais ne recouvre pas le fond de la cavité bien qu'elle soit en contact avec celui-ci. Une première couche 1032 de puits quantique est ensuite formée par épitaxie sélective à partir du matériau de la première couche 1030. Des couches 1030 et 1032 sont alternativement formées par épitaxie sélective à partir du matériau de la dernière couche, respectivement 1032 et 1030, formée dans la cavité 105, jusqu'à remplir la cavité 105 d'une alternance de couches 1030 et 1032. De préférence, la largeur de la cavité 105 et/ou l'épaisseur et le nombre de couches 1030 et 1032 est choisie de sorte que la dernière couche formée dans la cavité est une couche 1030, ou, autrement dit, que la couche centrale dans la cavité est une couche 1030.

[0060] Dans une variante de réalisation non illustrée, la première couche formée par épitaxie sélective à partir du matériau du ruban 1010, exposé au niveau des parois latérales de la cavité 105, est une couche de puits quantique 1032. Des couches 1030 et 1032 sont ensuite alternativement formées par épitaxie sélective à partir du matériau de la dernière couche, respectivement 1032 et 1030, formée dans la cavité 105, jusqu'à remplir la cavité 105.

[0061] Dans le cas non illustré où les parois de la cavité 105 sont inclinées, on constate une diminution du nombre de dislocations dans le matériau de la dernière couche formée dans la cavité 105, et entre le matériau du ruban 1010 et le matériau de la première couche formée dans la cavité. La diminution des dislocations entraîne une diminution des

B17228 – 18-GR3-0155

perturbations d'un signal optique traversant les puits quantiques multiples 103.

[0062] Comme cela est représenté en figure 4, vue B, des portions des couches 1030 et 1032 peuvent être en saillie par rapport à la face supérieure 1013 du guide d'onde 101. Ainsi, à une étape ultérieure non illustrée, on peut prévoir de retirer au moins partiellement, de préférence intégralement, ces portions des couches 1030 et 1032, par exemple par polissage mécano-chimique, de préférence jusqu'à la face supérieure 1013 du ruban 1010.

[0063] A des étapes ultérieures non illustrées, des vias conducteurs 111 sont formés à travers la couche 121, jusqu'au sommet des rubans 1014. Selon un mode de réalisation particulier, pour former les vias 111, une couche du même matériau que la couche 121 est déposée pour recouvrir le guide d'onde 101 et les couches 1030 et 1032. Des trous sont gravés, dans ce matériau, jusqu'au sommet des rubans 1016, aux emplacements où l'on souhaite former les vias 111. La partie exposée des rubans 1016 peut alors être siliciurée. Les vias 111 sont ensuite obtenus en remplissant ces trous d'un matériau conducteur.

[0064] Bien qu'un seul modulateur 1 soit représenté en figure 4, plusieurs modulateurs 1 peuvent être formés simultanément, par exemple à différents emplacements d'une même plaque, par exemple une plaque de type SOI, la plaque pouvant ensuite être découpée pour obtenir une pluralité de circuits intégrés photoniques individualisés.

[0065] A titre d'exemple particulier de réalisation, on prévoit un modulateur électro-optique 1 avec les dimensions suivantes :

- largeur des portions 1010B et 1010C comprise entre 200 et 1000 nm, par exemple égale à environ 400 nm, de préférence égale à 400 nm ;

B17228 – 18-GR3-0155

- largeur de la portion 1010A comprise entre 500 et 2300 nm, par exemple environ égale à environ 800 nm, de préférence égale à 800 nm ;
- largeur de la cavité 105 comprise entre 400 et 2000 nm, par exemple égale à environ 600 nm, de préférence égale à 600 nm ;
- longueur de la cavité 105 comprise entre 20 et 140 μm , par exemple égale à environ 40 μm , de préférence égale à 40 μm ;
- épaisseur du ruban 1010 comprise entre 220 et 500 nm, de préférence égale à environ 300 nm, par exemple égale à 300 nm ;
- largeur des bandes 1014 comprise entre 400 et 1800 nm, par exemple égale à environ 1000 nm, de préférence égale à 1000 nm ;
- épaisseur des bandes 1014 comprise entre 50 et 160 nm, par exemple égale à environ 150 nm, de préférence égale à 150 nm ;
- épaisseur des couches 1030 de l'ordre de 16 nm, de préférence égale à 16 nm ; et
- épaisseur des couches 1032 de l'ordre de 10 nm, de préférence égale à 10 nm.

