

Cabinet Chaillot

16/20, Avenue de l'Agent Sarre B.P. 74  
92703 Colombes Cedex

V/Ref. : B29122FR

**OBJET : Brevet d'invention - Notification de la délivrance**

Courbevoie, le 12.08.22

Madame, Monsieur,

Je vous prie de bien vouloir trouver ci-joint la décision de délivrance du brevet d'invention n° **19 09355** (n° de publication 3 100 086).

Le texte de ce titre de propriété industrielle est reproduit en annexe.

Veuillez agréer l'expression de ma considération distinguée.

Pour le directeur général de l'Institut National de la Propriété Industrielle



**Philippe CADRE**  
Directeur de la propriété industrielle



# Brevet d'invention

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

## DÉCISION DE DÉLIVRANCE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle décide que le brevet d'invention n° **19 09355** dont le texte est ci-annexé est délivré à :  
**National Taiwan University organisme à but non lucratif du secteur de l'enseignement et de la recherche**

La délivrance produit ses effets pour une période de vingt ans à compter de la date de dépôt de la demande, sous réserve du paiement des redevances annuelles.

Mention de la délivrance est faite au Bulletin officiel de la propriété industrielle n° 22/32 du 12.08.22 (n° de publication 3 100 086).

Fait à Courbevoie, le 12.08.22

Pour le directeur général de l'Institut National  
de la Propriété Industrielle

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, representing the name Philippe CADRE.

Philippe CADRE  
Directeur de la propriété industrielle



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

①1 N° de publication : **3 100 086**

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

②1 N° d'enregistrement national : **19 09355**

⑤1 Int Cl<sup>B</sup> : **H 01 L 31/101 (2019.01), H 01 L 31/022, H 01 L 27/  
14, G 01 J 5/08**

⑫

## BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 PHOTODÉTECTEUR.

②2 Date de dépôt : 22.08.19.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 26.02.21 Bulletin 21/08.

④5 Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 12.08.22 Bulletin 22/32.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension : Polynésie-Fr

⑦1 Demandeur(s) : *National Taiwan University  
organisme à but non lucratif du secteur de  
l'enseignement et de la recherche — TW.*

⑦2 Inventeur(s) : LIN Ching-Fuh, CHUANG Hung-  
Chieh, LIN Meng-Jie et HUANG Po-Jui.

⑦3 Titulaire(s) : *National Taiwan University organisme à  
but non lucratif du secteur de l'enseignement et de la  
recherche.*

⑦4 Mandataire(s) : Cabinet Chaillot.

FR 3 100 086 - B1



## Description

### Titre de l'invention : PHOTODÉTECTEUR

- [0001] La présente invention concerne un photodétecteur avec une réponse améliorée et une région de spectres à large bande qui sont bénéfiques pour une détection de photons.
- [0002] En 1938, W.H. Schottky a proposé que la jonction métal-semi-conducteur puisse générer une barrière de potentiel après un équilibre thermique, à savoir, une barrière de Schottky ou une jonction de Schottky. La Figure 1A montre qu'un semi-conducteur de type p est utilisé en tant qu'exemple dans lequel le porteur principal est un trou ( $h^+$ ), et chaque métal et semi-conducteur a sa propre bande d'énergie, son propre niveau de Fermi, et sa propre largeur de bande interdite avant d'être mis en contact. Le travail d'extraction ( $\phi_m$ ) du métal est laissé plus petit que le travail d'extraction ( $\phi_s$ ) du semi-conducteur. Le travail d'extraction est défini comme la différence d'énergie entre le niveau de Fermi et le niveau de vide  $E_{vac}$ . L'affinité électronique  $\chi$  du semi-conducteur est la différence d'énergie entre la bande de conduction  $E_c$  et le niveau de vide de semi-conducteur  $E_{vac}$ .
- [0003] Comme représenté à la Figure 1B, après que le métal est en contact avec le semi-conducteur, le niveau de Fermi du semi-conducteur est inférieur au niveau de Fermi du métal. Après équilibre thermique, le trou dans le semi-conducteur de type p s'écoule dans le métal, laissant la charge négative dans le semi-conducteur. Une charge d'espace est formée sur les deux côtés de la jonction métal-semi-conducteur, et un champ électrique intégré  $V_{bi}$  est généré. Si le trou de porteur principal ( $h^+$ ) dans le semi-conducteur de type p doit s'écouler dans le métal à partir du semi-conducteur, le champ électrique intégré  $V_{bi}$  au niveau de la jonction doit être surmonté. Si une polarisation est appliquée de sorte que le porteur peut surmonter le champ électrique intégré, la polarisation appliquée est appelée la tension de seuil. Si le trou a besoin d'aller vers le semi-conducteur depuis le métal, la barrière de Schottky au niveau de la jonction doit être surmontée. Ce genre de déformation de bande d'énergie ou de barrière d'énergie qui empêche le porteur de bouger est appelé la jonction de Schottky.
- [0004] Selon la théorie de la jonction métal-semi-conducteur, un semi-conducteur de type p a besoin d'être en correspondance avec un métal avec un grand travail d'extraction, et un semi-conducteur de type n a besoin d'être en correspondance avec un métal avec un petit travail d'extraction, de telle sorte qu'une jonction de Schottky peut être formée. Et la hauteur de la barrière de Schottky peut être estimée par une courbe IV (courant-tension) ou une courbe CV (capacité-tension).
- [0005] En 1959, HY Fan et AK Ramdas et al. ont découvert qu'après qu'un semi-conducteur est irradié avec de la lumière, des électrons ou des trous originellement dans la bande de valence de semi-conducteur sont excités par des photons incidents

puis sautent vers la bande de conduction pour former une paire électron-trou ou des porteurs chauds, et ce mécanisme est appelé absorption à mi-bande interdite (MBA). Pour que la lumière incidente excite une paire électron-trou, l'énergie du photon incident a besoin d'être plus grande que la bande interdite du semi-conducteur, de telle sorte que le porteur peut obtenir suffisamment d'énergie pour surpasser la bande interdite du semi-conducteur et former un photocourant. A présent, les photodétecteurs utilisent largement ce mécanisme d'absorption à mi-bande interdite de semi-conducteur.

- [0006] Les capteurs infrarouges actuels utilisent majoritairement des semi-conducteurs avec des petites bandes interdites tels que III-V ou Ge en tant que couche active ou matériau absorbant de détection pour détecter une lumière infrarouge avec une faible énergie photon. Bien que des détecteurs existants III-V ou Ge ont été bien établis dans leur procédé de fabrication, ces matériaux sont plus onéreux que d'autres matériaux, et le procédé requiert de nombreux dispositifs épitaxiaux complexes et coûteux. Le principe de détection de tels dispositifs est principalement l'absorption à mi-bande interdite (MBA). Des porteurs dans le semi-conducteur sont excités par une lumière incidente et surpassent la bande interdite de semi-conducteur pour générer des photocourants. Par conséquent, afin d'améliorer l'efficacité de détection ou la sensibilité du dispositif, de tels composants ont souvent besoin d'incorporer de multiples puits quantiques (MQW) ou de multiples points quantiques (MQD) complexes dans la couche active.
- [0007] Selon un aspect général, la présente invention concerne un photodétecteur, et plus particulièrement à un photodétecteur à bande large.
- [0008] La présente invention a pour objet un photodétecteur, caractérisé par le fait qu'il comprend : un semi-conducteur ayant une pluralité de micro à nanostructures ; une électrode de contact ohmique formant un contact ohmique avec une première surface du semi-conducteur ; une électrode métallique qui forme un contact de Schottky avec la surface des micro à nanostructures ; dans lequel des porteurs dans l'électrode métallique sont excités par une lumière incidente pour former des paires électron-trou ou des porteurs chauds pour traverser une barrière de Schottky entre une jonction de l'électrode métallique et du semi-conducteur et ainsi former un photocourant.
- [0009] Selon une caractéristique particulière de l'invention, chaque micro à nanostructure comprend de multiples longueurs linéaires, et une longueur d'onde de lumière incidente correspond à l'une des longueurs linéaires pour induire une résonance de plasmon de surface localisée, LSPR.
- [0010] Selon une caractéristique particulière de l'invention, la pluralité de micro à nanostructures sont des structures pyramidales inversées ou des structures pyramidales vers le haut.
- [0011] Selon une caractéristique particulière de l'invention, la lumière incidente entre à

partir d'une seconde surface du semi-conducteur pour améliorer l'électrode métallique avec le désavantage d'une oxydation aisée, et la seconde surface est opposée à la première surface.

- [0012] Selon une caractéristique particulière de l'invention, des photons avec une énergie plus petite que la barrière de Schottky et la bande interdite du semi-conducteur peuvent tous deux être détectés.
- [0013] Selon une caractéristique particulière de l'invention, la lumière incidente avec une gamme de longueurs d'onde de 500 nm à 4000 nm peut induire une résonance de plasmon de surface localisée dans les structures pyramidales inversées.
- [0014] Selon une caractéristique particulière de l'invention, la lumière incidente avec une gamme de longueurs d'onde de 1000 nm à 10000 nm peut induire une résonance de plasmon de surface localisée dans les structures pyramidales vers le haut.
- [0015] Selon une caractéristique particulière de l'invention, la période des structures pyramidales inversées est quatre fois la longueur d'onde de la lumière incidente.
- [0016] Selon une caractéristique particulière de l'invention, la résonance de plasmon de surface localisée est insensible à la polarisation.
- [0017] Selon une caractéristique particulière de l'invention, le spectre d'absorption du photodétecteur a un rapport d'absorption supérieur à 80 % dans la gamme de longueurs d'onde entre 450 nm et 2700 nm.
- [0018] Selon un mode de réalisation de cette invention, un photodétecteur comporte un semi-conducteur, une électrode de contact ohmique et une électrode métallique, dans lequel le semi-conducteur comprend une ou plusieurs structures microscopiques ou nanoscopiques induisant une résonance de plasmon. L'électrode de contact ohmique forme un contact ohmique avec une première surface du semi-conducteur. L'électrode métallique forme un contact de Schottky avec la surface des structures induisant une résonance de plasmon. Des porteurs dans l'électrode métallique sont excités par une lumière incidente pour former des paires électron-trou ou des porteurs chauds pour traverser une barrière de Schottky entre une jonction de l'électrode métallique et du semi-conducteur et ainsi former un photocourant. La lumière incidente induit une résonance de plasmon de surface localisée (LSPR) sur la surface des structures induisant une résonance de plasmon, et lorsque l'onde d'amortissement de plasmon générée par LSPR est transmise à la jonction de Schottky, le fort champ proche excite un grand nombre de porteurs chauds pour promouvoir la réponse du photodétecteur. Les structures induisant une résonance de plasmon contiennent des structures périodiques pour induire LSPR, augmenter l'absorption de lumière, et optimiser la réponse du photodétecteur.
- [0019] Pour mieux illustrer l'objet de la présente invention, on va en décrire ci-après, à titre illustratif et non limitatif, des modes de réalisation préférés, avec référence aux dessins

annexés.

- [0020] Sur ces dessins :
- [0021] [fig.1A] représente la bande d'énergie avant que le métal ne soit en contact avec le semi-conducteur ;
- [0022] [fig.1B] représente la bande d'énergie après que le métal soit en contact avec le semi-conducteur ;
- [0023] [fig.2] représente un photodétecteur selon un premier mode de réalisation de la présente invention ;
- [0024] [fig.3] représente des mesures IV du photodétecteur utilisant de l'or et du platine en tant qu'électrodes de contact ohmique ;
- [0025] [fig.4] représente le courant d'obscurité et le photocourant d'un photodétecteur réalisé en cuivre évaporé suivi par dépôt de platine ;
- [0026] [fig.5] représente la réponse de photocourant d'un composant au silicium de type p/ cuivre qui est sous un rayonnement de lumière visible et mesuré par un simulateur solaire ;
- [0027] [fig.6] représente la réponse de photocourant du photodétecteur fonctionnant à une polarisation 0 ;
- [0028] [fig.7] représente les spectres d'absorption d'un photodétecteur au silicium de type p/ cuivre selon un premier mode de réalisation de la présente invention ;
- [0029] [fig.8] représente la réponse du photodétecteur au silicium de type p/cuivre du premier mode de réalisation de la présente invention pour une lumière incidente à différentes longueurs d'onde ;
- [0030] [fig.9A] est une vue en perspective représentant un photodétecteur selon un second mode de réalisation de la présente invention ;
- [0031] [fig.9B] est une vue en coupe représentant l'une d'une nanostructure de micro-réseau périodique du photodétecteur selon le second mode de réalisation de la présente invention ;
- [0032] [fig.10] représente un procédé de fabrication du photodétecteur selon le second mode de réalisation de la présente invention ;
- [0033] [fig.11] est une photographie SEM de la vue de dessus et de la vue en coupe montrant les structures pyramidales inversées (IPS) après gravure pendant 20 minutes avec une solution de KOH ;
- [0034] [fig.12] représente la relation entre la largeur de ligne et le temps de gravure des structures pyramidales inversées (IPS) ;
- [0035] [fig.13] représente des structures pyramidales inversées (IPS) simulées en utilisant la méthode des éléments finis ;
- [0036] [fig.14] représente des résultats de simulation de résonance de plasmon de surface localisée des IPS où des lumières incidentes avec des longueurs d'onde différentes sont

- perpendiculairement incidentes sur le métal du photodétecteur IPS ;
- [0037] [fig.15] représente la relation entre l'intensité de résonance de plasmon de surface localisée (LSPR) et la longueur de la paroi de cavité des IPS de la Figure 13 pour des lumières incidentes avec différentes longueurs d'onde ;
- [0038] [fig.16] représente la relation entre la longueur d'onde de lumière incidente et la longueur de la paroi de cavité des IPS induit par la LSPR sur divers modes résonnants ;
- [0039] [fig.17] représente des spectres d'absorption d'un échantillon comparatif et du photodétecteur selon un second mode de réalisation de la présente invention ;
- [0040] [fig.18] représente des mesures IV de courant d'obscurité de photodétecteurs de Schottky de type p/cuivre plan et IPS selon les premier et second modes de réalisation de la présente invention ;
- [0041] [fig.19] représente les réponses photoélectriques mesurées avec des lumières infrarouges à différentes longueurs d'onde incidentes sur les photodétecteurs plan et IPS, respectivement ;
- [0042] [fig.20] représente le photodétecteur selon le second mode de réalisation de la présente invention, où, après qu'une partie des porteurs chauds entrent en collision les uns avec les autres, ils obtiennent une énergie plus grande que la barrière de Schottky et traversent la barrière d'énergie pour former un courant thermique ;
- [0043] [fig.21] représente la réponse du photodétecteur selon le second mode de réalisation de la présente invention fonctionnant avec un laser IR 1550 nm à différentes intensités de lumière incidente et tensions de polarisation ;
- [0044] [fig.22] est un graphique représentant la relation entre la réponse et l'intensité incidente du photodétecteur selon le second mode de réalisation de la présente invention ;
- [0045] [fig.23] est une photographie SEM montrant des structures pyramidales vers le haut en trois dimensions fabriquées selon un mode de réalisation de la présente invention ;
- [0046] [fig.24] représente un contact de Schottky réalisé par placage d'un nano film d'argent sur un substrat de silicium plan selon un mode de réalisation de la présente invention ;
- [0047] [fig.25] est une réponse de la Figure 24, dans laquelle des lumières sont incidentes sur le contact de Schottky dans des directions différentes ;
- [0048] [fig.26] représente des structures pyramidales inversées (IPS) simulées en utilisant la méthode des éléments finis dans laquelle la lumière est changée pour être incidente sur le contact de Schottky à partir du substrat de silicium ;
- [0049] [fig.27] représente des résultats de simulation de résonance de plasmon de surface localisée dans lesquels des lumières incidentes avec différentes longueurs d'onde sont perpendiculairement incidentes sur le métal des structures pyramidales vers le haut (UPS).
- [0050] Un premier mode de réalisation de la présente invention propose un photodétecteur

avec une jonction métal-semi-conducteur. Le photodétecteur peut détecter une lumière avec une énergie inférieure à la bande interdite du semi-conducteur, et peut produire un photocourant sous une unique condition que l'énergie de la lumière incidente est légèrement plus grande que la barrière de Schottky.

[0051] La Figure 2 représente un photodétecteur 1 selon un mode de réalisation de la présente invention. Comme montré à la Figure 2, le photodétecteur 1 comprend un semi-conducteur 10, une électrode de contact ohmique 12 et une électrode métallique 14. L'électrode métallique 14 peut comprendre une électrode de contact de Schottky 141 et une électrode de grille 142. Dans ce mode de réalisation, le semi-conducteur 10 est du silicium de type p, l'électrode de contact ohmique 12 est réalisée en platine, et l'électrode métallique 14 est réalisée en chrome. Dans certains modes de réalisation, l'électrode de contact ohmique 12 peut être en or ou en argent, et l'électrode métallique 14 peut être en cuivre.

