

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 79 31972

(54) Procédé d'ajustement du coefficient de température d'une diode à jonction et diode de référence.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). H 01 L 29/91, 23/56.

(22) Date de dépôt..... 28 décembre 1979.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 27 du 3-7-1981.

(71) Déposant : Société dite : THOMSON-CSF, société anonyme, résidant en France.

(72) Invention de : Henri Valdman.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Thomson-CSF, Michel de Beaumont, SCPI,
173, bd Haussmann, 75360 Paris Cedex 08.

- 1 -

La présente invention concerne une diode de référence compensée en température et un procédé de compensation.

Dans de très nombreux circuits discrets ou
5 intégrés à semiconducteurs, il est nécessaire de disposer d'une tension de référence. Une telle tension peut être fournie par une diode Zener. Néanmoins, un inconvénient de l'emploi de diodes Zener seules est que ces diodes présentent des coefficients de température
10 relativement élevés et positifs dès que leur tension dépasse une valeur de sensiblement 4,5 Volts. Ainsi, pour constituer des diodes de références, il est d'usage de mettre en série avec une diode Zener à coefficient de température positif des diodes à jonction classiques à
15 coefficient de température négatif pour permettre ainsi une compensation des coefficients de température. Ce procédé souffre de l'inconvénient que les diodes classiques présentent des coefficients de température sensiblement constants et qu'on ne peut donc réaliser une
20 compensation stricte du coefficient de température de la diode Zener que pour certaines valeurs particulières des coefficients de température de ces diodes Zener, c'est-à-dire seulement pour certaines valeurs de la tension Zener.

25 Un objet de la présente invention est de prévoir un procédé d'ajustement du coefficient de température d'une diode à jonction polarisée en direct permettant en particulier d'obtenir une variation de la tension $(dV/dt)_F$ de l'ordre de $-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$.

30 Un autre objet de la présente invention est de prévoir une diode de référence pouvant être compensée de façon relativement rigoureuse en température pour un domaine étendu de tensions Zener.

Pour atteindre ces objets ainsi que d'autres,
35 la présente invention prévoit un procédé d'ajustement du coefficient de température d'une diode polarisée en

- 2 -

direct consistant à sélectionner la distance entre la jonction et l'électrode recombinante de cette diode, cette distance étant nettement inférieure à la valeur de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la couche intermédiaire.

La présente invention prévoit aussi une diode de référence compensée en température comprenant une diode Zener en série avec au moins une diode à jonction en direct, l'une au moins de ces diodes en direct étant du type à électrode recombinante, c'est-à-dire présentant une électrode disposée à une distance choisie de la jonction nettement inférieure à la valeur de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la couche semiconductrice intermédiaire comprise entre la jonction et l'électrode. La diode à électrode recombinante peut comprendre au-dessus de la couche semiconductrice intermédiaire une couche de silicium polycristallin dopé selon le même type de conductivité que cette couche intermédiaire. La couche intermédiaire peut avoir un niveau de dopage de l'ordre de 10^{15} at/cm³ et une épaisseur de l'ordre de 2 à 5 microns.

Ces objets, caractéristiques et avantages ainsi que d'autres de la présente invention seront exposés plus en détail dans la description suivante faite en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

La figure 1 représente une chaîne de diodes selon la présente invention ;

La figure 2 représente un mode de réalisation de diodes à électrode recombinante selon la présente invention;

La figure 3 représente une courbe illustrant la variation de la chute de tension en direct d'une diode en fonction de la concentration d'or ;

Les figures 4A à 4D représentent des étapes préliminaires de fabrication d'une diode selon l'invention.

La figure 1 représente une diode de référence selon la présente invention. Cette diode comprend une

- 3 -

diode Zener 1 en série avec des diodes à jonction polarisées en direct 2, le courant circulant dans le sens indiqué par la flèche I. On pourra trouver une description de ce mode de compensation dans l'ouvrage de la

5 Société Motorola intitulé "Motorola Zener Diode Handbook" 1967 - Chapitre 5.

La figure 5-4 de ce chapitre 5 et la description correspondante indiquent qu'en utilisant des diodes à jonction classiques, on ne peut obtenir une compensation

10 tion de température convenable que pour des valeurs particulières de la tension de la diode de référence, et pour des surfaces données des diodes. Ainsi, avec une diode Zener de facteur de température $(dV/dt)_Z$ donné, on peut obtenir une compensation de température avec

15 un certain nombre choisi de diodes de coefficient de température négatif $(dV/dt)_F$ (l'indice F indique que la diode est polarisée dans le sens direct).