[0066] Divers modes de réalisation et variantes ont été décrits. L'homme de l'art comprendra que certaines caractéristiques de ces divers modes de réalisation et variantes pourraient être combinées, et d'autres variantes apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, l'homme du métier est en mesure de modifier les dimensions et les matériaux indiqués ci-dessus à titre d'exemple pour obtenir des modulateurs adaptés à moduler des signaux optiques à d'autres longueurs d'onde que celles indiquées ci-dessus. Par exemple, pour moduler des signaux optiques à des longueurs d'onde supérieures à 1550 nm, les couches de barrières quantiques peuvent être en un alliage d'étain et de germanium et les couches de puits quantiques peuvent être en germanium.

B17228 - 18-GR3-0155

[0067] Enfin, la mise en oeuvre pratique des modes de réalisation et variantes décrits est à la portée de l'homme du métier à partir des indications fonctionnelles données ci-dessus. En particulier, les dimensions et/ou les matériaux des modulateurs décrits peuvent être déterminés par l'homme du métier à partir d'outils de simulation, par exemple des outils de simulation exploitant des calculs de différences finies dans le domaine temporel (FDTD - "Finite Difference Time Domain"). Un exemple d'un tel outil de simulation est commercialisé par la société "Lumerical".

REVENDEICATIONS

1. Modulateur électro-optique (1) comprenant un guide d'onde (101) comportant de multiples puits quantiques (103) dans une cavité (105) dudit guide d'onde (101), la cavité (105) débouchant au niveau d'une face inférieure (1015) du guide d'onde (101) et ayant des parois inclinées par rapport à la normale à la face inférieure (1015) du guide d'onde (101).
2. Modulateur selon la revendication 1, dans lequel la cavité (105) traverse le guide d'onde (101) transversalement.
3. Modulateur selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le guide d'onde (101) comprend deux régions semiconductrices, de préférence en silicium, de part et d'autre de la cavité (105), les deux régions étant dopées avec des types de conductivités différents.
4. Modulateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel les puits quantiques multiples (103) sont constitués par une alternance de premières couches (1030) de barrières quantiques et de deuxièmes couches (1032) de puits quantiques.
5. Modulateur selon la revendication 4, dans lequel les premières couches (1030) sont en silicium-germanium, les deuxièmes couches (1032) étant en germanium.
6. Modulateur selon la revendication 4 ou 5, dans lequel chacune des premières (1030) et deuxièmes (1032) couches affleure au niveau de la face inférieure (1015) du guide d'onde (101).
7. Modulateur selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, dans lequel le guide d'onde (101) repose sur et est en contact avec une troisième couche (107), la troisième

B17228--18-GR3-0155

- couche étant de préférence une couche isolante d'une structure de type semiconducteur sur isolant.
8. Modulateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel le guide d'onde (101) comprend un ruban (1010) configuré pour guider un signal optique se propageant dans le guide d'onde.
 9. Modulateur selon la revendication 8, dans lequel la cavité (105) traverse le ruban (1010).
 10. Circuit photonique comprenant un modulateur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.
 11. Procédé de fabrication d'un modulateur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 comprenant les étapes successives suivantes :
 - a) graver une cavité (105) traversante dans un guide d'onde (101) ; et
 - b) remplir la cavité (105) en y formant des puits quantiques multiples (103).
 12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel l'étape b) comprend les étapes successives suivantes :
 - b1) former, dans la cavité (105), une première couche (1030) d'un premier matériau par épitaxie sélective à partir du matériau du guide d'onde (101) ;
 - b2) former alternativement une couche (1032) d'un deuxième matériau et une couche du premier matériau par épitaxie à partir de la couche précédente.
 13. Procédé selon la revendication 12, comprenant, après l'étape b), une étape de polissage mécano-chimique au moins partielle des portions des couches (1030, 1032) des premier et de deuxième matériaux en saillie par rapport au guide d'onde (101).

