

CAPTEUR D'IMAGE DE TYPE FACE AVANT ET PROCEDE DE FABRICATION D'UN TEL CAPTEUR

DOMAINE DE L'INVENTION

- 5 La présente invention concerne un capteur d'image de type face avant, ainsi qu'un procédé de fabrication d'un tel capteur d'image.

ETAT DE LA TECHNIQUE

- 10 Le document US 2016/0118431 décrit un capteur d'image de type « face avant » (« front-side imager », selon la terminologie anglo-saxonne).

- Comme illustré sur la figure 1, ledit capteur comprend un substrat de type semi-conducteur sur isolant (SOI, acronyme du terme anglo-saxon « Semiconductor-On-Insulator ») comprenant, de sa face arrière vers sa face avant, un substrat support 1' de silicium présentant un certain dopage, une couche 2' d'oxyde de silicium dite « couche d'oxyde enterrée » (BOX, acronyme du terme anglo-saxon « Buried OXide »), et une
15 couche 3' dite couche active de silicium présentant un dopage pouvant être différent de celui de la couche support 1', dans laquelle est défini un réseau matriciel de photodiodes définissant chacune un pixel.

- Selon un mode de réalisation, la couche d'oxyde enterrée est choisie relativement
20 mince (c'est-à-dire présentant une épaisseur inférieure à 100 nm, notamment de l'ordre de 20 nm) pour remplir la fonction du diélectrique d'un condensateur. La partie du substrat située en dessous de la couche d'oxyde enterrée est polarisée à une tension électrique différente de celle de la couche active, ce qui permet de passiver l'interface entre la couche diélectrique et cette couche active.

- 25 La tension électrique à appliquer à la partie du substrat située sous le BOX dépend de l'épaisseur de ce dernier. La différence de potentiel à appliquer est d'autant plus faible que la couche d'oxyde enterrée est mince.

- Inversement, si la couche d'oxyde enterrée est choisie relativement épaisse (c'est-à-dire présentant une épaisseur de l'ordre de 100 à 200 nm ou plus), elle présente des
30 propriétés optiquement réfléchissantes et permet de provoquer une réflexion des photons incidents de sorte à les confiner dans la couche active, en particulier dans le cas de photons dont la longueur d'onde est dans la gamme du proche infrarouge.

- Les gammes d'épaisseur optimales pour chacune de ces deux fonctions ne coïncidant pas, l'homme du métier est amené à effectuer un compromis entre la
35 réflectivité de la couche d'oxyde enterrée et son aptitude à polariser chaque pixel sous l'application d'une faible différence de potentiel entre la couche active et le substrat.

EXPOSE DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de concevoir un capteur d'image de type face avant qui soit plus performant que les capteurs existants, et notamment un substrat à partir duquel ledit capteur puisse être obtenu.

5 De préférence, ce substrat doit pouvoir être fabriqué à bas coût.

A cet effet, un premier objet de l'invention concerne un capteur d'image de type face avant, comprenant successivement :

- un substrat support semi-conducteur,
- une première couche de séparation électriquement isolante, et
- 10 - une couche semi-conductrice, monocristalline, dite couche active, comprenant un réseau matriciel de photodiodes

ledit capteur d'image étant caractérisé en ce qu'il comprend en outre, entre le substrat support et la première couche électriquement isolante :

- une seconde couche de séparation électriquement isolante et
- 15 - une seconde couche électriquement conductrice ou semi-conductrice, dite couche intermédiaire, agencée entre la seconde couche de séparation et la première couche de séparation, la seconde couche de séparation étant plus épaisse que la première couche de séparation.

20 Par « face avant » on entend dans le présent texte la face du capteur d'image destinée à être exposée à un rayonnement lumineux, qui se trouve du même côté de la structure que les composants électroniques associés.

La première couche de séparation présente avantageusement une épaisseur comprise entre 10 et 100 nm.

25 La seconde couche de séparation présente avantageusement une épaisseur comprise entre 100 et 300 nm.

Selon un mode de réalisation, la couche intermédiaire est en un matériau amorphe ou polycristallin dopé.

Selon un mode de réalisation, la couche intermédiaire est en silicium dopé.

De manière alternative, la couche intermédiaire est en un matériau métallique.

30 La couche intermédiaire présente avantageusement une épaisseur comprise entre 20 et 150 nm.

Selon un mode de réalisation, la couche active comprend une couche germe de silicium.

35 Selon un autre mode de réalisation, la couche germe est une couche de silicium-germanium.

Selon une forme d'exécution, la couche active comprend en outre une couche monocristalline de silicium-germanium sur la couche germe.

De manière particulièrement avantageuse, la teneur en germanium de la couche de silicium-germanium est inférieure ou égale à 10%.

De préférence, l'épaisseur de la couche de silicium-germanium est inférieure à une épaisseur critique définie comme étant une épaisseur au-delà de laquelle une relaxation du silicium-germanium se produit.