[0052] Dans le présent mode de réalisation, le semi-conducteur 10 est un silicium de type p (100) poli des deux côtés ayant une résistivité de 5-10  $\Omega$ -cm et une épaisseur de 380-420  $\mu$ m. Premièrement, la tranche de silicium est coupée en substrats de silicium de 2,5x2,5 cm<sup>2</sup> 10 en utilisant un stylo à diamant. Ensuite, le substrat de silicium est immergé dans de l'acétone, de l'alcool isopropyle (IPA), de l'eau déionisée (eau-DI) et du méthanol en séquence, et lavé par un nettoyeur à ultrasons pendant 15 minutes pour retirer des organismes et particules de surface.

[0053] Ensuite, une solution piranha est préparée avec un rapport en volume d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) sur peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) de 4:1. Premièrement, l'acide sulfurique est versé dans un plat en verre, puis le peroxyde d'hydrogène est lentement versé dans le plat en verre et la solution est chauffée à 120°C. Après que le gaz généré pendant le mélange est volatilisé, le substrat de silicium 10 est immergé dans la solution pendant 10 minutes. Dans cette étape, un film d'oxyde mince croît sur la surface du substrat de silicium 10 pour isoler des contaminations de surface vis-à-vis du substrat. Ensuite, du dioxyde de silicium sur la surface du substrat de silicium 10 est retiré avec une solution d'oxyde gravant tamponné (BOE). Finalement, le substrat de silicium 10 est rincé avec de l'eau déionisée (eau-DI) et séché avec de l'azote pour achever la procédure de nettoyage.

[0054] Après nettoyage, le substrat de silicium 10 est placé dans un système d'évaporation par faisceau d'électrons (ULVAC), et une électrode métallique 14 est déposée sous une pression de  $4 \times 10^{-6}$  torr. Premièrement, un nano-film de chrome avec une épaisseur de 10-20 nm est déposé sur la surface supérieure du substrat de silicium 10 en tant qu'électrode de contact de Schottky 141, le taux de dépôt étant de 0,1 angström (Å) par seconde. Un masque perforé métallique est ensuite appliqué sur le nano-film de chrome de manière à déposer une grille métallique Cr 142 avec une épaisseur de

120 nm sur le nano-film de chrome sous un taux de dépôt de 0,1 angström (Å)-10 nm par seconde, 0,3 angström (Å)-30 nm par seconde, et 0,5 angström(Å)-50 nm par seconde, et 1 angström (Å)-100 nm par seconde. Finalement, un film de platine avec une épaisseur de 100 nm est déposé sur la partie inférieure du substrat de silicium de type p en tant qu'électrode de contact ohmique 12, et le taux de dépôt est le même que celui de l'électrode de grille en chrome. Après cela, le photodétecteur 1 est achevé, tel que représenté à la Figure 2. Ensuite, le photodétecteur 1 produit est soumis à une courbe IV de photocourant et courant d'obscurité. Le logiciel de mesure Labview est utilisé avec un sourcemètre Keithley 2400 pour une mesure dans une boîte d'obscurité en utilisant un laser infrarouge 1 550 nm, 2 mW (modèle Thorlab:LDC1300B) en tant que source de lumière.

[0055] Selon un autre mode de réalisation de la présente invention, l'électrode de contact ohmique 14 est réalisée en or (en utilisant du platine qui forme un contact ohmique avec le silicium de type p, le photodétecteur aura une meilleure polarisation directe), et les éléments restants sont réalisés en des matériaux identiques à ceux dans le mode de réalisation précédent. La Figure 3 représente des mesures IV du photodétecteur en utilisant de l'or et du platine en tant qu'électrodes de contact ohmique 14, respectivement. Tel que représenté à la Figure 3, le photodétecteur utilisant du platine en tant qu'électrode de contact ohmique 12 a de meilleures performances de redressement. Il génère un grand courant lorsqu'il subit une polarisation directe, et a un faible courant de fuite lorsqu'il subit une polarisation inverse. La tension de seuil de celui-ci est d'environ seulement 0,3 V, ce qui révèle les caractéristiques de diode de Schottky standard.

[0056] Telle que représentée à la Figure 2, l'électrode métallique 14 peut comprendre une électrode de contact de Schottky 141 réalisée en chrome avec une épaisseur de 10-20 nm et une électrode de grille 142 réalisée en chrome avec une épaisseur de 120 nm. Selon un autre mode de réalisation, des photodétecteurs ayant des électrodes de contact de Schottky 141 faites de 10 nm et 20 nm de chrome ont été fabriqués séparément et leurs performances ont été comparées. Trois courants d'obscurité et trois photocourants ont été mesurés pour chaque composant. Les résultats de mesure montrent que l'électrode de contact de Schottky de 10 nm plus mince 141 avantage la lumière incidente à entrer dans la région active du photodétecteur et ainsi améliore la réponse du photodétecteur.

[0057] Selon un autre mode de réalisation de l'invention, le semi-conducteur 10, l'électrode de contact ohmique 12 et l'électrode métallique 14 sont réalisés en silicium de type p, platine et cuivre, respectivement. Le photodétecteur est fabriqué avec la même procédure décrite, et l'électrode métallique 14 comprend une électrode de contact de Schottky en cuivre de 10 nm 141 et une électrode de grille en chrome de 120 nm 142.

De plus, afin d'éviter l'influence de la haute température sur le nano-film de cuivre durant le dépôt de platine, la séquence de dépôt a été changée pour déposer le cuivre en premier suivi du dépôt de platine. Le courant d'obscurité et le photocourant de ce photodétecteur sont représentés à la Figure 4. Les performances du photodétecteur au silicium de type p/cuivre sont plus proches que celles de la diode de Schottky standard, tandis que le photodétecteur produit a des caractéristiques de redressement plus excellentes et également une faible tension de seuil. Le photodétecteur génère un grand courant lorsqu'il est commandé dans la région à polarisation directe, et maintient une polarisation inverse plus petite lorsqu'il est commandé dans une région à polarisation inverse. En conséquence, il est constaté que le problème de courant de fuite commandé dans une région à polarisation inverse peut être résolu en changeant la séquence de dépôt.

[0058] Dans le mode de réalisation de la présente invention, une barrière de Schottky est formée au niveau de la jonction or-semi-conducteur de telle sorte que les porteurs s'écoulent dans uniquement une direction spécifique pour former une redressement. La tranche de silicium de type p utilisée dans cette invention a été calculée de manière théorique pour avoir un niveau de Fermi  $E_F = -4,952$  eV, et du chrome (-4,5 eV) ou du cuivre (-4,65 eV) a été sélectionné en tant qu'électrode métallique. La barrière de Schottky formée par le silicium de type p/chrome est approximativement de 0,67 eV, et sa longueur d'onde de coupure mesurée est approximativement de 1850 nm dans la région proche-infrarouge. La barrière de Schottky formée par silicium de type p/cuivre est approximativement de 0,52 eV, et sa longueur d'onde de coupure est approximativement de 2384 nm.

[0059] La Figure 5 représente le photocourant du photodétecteur au silicium de type p/cuivre mesuré sous un éclairage de lumière visible à partir d'un simulateur solaire (Simulateur solaire atomique, Sun 2000). Le courant d'obscurité du photodétecteur au silicium de type p/cuivre présente les mêmes caractéristiques de redressement que la diode de Schottky standard. Lorsqu'il est irradié par la lumière du soleil, il y a une différence de courant significative entre le photocourant et le courant d'obscurité dans les régions à polarisation directe ou inverse. En particulier, dans la région à polarisation inverse, le photodétecteur 1 génère un photocourant d'approximativement 40 mA après éclairage.

[0060] La Figure 6 montre que le photodétecteur au silicium de type p/cuivre a également une réponse de photocourant reconnaissable quand le photodétecteur fonctionne à une polarisation 0. Bien que la réponse ne soit pas aussi grande que dans la région -2, -1, 1 ou 2 V, la réponse du photodétecteur au silicium de type p/cuivre montre une excellente stabilité, et la variation de courant d'obscurité du photodétecteur fonctionnant à 0 V est seulement de 0,1  $\mu$ A (113 nA), la réponse étant environ de 270 nA. Ces

réponse et variation du photodétecteur sont plus stables comparées à un fonctionnement à d'autres tensions.

[0061] La Figure 7 représente la comparaison des spectres d'absorption entre le photodétecteur au silicium de type p/cuivre et un substrat de silicium. Tel que représenté à la Figure 7, le spectre d'absorption du substrat de silicium est en bon accord avec la théorie. La majorité de la lumière incidente avec une longueur d'onde inférieure à 1107 nm peut être absorbée par le substrat de silicium. Au voisinage de 1107 nm, l'absorption du substrat de silicium diminue rapidement, et la lumière avec une longueur d'onde supérieure à 1107 nm est difficilement absorbée. Cela conduit à un bon accord avec la valeur théorique de l'absorption du substrat de silicium. La bande interdite du silicium est de 1,12 eV, qui a une longueur d'onde d'absorption théorique d'environ 1107 nm. La lumière incidente avec une énergie supérieure à 1,12 eV sera absorbée par le substrat de silicium, ainsi le substrat de silicium a une bonne absorption dans la gamme de 1107 nm à la lumière visible. Des photons avec une énergie inférieure à la bande interdite du silicium ne sont plus absorbés par le substrat de silicium, ainsi l'absorption du substrat de silicium est proche de zéro pour les lumières avec une longueur d'onde supérieure à 1107 nm. Le spectre d'absorption du photodétecteur au silicium de type p/cuivre présente une absorption à large bande, et a une absorption d'environ 40 % pour la gamme de lumière incidente de 300 à 2700 nm. Dans la région de lumière visible, le cuivre provoque une réflexion de lumière incidente, ainsi l'absorption du photodétecteur au silicium de type p/cuivre dans la région visible est inférieure à celle du substrat de silicium. L'absorption dans la gamme de 1000 à 2300 nm est principalement due à l'absorption de barrière de Schottky. Les photons incidents sur le côté métallique excitent le porteur chaud pour traverser la barrière de Schottky du photodétecteur et former un courant thermique, provoquant l'absorption de photons avec une longueur d'onde entre 1000 et 2300 nm par la barrière de Schottky. L'absorption de photon incident avec une longueur d'onde supérieure à 2300 nm est due à une semi-continuité. En raison du fait que le film métallique est un film de cuivre avec une épaisseur de 10 nm, il ne forme pas un film homogène plat sur le substrat de silicium, mais forme beaucoup de minuscules particules sur celui-ci. En conséquence, une lumière incidente avec des longueurs d'onde différentes résonnera avec une région de résonance partiellement en correspondance sur la surface du film métallique et une résonance de plasmon de surface localisée (LSPR) sera obtenue.

[0062] La Figure 8 représente le photodétecteur au silicium de type p/cuivre utilisé pour mesurer la réponse de lumière incidente avec des longueurs d'onde différentes. Tel que représenté à la Figure 8, cela conduit à un bon accord avec l'équation de Fowler, et le photodétecteur au silicium de type p/cuivre peut également améliorer sa réponse par

application d'une légère polarisation de -5 mV. Les résultats mesurés montrent que la réponse du photodétecteur au silicium de type p/cuivre diminue graduellement lorsque la longueur d'onde de lumière incidente augmente qu'il soit commandé à 0 mV ou -5 mV. En outre, il est clairement observé à partir de la courbe de -5 mV que la longueur d'onde de coupure de ce photodétecteur au silicium de type p/cuivre est environ de 2310 nm. En utilisant cette longueur d'onde de coupure, la barrière de Schottky, d'environ 0,53 eV, peut être calculée à partir de la formule

$E(\text{eV}) = hc/\lambda = 1240/(\lambda(\text{nm}))$ . Comme discuté précédemment, la barrière de Schottky de ce photodétecteur au silicium de type p/cuivre est approximativement de 0,52 eV sur la base de calculs théoriques. La barrière de Schottky sur la base des résultats mesurés de ce photodétecteur au silicium de type p/cuivre est très proche de la valeur théorique (0,52 eV), ce qui prouve que le photodétecteur au silicium de type p/cuivre peut en effet mesurer des photons avec une énergie inférieure à la bande interdite du silicium. Cependant, un tel photodétecteur de type p/cuivre plan peut générer des photocourants dans la région infrarouge uniquement par absorption de photoémission interne (IPA), manquant d'autres mécanismes assistants d'optimisation. Pour une utilisation en tant que photodétecteurs de Schottky généraux, il n'est pas facile d'obtenir une réponse à haute efficacité.

[0063] L'absorption de photoémission interne (IPA) fait référence à des porteurs dans un métal qui sont excités par des photons incidents et forme des paires électron-trou ou des porteurs chauds pour traverser la barrière de Schottky, formant ainsi un photocourant par l'intermédiaire du circuit externe par le mécanisme physique. Afin d'absorber des porteurs chauds excités par photons incidents par la barrière de Schottky, l'énergie de lumière incidente a seulement besoin d'être légèrement plus grande que la barrière de Schottky, de telle sorte que les porteurs chauds excités par la lumière incidente obtient suffisamment d'énergie pour traverser la barrière de Schottky.

[0064] La Figure 9A représente un photodétecteur selon un second mode de réalisation de la présente invention. Tel que représenté à la Figure 9A, le photodétecteur 2 comprend un semi-conducteur 20, une électrode de contact ohmique 22 et une électrode métallique 24 (comprenant une électrode de contact de Schottky). Le photodétecteur 2 diffère du photodétecteur 1 du premier mode de réalisation en ce que le semi-conducteur 20 n'est pas plan et présente une nanostructure de micro-réseau périodique.

[0065] Telle que représentée à la Figure 9A, dans ce mode de réalisation, la nanostructure de micro-réseau périodique est constituée de structures pyramidales inversées (IPS) tridimensionnelles (3D). La dimension de chaque structure pyramidale peut être microscopique ou nanoscopique. La Figure 10 représente un procédé de fabrication du photodétecteur 2. Dans ce mode de réalisation, le semi-conducteur est une tranche de

silicium de type p poli sur les deux côtés (100), qui a une résistivité de 5-10  $\Omega$ -cm et une épaisseur de 380-420  $\mu$ m. Premièrement, la tranche de silicium est coupée avec un stylo à diamant en un substrat de silicium de  $2,5 \times 2,5$  cm<sup>2</sup> 20. Ensuite, le substrat de silicium 20 est nettoyé avec de l'acétone, de l'alcool d'isopropyle (IPA), de l'eau déionisée (eau-DI) et du méthanol séquentiellement, et finalement un dispositif de nettoyage par ultrasons est utilisé pour laver la surface du substrat de silicium pendant 15 minutes afin de retirer des substances organiques et des particules fines sur la surface. Ensuite, le substrat de silicium est séquentiellement lavé avec une solution piranha, une solution d'acide fluorhydrique et de l'eau déionisée comme décrit ci-dessus, et le substrat de silicium 20 est séché par soufflage avec un pistolet de pulvérisation d'azote.

[0066] La Figure 9B est une vue en coupe représentant des structures pyramidales inversées (IPS) tridimensionnelles selon un mode de réalisation de la présente invention. Tel que représenté à la Figure 9B,  $H$  est la hauteur de la cavité pyramidale inversée et  $L(H)$  est la longueur de la paroi de cavité pyramidale inversée. Lorsque la hauteur  $H$  augmente, la longueur de paroi de cavité  $L(H)$  augmente également. Bien que les structures pyramidales inversées possèdent une période fixe, chaque pyramide a des longueurs de paroi de cavité variables ou multiples  $L(H)$ .

[0067] La Figure 10 représente un procédé pour produire les structures pyramidales inversées (IPS) des Figures 9A et 9B. Tel que représenté à l'étape (a), après nettoyage du substrat de silicium 20, un film de dioxyde de silicium 21 avec une épaisseur de 500 nm est déposé sur les surfaces supérieure et inférieure du substrat de silicium 20 par un appareil de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma. Le film de dioxyde de silicium 21 sur la surface supérieure sert de masque de gravure pour une gravure anisotrope par hydroxyde de potassium, et le film de dioxyde de silicium 21 sur la surface inférieure sert de couche protectrice durant la gravure. Les débits des gaz de réaction sont listés comme suit : SiH<sub>4</sub> : 40 sccm ; N<sub>2</sub>O : 160 sccm. De plus, la température, la pression et la durée de dépôt sont de 350°C, 67 Pa et 10 minutes, respectivement.

[0068] Tel que représenté à l'étape (b) de la Figure 10, un processus de lithographie est utilisé pour définir le motif de surface du substrat de silicium 20. Premièrement, une résine photosensible (S1813) 23 d'un processus de photolithographie est uniformément enrobée sur le film de dioxyde de silicium 21 sur la surface supérieure du substrat de silicium 20 en utilisant une tournette de dépôt. Les paramètres d'enrobage sont 1000 rpm, 10 secondes/4000 rpm, et 40 secondes. La résine photosensible enrobée 23 est ensuite cuite en douceur à 115°C pendant 3 minutes. De l'acétone peut être utilisé pour nettoyer le masque à exposer. Ensuite, le substrat de silicium 20 est placé dans la machine d'exposition, et le bord du substrat de silicium 20 est aligné sur le bord du

masque, et le masque est exposé pendant 20 secondes. Ensuite, le substrat de silicium 20 est tourné à 90° après exposition une fois et est ensuite aligné sur le bord du masque et fixé fermement au masque pour une seconde exposition pendant 20 secondes.

