

A1

**DEMANDE  
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

**N° 81 24164**

---

(54) Photodiode à zones d'absorption et d'avalanche séparées.

(51) Classification internationale (Int. Cl.<sup>3</sup>). H 01 L 31/12, 33/00.

(22) Date de dépôt ..... 23 décembre 1981.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du  
public de la demande ..... B.O.P.I. — « Listes » n° 25 du 24-6-1983.

---

(71) Déposant : Société dite : THOMSON-CSF, société anonyme. — FR.

(72) Invention de : Pierre Poulain et Baudouin De Crémoux.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Philippe Guilguet, Thomson-CSF, SCPI,  
173, bd Haussmann, 75360 Paris Cedex 08.

## PHOTODIODE A ZONES D'ABSORPTION ET D'AVALANCHE SEPARÉES

L'invention concerne une photodiode à zones d'absorption et d'avalanche séparées, opérant dans le domaine 1,2 - 1,6 micron, réalisée en utilisant des matériaux des familles III-V, et possédant un gain par avalanche élevé, bien que le facteur de bruit soit faible.

5 L'invention concerne plus précisément la structure des couches semi-conductrices qui constituent une photodiode à avalanche : l'optimisation de cette structure, par des modifications géométriques des couches ou des prises de contact par exemple, fait partie des connaissances de l'art et certains perfectionnements aux photodiodes à avalanche sont déjà connus,  
10 par exemple des demandes de brevets en France N° 75.15 437, 77.19 616 et 77.31 274 de la société demanderesse.

L'invention sera exposée en s'appuyant sur l'exemple d'une photodiode représentant deux hétérojonctions InP/GaInAs, mais d'autres matériaux tels que GaAsSb, GaAlAsSb, GaSb entrent dans le domaine d'application de  
15 l'invention, pourvu qu'ils soient adaptés entré eux en mailles cristallines.

Une photodiode à avalanche est un dispositif semiconducteur qui ajoute à l'effet photodétecteur un effet amplificateur dû à l'avalanche. Ce type de dispositif est très utilisé dans le domaine des télécommunications sur fibres optiques.

20 Une photodiode à zones d'absorption et d'avalanche séparées, comprend, parmi d'autres, une couche d'absorption des photons dans laquelle les photons incidents créent des paires électrons-trous. Sous l'effet d'une polarisation inverse, dans une couche ayant une concentration de dopage et une épaisseur telles qu'elle soit au moins partiellement en charge d'espace,  
25 ou que la longueur de diffusion des porteurs soit grande, un courant se produit par échange des électrons et des trous. Le potentiel de polarisation appliqué étant supposé suffisant, les électrons s'écoulent vers la première région formant une première hétérojonction avec la couche d'absorption, tandis que les trous s'écoulent dans un sens opposé, vers une deuxième région  
30 formant une deuxième hétérojonction avec la couche d'absorption, deuxième région dans laquelle ils déclenchent le phénomène d'avalanche dû à un fort champ électrique.

L'intérêt d'initier l'avalanche par les trous dans le cas des matériaux III-V, et InP plus particulièrement est que le bruit apporté par l'amplification est plus faible que dans le cas où elle est initiée par des électrons.

Il est maintenant bien établi que pour réaliser des photodiodes à avalanche à base de composés III-V, dans le domaine spectral de 1,2 - 1,6 micromètre, il faut utiliser des hétérostructures telles que la zone de fort champ électrique, de l'ordre de  $10^5$  V/cm, dans laquelle se produit l'avalanche soit située dans un matériau à grande bande interdite, l'absorption de lumière se faisant dans une zone adjacente à petite bande interdite.

Par ailleurs, la mesure des coefficients d'ionisation des porteurs de charge dans le matériau semiconducteur montre que ceux-ci sont d'autant plus dissymétriques, pour les électrons et les trous, que le champ électrique décroît. Mais, comme le bruit dû à l'amplification par avalanche est d'autant plus grand que le rapport de ce coefficient d'ionisation se rapproche de l'unité, les structures connues ont leur gain utile limité à des valeurs faibles, de l'ordre de 10. Par conséquent, pour pouvoir augmenter le gain d'une photodiode à avalanche, il est nécessaire d'opérer avec un champ électrique moins élevé de façon à ce que les coefficients d'ionisation soient davantage dissymétriques, tout en conservant un bruit dû à l'amplification peu élevé. C'est l'objet de l'invention que de réaliser une photodiode à zone d'absorption et d'avalanche séparées possédant un gain par avalanche élevé et simultanément un faible facteur de bruit.

