REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE

Revue Phys. Appl. 22 (1987) 473-476

JUILLET 1987, PAGE 473

Classification
Physics Abstracts
79.70

Etude de l'influence de l'épaisseur de la région n pour l'optimisation de la tenue en tension des structures p-n-n⁺

V. Boisson, M. Le Helley et J. P. Chante

Laboratoire d'Electronique, Automatique et Mesures Electriques, UA (CNRS) n° 848 « Génie Electronique », Ecole centrale de Lyon, 36, av. de Collongue, B.P. 163, 69131 Ecully Cedex, France

(Reçu le 11 février 1985, révisé le 13 février 1987, accepté le 3 avril 1987)

Résumé. — Dans cet article, nous présentons l'influence de l'épaisseur de la région n, pour l'optimisation de la tenue en tension des structures planar avec un anneau de champ et en limitation de zone de charge d'espace. Les résultats ont été obtenus par simulation numérique bidimensionnelle.

Abstract. — This paper presents the influence of the n-region thickness for the optimization of the breakdown voltage of punched through planar devices with one field limiting ring. The results have been obtained by two-dimensional numerical simulations.

1. Introduction.

Une technique pour améliorer la tension de claquage des diodes planar est de faire diffuser en même temps que la jonction principale des anneaux concentriques à la périphérie de la jonction. Le comportement de ces structures a été analysé dans la littérature [1-5], mais généralement les études ont été faites pour des dispositifs en non-limitation de zone de charge d'espace ; seuls Yasuda *et al.* [4] donnèrent quelques résultats pour des diodes p-n-n⁺. Le but de cet article est l'étude théorique de l'influence de la profondeur de la zone n sur la distance optimale de l'anneau à la jonction principale, dans le cas d'une structure à un seul anneau. L'étude porte sur une diode haute-tension dont la tension de claquage en volume est de 1 400 V. Le dopage de la région n restera donc constant au cours de l'étude, le seul paramètre variant étant l'épaisseur de cette région. Nos résultats sont différents de ceux de Yasuda *et al.* en ce qui concerne les dispositifs étudiés et l'explication de l'influence de ce paramètre. De plus, nous présenterons la variation de la tension de claquage en fonction de la profondeur de la région n pour des diodes sans anneau et avec un anneau.

2. Structure étudiée.

La structure que nous avons étudiée par simulation est représentée schématiquement à la figure 1. L'anode et l'anneau p⁺ sont diffusés dans un substrat

Fig. 1. — Structure p⁺-n-n⁺.

[p⁺-n-n⁺ structure.]

faiblement dopé n dans lequel une diffusion n⁺ a été réalisée préalablement sur la face arrière. La surface du dispositif est recouverte d'une couche de SiO₂. Dans la simulation, nous prendrons un dopage N_d constant pour la couche n égal à $6,67 \times 10^{13}$ at.cm³ (70 Ω.cm) et un profil de dopage exponentiel pour le substrat n⁺ ($N_d^+ = N_D \exp(0,13 x)$). Les profils de concentration des diffusions sont de type gaussien, $C = C_S \exp -gx'^2$ avec $C_S = 1,7 \times 10^{18}$ at.cm³ et la profondeur des jonctions, X_j , est de 13 μm. L'épaisseur de la couche d'oxyde thermique

est de $1,5 \mu\text{m}$ et sa permittivité relative de 3,9. Les simulations ont été effectuées successivement avec une densité de charges à l'interface Si-SiO₂ égale à zéro puis à $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$.

3. Equations et hypothèses de calcul.

Pour déterminer la distribution de potentiel dans la structure, nous résolvons l'équation de Poisson à 2 dimensions :

$$\Delta\psi(x, y) = -\frac{\rho(x, y)}{\varepsilon}$$

en faisant deux hypothèses simplificatrices :

1) Les densités p et n des porteurs mobiles peuvent être négligées dans la zone de charge d'espace d'une jonction p-n polarisée en inverse. Cette hypothèse impose que l'on se place dans le cas d'une désertion totale de porteurs et d'un régime de faible multiplication.