Selon une autre forme de réalisation, la couche active comprend en outre une couche monocristalline de silicium sur la couche germe.

Selon un mode de réalisation, le substrat comprend en outre, sur la couche active, une couche dite couche de confinement optique présentant un coefficient de réflexion optique de la face avant vers la couche active supérieur au coefficient de réflexion de la couche active vers la face avant.

De manière avantageuse, ladite couche de confinement optique comprend une couche de nitrure de titane entre deux couches d'oxyde de silicium.

Selon un mode de réalisation, chaque photodiode est séparée d'une photodiode adjacente par au moins une tranchée électriquement isolante s'étendant jusqu'à la première couche électriquement isolante.

De manière avantageuse, ladite tranchée comprend un via semi-conducteur ou électriquement conducteur s'étendant jusqu'à la couche intermédiaire entre des parois en un matériau électriquement isolant.

Selon un mode de réalisation, ladite au moins une tranchée s'étend au travers de la couche de confinement optique.

Selon un mode de réalisation, chaque tranchée comprend une première paroi s'étendant jusqu'à la couche intermédiaire et une seconde paroi s'étendant au moins en partie dans la seconde couche de séparation de sorte à isoler électriquement une portion de la couche intermédiaire, le via semi-conducteur ou électriquement conducteur étant connecté électriquement à ladite portion de la couche intermédiaire.

Le capteur tel que décrit ci-dessus est formé à partir d'un substrat pour un capteur d'image de type face avant, comprenant successivement :

- le substrat support semi-conducteur,
- la première couche de séparation électriquement isolante, et
- une couche semi-conductrice, monocristalline, dite couche germe, adaptée pour la croissance épitaxiale d'une couche semi-conductrice monocristalline,

ledit substrat comprenant en outre, entre le substrat support et la première couche électriquement isolante :

- la seconde couche de séparation électriquement isolante et
- la seconde couche électriquement conductrice ou semi-conductrice, dite couche intermédiaire, agencée entre la seconde couche de séparation et la première couche de

séparation, la seconde couche de séparation étant plus épaisse que la première couche de séparation.

Selon un mode de réalisation, la couche germe est une couche de silicium.

Selon un autre mode de réalisation, la couche germe est une couche de silicium-germanium.

Selon une forme d'exécution, le substrat comprend en outre une couche monocristalline de silicium-germanium sur la couche germe, ladite couche de silicium-germanium formant, avec la couche germe, la couche active du capteur d'image.

Selon une autre forme de réalisation, le substrat comprend en outre une couche monocristalline de silicium sur la couche germe, ladite couche de silicium formant, avec la couche germe, la couche active du capteur d'image.

Selon une forme d'exécution, ledit substrat peut être fabriqué par un procédé comprenant les étapes suivantes :

- fourniture d'un premier substrat donneur,
- formation d'une zone de fragilisation dans ledit premier substrat donneur, de sorte à délimiter une première couche semi-conductrice,
- transfert de ladite première couche sur un substrat support semi-conducteur, une couche électriquement isolante étant à l'interface entre le substrat donneur et le substrat support de sorte à former une structure comprenant le substrat support, la couche électriquement isolante, et la couche transférée,
- fourniture d'un second substrat donneur,
- formation d'une zone de fragilisation dans ledit second substrat donneur, de sorte à délimiter une couche semi-conductrice monocristalline,
- transfert de ladite couche semi-conductrice monocristalline sur la structure, une couche électriquement isolante étant à l'interface entre le second substrat donneur et la structure.

Selon une forme d'exécution alternative, le substrat peut être fabriqué par un procédé comprenant les étapes suivantes :

- formation d'une structure par dépôt d'une couche semi-conductrice ou électriquement conductrice sur un substrat support recouvert d'une couche électriquement isolante,
- fourniture d'un substrat donneur,
- formation d'une zone de fragilisation dans ledit substrat donneur, de sorte à délimiter une couche semi-conductrice monocristalline,
- transfert de ladite couche semi-conductrice monocristalline sur la structure, une couche électriquement isolante étant à l'interface entre le second substrat donneur et la structure.

Un autre objet de l'invention concerne un procédé de fabrication d'un capteur d'image de type face avant tel que décrit précédemment.