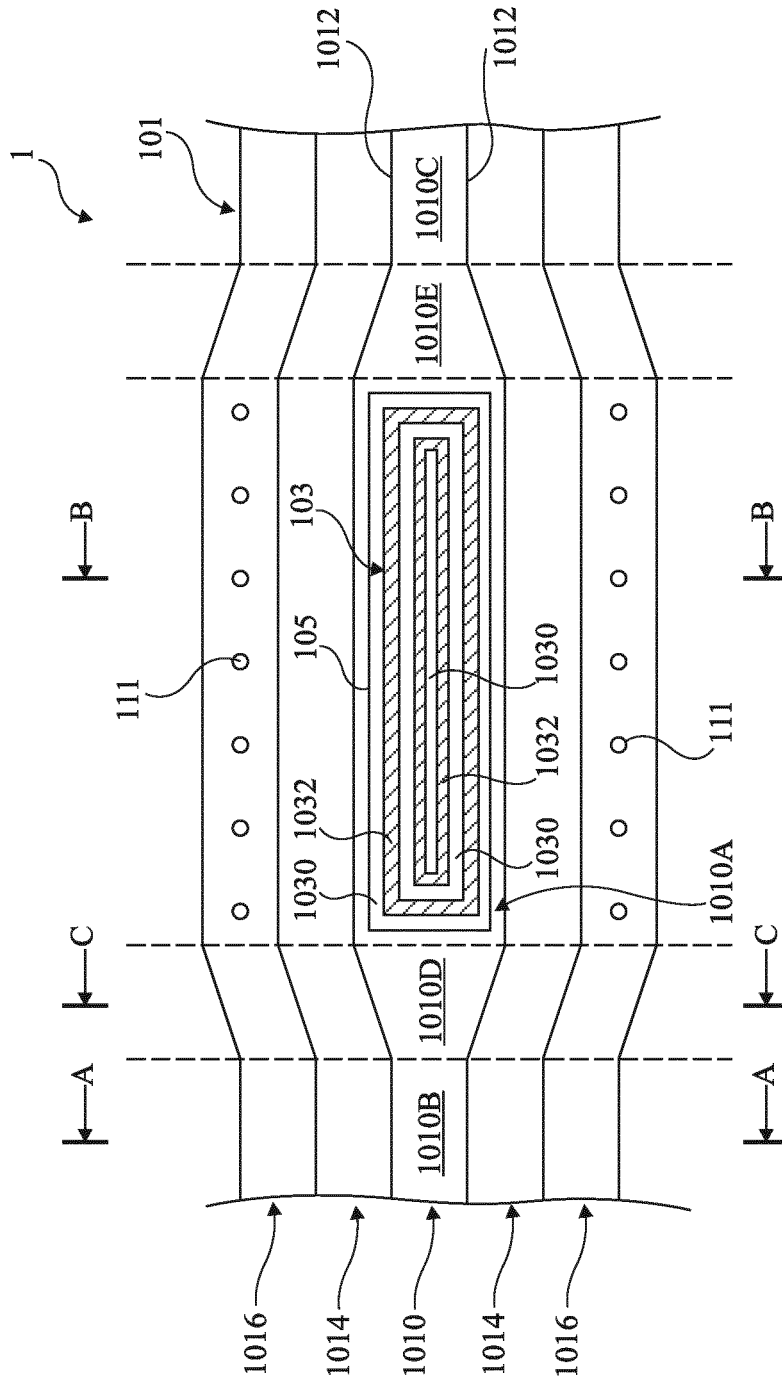


Fig 1

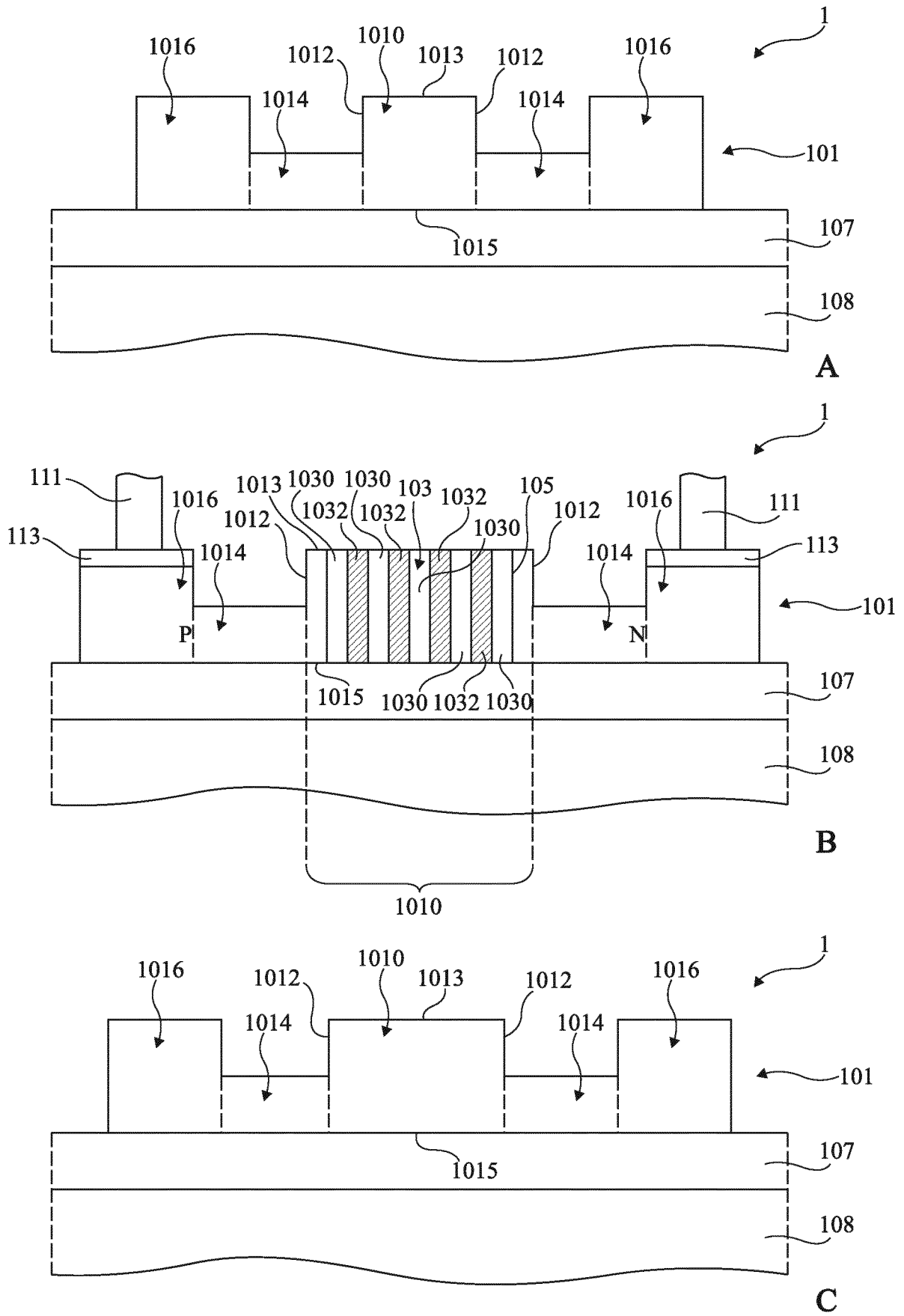


Fig 2

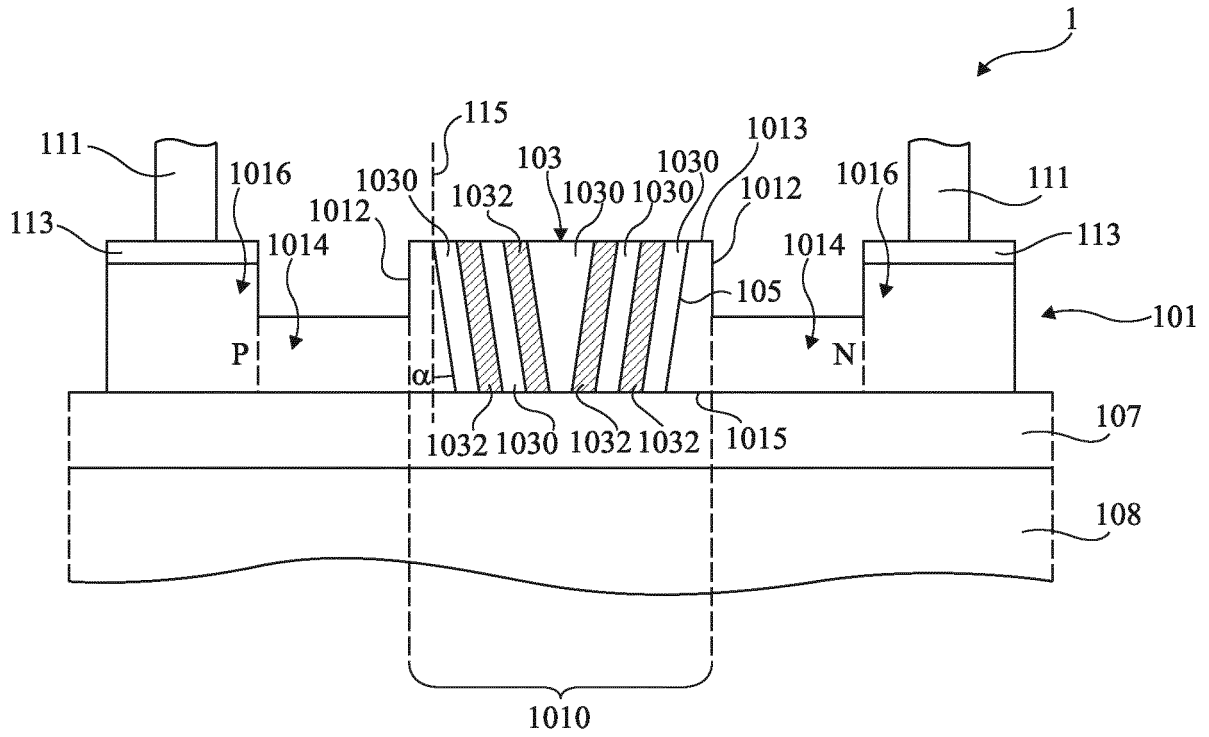


Fig 3

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 2008/232735 A1 (MILLER DAVID A B [US]
ET AL) 25 septembre 2008 (2008-09-25)

FR 2 741 195 A1 (THOMSON CSF [FR])
16 mai 1997 (1997-05-16)

EP 0 306 400 A1 (THOMSON CSF [FR])
8 mars 1989 (1989-03-08)

TANIA TASMIN ET AL: "Design of a 1550nm
SiGe/Si quantum-well optical modulator",
PROCEEDINGS OF SPIE MEDICAL IMAGING 1997,
vol. 7750, 17 juin 2010 (2010-06-17), page
77501N, XP055595921,
1000 20th St. Bellingham WA 98225-6705 USA
ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.870014
ISBN: 978-1-5106-2781-9

D. R. P. GUY ET AL: "Theory Of An
Electro-Optic Modulator Based On Quantum
Wells In A Semiconductor etalon",
PROCEEDINGS OF SPIE MEDICAL IMAGING 1997,
vol. 0792, 11 août 1987 (1987-08-11), page
189, XP055596225,
1000 20th St. Bellingham WA 98225-6705 USA
ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.940840
ISBN: 978-1-5106-2781-9

EP 0 477 072 A1 (THOMSON CSF [FR])
25 mars 1992 (1992-03-25)

CN 102 169 243 A (INST SEMICONDUCTORS CAS)
31 août 2011 (2011-08-31)

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

EP 3 352 312 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE
ATOMIQUE [FR])
25 juillet 2018 (2018-07-25)

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

NEANT