2) Dans les régions neutres du semiconducteur, le potentiel doit être constant si nous négligeons le faible courant inverse.

Pour cela, la densité de charge volumique $\rho(x, y)$ exprimée par

$$\rho(x, y) = q[N_D(x, y) - N_A(x, y)]$$

est appliquée dans tout le semiconducteur et la position de la limite de la zone désertée est obtenue par itérations en contraignant le potentiel à rester entre 0 V. et la tension appliquée [6]. Une condition basée sur l'hypothèse d'Adler [2] est appliquée sur l'anneau de champ : le potentiel de la partie neutre de l'anneau est pris égal au plus petit potentiel qui apparaît le long de la jonction anneau-substrat tout au long du calcul.

A l'interface, entre deux milieux de permittivités différentes, nous utilisons la loi de Gauss :

$$(\varepsilon_1 \mathbf{E}_1 - \varepsilon_2 \mathbf{E}_2) \cdot \mathbf{n} = \sigma$$

où σ est la densité de charges à l'interface entre le milieu 1 et le milieu 2 respectivement et $\mathbf{n}$ est le vecteur unitaire perpendiculaire à l'interface. A l'intérieur de l'oxyde, nous résolvons l'équation de Laplace.

$$\Delta\psi(x, y) = 0.$$

A partir de la distribution de potentiel dans la structure, nous calculons les lignes de champ et les intégrales d'ionisation le long de celles-ci. Pour déterminer la tension de claquage d'une jonction p⁺-n, nous calculerons l'intégrale d'ionisation des trous [7].

$$I_p = \int_{\text{cathode}}^{\text{anode}} \alpha_p \exp \left[- \int_{\text{cathode}}^x (\alpha_p - \alpha_n) dx' \right] dx$$

avec

$$\alpha_p = A_p \exp - \frac{b_p}{|E|}$$

$$\alpha_n = A_n \exp - \frac{b_n}{|E|}.$$

Nous avons utilisé les coefficients de Van Overstraeten et De Man [7]. La tension de claquage est obtenue lorsque $I_p = 1$.

4. Simulation bidimensionnelle.

L'équation de Poisson bidimensionnelle est résolue par la méthode des différences finies à l'aide d'un logiciel que nous avons réalisé [8-10]. La définition de la structure, l'entrée des paramètres physiques et le maillage de la structure sont effectués de manière interactive par digitalisation avec une console graphique. Un choix de mailles dont les dimensions sont calculées automatiquement en fonction des dimensions de la structure simulée est proposé à l'utilisateur. La structure peut ainsi être discrétisée au moyen de modules ce qui permettra d'affiner ou au contraire de relâcher le maillage localement au cours du processus de calcul. Ceci permet de préciser la distribution de potentiel dans les régions à fort gradient et de minimiser le nombre de points de calcul dans les zones où le potentiel ne varie pratiquement pas. La position ainsi que le nombre de lignes et de colonnes des modules sont définis interactivement, la connexion des modules entre eux est automatique. Un exemple de maillage utilisé pour une structure ayant une épaisseur W_n égale à $70 \mu\text{m}$ est représenté à la figure 2.

La condition à la limite le long de la surface supérieure de l'oxyde est mal connue. Afin de minimiser son influence nous plaçons une couche

Fig. 2. — Maillage utilisé pour les calculs de simulation avec $W_n = 70 \mu\text{m}$.

[Meshed structure for two-dimensional simulation for $W_n = 70 \mu\text{m}$.]

d'air sur l'oxyde afin de reporter cette limite à l'infini. Nous avons utilisé les conditions suivantes. Le potentiel est fixe et égal à 0 V. le long de HAB et égal à V_{cathode} le long de CDEFG. Suivant BC et HG, nous prendrons respectivement les conditions de Neumann $\partial \Psi / \partial y = 0$ et $\partial \Psi / \partial x = 0$. La couche d'air modélisée a une épaisseur de 20 μm , valeur assurant l'indépendance des résultats vis-à-vis de la condition aux limites le long de HG et ce, quelle que soit la valeur des paramètres physiques de la structure.