Selon l'invention, on obtient un gain appréciable avec un champ faible en augmentant la longueur sur laquelle ce champ s'exerce, c'est-à-dire en remplaçant la région d'avalanche des structures connues, région d'avalanche peu épaisse mais sous fort champ électrique, par une région d'avalanche plus longue et sous faible champ électrique. Ainsi, statistiquement le gain obtenu par avalanche est le même. Ceci est obtenu en intercalant une couche à grande bande interdite et faiblement dopée entre la couche d'abaissement du champ électrique et la couche fenêtre ou couche de prise de contact par métallisation sur le corps de la diode, afin que la zone d'avalanche s'étende sur une distance suffisante pour obtenir un gain élevé sous champ électrique faible.

De façon plus précise, l'invention concerne une photodiode à zones d'absorption et d'avalanche séparées, comprenant, sur un substrat porteur d'une première métallisation de prise de contact électrique, une hétéro-structure formée par une première couche d'absorption de la lumière, en  
5 matériau à faible bande interdite, et par une deuxième couche, en matériau à grande bande interdite, l'ensemble du substrat et des deux couches de l'hétérostructure étant d'un premier type de conductivité, cette diode comprenant de plus une couche, d'un second type de conductivité, et  
10 porteuse d'une seconde métallisation de prise de contact électrique, ladite diode étant caractérisée en ce que le phénomène d'avalanche est confiné dans une couche d'avalanche, à faible bande interdite, et du premier type de conductivité, formant jonction avec la couche du second type de conductivité, cette couche d'avalanche étant séparée de la première couche d'absorption de la lumière, à faible bande interdite, par la deuxième couche  
15 de l'hétérostructure, à grande bande interdite, et étant d'épaisseur telle que le produit "concentration de dopage x épaisseur" soit inférieur à  $1,3.10^{12}$  at.cm<sup>-2</sup>, tandis que la couche à grande bande interdite, a une épaisseur telle que le produit "concentration de dopage x épaisseur" est sensiblement égal à  $2,5.10^{12}$  at.cm<sup>-2</sup>.

20 L'invention sera mieux comprise par la description qui suit d'un exemple de réalisation, cette description s'appuyant sur les figures jointes en annexe qui représentent :

- figure 1 : structure et profil du champ électrique pour une photodiode à avalanche selon l'art connu ;
- 25 - figure 2 : structure et profil du champ électrique pour une photodiode à avalanche selon l'invention.

La figure 1 représente la structure d'une photodiode à zones d'absorption et d'avalanche séparées selon l'art connu. La géométrie d'une telle photodiode s'y prêtant, on a superposé à la représentation de la structure par  
30 couches de semiconducteurs la représentation du diagramme ou du profil du champ électrique, sur le dessin de la structure.

Dans le but de simplifier les explications, cette diode à avalanche selon l'art connu est choisie en InP/GaInAs, dont les différentes couches sont de type n et p.

Une telle photodiode à avalanche est composée d'un substrat  $n^+$  en InP repéré 1 : dans la réalité, cette couche 1 est composée du substrat lui-même et d'une couche tampon ou buffer de même matériau et de même type de conductivité, la couche tampon étant destinée à lisser la surface relativement rugueuse du substrat. Sur le substrat 1 est déposée une couche 2 de GaInAs de type de conductivité  $n$ , que l'on appellera  $\nu$ , parce que c'est une zone  $n$  peu dopée. Avec la zone d'absorption des photons, une couche 3 d'InP de type  $n$  forme une hétérojonction, de grande bande interdite, alors que la couche d'absorption est à faible bande interdite. Enfin, une couche de contact 4 en InP de type de conductivité  $p^+$  assure la prise de contact avec la métallisation d'électrode. Une telle diode est complétée par deux métallisations d'électrodes 5 du côté du substrat et 6 du côté de la fenêtre par laquelle pénètre la lumière détectée par cette diode à avalanche. Les métallisations de prise de contact, tout comme la représentation des différentes couches composant la structure d'une telle photodiode, sont très schématisées.