La présente invention se base sur une analyse théorique approfondie des paramètres commandant la valeur des facteurs de température $(\frac{dV}{dt})_F$ d'une diode polarisée en direct. Ce facteur de température peut s'écrire:

20

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_F = \frac{V_F - E_g/q}{T} - \frac{3k}{q} \quad (1)$$

dans cette équation :

V_F désigne la chute de tension en direct dans la diode,

25 E_g désigne l'intervalle de bande interdite dans le semiconducteur,

T désigne la température absolue,

k la constante de Boltzman,

30 q la charge élémentaire de l'électron.

A part V_F , tous les paramètres apparaissant dans l'expression de $(dV/dt)_F$ sont des données, sauf bien entendu T qui désigne la température absolue, mais l'on ne peut également pas jouer sur ce facteur.

- 4 -

V_F s'exprime par l'équation :

$$V_F = \frac{nkT}{q} \text{ Log } \frac{I_F}{J_0 S} \quad (2)$$

où n est un paramètre ayant une valeur variant entre 1 et 2 en fonction des caractéristiques du semiconducteur et en particulier de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans ce semiconducteur.

I_F désigne le courant passant dans le sens direct dans la diode. Généralement, dans l'utilisation en diode de référence, ce courant est fixé par le constructeur.

S désigne la surface de jonction de la diode. Cette surface de jonction est déterminée une fois que l'on a choisi la surface de la diode Zener étant donné que la diode en direct est généralement montée sous forme d'une pastille soudée sur la diode Zener et a sensiblement la même dimension que celle-ci.

Donc, pour agir sur la valeur de V_F , il convient d'agir sur la valeur de J_0 qui désigne la densité de courant dans la diode et qui s'écrit :

$$J_0 = n_i^2 q \left[\frac{D_p}{N L_p} + \frac{D_n}{P L_n} \right] \quad (3)$$

Dans cette expression, n_i désigne la concentration intrinsèque de porteurs de charge ; D_p et D_n désignent les coefficients de diffusion des trous et des électrons respectivement ; L_p et L_n les longueurs de diffusion des trous et des électrons respectivement ; et P et N désignent respectivement la concentration des trous dans la région P et la concentration des électrons dans la région N . Dans le cas général où la jonction est très dissymétrique, c'est-à-dire où l'une des couches formant cette jonction est nettement plus dopée que l'autre, par exemple dans laquelle la concentration des impuretés dopantes dans la couche de type P est nettement supérieure à la

- 5 -

concentration des impuretés dopantes dans la région de type N, on a $N \gg P$

et on peut écrire :

$$J_0 \neq ni^2 q \frac{D_n}{PL_n} \quad (4)$$

Ainsi, dans l'art antérieur, quand on voulait
 5 modifier le coefficient de température en diminuant V_F ,
 c'est-à-dire en augmentant J_0 , on a utilisé comme moyen
 pour atteindre ce résultat une diminution de la longueur
 de diffusion L_n en effectuant une diffusion à l'or dans
 la couche de type P. Néanmoins l'emploi de ce procédé est
 10 limité car, comme on l'a vu précédemment, la valeur de
 n dans l'expression de V_F dépend également de la longueur
 de diffusion et la variation de n se fait dans le même
 sens que celle de J_0 . Ces deux coefficients étant respec-
 tivement au numérateur et au dénominateur de l'expression
 15 de V_F , leurs effets se compensent et l'on ne peut atteindre
 que de faibles diminutions de la valeur de V_F , c'est-à-
 dire du coefficient de température.

La courbe de la figure 3 indique l'allure de la
 variation de V_F en fonction de la concentration d'or en
 20 unités arbitraires. On voit que l'on ne peut descendre en
 dessous d'un minimum.