Ensuite, le substrat de silicium exposé 20 est immergé dans le développeur dédié à S1813 MF-319 pendant 13 secondes. Ensuite, le substrat de silicium développé 20 est immergé dans de l'eau déionisée pour retirer la résine photosensible résiduelle 23 et le développeur, et séché avec un pistolet de pulvérisation d'azote. Finalement, le substrat de silicium 20 est cuit durement avec une plaque chaude à 125°C pendant 1 minute.

[0069] Tel que représenté à l'étape (c) de la Figure 10, le substrat de silicium 20 est placé dans un dispositif d'enrobage à évaporation thermique (ULVAC) et un film de chrome 25 avec une épaisseur de 40 nm est déposé sur la surface supérieure du substrat de silicium 20 avec un taux de dépôt de 0,3 angström (Å) par seconde dans un environnement sous vide inférieur à  $4 \times 10^{-6}$  torr.

[0070] Tel que représenté à l'étape (d) de la Figure 10, le substrat de silicium 20 est ensuite immergé dans de l'acétone et lavé pendant 30 à 90 minutes par un dispositif de nettoyage par ultrasons pour retirer la résine photosensible 23 et le chrome 25 au-dessus de la résine photosensible 23, et le chrome restant 25 sera utilisé en tant que masque pour un processus ultérieur de gravure à sec.

[0071] Tel que représenté à l'étape (e) de la Figure 10, la gravure est réalisée sous une pression de chambre de  $4 \times 10^{-4}$  torr avec un système de gravure ionique réactive (RIE: Plasmaab). Les débits de gaz de réaction sont : Ar, 25 sccm ; et  $\text{CHF}_3$ , 25 sccm, et la puissance de fonctionnement et la durée de gravure sont de 200 watts et 30 minutes, respectivement. Le substrat silicium 20 est placé dans la chambre pour une gravure isotrope, et le dioxyde de silicium 21 qui n'est pas protégé par le masque de chrome est gravé dans la direction verticale jusqu'à ce que le dioxyde de silicium soit complètement retiré et expose le substrat de silicium 20 en dessous. Le dioxyde de silicium restant 21 sera utilisé en tant que masque pour un processus ultérieur de gravure anisotrope humide utilisant de l'hydroxyde de potassium (KOH).

[0072] Tel que représenté à l'étape (f) de la Figure 10, ensuite, une solution de gravure d'hydroxyde de potassium avec un pourcentage de concentration en volume de 15 % est préparée. Le rapport d'isopropanol (IPA) et de solution d'hydroxyde de potassium à 45% sur l'eau déionisée est de 1:5:15. L'ajout d'isopropanol (IPA) est dû à sa plus faible polarité et sa plus faible tension de surface, ce qui permet aux bulles d'hydrogène générées pendant la gravure et fixées à la structure de se séparer facilement de la surface de silicium, empêchant ainsi le masque de dioxyde de silicium 21 d'être gravé et augmentant l'uniformité de gravure. Après chauffage de la solution de gravure à 75°C, le substrat de silicium 20 est immergé dans la solution de gravure pour une gravure anisotrope d'environ 10 à 20 minutes pour produire les structures py-

ramidales inversées (IPS).

[0073] Tel que représenté à l'étape (g) de la Figure 10, le substrat de silicium 20 est immergé dans une solution d'oxyde gravant tamponné (BOE) pour retirer le dioxyde de silicium 21 et le chrome 25 sur les surfaces supérieure et inférieure, achevant ainsi les structures pyramidales inversées tridimensionnelles. Ensuite, les substances organiques, les oxydes et les particules métalliques restant sur la surface du substrat de silicium 20 sont retirés avec une solution Piranha et une solution d'acide fluorhydrique (BOE). Ensuite, le substrat de silicium 20 est placé dans un système d'évaporation par faisceau d'électrons (ULVAC), et l'électrode de contact ohmique 22 et l'électrode métallique 24 sont déposées sous une pression de chambre de  $4 \times 10^{-6}$  torr. Premièrement, du platine avec une épaisseur de 100 nm est déposé en tant qu'électrode de contact ohmique 22 sur la surface inférieure du substrat de silicium 20. Ensuite, un film de cuivre avec une épaisseur de 8 nm est déposé sur la surface d'IPS du substrat de silicium 20 en tant qu'électrode de contact de Schottky, et finalement une électrode de grille en cuivre avec une épaisseur de 120 nm est déposée sur l'électrode de contact de Schottky en cuivre par utilisation d'un masque perforé. L'électrode métallique 24 comprend une électrode de contact de Schottky en cuivre et une électrode de grille en cuivre. A ce point, le photodétecteur 2 représenté à la Figure 9 a été achevé.

[0074] Dans le procédé de fabrication ci-dessus, la topographie d'IPS est hautement liée aux paramètres du processus de lithographie et de la gravure anisotrope humide par KOH. La Figure 11 représente des photographies SEM de la vue de dessus et de la vue en coupe montrant les structures pyramidales inversées après une gravure pendant 20 minutes avec une solution de KOH. La Figure 12 représente la relation entre les paramètres structurels des nanostructures pyramidales inversées et le temps de gravure. Tel que représenté à la Figure 12, la largeur maximale du dessus de chaque élément pyramidal inversé peut atteindre 3,8  $\mu\text{m}$  (largeur), et l'espace entre deux éléments pyramidaux inversés adjacents peut atteindre 300 nm. Dans un autre mode de réalisation, des structures pyramidales inversées tridimensionnelles avec une période de 6  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$  sont respectivement fabriquées en faisant varier la période d'exposition du masque. Le temps optimal de gravure anisotrope par KOH est, pour des IPS de période de 6  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$ , de 22 et 24 minutes, respectivement.

[0075] Dans un autre mode de réalisation de la présente invention, des structures pyramidales vers le haut (UPS) tridimensionnelles sont fabriquées avec succès en utilisant la technique de double exposition et de gravure par KOH pour inverser le motif de surface exposé avec une résine photosensible négative. La Figure 23 est une photographie SEM montrant les structures pyramidales vers le haut tridimensionnelles fabriquées.

[0076] Afin de comprendre la résonance de plasmon de surface localisée (LSPR) entre

l'onde électromagnétique incidente et la structure métallique, la méthode des différences finies dans le domaine temporel 3D (3D-FDTD) et la méthode des éléments finis (FEM) sont utilisées pour simuler la résonance d'onde électromagnétique dans une structure IPS. La Figure 13 représente la structure IPS utilisée dans la simulation, comprenant : créer un espace avec un volume de  $4 \times 4 \times 6 \mu\text{m}^3$  (x, y, z) ; définir des couches à couplage parfait (PML) pour six surfaces limites dans cet espace ; créer une structure IPS à base de silicium (IPS-Si) ; définir un nano-film métallique avec une épaisseur de 30 nm sur la surface de cavité d'IPS ; définir l'espace au-dessus du nano-film métallique en air et définir la lumière incidente à partir de la limite supérieure de l'espace perpendiculairement vers le bas dans une direction  $-Z$  ; définir la direction de polarisation de la lumière incidente comme étant une oscillation de direction  $X$  ; et définir la longueur d'onde de l'onde électromagnétique incidente comme étant de 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 et 4000 nm, respectivement. L'épaisseur de métal est définie à 30 nm au lieu des 10 nm utilisés dans l'expérience pour éviter le problème de mémoire insuffisante dans la simulation. Après l'achèvement du calcul de simulation, la formule suivante (1) est utilisée pour normaliser l'intensité de l'onde électromagnétique incidente.

$$[0077] \quad \text{Rapport} = \frac{|E|}{|E_0|} \quad (1)$$

[0078] Dans ce mode de réalisation, un nano-film de cuivre avec une épaisseur de 10 nm est déposé sur la surface de la structure IPS par un système d'évaporation par faisceau d'électrons pour obtenir une nanostructure de micro-réseau métallique sur la surface métallique. Du cuivre et du silicium de type p forment une jonction de Schottky au niveau de la jonction métal-semi-conducteur avec une barrière de Schottky d'approximativement 0,52 eV.

[0079] La Figure 14 représente des résultats de simulation de lumière incidente à 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 et 4000 nm perpendiculairement incidente sur le métal du photodétecteur IPS, respectivement. Si la période de la structure est ajustée à 5-10  $\mu\text{m}$ , la longueur d'onde de résonance peut également être augmentée à 5000-10000 nm telle que représentée à la Figure 14. Tel que représenté à la Figure 14, un fort effet de confinement de lumière peut être observé dans la cavité de la structure Cu-IPS pour toutes les longueurs d'onde incidentes, indiquant que cette structure est une bonne cavité de résonance tridimensionnelle. Lorsque la longueur d'onde incidente change, la résonance de plasmon de surface se produit dans différentes régions dans la cavité de la structure Cu-IPS. Lorsque la longueur d'onde incidente est de 500 nm, la longueur de résonance (LSPR) a besoin d'être plus courte en raison de la longueur d'onde plus courte de la lumière incidente, ainsi la longueur nanoscopique mis en correspondance est localisée au niveau de la partie inférieure de la structure Cu-IPS pour

généraliser la LSPR. Lorsque la lumière infrarouge moyenne avec une longueur d'onde de 1500-4000 nm est incidente, la LSPR est générée par une longueur microscopique mise en correspondance localisée près de la partie supérieure de la structure Cu-IPS en raison de la longueur d'onde plus longue de la lumière incidente. Il peut clairement être observé, à partir de toutes les simulations de résonance, que le champ lumineux fort localisé dans la cavité de structure Cu-IPS est en effet continu avec le champ proche fort du métal et par conséquent produit une résonance de plasmon de surface localisée (LSPR) sur la surface métallique. Ainsi, cela prouve qu'en raison du fait que la structure IPS a un caractère géométrique avec de multiples longueurs de cavité, la lumière incidente avec une longueur d'onde jusqu'à 4  $\mu\text{m}$  peut trouver la longueur de cavité de résonance correspondante dans la structure et générer une résonance de plasmon de surface localisée (LSPR), tel que représenté à la Figure 14. En outre, en raison du fait que la structure IPS satisfait la symétrie géométrique bidimensionnelle pour une unité et la symétrie bidimensionnelle pour un réseau périodique, les lumières infrarouges incidentes à polarisation en X et à polarisation en Y peuvent toutes les deux générer une LSPR avec une excellente intensité sur la surface de structure. La structure IPS est insensible à la polarisation pour la lumière incidente.

[0080] La Figure 15 représente la relation entre l'intensité de résonance de plasmon de surface localisée et la longueur de cavité pour différentes longueurs d'onde de lumière incidente (données prises à partir des flèches noires dans la Figure 13). Pour une lumière incidente avec différentes longueurs d'onde, le premier mode de résonance est la plus courte longueur de cavité métallique de résonance, comme indiqué par les flèches dans la Figure 15. Lorsque la longueur d'onde de la lumière incidente augmente de 500 nm à 4000 nm, la longueur de cavité métallique de résonance du premier mode de résonance augmente également. En outre, dans la gamme de longueurs d'onde de 1000-4000 nm, lorsque la longueur d'onde de la lumière incidente augmente, l'intensité de résonance du premier mode de résonance devient plus petite. Par exemple, l'intensité de résonance du premier mode de résonance de la lumière incidente avec une longueur d'onde de 1000 nm est plus forte que celle du premier mode de résonance de la lumière incidente avec une longueur d'onde de 4000 nm. Pour générer la résonance de plasmon de surface localisée, la lumière incidente avec une longueur d'onde de 1000 nm a besoin d'une longueur de cavité de 700 nm, et l'intensité de lumière incidente sera limitée à la longueur de cavité de 700 nm pour une structure IPS avec une largeur unitaire de 4  $\mu\text{m}$ . Pour une lumière incidente avec une longueur d'onde de 4000 nm, une longueur de cavité de 2700 nm est nécessaire, et l'intensité de lumière incidente sera limitée à la longueur de cavité de 2700 nm pour une structure IPS avec une largeur unitaire de 4  $\mu\text{m}$ . Par conséquent, une lumière incidente avec une longueur d'onde courte aura une plus forte intensité de résonance

de plasmon de surface localisée qu'une lumière incidente avec une longueur d'onde longue. Pour que des longueurs d'onde plus longues aient une meilleure intensité de résonance, il est uniquement nécessaire d'augmenter la période de la structure IPS (c'est-à-dire, la largeur unitaire de la structure IPS), de telle sorte que la lumière incidente à longueur d'onde longue aura un plus fort effet de confinement de plasma.

[0081] La Figure 16 représente la relation entre la longueur d'onde de lumière incidente et la longueur de cavité de résonance induisant une LSPR sur divers modes de résonance. A partir de la Figure 16, il peut être observé que, lorsque la longueur d'onde de la lumière incidente augmente, la longueur de cavité métallique de résonance dans le premier mode de résonance augmente également. Ici, la relation entre la longueur d'onde et la longueur de cavité métallique de résonance mise en correspondance peut être résumée par les équations suivantes (2)-(4). La longueur de cavité métallique de résonance du premier mode de résonance est approximativement 0,7 fois la longueur d'onde de la lumière incidente (équation 2), et la longueur de cavité métallique de résonance du second mode de résonance est approximativement 1,54 fois la longueur d'onde de la lumière incidente (équation 3). La longueur de cavité métallique de résonance est approximativement 1,8 fois la longueur d'onde de la lumière incidente (équation 4), et le coefficient de corrélation  $R^2$  de chaque équation est supérieur à 0,99.

[0082]  $L_{m1,Cu} = 0,6925 \times \lambda + 0,014$  ( $R^2 = 0,9974$ ) (2)

[0083]  $L_{m2,Cu} = 1,5403 \times \lambda + 0,042$  ( $R^2 = 0,9999$ ) (3)

[0084]  $L_{m3,Cu} = 1,8532 \times \lambda + 0,447$  ( $R^2 = 0,9941$ ) (4)

[0085] Dans un autre mode de réalisation de la présente invention, la simulation de LSPR est effectuée avec une structure IPS de type p/or et une structure IPS de type p/argent. Les résultats sont très similaires à ceux de la structure Cu-IPS décrite ci-dessus. Il est ainsi confirmé que la clé pour générer une résonance de plasmon de surface localisée de la lumière incidente par la structure IPS réside dans les multiples longueurs de cavité et la période de la structure. Pour induire une résonance de plasmon de surface localisée à haute intensité avec une structure IPS, la période de la structure IPS doit être conçue pour être environ 4 fois la longueur d'onde de résonance cible (IPS de période de 4 nm correspondant à une lumière incidente de 1000 nm), atteignant ainsi le meilleur effet de confinement de lumière et la meilleure intensité de résonance de plasmon de surface. Une structure de résonance de plasmon de surface localisée avec une unique longueur de métal de résonance pourrait être conçue en se référant aux équations (2)-(4) ci-dessus et en calculant la longueur linéaire de métal de résonance requise et la structure requise pour la longueur d'onde cible, de telle sorte qu'une structure de résonance de plasmon de surface localisée à haute intensité peut être obtenue.

[0086] La Figure 17 représente les spectres d'absorption du substrat de silicium de type p

poli des deux côtés, du photodétecteur de Schottky plan au silicium de type p/cuivre, du photodétecteur de Schottky IPS au silicium de type p/cuivre et du photodétecteur de Schottky plan au silicium de type p/cuivre/or. Tel que représenté à la Figure 17, le substrat de silicium a une absorption significative d'environ 60-70 % dans la région visible avant la longueur d'onde de coupure de 1107 nm, et l'absorption décroît brusquement à proximité de la longueur d'onde de coupure, et l'absorption s'approche de zéro après la longueur d'onde de coupure. En raison de la réflectivité augmentée du film de cuivre dans la gamme de lumière visible, l'absorption du photodétecteur plan de type p/cuivre dans la gamme de lumière visible est réduite d'environ 10 % à 20 % comparée au substrat de silicium. Cependant, dans la région infrarouge, la barrière d'énergie de jonction de Schottky est formée en raison de la différence de travail d'extraction entre le silicium et le cuivre, de telle sorte que les photons incidents ne pénètrent pas directement à travers le silicium, et une partie de la lumière incidente est absorbée par la jonction de Schottky, de telle sorte que l'absorption du photodétecteur plan de la région infrarouge ( $\lambda > 1107$  nm) sous la bande interdite du silicium peut être augmentée à 40 %, mais cela est légèrement insuffisant pour le photodétecteur.