La région superficielle du côté de la prise de contact 6 constitue une fenêtre pouvant jouer le rôle de filtre limitant vers les courtes longueurs d'onde le spectre de la lumière reçue par le dispositif utilisé en photodétecteur. Elle constitue en même temps, du fait de son dopage élevé, une région de prise de contact et sa localisation permet de limiter la région d'absorption du dispositif à l'aire strictement utile, par exemple l'aire très petite correspondante à la section d'une fibre optique ou d'un faisceau de fibres optiques. Lorsqu'un photon  $\nu$  pénètre dans la photodiode par la fenêtre constituée dans la métallisation 6, il traverse les couches superficielles 3 et 4 et est détecté et absorbé dans la couche d'absorption 2 dans laquelle il crée une paire électron-trou. Sous l'action d'un champ électrique, exercé par la polarisation inverse qui est appliquée aux bornes de la diode, les électrons et les trous se séparent, les électrons étant dirigés vers le substrat 1 tandis que les trous sont dirigés vers la couche 3 et la région superficielle.

L'axe horizontal du dessin représentant les distances ou les épaisseurs de couches, on a porté en axe vertical le champ électrique  $E$ , en valeur absolue, développé par la polarisation. Ce champ est de peu d'importance

dans le substrat, mais dans la couche d'absorption 2, il atteint une valeur de l'ordre de  $10^5$  V/cm au maximum, au-delà de laquelle il y aurait risque de claquage de la diode par effet tunnel. Puis, dans la couche 3 à grande bande interdite, il y a élévation du champ, jusqu'à un maximum dans lequel se produit l'avalanche, tandis que dans la couche 4 de prise de contact le champ retombe brutalement au-delà de la jonction entre les couches 3 et 4, à une valeur très faible. Sur le diagramme de champ superposé au diagramme de structure dans la figure 1, la zone de détection et d'absorption des photons est représentée par la zone 7, tandis que la zone d'avalanche est représentée en 8 : la zone d'avalanche a une épaisseur de l'ordre de 100 Å.

La variation brutale de champ dans la couche 3 peut être considérée selon le cas comme une élévation du champ selon qu'il s'agit des trous qui se dirigent de la zone 2 vers la zone 3 ou comme un abaissement du champ si l'on considère le trajet des photons : toujours est-il que ce champ varie fortement en fonction de la distance  $x$  et que par conséquent comme cela a été dit, il se produit statistiquement un bruit élevé dû à une amplification brutale par avalanche, ce bruit étant d'autant plus grand que le rapport des coefficients d'ionisation approche de l'unité, c'est-à-dire que le champ électrique est élevé.

Selon l'invention, le bruit est diminué tout en conservant un gain dû à l'avalanche élevé, la zone d'avalanche s'étendant sur une distance suffisante pour obtenir un gain sous champ électrique faible. C'est ce que représente la figure 2 qui donne le schéma de structure d'une diode à avalanche selon l'invention.

La figure 2 est à rapprocher de la figure 1 en ce sens qu'elle donne selon l'axe des  $x$  les différentes couches semiconductrices qui composent une photodiode à avalanche et, superposée selon l'axe des  $y$ , la courbe du champ électrique  $E$  en valeur absolue dans ces mêmes couches.

De façon à être comparable à l'exemple cité de l'art connu, l'exemple d'application de l'invention décrite utilise le composé III-V  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ , qui permet de couvrir le domaine spectral de 1 à 1,7 micromètre lorsqu'il est adapté en maille cristalline à un substrat InP. Mais, comme il a été dit, d'autres matériaux sont utilisables qui entrent dans le domaine de l'invention.

Le substrat 1 en InP de type de conductivité n+ est composé d'une couche de substrat à proprement parler et d'une couche tampon destinée à lisser la surface du substrat : sur ce substrat 1 est déposée par épitaxie en phase vapeur, une couche 2, qui est la couche d'absorption, en  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  correspondant à la composition  $x = 0,47$ , et de dopage  $n < 2 \cdot 10^{15}$  atomes d'impureté ionisés par  $\text{cm}^3$ , cette couche ayant une épaisseur de 2 microns environ.