L'une des bases de la présente invention a été
 de réaliser que, comme cela est d'ailleurs connu dans le
 cas général, l'équation (4) ci-dessus correspond en fait
 25 à un cas particulier dans lequel l'épaisseur de la couche
 la moins dopée des deux couches formant la jonction est
 suffisamment importante. En effet, dans le cas général
 de réalisation pratique des diodes semiconductrices, on
 évite d'avoir des épaisseurs de semiconducteur très fai-
 30 bles par rapport à la longueur de diffusion entre la sur-
 face de la jonction et la surface de l'électrode car alors
 on risque d'avoir un mauvais contact ohmique entre l'élec-
 trode et la couche sous-jacente et, de toute manière, on
 détériore les caractéristiques inverses de la diode qui

- 6 -

présente alors un courant de fuite en inverse relativement élevé. Ainsi, selon un préjugé bien établi, on considère toujours dans les divers cas pratiques des diodes semiconductrices présentant des épaisseurs de couches semiconductrices relativement importantes de part et d'autre de la jonction. Mais, comme l'indique par exemple les pages 157 et 158 de l'ouvrage théorique de P. Aigrain et F. Englert publié aux Editions DUNOD, dans le cas où l'épaisseur W de la couche semiconductrice

10 située entre la jonction et son électrode est très inférieure à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la couche intermédiaire, on obtient une structure dite à électrode recombinante pour laquelle l'équation (4) peut s'écrire :

$$15 \quad J'_0 = n_i^2 q \frac{Dn}{PW} \quad (5)$$

ou encore :

$$J'_0 = n_i^2 q \frac{Dn}{PLn} \times \frac{Ln}{W} = J_0 \frac{Ln}{W} \quad (6)$$

On a couramment pour du silicium de type P dopé à 10^{15} at/cm³ une durée de vie de l'ordre de 1 mic d'où

20 une longueur de diffusion des électrons $Ln = \sqrt{35 \times 10^{-6}} = 60\mu$ soit pour une couche $W = 2\mu$ un rapport $\frac{Ln}{W} = 30$.

Ainsi, en choisissant de façon appropriée la valeur de W , on peut modifier la valeur de J_0 du rapport Ln/W . Ce rapport peut facilement être rendu égal à une valeur de l'ordre de 30. En conséquence, bien que la dépendance entre V_F et J_0 soit logarithmique, on peut faire varier de façon

25 notable la valeur de V_F et par conséquent la valeur du coefficient de température $(dV/dt)_F$.

Ainsi, selon la présente invention, il est envisagé d'utiliser des diodes à électrode recombinante contrairement à un préjugé établi dans la technique, dans le but particulier de réaliser une diode à coefficient de température réglable quand cette diode fonctionne dans le sens direct.

30

- 7 -

Il n'en demeure pas moins que cette diode aura de mauvaises caractéristiques en inverse, mais, dans l'application particulière envisagée relative à la fabrication de diodes de référence, la tenue en inverse des diodes de compensation est une caractéristique sans importance, ces diodes étant toujours amenées à fonctionner dans le sens direct. En outre, même si l'on tient à ce que l'ensemble du montage série illustré en figure 1 présente une bonne tenue en inverse, il suffira de choisir l'une des diodes 2 du type à électrode recombinante selon la présente invention associée à une autre diode qui soit, elle, de type classique et qui assure la tenue en tension inverse.

Un autre aspect de la présente invention est de prévoir une structure particulière de diode à électrode recombinante. On considèrera une diode constituée d'une jonction 10 entre une couche 11 de type N et une couche 12 de type P à niveau de dopage moins élevé que celui de la couche de type N. La façon la plus simple d'obtenir une diode à électrode recombinante à partir d'une telle structure consiste à former par épitaxie une couche 12 d'une épaisseur W choisie inférieure à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans cette couche, puis à revêtir la surface supérieure de la couche 12 d'une métallisation d'aluminium.

Une telle métallisation en aluminium permet d'éviter l'apparition de phénomènes du type Schottky. Toutefois, dans la pratique, on souhaite souvent encapsuler les diodes de référence dans des boîtiers de verre qui en assurent une excellente protection. Dans l'état actuel de la technique, ces boîtiers de verre doivent être scellés, avec les verres couramment disponibles, à des températures supérieures à 600°C. Ceci interdit l'emploi de la couche d'aluminium évoquée précédemment, la température de scellement étant supérieure à la température de l'eutectique silicium/aluminium (570°C) et entraînant une mise en court-circuit de la jonction ou du moins la dégradation de la propriété recherchée.