Selon une forme d'exécution, ledit procédé de fabrication comprend les étapes suivantes :

- 5 - fourniture d'un premier substrat donneur,
- formation d'une zone de fragilisation dans ledit premier substrat donneur, de sorte à délimiter une première couche semi-conductrice,
- transfert de ladite première couche sur un substrat support semi-conducteur, une couche électriquement isolante étant à l'interface entre le substrat donneur et le substrat support de sorte à former une structure comprenant le substrat support, la couche électriquement isolante, et la couche transférée,
- 10 - fourniture d'un second substrat donneur,
- formation d'une zone de fragilisation dans ledit second substrat donneur, de sorte à délimiter une couche semi-conductrice monocristalline,
- 15 - transfert de ladite couche semi-conductrice monocristalline sur la structure, une couche électriquement isolante étant à l'interface entre le second substrat donneur et la structure,
- croissance épitaxiale d'une couche semi-conductrice monocristalline (3b) sur la couche semi-conductrice monocristalline (3a) transférée, ladite couche épitaxiale semi-conductrice monocristalline (3b) formant, avec la couche semi-conductrice monocristalline (3a) transférée, une couche active (3) du capteur d'image.
- 20

Selon une forme d'exécution alternative, ledit procédé de fabrication comprend les étapes suivantes :

- formation d'une structure par dépôt d'une couche semi-conductrice ou électriquement conductrice sur un substrat support recouvert d'une couche électriquement isolante,
- 25 - fourniture d'un substrat donneur,
- formation d'une zone de fragilisation dans ledit substrat donneur, de sorte à délimiter une couche semi-conductrice monocristalline,
- 30 - transfert de ladite couche semi-conductrice monocristalline sur la structure, une couche électriquement isolante étant à l'interface entre le second substrat donneur et la structure,
- croissance épitaxiale d'une couche semi-conductrice monocristalline (3b) sur la couche semi-conductrice monocristalline (3a) transférée, ladite couche épitaxiale semi-conductrice monocristalline (3b) formant, avec la couche semi-conductrice monocristalline (3a) transférée, une couche active (3) du capteur d'image.
- 35

Lesdits procédés comprennent en outre une étape de formation d'un réseau matriciel de photodiodes dans la couche active.

Par ailleurs, une couche dite de confinement optique peut être formée sur la couche active, ladite couche de confinement optique présentant un coefficient de réflexion optique de la face avant vers la couche active supérieur au coefficient de réflexion de la couche active vers la face avant.

5

DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue en coupe d'un substrat SOI pour capteur d'image face avant tel que décrit dans le document US 2016/0118431 ;
 - la figure 2 est une vue en coupe d'un substrat SOI, prêt pour une épitaxie pour former la couche active d'un capteur d'image face avant selon l'invention ;
 - les figures 3A à 3E illustrent de manière schématique les principales étapes d'un procédé de fabrication du substrat de la figure 2,
 - les figures 4A à 4D illustrent de manière schématique les principales étapes d'un autre procédé de fabrication du substrat de la figure 2,
 - la figure 5 illustre le substrat obtenu après croissance épitaxiale de la couche active sur le substrat de la figure 2,
 - la figure 6 illustre le substrat obtenu après formation de tranchées électriquement isolantes dans le substrat de la figure 5 pour individualiser chaque pixel du capteur d'image,
 - la figure 7A illustre le substrat obtenu après formation d'une couche de confinement optique sur le substrat de la figure 6,
 - la figure 7B illustre le substrat obtenu après formation d'une couche de confinement optique sur le substrat de la figure 5 et la formation de tranchées électriquement isolantes dans ledit substrat,
 - les figures 8 et 9 illustrent des variantes du substrat de la figure 6, dans lequel chaque tranchée comprend un via semi-conducteur en contact avec la couche intermédiaire.
- Pour des raisons de lisibilité des dessins, les différentes couches ne sont pas nécessairement représentées à l'échelle.

DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION DE L'INVENTION

- Contrairement au substrat de la figure 1, un substrat pour capteur d'image selon l'invention comprend un empilement comportant deux couches de séparation électriquement isolantes séparées par une couche électriquement conductrice ou semi-conductrice, dite couche intermédiaire. L'empilement est interposé entre le substrat

support et la couche active, et il est configuré pour réfléchir les photons traversant la couche active vers cette même couche active.

Le substrat support est généralement obtenu par découpe d'un lingot monocristallin. Ledit substrat remplit essentiellement une fonction de support mécanique du capteur d'image. Le substrat support peut comprendre un matériau choisi parmi le silicium, les matériaux semi-conducteurs III-V, le verre, la silice, le saphir, l'alumine, le nitrure d'aluminium, le carbure de silicium ou encore une céramique ou un alliage métallique. De manière avantageuse, le substrat support est en silicium. Son dopage (s'il s'agit de silicium), sa nature et ses caractéristiques peuvent être optimisées afin d'intégrer, de façon hybride, sous la forme d'un « Système on Chip », des dispositifs électroniques autres que le capteur d'image. Ledit dopage du substrat peut être homogène sur toute l'épaisseur du matériau ou limitée à une portion de celui-ci. Préférentiellement, la zone dopée est adjacente à une des deux couches de séparation.

La couche active comprend un matériau semi-conducteur monocristallin et est destinée à recevoir un réseau matriciel de photodiodes permettant la capture d'images.

Les deux couches de séparation de part et d'autre de la couche intermédiaire présentent des épaisseurs différentes et présentent des fonctions différentes dans le fonctionnement du capteur d'image.