[0087] Tel que représenté à la Figure 17, comparée aux deux précédentes, la structure IPS a un effet de cavité 3D pour introduire une LSPR à bande extrêmement large, et la nano-structure de surface peut augmenter la zone active, de telle sorte que l'absorption est significativement améliorée. Le photodétecteur IPS au silicium de type p/cuivre a une absorption supérieure à 80 % de la région de lumière visible à la région de lumière infrarouge moyenne (450- 2700 nm), obtenant des caractéristiques d'absorption de fréquence extrêmement large. Ce spectre d'absorption est en accord avec les résultats de simulation montrant une résonance de fréquence extrêmement large. La structure IPS de type p/cuivre a une longueur de cavité graduellement variable, et la lumière incidente avec une longueur d'onde inférieure à 4000 nm peut induire la LSPR et un effet de confinement de photons pour améliorer efficacement l'absorption de lumière. Cette structure IPS de type p/cuivre a une absorption de résonance à large bande supérieure comparée à la structure 3D-DTTM citée dans le journal Nature Communication (Lai, YS, Chen, H. L., & Yu, C. C. (2014). Silicon-based broadband antenna for high responsivity and polarization-insensitive photodetection at telecommunication wavelengths (Antenne large bande à base de silicium pour une photodétection à sensibilité élevée et insensible à la polarisation à des longueurs d'onde de télécommunication). Nature communications, 5, 3288).

[0088] La Figure 18 représente des mesures IV de courants d'obscurité de photodétecteurs de Schottky de type p/cuivre plan et IPS. Tel que représenté à la Figure 18, les photodétecteurs plan et IPS présentent tous les deux les caractéristiques de redressement IV d'une diode de Schottky standard, et les deux photodétecteurs ont une faible tension de

seuil en comparaison avec une diode à jonction PN lorsqu'ils fonctionnent dans une région à polarisation directe. La tension de seuil des deux photodétecteurs est d'environ 0,1 V, et le courant d'obscurité des deux photodétecteurs dans la région à polarisation inverse est très petit. Dans la région de fonctionnement des deux photodétecteurs, le courant d'obscurité est d'environ 1,66  $\mu\text{A}$  à une polarisation 0. En comparant les courants d'obscurité des photodétecteurs plan et IPS, il peut être observé que la différence entre les courants d'obscurité des deux photodétecteurs n'est pas significative. Il peut être observé que la structure IPS sur la surface du photodétecteur ne modifie pas les performances de courant d'obscurité du photodétecteur de Schottky au silicium de type p/cuivre.

- [0089] Selon un mode de réalisation, les photodétecteurs plan et IPS sont utilisés pour mesurer une lumière infrarouge avec différentes longueurs d'onde (1150-2700 nm). Les photodétecteurs sont commandés à une polarisation 0 et une tension de polarisation de -5 mV pour mesurer le courant d'obscurité et le courant lumineux, et calculer combien d'excès de courant ou de réponse survient lorsque diverses longueurs d'onde de lumière infrarouge sont incidentes sur le photodétecteur. La Figure 19 représente des réponses des photodétecteurs plan et IPS mesurés par des lumières infrarouges avec différentes longueurs d'onde. Pour le photodétecteur plan, lorsque le photodétecteur est commandé à une polarisation 0, la réponse du photodétecteur diminue lorsque la longueur d'onde de lumière incidente devient plus longue. Cette tendance est également approximativement cohérente avec la formule de probabilité de transmission quantique ( $\eta_i$ ) ( $\eta_i = C \frac{(h\nu - \phi_B)^2}{h\nu}$ ). Lorsque la longueur d'onde de la lumière incidente augmente, l'énergie de photons incidents diminue. Par conséquent, la réponse du photodétecteur plan est plus prononcée dans la région des longueurs d'onde courtes que dans la région des longueurs d'onde longues, et lorsque le photodétecteur est commandé à une tension de polarisation de -5 mV, la réponse du photodétecteur peut être améliorée de 3 à 10 fois. A partir de cette réponse, il peut être observé que la tension de coupure du photodétecteur plan est d'environ 2350 nm, ce qui est équivalent à une hauteur de barrière de Schottky d'environ 0,53 eV. Cela est en comparaison avec la hauteur de barrière de Schottky calculée théoriquement de la diode de Schottky à base de Si de type p/cuivre. La jonction (Cu/Si de type P) a une hauteur de barrière de Schottky d'approximativement 0,52 eV, démontrant que le photodétecteur de Schottky à base de Si de type p/Cu de cette invention est en effet mesurable pour mesurer des photons avec une énergie de photons inférieure à la bande interdite de silicium. Cependant, le mécanisme du photocourant généré par le photodétecteur plan est seulement l'absorption de photoémission interne (IPA), et il n'est pas aisé d'obtenir une réponse à haute efficacité.

[0090] La Figure 19 montre que le photodétecteur IPS a une réponse à bande extrêmement large et à haute intensité, qui est approximativement 40 fois supérieure que celle du photodétecteur plan. En outre, lorsque la longueur d'onde de lumière incidente augmente, la réponse diminue, mais elle ne chute pas aussi rapidement qu'un photodétecteur plan et la longueur d'onde de coupure du photodétecteur IPS n'est pas observée dans la gamme de longueurs d'onde de mesure. En raison du fait que la surface du photodétecteur IPS possède une structure de résonance de plasmon de surface et une cavité de résonance optique tridimensionnelle, les photons incidents peuvent être confinés efficacement sur la jonction de Schottky, et par conséquent un fort champ proche est fourni et beaucoup de porteurs chauds sont générés au niveau de la jonction métal-semi-conducteur, afin d'améliorer efficacement la réponse du photodétecteur. En outre, la structure IPS a de multiples longueurs de cavité, et les résultats de simulation montrent qu'une lumière incidente avec une longueur d'onde de 500-4000 nm peut générer une LSPR dans la structure IPS, et la résonance augmente lorsque la longueur d'onde de lumière incidente augmente, par conséquent, non seulement la réponse est optimisée dans une gamme de longueurs d'onde spécifique, mais également une haute réponse à bande très large peut être obtenue, de telle sorte que la réponse ne chute pas rapidement lorsque la longueur d'onde incidente augmente. De plus, les résultats de mesure montrent également que le photodétecteur IPS peut détecter une lumière infrarouge moyenne avec une énergie inférieure à la barrière de Schottky (dans cet exemple, 0,53 eV : 2350 nm) en raison du fait que le photodétecteur IPS a une excellente résonance LSPR. Les porteurs thermiques excités par lumière infrarouge provenant de l'incident sont accumulés sur le métal car leur énergie est inférieure à la hauteur de barrière de Schottky et ne peuvent pas traverser la barrière d'énergie. Cependant, la résonance LSPR sur le métal fournit une grande quantité de porteurs chauds excités accumulés au niveau de la jonction métal-semi-conducteur. Après que beaucoup de porteurs chauds entrent en collision entre eux et atteignent un équilibre thermique, certains porteurs chauds vont acquérir une énergie supérieure à la hauteur de barrière de Schottky et par conséquent, peuvent traverser la barrière d'énergie pour former le courant thermique, tel que représenté à la Figure 20. Par conséquent, le photodétecteur IPS peut non seulement optimiser la réponse de détection de photons incidents avec une énergie inférieure à la bande interdite de Si, mais également détecter une lumière infrarouge moyenne avec une énergie inférieure à la barrière de Schottky.

[0091] La Figure 21 représente la réponse de photocourant du photodétecteur IPS selon le mode de réalisation de la présente invention, où le photodétecteur IPS est commandé avec un laser IR à 1550 nm ayant différentes intensités de lumière incidente (1,2-5,8 mW) et tensions de polarisation, et l'intensité de chaque lumière incidente est

mesurée trois fois. Les réponses de courant du photodétecteur pour diverses intensités de lumière incidente sont clairement différentes et augmentent graduellement en réponse à l'augmentation de l'intensité de lumière incidente. Les sept courbes IV dans la Figure 21 sont respectivement mesurées par différentes intensités de lumière incidente telles que dans le noir, 1,2 mW, 2 mW, 3 mW, 4 mW, 5 mW et 5,8 mW, de haut en bas. La réponse de courant est proportionnelle à l'intensité de lumière incidente, et les données de courant d'origine mesurées montre également une très haute corrélation avec l'intensité de lumière incidente.

[0092] La Figure 22 représente les relations entre la réponse et l'intensité de lumière incidente lorsque le photodétecteur IPS fonctionne à une polarisation de 0 mV ou -5 mV. Lorsque le photodétecteur IPS fonctionne à une polarisation 0, la réponse du photodétecteur est directement proportionnelle à l'intensité de lumière infrarouge incidente, et les mesures montrent une excellente linéarité (haut degré de linéarité  $R^2 = 0,997$ ) avec une réponse d'environ 1032 nA/mW. Lorsque le photodétecteur IPS fonctionne à une polarisation de -5 mV, la réponse du photodétecteur est également directement proportionnelle à l'intensité de lumière infrarouge incidente, et les mesures montrent une bonne linéarité (haut degré de linéarité  $R^2 = 0,9864$ ) avec une réponse d'environ 1343 nA/mW, ce qui constitue une amélioration d'environ 30 % comparée au fonctionnement à une polarisation 0. Les photodétecteurs de cette invention fournissent une détection d'absorption à réponse plus forte et à large bande plus grande par rapport à des dispositifs actuels divulgués dans la littérature, tels que la structure à métal mince/tranchée profonde d'antenne tridimensionnelle réalisée par Knight et al. (Knight, MW, Sobhani, H., Nordlander, P., & Halas, NJ (2011). Photodetection with active optical antennas (Photodétection avec des antennes optiques actives). *Science*, 332(6030), 702 -704.) and Lin, Keng-Te, et al, (Lai, YS, Chen, HL, & Yu, CC (2014) Silicon-based broadband antenna for high responsivity and polarization-insensitive photodetection at telecommunication wavelengths (Antenne large bande à base de silicium pour une photodétection à sensibilité élevée et insensible à la polarisation à des longueurs d'onde de télécommunication). *Nature Communications*, 5, 3288).

[0093] La Figure 24 représente un contact de Schottky réalisé par dépôt d'un nano-film d'argent sur un substrat de silicium plan selon un mode de réalisation de la présente invention. La Figure 25 est un graphique représentant la réponse de courant de la Figure 24 dans laquelle le dispositif est commandé à une large gamme de tensions et une polarisation 0 et des lumières sont incidentes vers l'avant ou vers l'arrière au contact de Schottky du dispositif. Telle que représentée à la Figure 25, la réponse de courant du dispositif est très stable lors d'un fonctionnement à 0 mV, et il est observé que la réponse du dispositif avec une lumière incidente vers l'arrière est environ deux fois aussi grande que celle avec une lumière incidente vers l'avant. Lorsque la lumière

est incidente vers l'avant à la jonction de Schottky, la lumière doit passer à travers le film de métal mince et sera absorbée par le métal. Inversement, lorsque la lumière est incidente vers l'arrière à la jonction de Schottky, la lumière peut directement atteindre la jonction de Schottky. Cette manière incidente vers l'arrière peut seulement être appliquée à la détection de bande infrarouge, en raison du fait que le substrat de silicium a une bonne absorption dans la région de lumière visible.

[0094] Tel que représenté aux Figures 24 et 25, lorsque la lumière est changée en incidente vers l'arrière à la jonction de Schottky, le nano-film de contact de Schottky en argent d'origine pourrait être plus épais et changé de 10 nm à 100 nm. Avec le contact de Schottky plus épais, le désavantage d'oxydation aisée de la couche de film mince peut être amélioré.

[0095] La Figure 26 représente des structures pyramidales vers le haut (UPS) simulées par la méthode des éléments finis et la lumière est changée pour être incidente sur le contact de Schottky à partir du substrat de silicium. La Figure 27 représente les résultats de simulation dans lesquels des lumières avec des longueurs d'onde de 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500, 8000, 8500, 9000, 9500, 10000 nm sont incidentes perpendiculairement à l'électrode métallique d'UPS, respectivement. Des cavités sont formées entre les pyramides vers le haut. Un fort effet de confinement de champ lumineux peut être observé dans les cavités de la structure Ag-UPS pour toutes les longueurs d'onde incidentes, indiquant que cette structure est également une bonne cavité de résonance tridimensionnelle. Lorsque la longueur d'onde incidente change, la résonance de plasmon de surface se produit dans différentes régions de la cavité de la structure Ag-UPS. Dans cette structure, la longueur d'onde équivalente de la lumière incidente diminuera car la lumière entrant dans le substrat de silicium conduira à l'augmentation de l'indice de réfraction, et la longueur linéaire mise en correspondance peut être trouvée dans la cavité pour la longueur d'onde équivalente. En outre, il peut être clairement observé à partir de toutes les simulations de résonance que le fort champ lumineux local dans la cavité de la structure Ag-UPS est en effet continu avec le fort champ proche sur le métal et produit une résonance de plasmon de surface localisée (LSPR) prononcée sur la surface métallique. Cela prouve que la structure UPS a également des longueurs de cavité variables ou multiples pour introduire une LSPR à large bande.

[0096] Dans un mode de réalisation de la présente invention, un photodétecteur de Schottky à base de Si est fabriqué avec succès sur un substrat de silicium de type p en utilisant une jonction métal-semi-conducteur (Cu-Si). Et une structure IPS (ou UPS) est utilisée pour optimiser la réponse du photodétecteur. La structure IPS a les caractéristiques d'une longueur linéaire variable unidimensionnelle, d'un réseau périodique symétrique bidimensionnel et d'une cavité de résonance optique tridimensionnelle, et peut

améliorer efficacement l'effet de confinement de lumière et générer un photocourant. A partir des résultats des simulations 3D-FDTD et FEM, il peut être observé que, dans la gamme de longueurs d'onde incidentes de 500-4000 nm, la longueur linéaire mise en correspondance peut être trouvée dans la structure IPS de type p/cuivre pour induire des LSPR, permettant une LSPR à très large bande qui est obtenue par la structure IPS de type p/cuivre. En outre, la relation entre la longueur d'onde de l'onde électromagnétique incidente et la longueur linéaire d'IPS a été résumée avec succès. A partir du spectre d'absorption, il peut être également observé que l'absorption du photodétecteur IPS à base de Si de type p/cuivre a une absorption à bande extrêmement large de plus de 80 % dans la longueur d'onde de 450-2700 nm. Il a en effet réussi à dépasser la structure LSPR conventionnelle qui peut seulement induire une résonance de plasmon de surface à une fréquence étroite. A partir des mesures de réponse pour une lumière incidente ayant différentes longueurs d'onde, il peut être observé que la structure IPS de type p/cuivre a une excellente réponse dans la gamme de longueurs d'onde incidentes de 1150-2700 nm. Lorsque le dispositif est commandé à une polarisation 0 et 5 mV, la réponse moyenne est supérieure à 300 nA et 3500 nA, respectivement, et la réponse ne diminue pas drastiquement lorsque la longueur d'onde de lumière incidente augmente. Lorsque le dispositif de photodétecteur est commandé avec un laser IR à 1550 nm à une polarisation 0, la réponse du dispositif est même jusqu'à 1032 nA/mW. En outre, en raison de l'excellent effet de résonance de plasmon de surface de la structure IPS de type p/cuivre, la structure IPS peut non seulement optimiser la réponse de détection de photons incidents avec une énergie inférieure à la bande interdite du silicium, mais également détecter des photons de lumière incidente infrarouge moyenne (2700 nm) avec une énergie inférieure à la barrière de Schottky. En outre, la structure IPS de type p/cuivre a les avantages d'une absorption à bande extrêmement large, d'une résonance insensible à la polarisation et d'une forte réponse. En outre, le photodétecteur IPS au silicium type p/cuivre est fabriqué par un procédé de semi-conducteur au silicium et un procédé de gravure par solution. Ces procédés sont matures et stables et utilisent des équipements et des matériaux non onéreux. En conséquence, les photodétecteurs fabriqués ont un excellent potentiel pour être intégrés dans un circuit intégré à base de silicium pour développer des puces à base de silicium associées pour des détecteurs visibles-infrarouges ou des imageurs thermiques infrarouges.

## Revendications

[Revendication 1]

Photodétecteur (2), caractérisé par le fait qu'il comprend :

un semi-conducteur (20) ayant une première surface et une seconde surface, la seconde surface étant opposée à la première surface et étant gravée pour former une pluralité de structures pyramidales inversées ou de structures pyramidales vers le haut ;

une électrode de contact ohmique (22) recouvrant la première surface du semi-conducteur (20) et formant un contact ohmique avec la première surface du semi-conducteur (20) ;

une électrode métallique (24) recouvrant une surface de la pluralité de structures pyramidales inversées ou de structures pyramidales vers le haut et formant un contact de Schottky avec la surface de la pluralité de structures pyramidales inversées ou de structures pyramidales vers le haut ; et

une lumière incidente ;

dans lequel chaque structure pyramidale inversée ou structure pyramidale vers le haut comprend de multiples longueurs de cavité linéaires, et une longueur d'onde de la lumière incidente correspond à l'une des longueurs de cavité linéaires pour induire une résonance de plasmon de surface localisée, LSPR ; et

dans lequel des porteurs dans l'électrode métallique (24) sont excités par la lumière incidente pour former des paires électron-trou ou des porteurs chauds pour traverser une barrière de Schottky entre une jonction de l'électrode métallique (24) et du semi-conducteur (20) et ainsi former un courant photo-induit.

[Revendication 2]

Photodétecteur (2) selon la revendication 1, caractérisé par le fait que la lumière incidente entre à partir de la première surface du semi-conducteur (20).