Ensuite, est déposée une couche InP dopée  $n_1$ , et d'épaisseur  $x_1$  telle que  $n_1 \cdot x_1 \approx 2,5 \cdot 10^{12}$  atomes d'impureté ionisés par  $\text{cm}^2$ . A titre d'exemple,  $n_1 = 5 \cdot 10^{16}$  atomes/ $\text{cm}^3$  et  $x_1 = 0,5$  micron. Cette couche d'abaissement du champ est repérée 9 sur la figure 2 pour la différencier de la couche 3 de la figure 1. Cette couche 9 doit répondre à la condition  $n_1 x_1 \approx 2,5 \cdot 10^{12}$  atomes/ $\text{cm}^2$ . Sur la couche d'abaissement de champ 9 est déposée une couche d'InP repérée 10 dopée  $n_2$  : cette couche est épaisse et, avant les opérations qui seront décrites ultérieurement, elle va jusqu'à la métallisation 6 de prise de contact. Cette couche 10 est, comme la couche 2, repérée par le signe  $\nabla$ , qui indique qu'elle est peu dopée.

La jonction électrique pn nécessaire pour faire une diode de ce type, est formée par implantation ou diffusion dans la couche d'InP 10 d'un dopant de type p à travers un masque d'oxyde, et jusqu'à une profondeur telle que l'on ait la condition  $n_2 \cdot x_2 < 1,3 \cdot 10^{12}$  at/ $\text{cm}^2$ ,  $x_2$  étant la distance séparant la jonction de l'interface entre les deux couches d'InP 9 et 10. Cette opération d'implantation ou de diffusion forme donc dans la couche 10 de type  $n_2$  la couche 11 de type p+ représentée sur la figure 2.

Les contacts ohmiques sont ensuite réalisés par des moyens connus de métallisation avec une géométrie permettant la transmission de la lumière sur au moins l'une des faces : sur la figure représentée, le contact ohmique 5 sur la couche n+ qui est le substrat n'est pas transparent à la lumière et c'est le contact ohmique 6 sur la couche p+ 11 qui présente une fenêtre, pour le passage d'une fibre optique par exemple.

Si l'on considère maintenant le diagramme de champ électrique qui est rapporté et superposé sur cette structure de diode, la zone de détection est, comme dans la diode de l'art connu, la zone 7 dans la couche d'absorption 2. Cette zone de détection correspond à un champ électrique maximum de  $10^5$

Volts/cm. La zone d'avalanche est repérée 12 et elle correspond à un minimum de  $4,5 \times 10^5$  Volts/cm. Cette zone d'avalanche s'étend à travers la couche d'avalanche InP 10, couche dans laquelle le champ varie peu, mais varie sur une distance suffisante pour que le produit de l'amplification par unité de distance multiplié par l'épaisseur de la couche donne un gain important.

La structure décrite est du type  $n\nu n\nu p$  : toutefois, si les matériaux utilisés pour réaliser une photodiode à avalanche sont tels que le coefficient d'ionisation des électrons est supérieur à celui des trous, il suffit alors de réaliser une structure de type  $p\nu p\nu n$  pour obtenir une photodiode à avalanche jouissant des mêmes caractéristiques de gain élevé et de faible bruit en excès à l'amplification. Cependant, comme un faible bruit en excès est obtenu pour des coefficients d'ionisation très différents, il est préférable d'injecter dans la zone d'avalanche le porteur de plus fort coefficient d'ionisation, c'est pourquoi le cas le plus général est le cas d'une diode  $n\nu n\nu p$ .

Enfin, l'invention a été exposée en précisant, dans le seul but de simplifier les explications, que les matériaux sont InP et GaInAs : il a été dit précédemment que d'autres matériaux tels que GaAlSb, GaAlAsSb, GaSb par exemple conviennent parfaitement.

En outre, la structure de la diode a été exposée dans son schéma le plus général, qui correspond à celui de couches de matériaux semi-conducteurs. Rien n'empêche de perfectionner cette diode en donnant aux différentes couches énoncées des formes qui permettent d'optimiser la diode selon l'invention, qui est précisée par les revendications ci-après.