La première couche de séparation est située du côté de la face avant, et elle est plus fine que la seconde couche de séparation, qui est disposée du côté de la face arrière.

La première couche de séparation a pour fonction de permettre le transfert d'une polarisation de la couche intermédiaire vers la couche active. La seconde couche de séparation a pour fonction d'isoler électriquement la couche intermédiaire du substrat, et de permettre que l'empilement des couches séparant la couche active du substrat support présente une réflectivité adaptée vis-à-vis des photons provenant de la couche active.

Chacune des deux couches de séparation est réalisée en un matériau électriquement isolant, tel qu'un matériau diélectrique, par exemple un oxyde, tel qu'un oxyde de silicium thermique ou déposé, ou encore un oxyde de nitrure. La structure comprenant ces deux couches de séparation électriquement isolantes peut alors être qualifiée de « double BOX », c'est-à-dire « double couche d'oxyde enterrée ».

Du côté de sa face avant, le substrat comprend une couche germe sur la première couche de séparation, ladite couche germe étant une couche semi-conductrice monocristalline adaptée pour la croissance épitaxiale d'une couche semi-conductrice monocristalline destinée à former, avec la couche germe, la couche active du capteur d'image.

Le matériau de la couche germe est choisi en fonction du matériau de la couche épitaxiale, et présente notamment un paramètre de maille adapté pour permettre la

croissance de la couche épitaxiale en évitant ou tout au moins en minimisant la génération de défauts cristallins tels que des dislocations.

La couche germe et la couche épitaxiale peuvent être constituées du même matériau (homoépitaxie) ou de deux matériaux différents (hétéroépitaxie).

5 La couche épitaxiale peut être en silicium. Dans ce cas, la couche germe est avantageusement en silicium.

De manière préférée, la couche épitaxiale est en silicium-germanium (SiGe) car le silicium-germanium présente un coefficient d'absorption optique supérieur à celui du silicium, notamment dans l'infrarouge, ce coefficient d'absorption étant d'autant plus grand
10 que la concentration en germanium est grande. La couche germe peut alors être en silicium-germanium ou en silicium. Dans ce dernier cas, la conception de la couche épitaxiale ne doit pas prendre en compte que la concentration en germanium mais aussi l'épaisseur de ladite couche. En effet, si la couche de SiGe est formée par épitaxie sur une couche germe de silicium, dont le paramètre de maille est différent de celui du
15 silicium-germanium, il se produit une relaxation de la couche de SiGe au-delà d'une certaine épaisseur, dite épaisseur critique. Cette relaxation se traduit par la formation de dislocations au sein de la couche de SiGe. De telles dislocations rendraient la couche de SiGe impropre à la fonction de la couche active en particulier pour un capteur d'image et doivent donc être évitées. Or, l'épaisseur critique est d'autant plus faible que la
20 concentration en germanium est grande. L'épaisseur de la couche épitaxiale et la concentration en germanium de ladite couche résultent donc d'un compromis entre :

- d'une part, une épaisseur suffisamment grande pour capturer un maximum de photons dans les longueurs d'onde du proche infrarouge,
- d'autre part, une concentration suffisante en germanium pour accroître la capacité
25 d'absorption des photons par la couche active en particulier dans le proche infrarouge, et
- enfin, une épaisseur limitée (dépendant de la concentration), inférieure à l'épaisseur critique, pour éviter la relaxation du silicium-germanium et la création de défauts cristallins (dislocations) qui en résulte.

Typiquement, on cherche à maximiser l'épaisseur et la concentration en germanium
30 de la couche épitaxiale pour avoir la meilleure absorption possible dans l'infrarouge. De préférence, la teneur en germanium de la couche active est inférieure ou égale à 10%. En effet, l'épaisseur critique d'une couche de $\text{Si}_{0,9}\text{Ge}_{0,1}$ est de l'ordre de quelques micromètres, ce qui convient à la couche active d'un capteur d'image de type « face avant ».

35 La couche intermédiaire peut être en un matériau semi-conducteur ou encore en un matériau électriquement conducteur. En effet, cette couche intermédiaire a pour fonction de permettre une polarisation de la couche active par l'arrière, autrement dit via une zone disposée entre le substrat support et la deuxième couche électriquement isolante. Une

telle polarisation permet l'application d'une différence de potentiel entre la couche active et la couche intermédiaire enterrée.

La couche intermédiaire peut être monocristalline mais cela n'est pas indispensable car on ne recherche pas une capacité à assurer une conduction des électrons au travers de cette couche, ni une quelconque propriété électronique comme il est communément
5 considéré pour des applications autres que celle des capteurs d'image, mais uniquement une capacité à modifier le potentiel électrique de la couche active à la périphérie de la première couche de séparation.