[Revendication 3]

Photodétecteur (2) selon la revendication 1, caractérisé par le fait que des photons avec une énergie plus petite que la barrière de Schottky et la bande interdite du semi-conducteur (20) sont tous deux détectés.

[Revendication 4]

Photodétecteur (2) selon la revendication 1, caractérisé par le fait que la lumière incidente avec une gamme de longueurs d'onde de 500 nm à 4000 nm induit une résonance de plasmon de surface localisée dans les structures pyramidales inversées.

[Revendication 5]

Photodétecteur (2) selon la revendication 1, caractérisé par le fait que la lumière incidente avec une gamme de longueurs d'onde de 1000 nm à

10000 nm induit une résonance de plasmon de surface localisée dans les structures pyramidales vers le haut.

[Revendication 6] Photodétecteur (2) selon la revendication 1, caractérisé par le fait que la période des structures pyramidales inversées est quatre fois la longueur d'onde de la lumière incidente dans la gamme de longueurs d'onde entre 500 nm et 4000 nm.

[Revendication 7] Photodétecteur (2) selon la revendication 1, caractérisé par le fait que la résonance de plasmon de surface localisée est insensible à la polarisation.

[Revendication 8] Photodétecteur (2) selon la revendication 1, caractérisé par le fait que le spectre d'absorption du photodétecteur (2) a un rapport d'absorption supérieur à 80 % dans la gamme de longueurs d'onde entre 450 nm et 2700 nm.

[Fig. 1A]

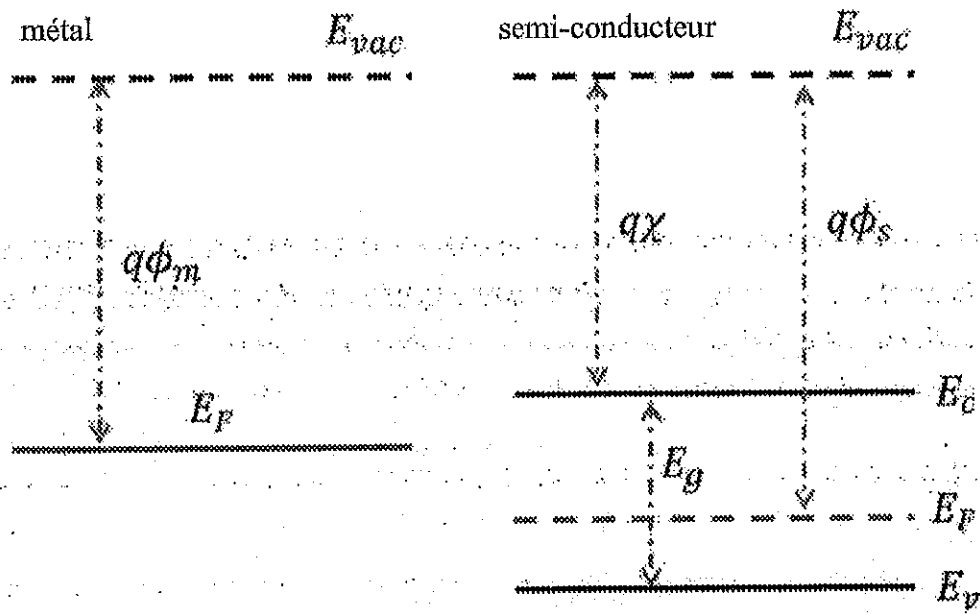


FIG. 1A

[Fig. 1B]

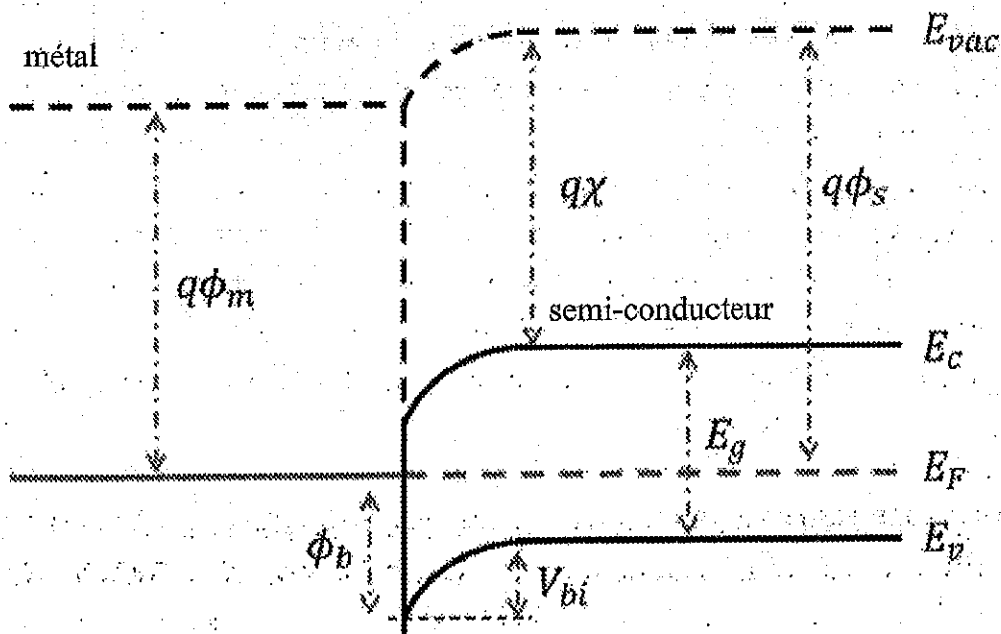


FIG. 1B

[Fig. 2]

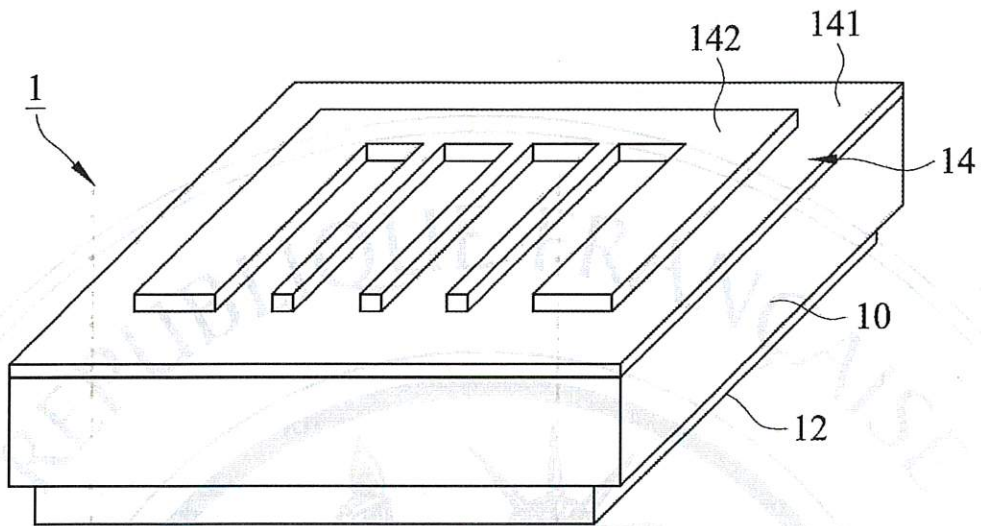


FIG. 2

[Fig. 3]

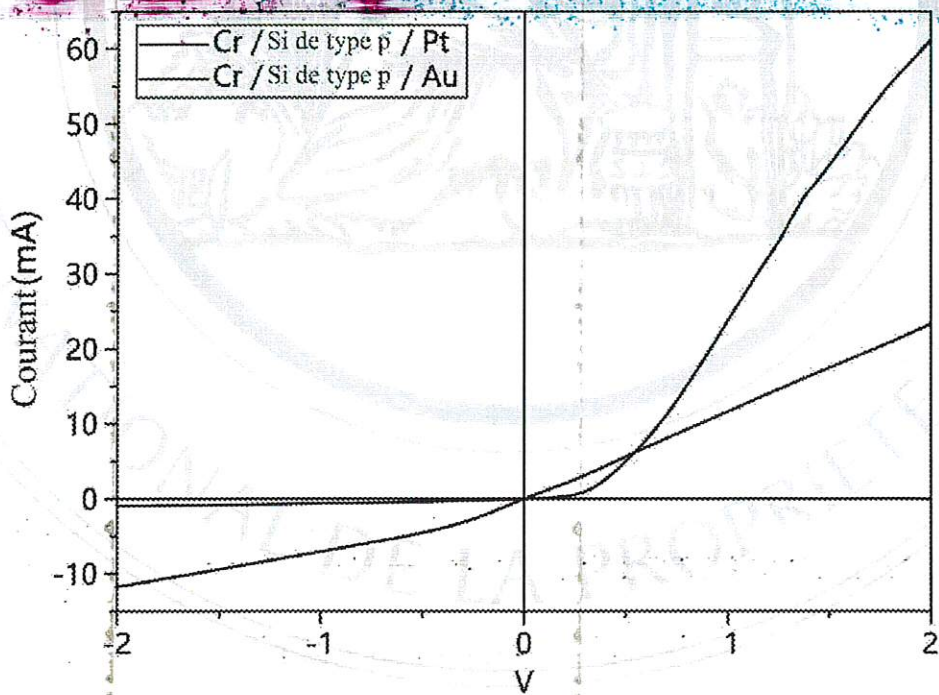


FIG. 3

[Fig. 4]

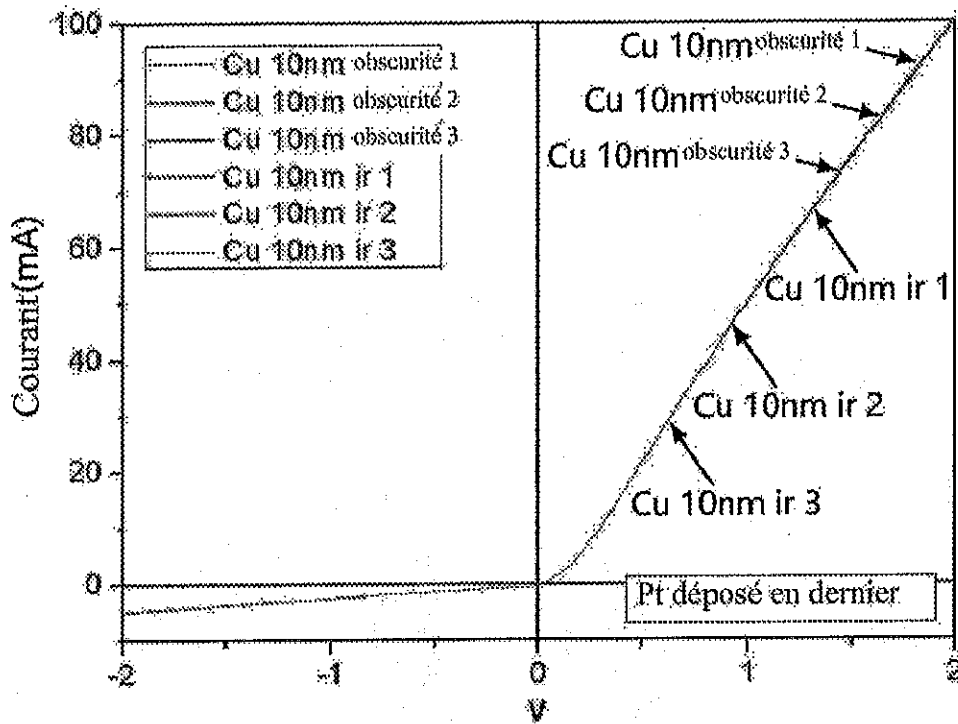


FIG. 4

[Fig. 5]

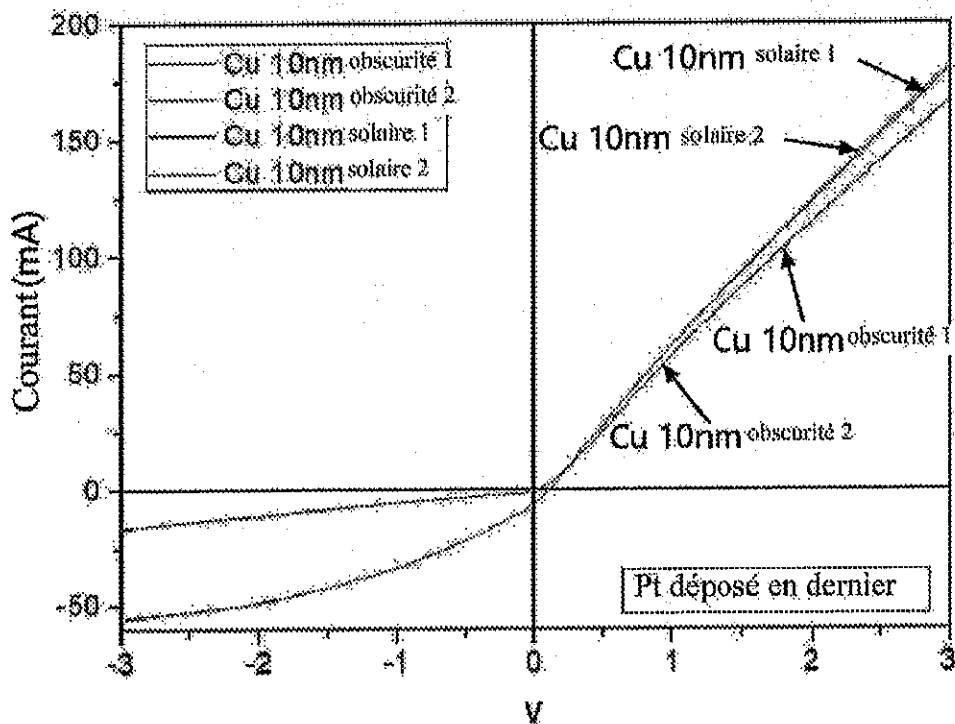


FIG. 5

[Fig. 6]

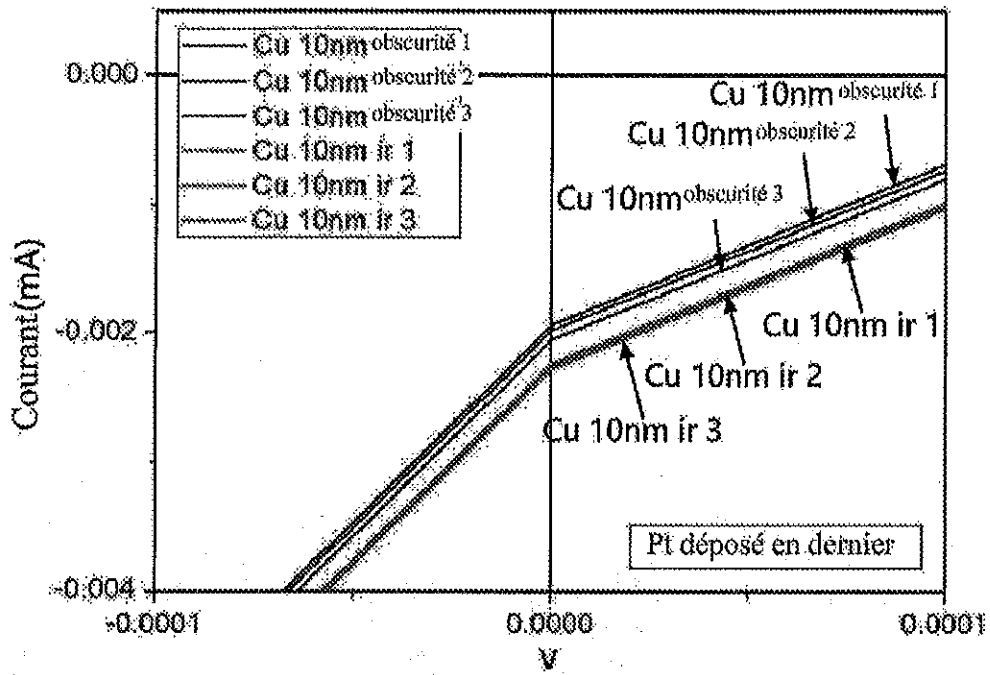


FIG. 6

[Fig. 7]

