

La résistivité d'une diode au silicium utilisée comme détecteur de particules

Saadoune Achour^a, Dehimi Lakhdar^b

^aLaboratoire des Matériaux semi-conducteurs et Métalliques, B.P.145, Université de Biskra, Biskra 07000, Alegria

^bFaculté des Sciences, Université de Batna 05000, Algeria

Correspondance : a.saadoune@univ-biskra.dz

Résumé

La résistivité (ρ) d'une structure p^+n^+ au silicium, utilisée comme détecteur de particules travaillant dans un environnement hostile et soumis à de fortes fluences, est simulé numériquement en utilisant la méthode des différences finies. Lorsque cette jonction est soumise à des fortes radiations, des défauts structuraux sont créés qui ont des effets indésirables et peuvent dégrader les performances des détecteurs. Ces défauts se manifestent comme des pièges accepteurs et des centres de génération-recombinaison (g-r).

La résistivité augmente avec l'augmentation de la densité du piège accepteur pour atteindre la résistivité intrinsèque (maximale).

MOTS-CLÉS : Diode, Silicium, Radiation, semi-conducteurs.

1. Introduction

Les perturbations créées par radiation du réseau cristallin du semi-conducteur se manifestent par la présence des niveaux d'énergie dans la bande interdite. Quand ils sont proches du milieu de la bande interdite, ces niveaux sont appelés pièges profonds. Ils ont une incidence directe sur les propriétés électriques du semi-conducteur et des dispositifs associés. En effet, les pièges modifient de façon plus ou moins importante les propriétés électriques des semi-conducteurs.

Parmi ces effets l'inversion du type du semi-conducteur [1, 2], augmentation de sa résistivité [3, 4]. Cette dernière peut atteindre une valeur maximale qui est la résistivité intrinsèque. La connaissance et/ou la prédiction de ces effets est très utile dans le domaine de la physique hautement énergétique (high energy physics)...

Plusieurs techniques ont été développées pour l'analyse de ces défauts [5, 6].

Dans ce travail les dommages causés par les radiations sont étudiés au moyen de pièges accepteurs et par des centres de génération-recombinaison.

Nous supposons les centres g-r électriquement neutres et les autres niveaux de pièges peuvent être neutres ou chargés suivant leurs positions par rapport au niveau de Fermi.

Le présent travail est la caractérisation des propriétés électriques après l'irradiation en étudiant la résistivité (ρ) et le coefficient de Hall, en fonction des fluences de particules, nous les avons modélisés à l'aide d'une structure typique de diode, nous avons expliqué les processus physiques se passant en celle-ci et nous avons discuté les implications (résultats).

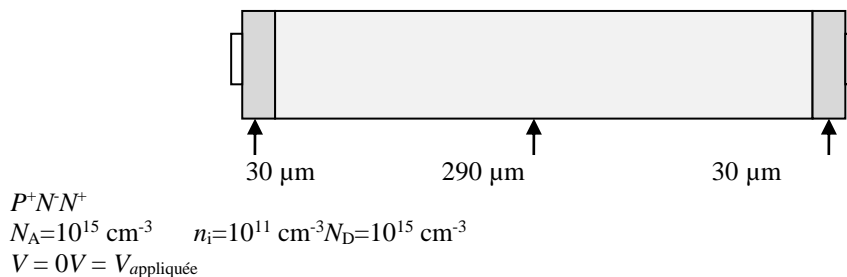
Ces caractéristiques permettent d'extraire la densité de fluence qui correspond l'inversion de type et la résistivité maximale.

2. Modélisation numérique

La modélisation a été effectuée en se basant sur la solution numérique développée par KURATA [7]. Le programme de simulation consiste à résoudre les trois équations de base simultanément : l'équation de Poisson et les deux équations de continuité d'une structure $p^+n^-n^+$ au silicium irradié, on utilise la méthode des différences finies en considérant seulement le cas unidimensionnel.

Les variables calculées sont la densité d'électron n , la densité de trou p , et le potentiel V , à chaque point de maille de la structure. Les valeurs initiales de n et de p sont simplement les densités correspondantes des dopages, c'est-à-dire dans la région-p $p=N_A$ et $n=n_i^2/N_A$ tandis que dans la région-n $n=N_D$ et $p=n_i^2/N_D$. Les états de frontière sont : à la fin du contact P^+ : $p=N_A$, $n=n_i^2/N_A$ et $V = 0$ (la tension de référence). A la fin du contact n^+ : $n=N_D$, $p=n_i^2/N_D$ et $V=V$ la tension appliquée. N_A et N_D sont les densités d'accepteur et les densités de donneur et n_i la densité intrinsèque de porteur. Les autres variables peuvent être calculées une fois que n , p et V sont connus. Ces trois variables principales permettent de calculer les caractéristiques, telles que, le champ électrique, la capacité, la résistivité afin d'extraire les paramètres essentielles.

L'analyse a été faite pour une structure de silicium $p^+n^-n^+$:



L'application des conditions de l'équilibre thermodynamique $np = n_i^2$ aux limites du dispositif ($x = 0$ et $x = d$) signifie que les contacts sont des contacts ohmiques idéals. Ces conditions rendent le calcul numérique plus simple et plus rapide. Seulement, pour les appliquer, il faut s'assurer que la zone de charge d'espace, résultante dans les côtés p^+ et n^+ des jonctions p^+n^- et n^-n^+ respectivement, ne s'étend pas jusqu'aux limites $x = 0$ et $x = d$, et ce qui est bien assuré par un dopage élevé des régions p^+ et n^+ [7].