La couche intermédiaire peut ainsi être polycristalline et/ou amorphe, ce qui la rend
10 moins onéreuse à fabriquer, et/ou métallique. Cette couche peut être plus ou moins dopée de manière à assurer une capacité à être polarisée. Une couche intermédiaire semi-conductrice est avantageusement en silicium. Ladite couche présente alors typiquement une épaisseur comprise entre 20 et 150 nm.

La première couche de séparation, électriquement isolante, qui est interposée entre
15 la couche active et la couche intermédiaire, remplit la fonction du diélectrique d'un condensateur, et permet ainsi de polariser la couche active à la périphérie du matériau électriquement isolant. A cet effet, la première couche de séparation est choisie suffisamment mince pour minimiser la différence de potentiel à appliquer entre la couche intermédiaire et la couche active. Typiquement, l'épaisseur de la première couche de
20 séparation est comprise entre 10 et 100 nm.

L'épaisseur de la première couche de séparation est en revanche trop faible pour
permettre de réfléchir tous les photons traversant la couche active, notamment les photons dont la longueur d'onde est dans la gamme du proche infrarouge. Par conséquent, des photons traversant la couche active sont susceptibles de passer au
25 travers de la première couche de séparation et de la couche intermédiaire.

La seconde couche de séparation a pour fonction d'induire une réflexion des
photons, notamment des photons dont la longueur d'onde est dans la gamme du proche infrarouge, vers le pixel formé dans la couche active au travers de l'empilement comportant : la seconde couche de séparation, la couche intermédiaire et la première
30 couche de séparation. A cet effet, cette seconde couche de séparation présente une épaisseur suffisamment grande pour présenter une réflectivité (ou coefficient de réflexion optique) élevée notamment dans le domaine du proche infrarouge. Typiquement, l'épaisseur de la seconde couche de séparation, réalisée par exemple en oxyde de silicium est comprise entre 100 et 300 nm.

35 La figure 2 est une vue en coupe d'un substrat pour un capteur d'image face avant selon un mode de réalisation de l'invention.

Ledit substrat comprend successivement, de sa face arrière vers sa face avant :

- un substrat support 1, préférentiellement semi-conducteur,

- la seconde couche de séparation électriquement isolante, 2b,
- la couche semi-conductrice intermédiaire 4,
- la première couche de séparation électriquement isolante 2a, et
- la couche germe 3a semi-conductrice, monocristalline.

5 On va maintenant décrire des exemples de procédés de fabrication du substrat illustré sur la figure 2.

Selon une première forme d'exécution, illustrée sur les figures 3A-3E, le procédé de fabrication du substrat comprend deux étapes successives de transfert de couche, par exemple en mettant en œuvre le procédé Smart Cut™ à deux reprises.

10 D'une part, en référence à la figure 3A, on fournit un premier substrat donneur 40 comprenant un matériau semi-conducteur destiné à constituer la couche intermédiaire 4.

D'autre part, en référence à la figure 3B, on fournit le substrat support 1, et l'on colle le substrat donneur sur le substrat support, la seconde couche de séparation 2b étant à l'interface de collage. Comme représenté sur la figure 3A, ladite couche 2b est par
15 exemple préalablement formée à la surface du premier substrat donneur 40 avant le collage. De manière alternative, la couche 2b pourrait être formée sur le substrat support 1, voire constituée de l'assemblage d'une couche formée sur le premier substrat donneur et d'une couche formée sur le substrat support.

On amincit ensuite le premier substrat donneur de sorte à transférer une couche 4
20 du matériau semi-conducteur sur le substrat receveur. Cet amincissement peut être effectué par polissage ou gravure du matériau semi-conducteur par la face opposée à l'interface de collage. Toutefois, de manière avantageuse, on procède, avant l'étape de collage, à la formation d'une zone de fragilisation 41 dans le matériau semi-conducteur de sorte à délimiter une couche superficielle 4 à transférer ; ladite zone de fragilisation peut
25 être formée par implantation d'espèces atomiques telles que de l'hydrogène et/ou de l'hélium (ladite implantation étant schématisée par les flèches sur la figure 3A). Après l'étape de collage, l'amincissement consiste à détacher le premier substrat donneur 40 le long de la zone de fragilisation 41, ce qui conduit au transfert de la couche intermédiaire 4 sur le substrat support 1 (cf. figure 3C). Typiquement, l'épaisseur de la couche 4
30 transférée est inférieure ou égale à 300 nm. Eventuellement, on effectue un traitement de finition de la surface libre de la couche transférée afin de favoriser la mise en œuvre d'une nouvelle étape de transfert de couche, ce traitement pouvant conduire à amincir et réduire la rugosité de la couche transférée.

En référence à la figure 3D, on fournit par ailleurs un second substrat donneur 30
35 comprenant un matériau monocristallin adapté pour la croissance épitaxiale de la couche active et destiné à constituer la couche germe 3a.