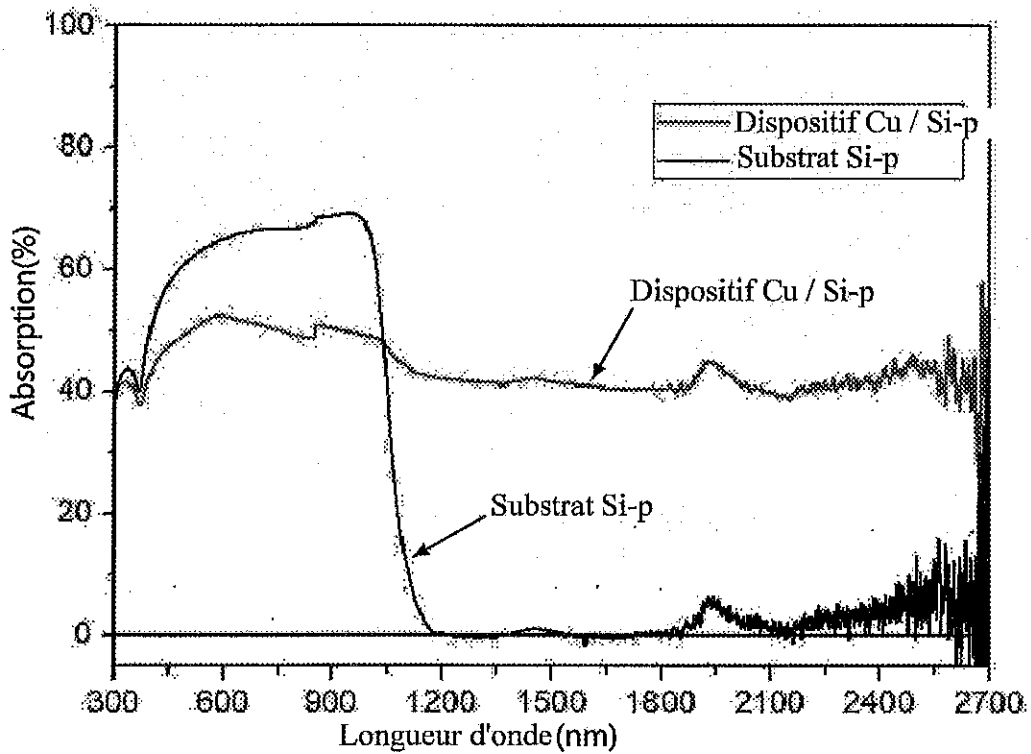


FIG. 7

[Fig. 8]

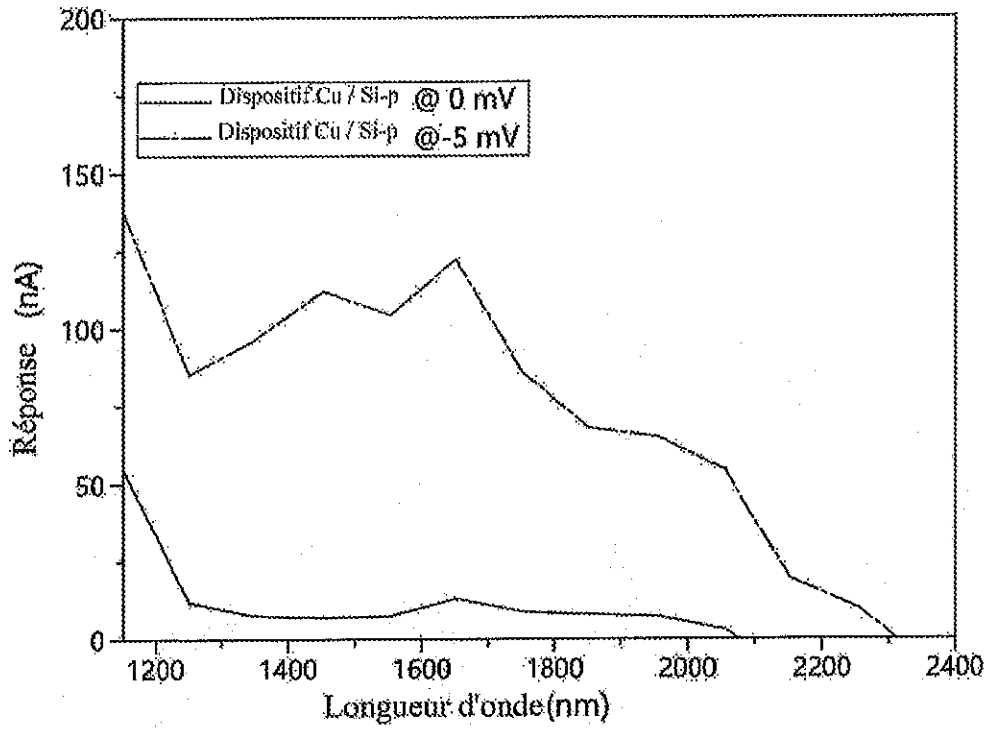


FIG. 8

[Fig. 9A]

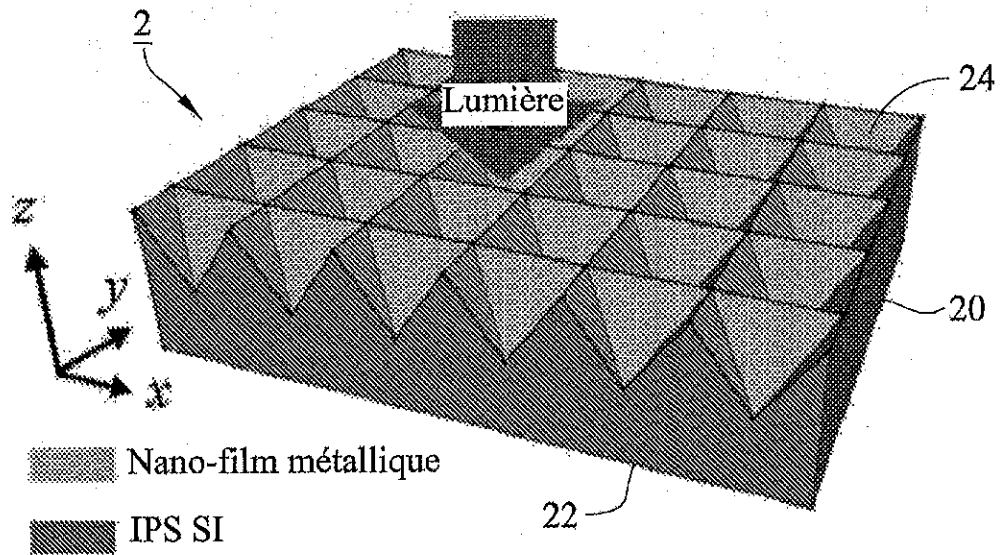


FIG. 9A

[Fig. 9B]

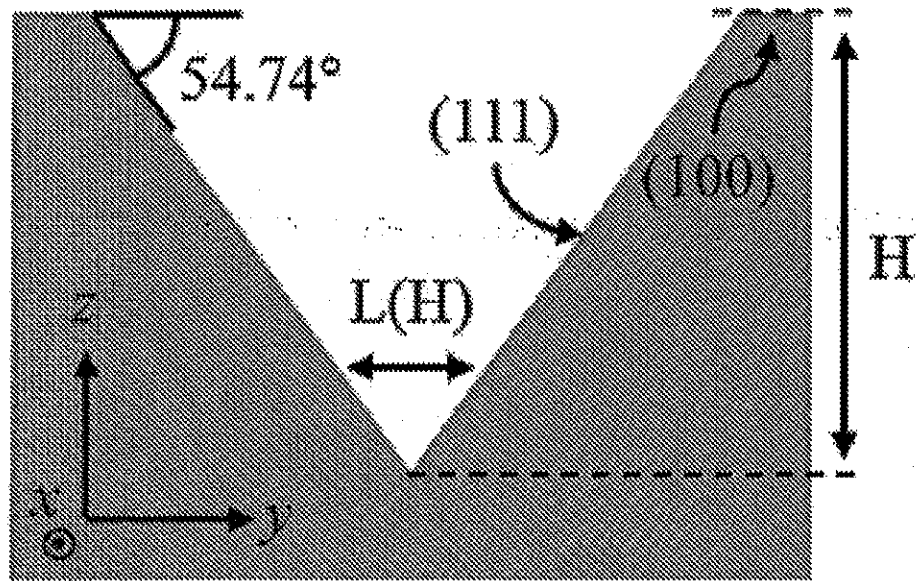


FIG. 9B

[Fig. 10]

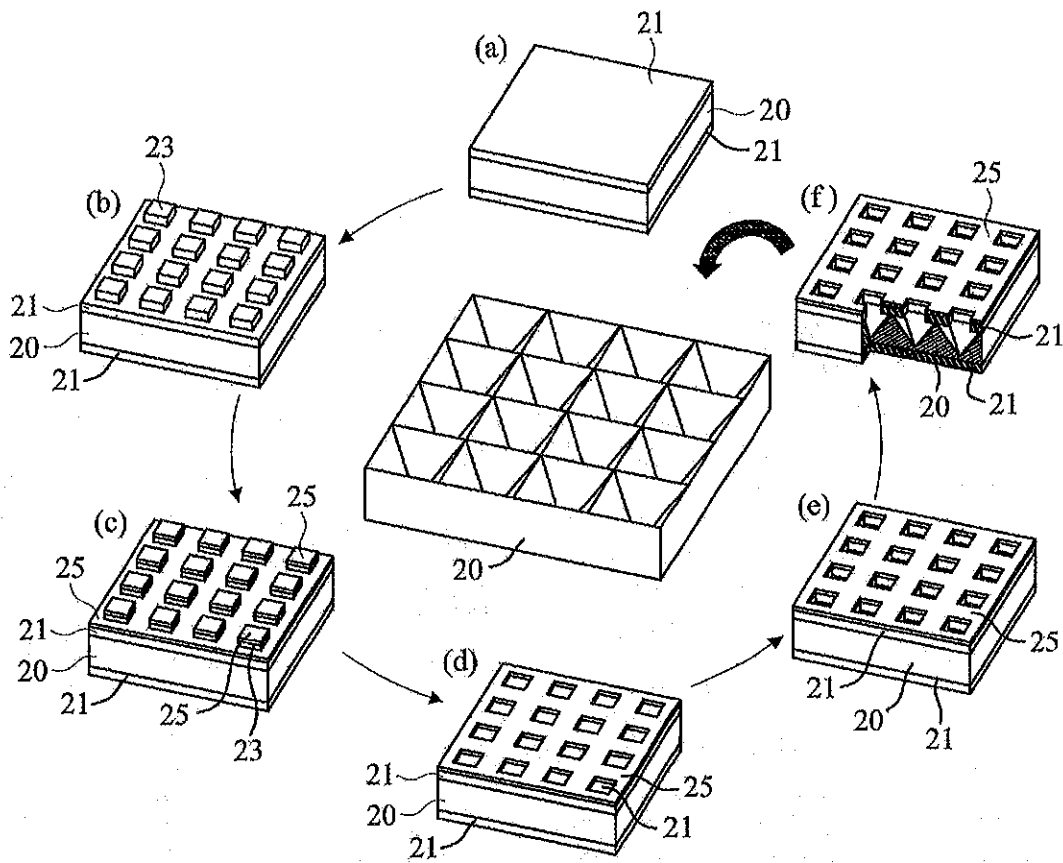


FIG. 10

[Fig. 11]

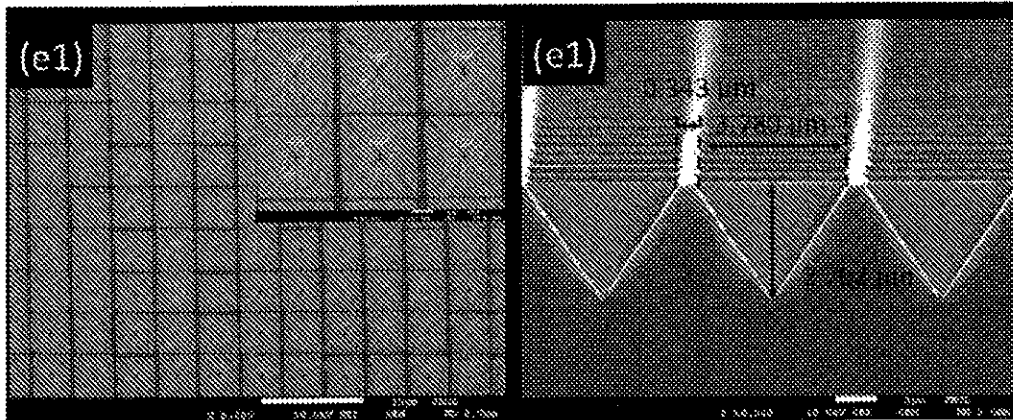


FIG. 11

[Fig. 12]

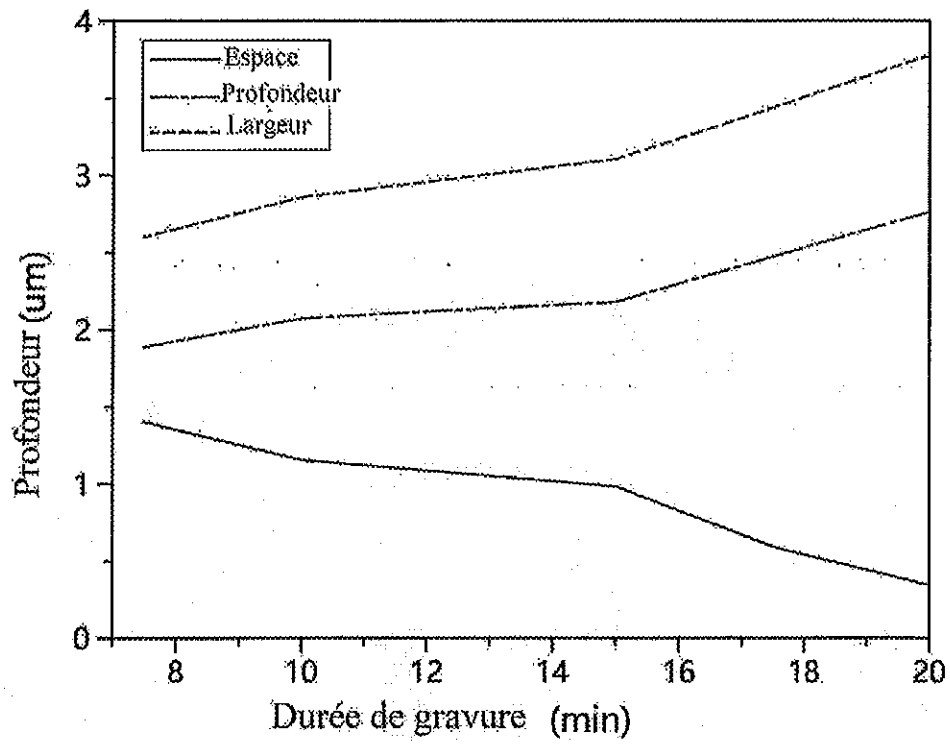


FIG. 12

[Fig. 13]

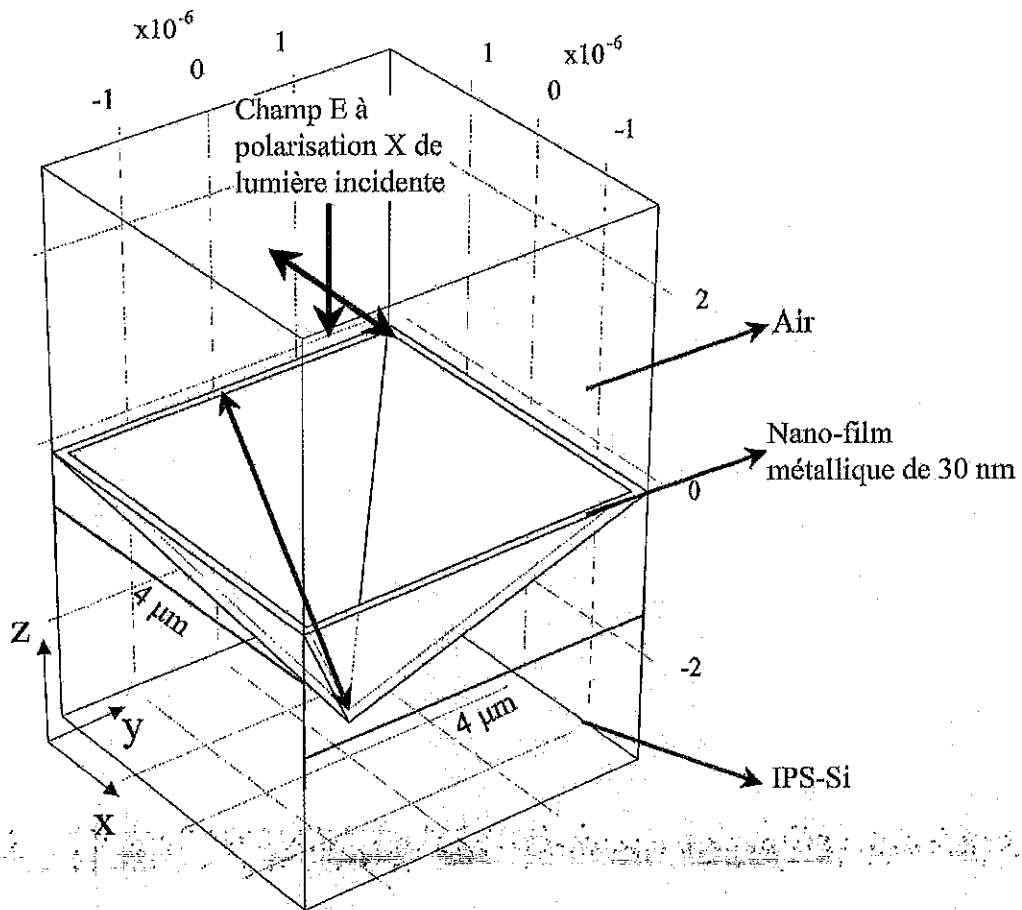


FIG. 13

[Fig. 14]