5. Résultats.

Pour montrer l'influence de l'épaisseur W_n de la couche n pour l'optimisation de structures planar avec un anneau, nous avons étudié la variation de la distance optimale d de l'anneau et le rapport tension de claquage sur tension de volume pour différentes épaisseurs W_n de la couche n.

Pour une structure ayant une épaisseur W_n donnée, nous recherchons la distance optimale d_{opt} , distance pour laquelle nous avons claquage simultanément sur la jonction principale et sur l'anneau. Le calcul est effectué par approximations successives en faisant varier la tension inverse appliquée et la distance anneau-anode de façon à obtenir les intégrales d'ionisation à la courbure maximale de la jonction principale et de l'anneau égales à 1. Notre méthode de recherche de la distance optimale est donc différente de celle utilisée par Yasuda *et al.* [4] qui ont gardé la même tension inverse pour déterminer la distance optimale quelle que soit l'épaisseur du substrat. Il est évident que nous devons avoir le même critère de claquage pour toutes les structures et donc que la tension de claquage dépend de

l'épaisseur W_n . Si nous gardons la même tension inverse, l'erreur faite sur la distance optimale peut être très importante.

La variation de la distance optimale en fonction de la profondeur du substrat n est représentée figure 3. La courbe montre que la distance d_{opt} est une fonction croissante de W_n pour les faibles valeurs de W_n et qu'elle atteint une valeur limite à partir de W_{n1} . Aucune explication n'a encore été donnée pour cette variation. Seuls Yasuda *et al.* [4] ont montré que pour une valeur de tension V_R constante, un dopage de $8 \times 10^{13}/\text{cm}^3$, une profondeur de jonction de 50 μm , la distance est de 61 μm pour W_n égal à 90 μm et de 64 μm pour W_n compris entre 120 et 150 μm . L'explication est que, d'après l'expression du champ électrique à la jonction sous l'anode,

$$E_p = q/2 \varepsilon \varepsilon_0 N W_n + V_R/W_n,$$

la variation du champ pour W_n variant de 120 μm à 150 μm est plus faible que celle calculée lorsque W_n est compris entre 90 μm et $W_n = 120 \mu\text{m}$. Cette explication ne peut convenir car la distance optimale ne peut être déterminée qu'au claquage et donc lorsque le champ est égal au champ critique, qui est constant pour un dopage donné et donc indépendant de la profondeur W_n de la couche. La variation du champ n'intervient donc pas et nous devons prendre toujours $1 - 1/M = 1$ comme critère de claquage.

L'augmentation de d_{opt} en fonction de W_n , figure 3, peut s'expliquer de la manière suivante. L'extension latérale de la zone de charge d'espace va croître avec l'extension en volume, c'est-à-dire W_n , et la distance optimale de l'anneau va donc augmenter également. La variation n'est pas linéaire car pour W_n faible, l'extension latérale est proche de l'extension en volume [11] et la distance optimale va suivre cette variation. Pour les grandes profondeurs de la couche n, nous sommes dans le cas où l'extension latérale est beaucoup plus faible que l'extension en volume et par conséquent, la distance optimale croît moins vite. Lorsque W_n dépasse $W_{n1} = 110 \mu\text{m}$, nous ne sommes plus en limitation de zone de charge d'espace et l'extension latérale ne dépend plus de l'épaisseur du substrat ; il en résulte que la distance optimale est constante. Nous voyons cependant que dans le domaine usuel d'application ($W_n > 50 \mu\text{m}$) la distance optimale varie très peu (au maximum de 1 μm).