En référence à la figure 3E, on colle ce second substrat donneur sur la couche intermédiaire 4 précédemment transférée sur le substrat support 1, la première couche de

séparation 2a étant à l'interface de collage. Comme représenté sur la figure 3D, ladite couche 2a est par exemple préalablement formée à la surface du second substrat donneur 30 avant le collage. De manière alternative, la couche 2a pourrait être formée sur la couche intermédiaire 4 après son transfert sur le substrat support 1, voire constituée de
5 l'assemblage d'une couche formée sur le second substrat donneur et d'une couche formée sur la couche intermédiaire transférée.

On amincit ensuite le second substrat donneur de sorte à transférer une couche 3a du matériau semi-conducteur sur le substrat receveur, ce qui permet d'obtenir le substrat représenté sur la figure 2. Cet amincissement peut être effectué par polissage ou gravure
10 du matériau semi-conducteur de sorte à obtenir l'épaisseur et l'état de surface souhaité pour l'épitaxie de la couche active. Toutefois, de manière avantageuse, on procède, avant l'étape de collage, à la formation d'une zone de fragilisation 31 dans le matériau semi-conducteur monocristallin de sorte à délimiter la couche germe 3a à transférer. Après l'étape de collage, l'amincissement consiste à détacher le second substrat donneur 30 le
15 long de la zone de fragilisation 31, ce qui conduit au transfert de la couche germe 3a sur la structure constituée du substrat support 1, de la seconde couche de séparation 2b et de la couche intermédiaire 4. Typiquement, l'épaisseur de la couche germe transférée est inférieure ou égale à 300 nm. Eventuellement, on effectue un traitement de finition de la surface libre de la couche germe transférée afin de favoriser la mise en œuvre de
20 l'épitaxie, ce traitement pouvant conduire à amincir la couche transférée et/ou à réduire sa rugosité.

Selon une seconde forme d'exécution, illustrée sur les figures 4A-4D, le procédé de fabrication du substrat comprend une étape de dépôt de la couche intermédiaire (au lieu d'un transfert de ladite couche à partir d'un substrat donneur) et une seule étape de
25 transfert de couche, pour la formation de la couche germe.

Cette seconde forme d'exécution du procédé tire avantage du fait que la couche semi-conductrice intermédiaire ne présente pas de fonction optique ni électronique et peut donc être réalisée en un matériau qui n'est pas monocristallin mais polycristallin et/ou amorphe. Ainsi, la couche intermédiaire peut être formée par dépôt sur la seconde
30 couche électriquement isolante 2b sous-jacente.

En référence à la figure 4A, on fournit le substrat support 1 recouvert de la seconde couche de séparation 2b. Ladite couche 2b est typiquement formée par oxydation thermique du substrat support 1 si celui-ci est en silicium. Celle-ci peut également être formée par un dépôt chimique en phase vapeur (technique CVD, acronyme du terme
35 anglo-saxon « Chemical Vapor Deposition ») qui peut ensuite nécessiter ou non un traitement visant à réduire sa rugosité.

En référence à la figure 4B, on dépose la couche intermédiaire 4, par exemple en silicium polycristallin et/ou amorphe. Ce dépôt peut être mis en œuvre par CVD ou par

épitaxie à différentes températures (allant de 300°C à plus de 800°C selon les techniques utilisées). Ce dépôt peut être suivi d'un polissage ou d'un traitement de lissage par exemple de type plasma de la couche 4 afin d'obtenir un état de surface adapté pour le collage puis le transfert de la couche germe.

5 En référence à la figure 4C, on fournit un substrat donneur 30 comprenant un matériau monocristallin adapté pour la croissance épitaxiale de la couche active et destiné à constituer la couche germe 3a. Selon un mode de réalisation, la couche germe 3a est délimitée par une zone de fragilisation 31 formée par implantation d'espèces atomiques, telles que de l'hydrogène et/ou de l'hélium.

10 En référence à la figure 4D, on colle le substrat donneur 30 sur la couche intermédiaire 4 précédemment déposée sur le substrat support 1, la première couche de séparation 2a étant à l'interface de collage. Comme représenté sur la figure 4C, ladite couche 2a est par exemple préalablement formée à la surface du substrat donneur 30 avant le collage. De manière alternative, la couche 2a pourrait être formée sur la couche
15 intermédiaire 4 après son dépôt sur le substrat support 1, voire constituée de l'assemblage d'une couche formée sur le substrat donneur et d'une couche formée sur la couche intermédiaire déposée.

On amincit ensuite le substrat donneur 30 de sorte à transférer la couche 3a sur la couche intermédiaire 4, ce qui permet d'obtenir le substrat représenté sur la figure 2. De
20 manière avantageuse, l'amincissement consiste à détacher le substrat donneur 30 le long de la zone de fragilisation 31. De manière alternative, l'amincissement pourrait être effectué par polissage ou gravure du substrat donneur par la face opposée à l'interface de collage de sorte à obtenir l'épaisseur et l'état de surface souhaité pour l'épitaxie de la couche active. Typiquement, l'épaisseur de la couche germe transférée est inférieure ou
25 égale à 300 nm. Eventuellement, on effectue un traitement de finition de la surface libre de la couche germe transférée afin de favoriser la mise en œuvre de l'épitaxie, ce traitement pouvant conduire à amincir de la couche transférée et/ou à réduire sa rugosité.