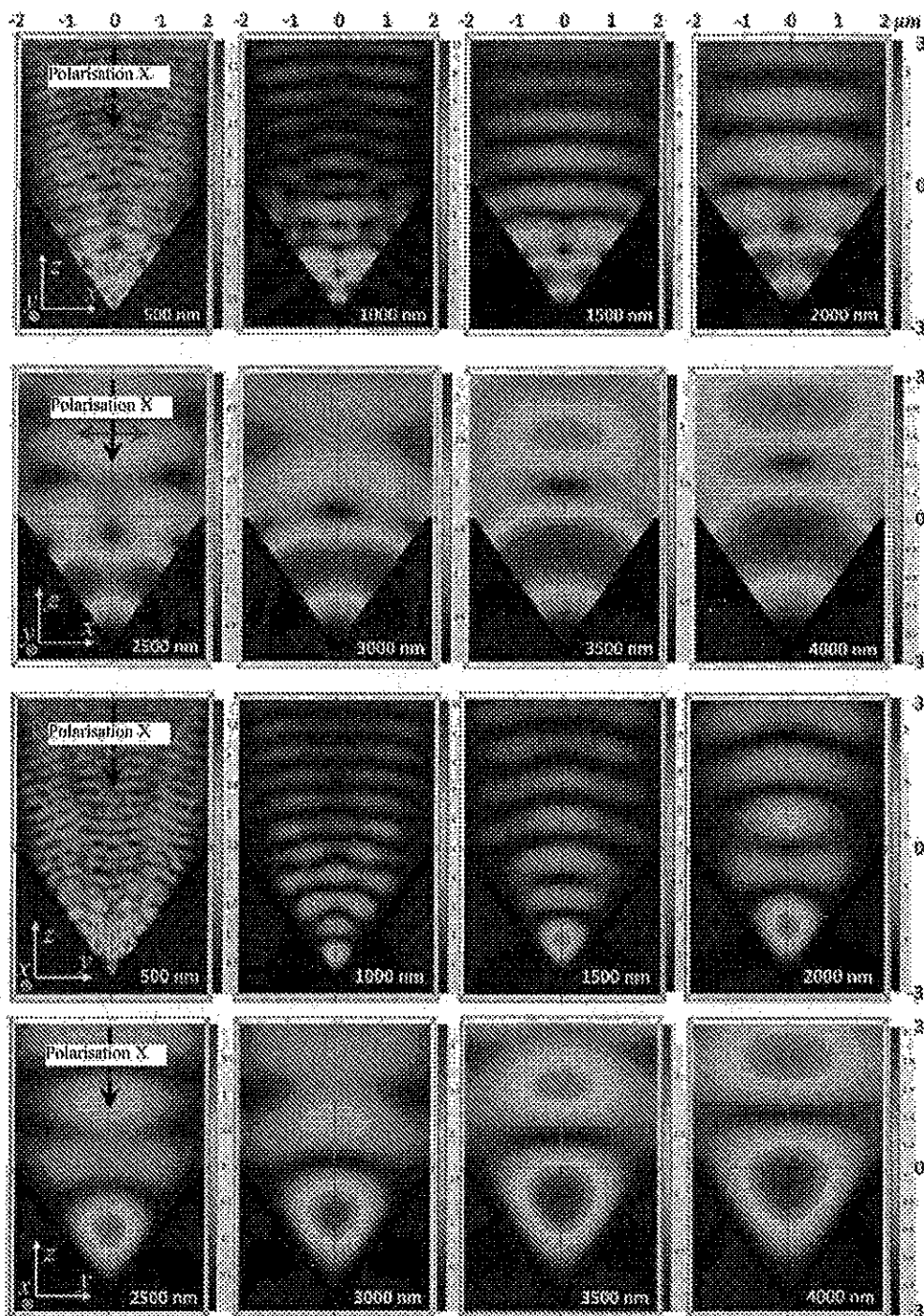


FIG. 14

[Fig. 15]

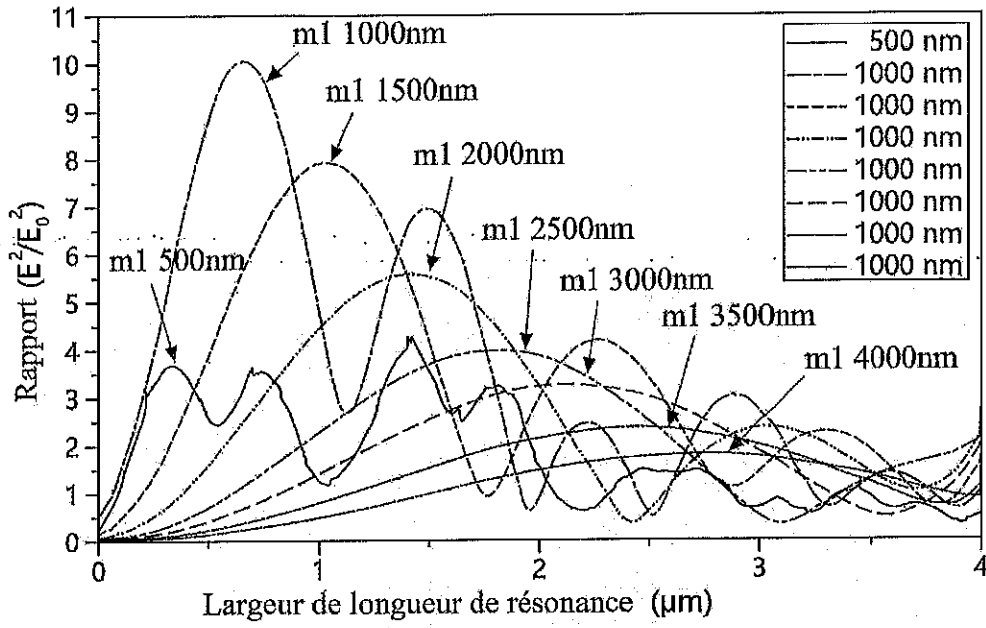


FIG. 15

[Fig. 16]

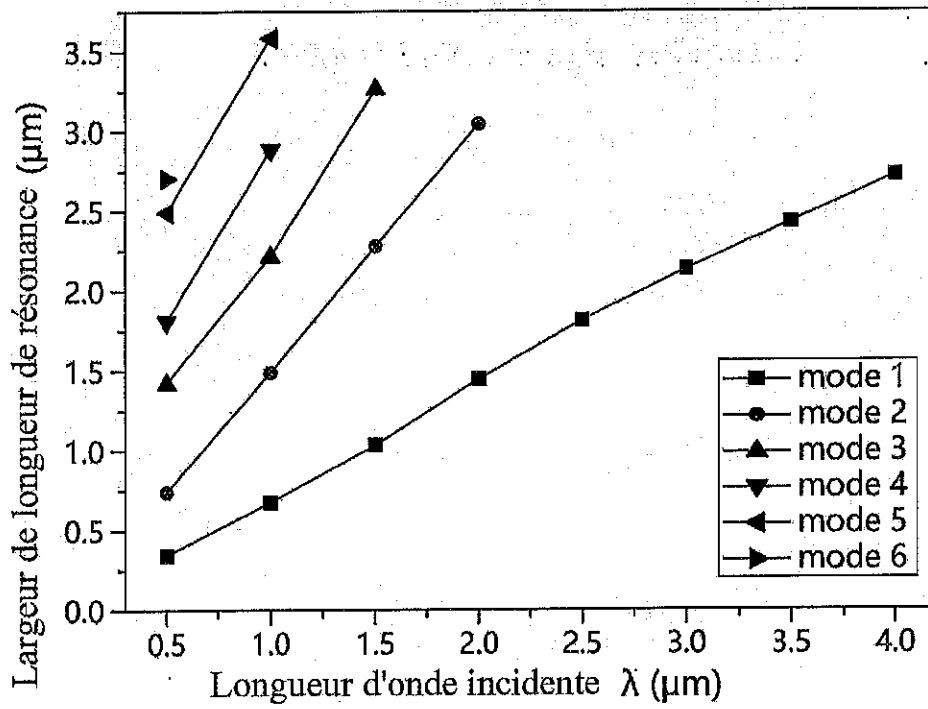


FIG. 16

[Fig. 17]

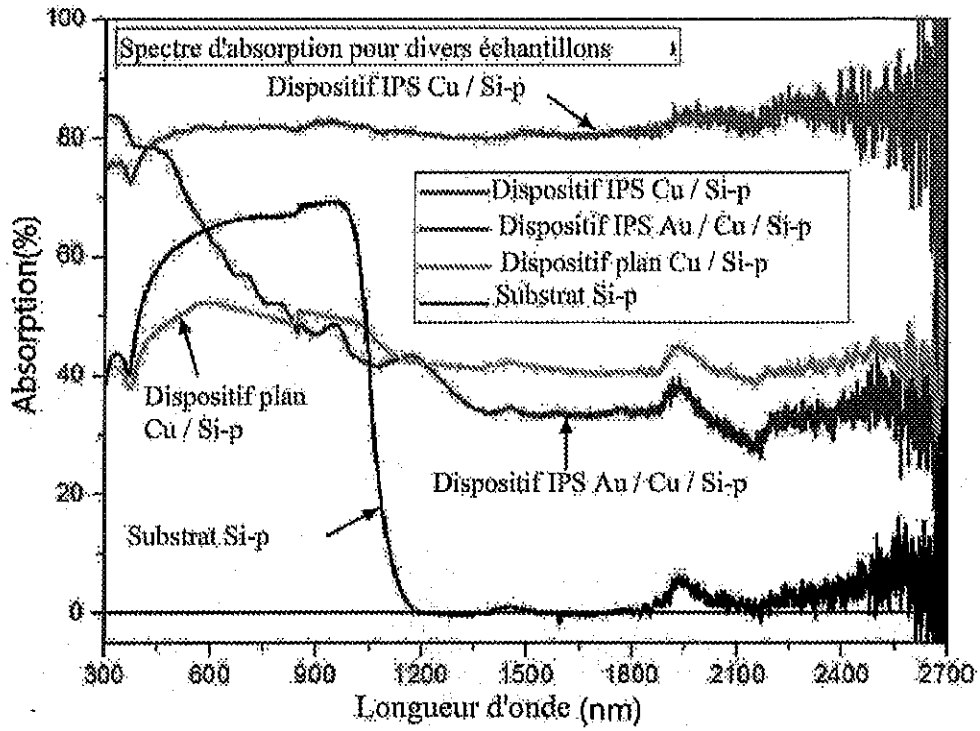


FIG. 17

[Fig. 18]

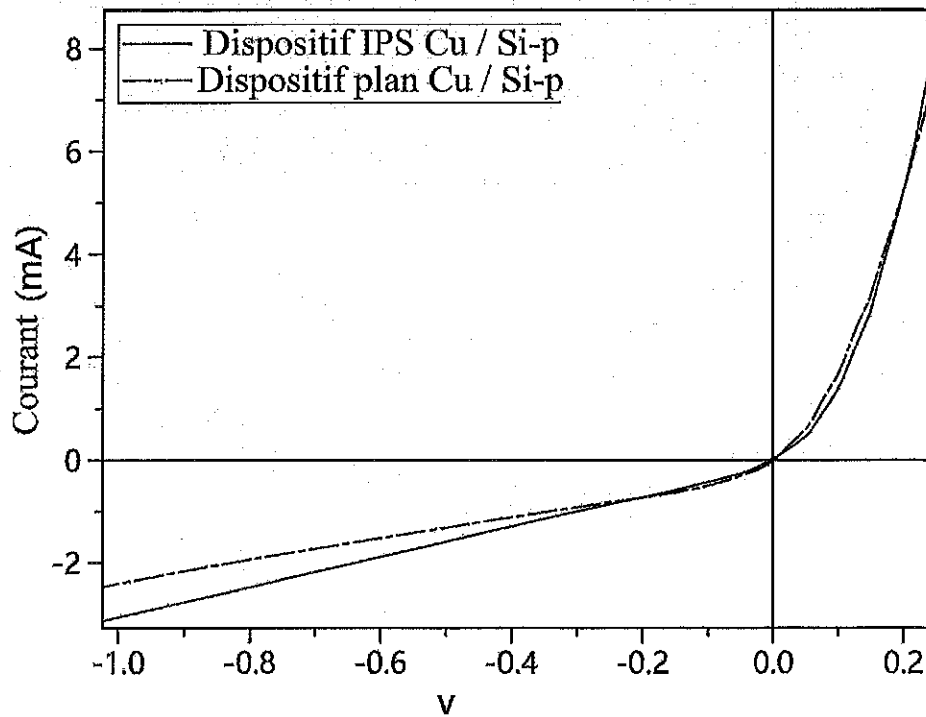


FIG. 18

[Fig. 19]

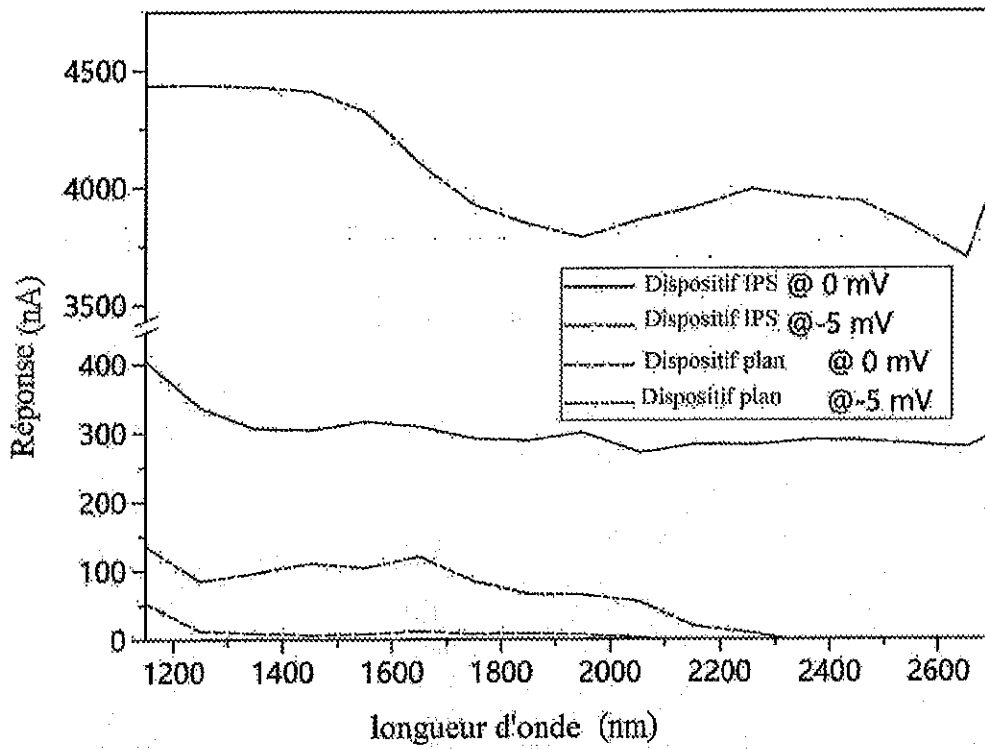


FIG. 19

[Fig. 20]

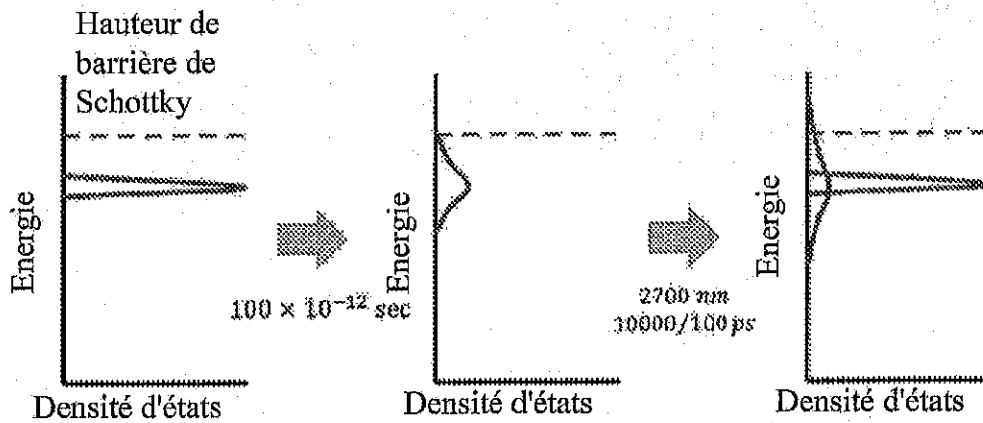


FIG. 20

[Fig. 21]