# REVENDICATIONS

1. Photodiode à zones d'absorption et d'avalanche séparées, comprenant, sur un substrat (1) porteur d'une première métallisation (5) de prise de contact électrique, une hétérostructure formée par une première couche (2) d'absorption de la lumière, en matériau à faible bande interdite, et par une deuxième couche (9), en matériau à grande bande interdite, l'ensemble du substrat (1) et des deux couches (2, 9) de l'hétérostructure étant d'un premier type de conductivité, cette diode comprenant de plus une couche (11), d'un second type de conductivité, et porteuse d'une seconde métallisation (6) de prise de contact électrique, ladite diode étant caractérisée en ce que le phénomène d'avalanche est confiné dans une couche d'avalanche (10), à faible bande interdite, et du premier type de conductivité, formant jonction avec la couche (11) du second type de conductivité, cette couche d'avalanche (10) étant séparée de la première couche (2) d'absorption de la lumière, à faible bande interdite, par la deuxième couche (9) de l'hétérostructure, à grande bande interdite, et étant d'épaisseur ( $X_2$ ) telle que le produit "concentration de dopage x épaisseur  $X_2$ " soit inférieur à  $1,3.10^{12}$  at.cm<sup>-2</sup>, tandis que la couche (9) à grande bande interdite, a une épaisseur ( $X_1$ ) telle que le produit "concentration de dopage x épaisseur  $X_1$ " est sensiblement égal à  $2,5.10^{12}$  at.cm<sup>-2</sup>.
2. Photodiode selon la revendication 1, caractérisée en ce que sa structure est de type n+v nvp+ : substrat (1) n+, couche d'absorption (2) v, couche à grande bande interdite (9) n, couche d'avalanche (10) v, couche de jonction (11) p+, l'avalanche étant déclenchée par des trous.
3. Photodiode selon la revendication 1, caractérisée en ce que sa structure est de type p+ $\pi$  p  $\pi$  n+ : substrat (1) p+, couche d'absorption (2)  $\pi$  couche à grande bande interdite (9) p, couche d'avalanche (10)  $\pi$ , couche de jonction (11) n+, l'avalanche étant déclenchée par des électrons.
4. Photodiode selon la revendication 1, caractérisée en ce que le matériau du substrat (1) et des couches à grande bande interdite (9) d'avalanche (10) et de jonction (11) étant InP, l'hétérostructure est formée par une couche à faible bande interdite (2) en Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As, avec x = 0,47.

5 5. Photodiode selon la revendication 1, caractérisée en ce que le matériau du substrat (1) et des couches à grande bande interdite (9) d'avalanche (10) et de jonction (11) étant GaSb, l'hétérostructure est formée par une couche à faible bande interdite (2) en matériau adapté en paramètre de maille cristalline parmi GaAlSb ou GaAlAsSb.

1/1

FIG. 1

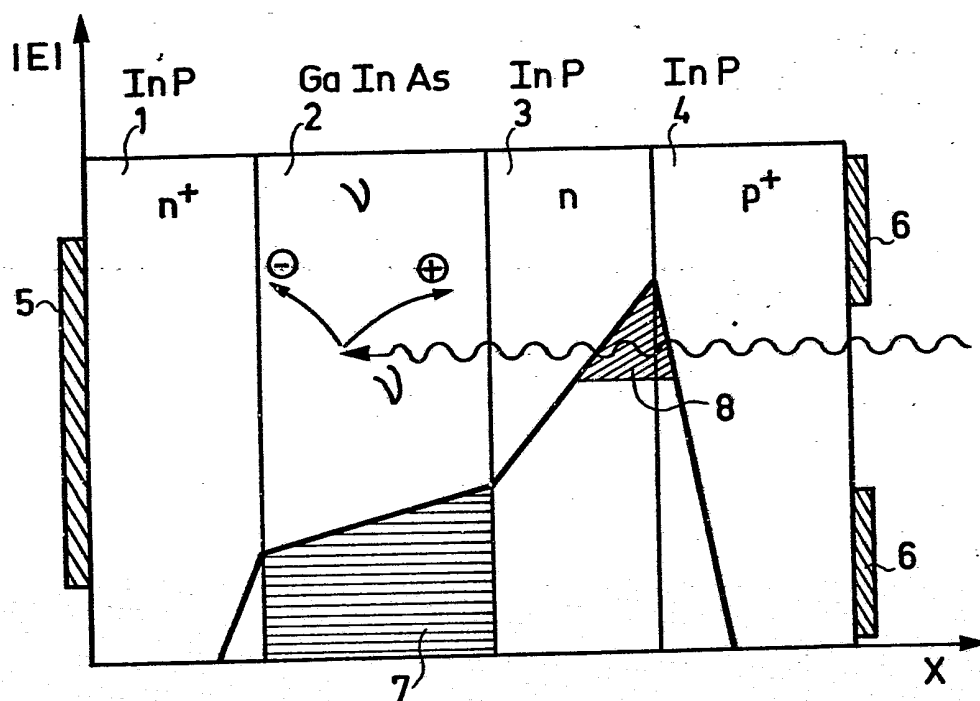


FIG. 2