Cette seconde forme d'exécution du procédé est particulièrement avantageuse en ce qu'elle est moins onéreuse puisqu'elle implique une seule étape de transfert de couche
30 au lieu de deux.

Quel que soit le procédé de fabrication de la structure illustrée sur la figure 2, on met ensuite en œuvre, sur la couche germe 3a transférée, la croissance épitaxiale d'une couche 3b de silicium-germanium ou de silicium jusqu'à l'obtention de l'épaisseur
souhaitée pour la couche active (cf. figure 5), c'est-à-dire typiquement supérieure ou
35 égale à 1 µm. La couche épitaxiale 3b peut être légèrement dopée.

La couche germe 3a et la couche épitaxiale 3b forment ensemble la couche active 3. L'épaisseur de la couche épitaxiale 3b étant nettement supérieure à celle de la couche germe 3a, on considère que les propriétés optiques de la couche active sont

essentiellement imposées par la couche épitaxiale 3b, même si les couches 3a et 3b sont en des matériaux différents.

Ainsi, par exemple, si la couche épitaxiale est en SiGe mais que la couche germe n'est pas en SiGe, par exemple lorsqu'elle est en silicium, la couche de silicium est
5 suffisamment mince (d'une épaisseur inférieure ou égale à 300 nm) par rapport à l'épaisseur de la couche de SiGe pour ne pas affecter notablement les propriétés de la couche active en termes d'absorption dans l'infrarouge.

Cependant, il est possible de modifier la nature de la couche germe, par exemple au moyen d'un procédé dit « thermal mixing » selon la terminologie anglo-saxonne. De
10 manière connue en elle-même, ledit procédé comprend une oxydation de la couche de SiGe épitaxiée sur une couche de silicium, ladite oxydation ayant pour effet de consommer uniquement le silicium (pour former de l'oxyde de silicium) et de faire migrer le germanium vers la face opposée à la surface libre de la couche de SiGe. On obtient alors en surface une couche de SiO₂ que l'on peut éliminer par gravure.

En référence à la figure 6, on forme dans la couche active 3 une pluralité de
15 tranchées 5 électriquement isolantes qui s'étendent jusqu'à la première couche électriquement isolante 2a. Ces tranchées sont connues dans le domaine des capteurs d'image sous le terme CDTI, acronyme du terme anglo-saxon « Capacitive Deep Trench Isolation », c'est-à-dire tranchée profonde d'isolation. Chaque région de la couche active
20 délimitée par de telles tranchées est destinée à former un pixel du capteur d'image. A cet effet, une étape ultérieure du procédé de fabrication du capteur d'image est de former une photodiode (non représentée) dans ladite région. Les procédés de fabrication des tranchées et des photodiodes sont connus de l'homme du métier et ne seront donc pas décrits en détail dans le présent texte.

Selon un mode de réalisation optionnel mais avantageux, en référence à la figure
25 7A, on recouvre la couche active 3 dans laquelle ont été formées les tranchées d'isolation 5 d'une couche de confinement optique 6 présentant un coefficient de réflexion optique de la face avant vers la couche active supérieur au coefficient de réflexion de la couche active vers la face avant. Ladite couche de confinement optique 6 est constituée d'un
30 empilement de couches qui assurent une telle sélectivité de la réflectivité en fonction du sens du photon incident. Selon un mode de réalisation préféré, ladite couche de confinement optique 6 comprend une couche de nitrure de titane entre deux couches d'oxyde de silicium présentant des épaisseurs différentes. Un avantage d'un tel empilement est qu'il est compatible avec les procédés utilisés en micro-électronique ; la
35 formation de la couche de confinement optique peut donc être aisément intégrée dans le procédé de fabrication du capteur d'image. Par exemple, la couche de confinement optique 6 comprend, de la face avant vers la face arrière, une couche de SiO₂ de 100 nm d'épaisseur, une couche de TiN de 10 nm d'épaisseur et une couche de SiO₂ de 200 nm

d'épaisseur. La réflectivité d'un tel empilement de la face avant du capteur vers la couche active est de 0,5%, tandis que sa réflectivité de la couche active vers la face avant est de 37%.

Ladite couche de confinement optique 6 laisse passer le rayonnement incident sur la surface du capteur d'image sensiblement sans le réfléchir, mais réfléchit en revanche les photons présents dans la couche active et réfléchit par la structure double BOX, ce qui a pour effet de les emprisonner dans la couche active et d'augmenter la longueur de leur parcours dans la couche active. Ladite couche de confinement optique permet ainsi d'augmenter l'absorption optique de la couche active.