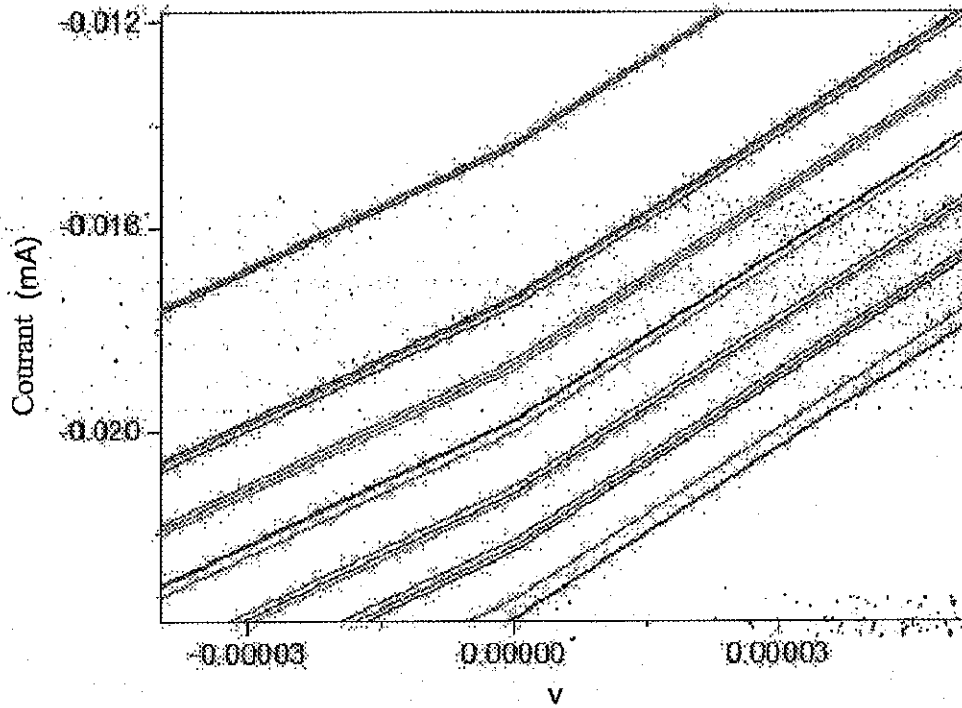


FIG. 21

[Fig. 22]

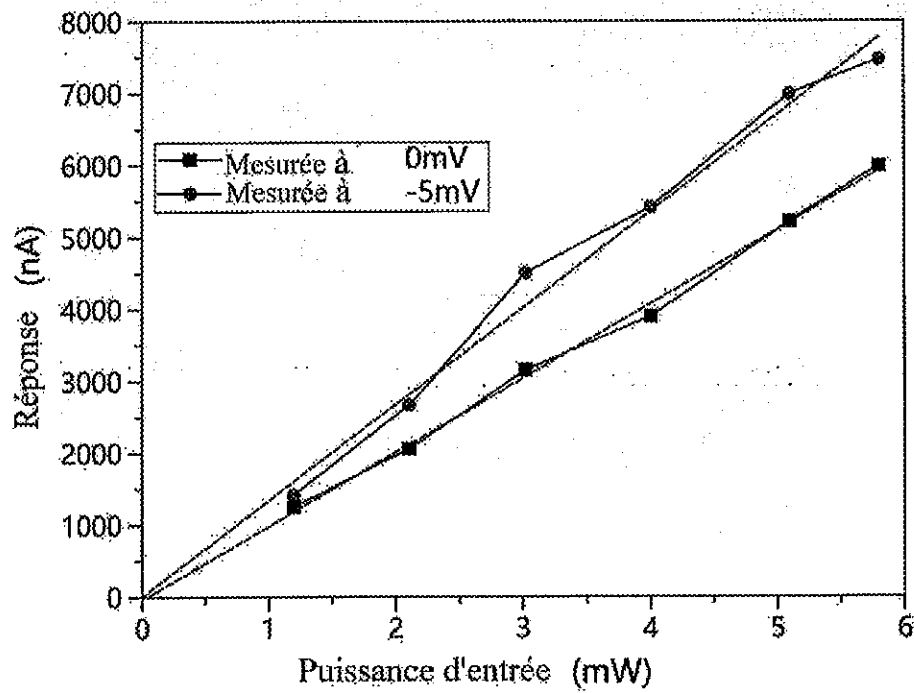


FIG. 22

[Fig. 23]

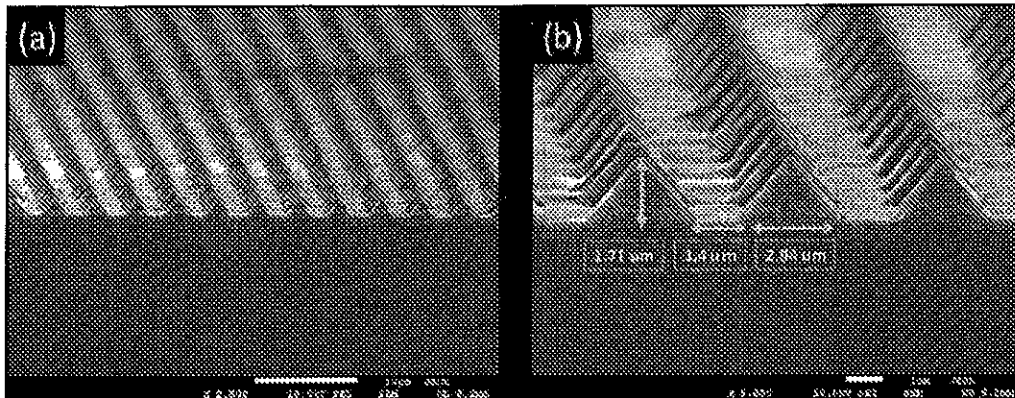


FIG. 23

[Fig. 24]

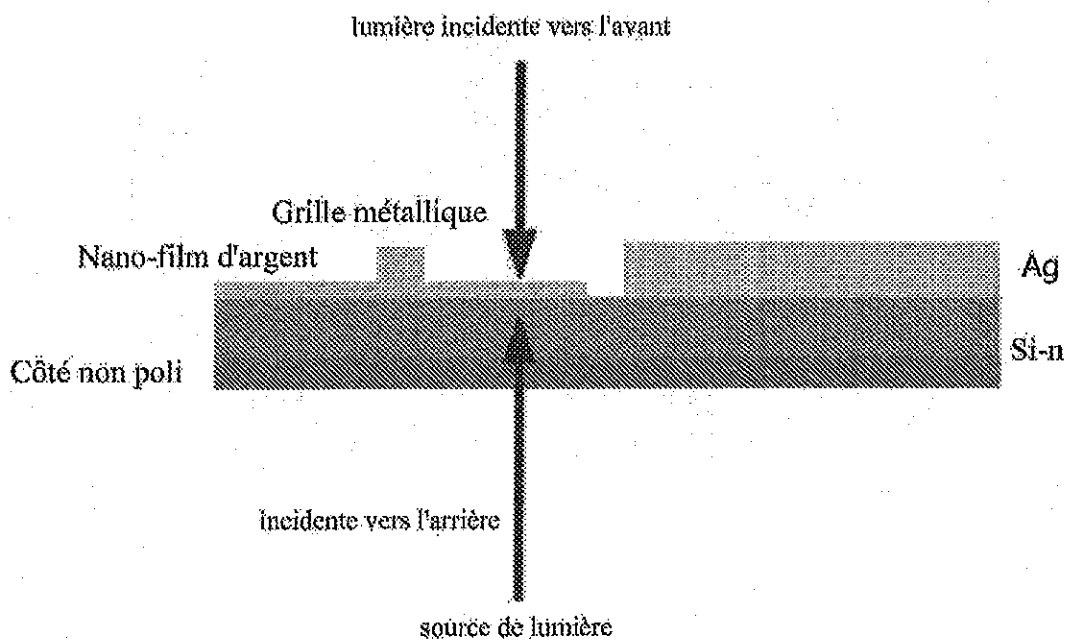
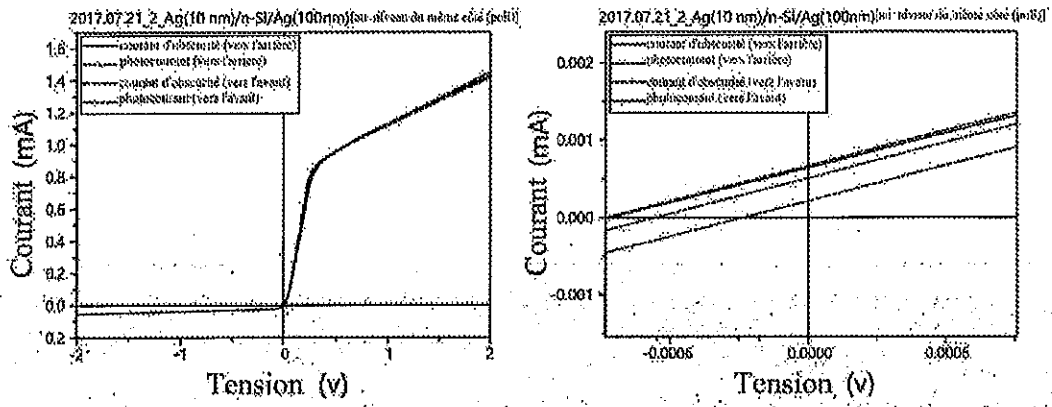


FIG. 24

[Fig. 25]



[Fig. 26]

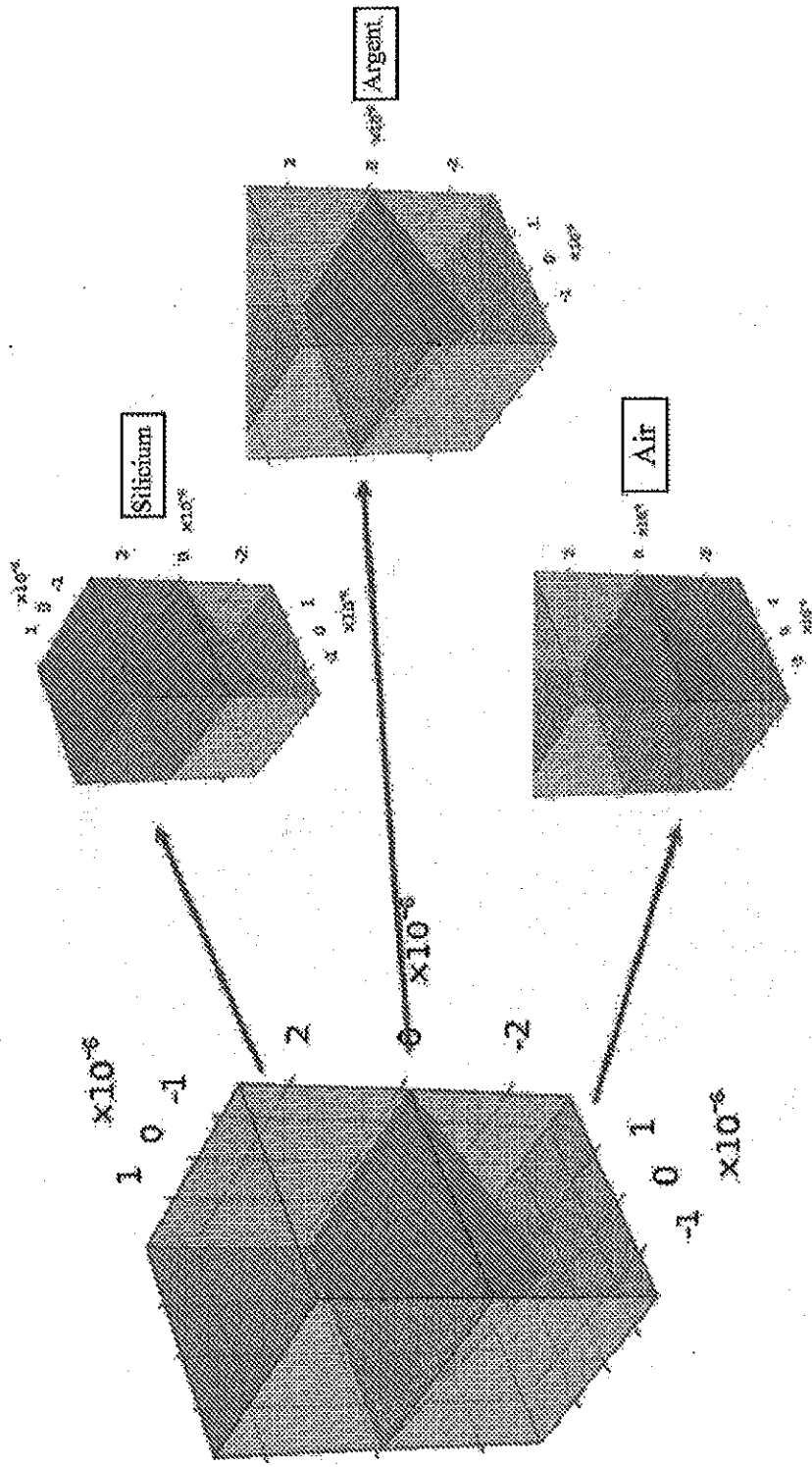


FIG. 26

[Fig. 27]

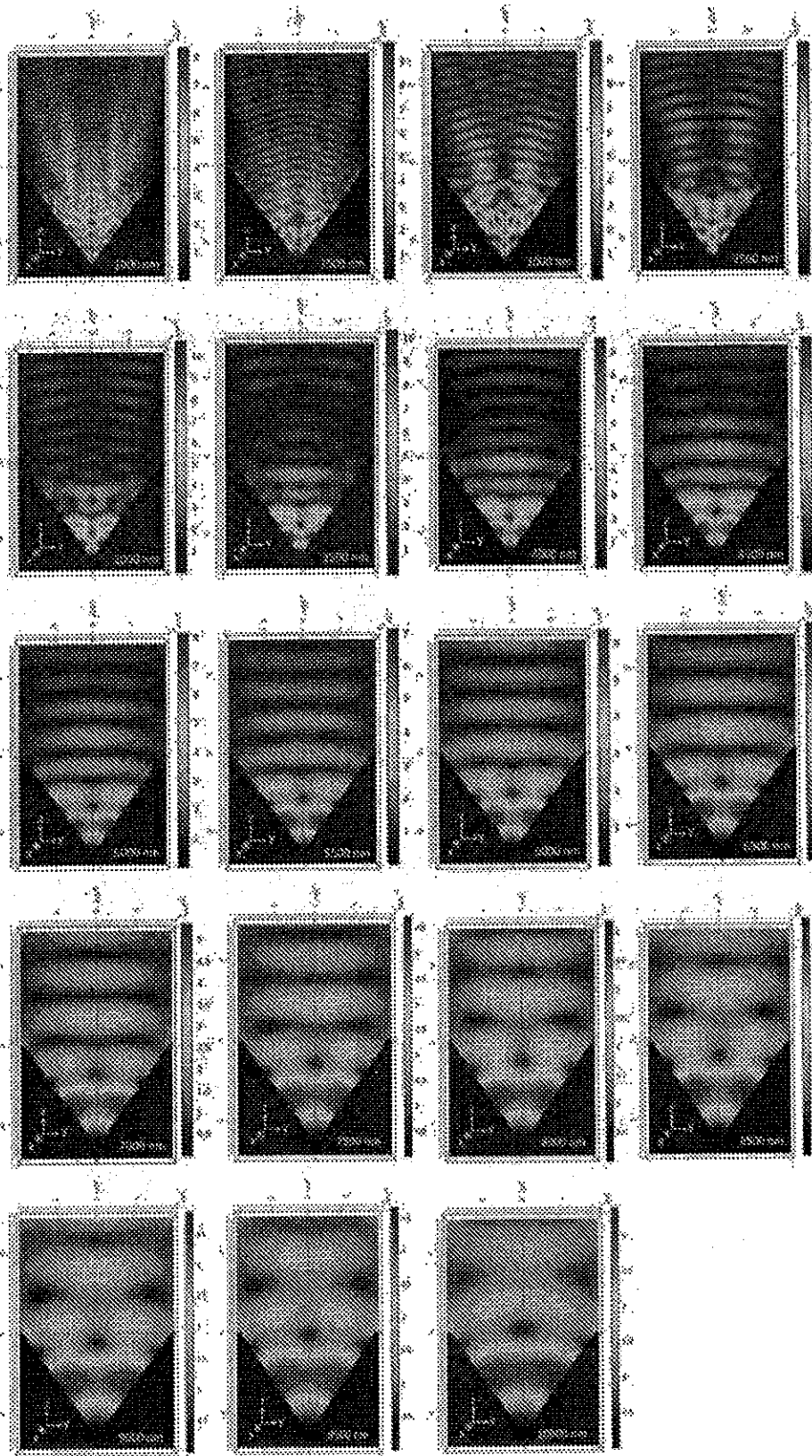


FIG. 27

# 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 (nouveauté) 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 2015/228837 A1 (CHEN HSUEN-LI [TW] ET  
AL) 13 août 2015 (2015-08-13)

DE 42 42 035 A1 (DEUTSCHE AEROSPACE [DE])  
16 juin 1994 (1994-06-16)

US 2019/058073 A1 (FUJIWARA HIROYASU [JP]  
ET AL) 21 février 2019 (2019-02-21)

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

NEANT

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

NEANT

[The body of the document contains several paragraphs of text that are extremely faint and illegible due to low contrast and significant noise. The text appears to be a standard document layout with multiple lines of prose.]