- 8 -

Ainsi, il est suggéré selon la présente invention, de la façon illustrée en figure 2, de déposer au-dessus de la couche épitaxiée 12 une couche de silicium polycristallin 13 fortement dopée de type P + 13 elle-même revêtue d'une couche ou d'un ensemble de couches de métallisation 14 (par exemple une métallisation titane-argent). La demanderesse a vérifié qu'avec une telle structure, comme dans le cas où une métallisation est directement déposée à la surface de la couche 12, on obtient bien une densité de courant obéissant aux équations (5) et (6) rappelées ci-dessus sans produire d'effet Schottky, c'est-à-dire que l'interface silicium polycristallin/silicium monocristallin agit comme une électrode recombinate tandis que la liaison silicium polycristallin/électrode métallique est ohmique et peu résistante. Un avantage d'une telle structure réside notamment dans le fait que, même si l'on chauffe à des températures relativement élevées, supérieures à 600°C, lors des étapes d'encapsulation, la couche de silicium polycristallin sert de couche tampon et évite une diffusion du métal des couches de métallisations 14 dans la couche 12 de type P constituant l'une des couches de la jonction.

Les figures 4A, B, C et D illustrent certaines étapes préliminaires de fabrication d'une diode à jonction à coefficient de température réglable selon la présente invention. On part d'un substrat 20 de type N⁺ (figure 4A) sur lequel est formée par épitaxie une couche de type P d'épaisseur ajustée 21. La concentration du substrat 20 peut être de l'ordre de 5×10^{18} at/cm³ et celle de la couche P de l'ordre de 10^{15} at/cm³. Comme le montre la figure 4C, on forme ensuite sur la couche de type P une couche de silice 22 dans laquelle sont formées des ouvertures en quadrillage aux emplacements correspondants aux limites des diodes élémentaires que l'on veut fabriquer. A travers ces ouvertures, sont diffusées des impuretés de type N⁺ (comme le substrat) pour former des

- 9 -

murs 24. On masque ensuite la face supérieure des murs par une couche de silice 25 (figure 40) et l'on procède au dépôt 26 de métallisations ou d'une couche de silicium polycristallin suivi de métallisations, après quoi les plaquettes représentées sont découpées selon les traits en pointillés 23 pour fournir des diodes élémentaires. Dans les figures 4A à 4D on n'a pas représenté les opérations effectuées sur la couche inférieure de la plaquette, sur la face du substrat N^+ opposée à la jonction. En fait, on formera généralement sur cette face une couche surdopée de type N^+ avant de réaliser une métallisation, comme cela est bien connu dans la technique de la fabrication des semiconducteurs.

Avec les niveaux de dopage indiqués ci-dessus, la couche de type P peut avoir une épaisseur de l'ordre de 2 à 5 microns. Les métallisations peuvent être formées d'une superposition d'une couche de titane d'une épaisseur de 500 Å suivie d'une couche d'argent évaporée sous vide de l'ordre d'un micron et d'une deuxième couche d'argent déposée par électrolyse d'une épaisseur de l'ordre de 30 microns.

Le tableau ci-dessous permet de comparer les résultats obtenus avec une diode classique, avec une diode classique diffusée à l'or, et avec une diode à électrode recombinante.

	V_F (V)	$\left(\frac{dV}{dT}\right)_F$ (mV/°C)	RZ à 7,5 mA (Ω)
30 Jonction classique type Zener (0,26 x 0,26 mm)	0,77	- 1,4	5
Jonction $N^+N P^+$ diffusion à l'or (0,26 x 0,26 mm)	0,66	- 1,8	7 à 8
35 Jonction N^+P à électrode recombinante (0,20 x 0,20 mm)	0,6	- 2	5