Les courbes de la figure 4 montrent le rapport de tension BV/BV_{vol} en fonction de la profondeur W_n pour une jonction planar seule et pour une jonction ayant un anneau optimisé. Nous appelons BV la tension de claquage de la structure et BV_{vol} la tension de claquage de la structure identique plane et idéale en limitation de zone de charge d'espace. La distance optimale est la distance obtenue à la figure 3. A partir de ces courbes, nous

Fig. 3. — Variation de la distance optimale en fonction de l'épaisseur W_n .

[Optimized distance versus the width W_n of the n region.]

Fig. 4. — Variation de la tenue en tension normalisée à la tension de claquage en volume en fonction de l'épaisseur W_n .

[Variation of the normalized breakdown voltage BV/BV_{vol} versus W_n .]

voyons que les structures en forte limitation de zone de charge d'espace, c'est-à-dire ayant des profondeurs W_n faibles donnent des valeurs de tensions proches de la valeur de tension de volume car elles sont moins sensibles à la courbure des jonctions. Il faut toutefois bien noter que BV_{vol} diminue avec

W_n puisque le dopage de la couche N est gardé constant. D'autre part, l'écart entre la courbe correspondant à une structure avec un anneau et celle de la structure planar augmente lorsque W_n augmente, donc l'anneau est plus efficace pour les profondeurs de substrat grandes. Pour augmenter le rapport BV/BV_{vol} dans le cas de structures en non-limitation de zone de charge d'espace ou ayant des profondeurs de couches n importantes nous serons amenés à mettre plusieurs anneaux.

6. Conclusion.

Dans cet article, nous avons étudié la tenue en tension de structures $p-n-n^+$ en limitation de zone de charge d'espace. Nous avons montré l'influence de la profondeur de la région n sur la distance optimale des structures avec un anneau de champ et sur la tension de claquage. Ce paramètre doit être pris en compte pour l'optimisation des dispositifs avec anneaux de champ au même titre que la profondeur des jonctions, les dopages et les charges dans les oxydes.

Remerciements.

Nous sommes reconnaissants à MM. Collumeau, Quirin et Lhorte, de la Société Thomson-CSF, Aix-en-Provence, pour leur aide et la réalisation des dispositifs.

Bibliographie

- [1] KAO, Y. C. and WOLLEY, E. D., *Proc. IEEE* **55** (1967) 1409-1414.
- [2] ADLER, M. S., TEMPLE, V. A. K., FERRO, A. P., RUSTAY, R. C., *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-24** (1977) 107-112.
- [3] WHIGHT, K. P., COE, D. J., TREE, R. J., VEVERIS, A. J., *Proc. NASECODE III, Conf.* (1983) p. 299-304.
- [4] YASUDA, S., YONEZAWA, T., *Solid-State Electron.* **25** (1982) 423-427.
- [5] BRIEGER, K. P., GERLACH, W., PELKA, J., *Solid-State Electron.* **26** (1983) 739-745.
- [6] ADLER, M. S., TEMPLE, V. A. K., RUSTAY, R. C., *Solid-State Electron.* **25** (1982) 1179-1186.
- [7] VAN OVERSTRAETEN, R., DE MAN, H., *Solid-State Electron.* **13** (1970) 583-608.
- [8] BOISSON, V., CHANTE, J. P., LE HELLEY, M., ROUAULT, G., *Proc. NASECODE III, Conf.* p. 91-95, (Boole Press, Dublin) 1983.
- [9] BOISSON, V., LE HELLEY, M., CHANTE, J. P., GAFIOT, F., *Actes Colloque MODELEC, La Grande Motte, France*, (1984) p. 49-66.
- [10] BOISSON V., LE HELLEY, M., CHANTE, J. P., *COMPEL*, **4** (Boole Press, Dublin) 79-89.
- [11] ANANTHARAM, V., BHAT, K. N., *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-27** 5 (1980) 939-945.