Selon un mode de réalisation illustré à la figure 7B, les tranchées 5 électriquement isolantes s'étendent également dans la couche de confinement optique 6. Cette configuration permet avantageusement d'isoler électriquement, l'un par rapport à l'autre, deux pixels (ou deux capteurs d'image) adjacents même au niveau de la couche de confinement, notamment pour éviter des effets parasites ou d'ombrage.

Selon un mode de réalisation illustré sur la figure 8, il est possible de polariser entièrement (c'est-à-dire sur toute son épaisseur) chaque pixel. A cet effet, chaque tranchée 5 est formée d'un via semi-conducteur 5a, par exemple en silicium, ou électriquement conducteur, s'étendant jusqu'à la couche intermédiaire 4 entre des parois 5b en un matériau électriquement isolant. Cette disposition est particulièrement avantageuse en ce qu'elle permet, avec une prise de contact unique, de polariser l'ensemble du pixel puisque les couches semi-conductrices 5a et 4 sont électriquement connectées.

Enfin, selon un mode de réalisation illustré sur la figure 9, il est possible de polariser entièrement et de manière indépendante chaque pixel. En effet, en ajustant la profondeur et les épaisseurs des parois intérieures et extérieures 5b de chaque tranchée, chaque pixel peut être polarisé indépendamment du pixel adjacent. Par exemple, chaque pixel peut être délimité d'un côté (côté droit pour le pixel central de la figure 9) par une paroi 5b en un matériau électriquement isolant relativement mince qui s'étend jusqu'à la couche intermédiaire 4, et d'un autre côté (côté gauche pour le pixel central de la figure 9) par une paroi 5b en un matériau électriquement isolant relativement épais qui s'étend au moins en partie dans la seconde couche de séparation 2b. La portion 4a de la couche intermédiaire 4 située sous le pixel est connectée électriquement à la couche semi-conductrice 5a située uniquement d'un côté du pixel (côté droit pour le pixel central de la figure 9) et est isolée électriquement du reste de la couche intermédiaire 4. Ainsi, chaque pixel peut être avantageusement adressé de manière indépendante.

Bien que non représentée sur les figures 8 et 9, la couche de confinement optique pourrait être présente sur la couche active et être traversée ou non par les tranchées 5 comme représenté sur les figures 7B et 7A.

Exemples

Des simulations numériques d'absorption optique ont été effectuées pour différents substrats, selon l'état de la technique (avec une seule couche d'oxyde de silicium entre le substrat support et la couche active, comme illustré sur la figure 1) et selon l'invention (avec une structure double BOX à entre le substrat support et la couche active, comme illustré sur la figure 5). Ladite structure double BOX est constituée de l'empilement suivant, de la face avant vers la face arrière du substrat :

- première couche de séparation 2a : SiO_2 , 40 nm
- couche semi-conductrice intermédiaire 4 : silicium polycristallin, 100 nm
- seconde couche de séparation 2b : SiO_2 , 150 nm.

La réflectivité d'un tel empilement est de l'ordre de 72% pour une longueur d'onde incidente de 940 nm.

Dans ces simulations, certains substrats sont recouverts d'une couche de confinement optique présentant une réflectivité de la face avant vers la couche active supérieure à la réflectivité de la couche active vers la face avant. Ladite couche de confinement optique est constituée de l'empilement suivant, de la face avant vers la face arrière du substrat : SiO_2 , 100 nm / TiN, 10 nm / SiO_2 , 200 nm.

La couche active est constituée soit d'une couche de silicium de 6 μm d'épaisseur, soit d'une couche de SiGe de 2 μm d'épaisseur présentant une concentration en germanium égale à 10%.

Le tableau ci-dessous indique le coefficient d'absorption optique dans la couche active, pour un rayonnement incident normal (perpendiculaire à la face avant du substrat) et présentant une longueur d'onde de 940 nm. La simulation ne prend pas en compte l'influence de la diffraction ni de la réfraction sur les tranchées séparant les différents pixels.

Couche de confinement optique	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Interface substrat support-couche active	SiO_2 30 nm	Double BOX	Double BOX	SiO_2 30 nm	Double BOX	Double BOX
Couche active	Si 6 μm	Si 6 μm	$\text{Si}_{0,9}\text{Ge}_{0,1}$ 2 μm	Si 6 μm	Si 6 μm	$\text{Si}_{0,9}\text{Ge}_{0,1}$ 2 μm
Coefficient d'absorption optique	33%	47%	49%	47%	68%	87%

- On constate un gain significatif en absorption dès lors que l'on utilise une structure double BOX au lieu d'une unique couche de SiO₂. L'absorption optique est encore améliorée avec la réalisation de la couche active en SiGe au lieu du silicium, et/ou avec
- 5 l'ajout de la couche de confinement optique qui confine les photons dans la couche active.

REFERENCES

US 2016/0118431