$\ln/W \neq 25$

- 10 -

Les deux premières colonnes du tableau permettent de montrer qu'avec une électrode recombinante selon la présente invention, on peut obtenir une diminution de V_F et une augmentation du facteur de température $(dV/dt)_F$,
5 la diminution de V_F et l'augmentation de $(dV/dt)_F$ pouvant être nettement plus importantes que dans le cas où l'on utilise le procédé connu de diffusion d'or. D'autre part, la dernière colonne indique les valeurs de la résistance d'ensemble de la diode de référence dans le sens conduc-
10 teur (R_Z) pour un courant donné de 7,5 mA. On voit que, alors que la diffusion à l'or fait croître la valeur de cette résistance de perte dans le sens direct, l'utilisation d'une électrode recombinante permet de ne pas modifier la valeur de cette résistance de perte.
15 La présente invention a été illustrée ci-dessus dans le cadre particulier d'une structure silicium N^+ , silicium P, électrode recombinante. On aurait aussi pu envisager une structure de silicium de type P^+ , silicium de type N, électrode recombinante. D'autre part, en figure
20 4, on a donné l'exemple d'une structure de type planar. Une structure de type mesa pourrait également être envisagée.
La présente invention n'est pas limitée aux modes de réalisation qui ont été explicitement décrits ci-dessus; elle en inclut les diverses variantes et généralisations
25 comprises dans le domaine des revendications ci-après.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'ajustement du coefficient de température d'une diode polarisée en direct, caractérisé en ce qu'il consiste à sélectionner la distance entre la jonction et l'électrode de cette diode, cette électrode étant du
5 type à électrode recombinate, c'est-à-dire que ladite distance est nettement inférieure à la valeur de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la couche intermédiaire entre la jonction et l'électrode.

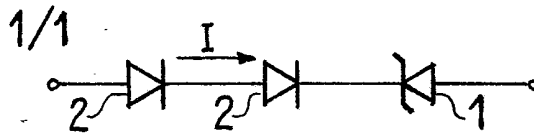
2. Diode de référence compensée en température
10 comprenant une diode Zener en série avec au moins une diode à jonction en direct, caractérisé en ce que l'une au moins de ces diodes en direct est du type à électrode recombinate, c'est-à-dire présente une électrode disposée à une distance choisie de la jonction, nettement inférieure à la valeur de
15 la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la couche semiconductrice intermédiaire comprise entre la jonction et l'électrode.

3. Diode de référence selon la revendication 1 caractérisée en ce que la diode à électrode recombinate
20 comprend au-dessus de la couche semiconductrice intermédiaire une couche de silicium polycristallin dopée selon le même type de conductivité que ladite couche intermédiaire.

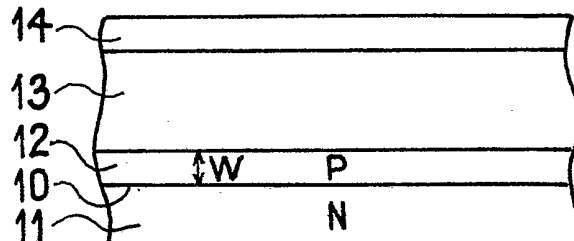
4. Diode de référence selon l'une des revendications 2 ou 3 caractérisée en ce que la couche intermédiaire
25 a un niveau de dopage de l'ordre de 10^{15} at/cm³ et une épaisseur de l'ordre de 2 à 5 microns.

5. Diode de référence selon la revendication 3 caractérisée en ce que la couche de silicium polycristallin est revêtue d'une couche de titane, elle-même revêtue d'une
30 couche d'argent déposée sous vide suivie d'une couche d'argent déposée électrolytiquement.

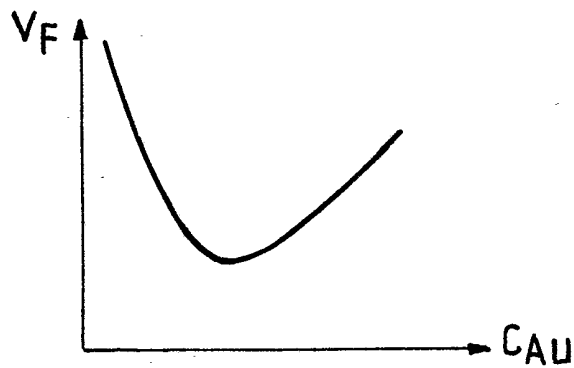
FIG_1



FIG_2



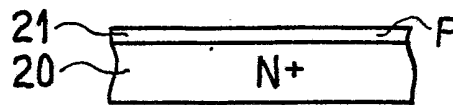
FIG_3



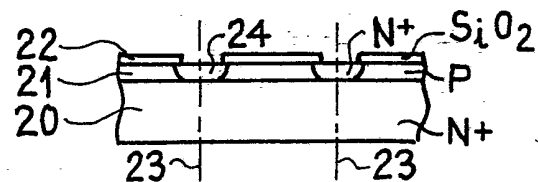
FIG_4-A



FIG_4-B



FIG_4-C



FIG_4-D