La concentration en porteur intrinsèque à la température ambiante, n_i , est $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Le temps de relaxation d'électrique, τ_D , à la température ambiante est au sujet de 10^{-9} s ainsi le critère de relaxation est atteint pour une valeur de la densité de centre g-r de $N_{g-r} \sim 10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ en utilisant $\tau^{-1} = \sigma v_{th} N_{g-r}$, où v_{th} est la vitesse thermique de porteur, et une valeur typique de 10^{14} cm^2 est employée pour la section transversale, $S = 1 \text{ cm}^2$ et les centres sont au milieu de gap.

La résistivité électrique et le coefficient de Hall d'une structure (à base d'un semi-conducteur) sont directement liés aux densités des électrons et des trous.

a) La résistivité électrique :

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n(x) + \mu_p p(x))} \quad (3)$$

Avec :

$$\rho_{\max} = \frac{1}{2q\sqrt{\mu_n \cdot \mu_p} \cdot n_i} \quad (4)$$

b) le coefficient de Hall

$$R_H = \frac{p(x) - b^2 n(x)}{q(p(x) + bn(x))^2} \text{ Où } b = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (5)$$

3. Résultats et discussion

Expérimental la résistivité et le coefficient de Hall en fonction de fluence d'une structure au silicium de type n, montrent un pic pour la résistivité et un changement de signe pour le coefficient de Hall [8].

Les résultats de simulation Figs.1.a et b représentent la résistivité et le coefficient de Hall, en présence de faible densité de centre de g-r, en fonction de la densité de piège accepteur peu profond située à un niveau de $E_{tA} - E_V = 0.52\text{eV}$ dans le gap d'énergie par rapport à la bande de valence, et pour différent densité de piège accepteur (N_{tA}). La densité de centre de génération-recombinaison (N_{g-r}) est de l'ordre de 10^{11}cm^{-3} (matériau de temps de vie).

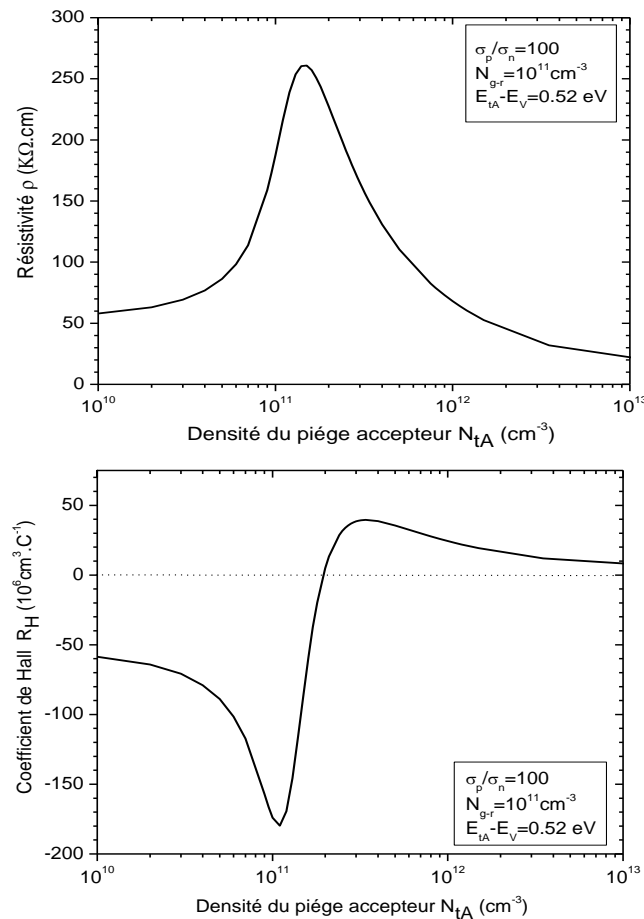


Fig. 1 : Résultats de simulation a) la résistivité et b) le coefficient de Hall. En fonction de la densité du piège accepteur N_{tA} .

Dans notre travail de simulation, on a montré que la résistivité augmente avec l'augmentation de la densité du piège accepteur ceci est due à la compensation des donneurs superficiels par les pièges accepteurs. Elle atteint une valeur maximale quand la compensation totale est satisfaite. Après que la compensation est satisfaite la résistivité commence à diminuer avec l'augmentation de la densité du piège accepteur. Cette diminution indique que le matériau se convertit et change de type et devient de type p.

De même le coefficient de Hall augmente en valeur absolue avec l'augmentation de la densité du piège accepteur jusqu'à au point où on remarque un changement de signe de négative au positive. Ce point correspond au point maximal dans les caractéristiques de la résistivité, indiquant l'inversion de type.

Le point correspond au pic dans la résistivité et que le point de changement de signe pour le coefficient de Hall ne se produit pas exactement à la même fluence (densité du piège accepteur N_{tA}).

Ceci est montré analytiquement est confirmé l'accord de nos résultats de simulation avec le résultat expérimental et de modélisation qui montrent aussi ce décalage [8].

Pour expliquer bien les deux phénomènes précédents ; il est nécessaire de représenter les distributions spatiales de n et p et l'illustration de niveau de Fermi en fonction de la densité du piège accepteur (Fig. 2).

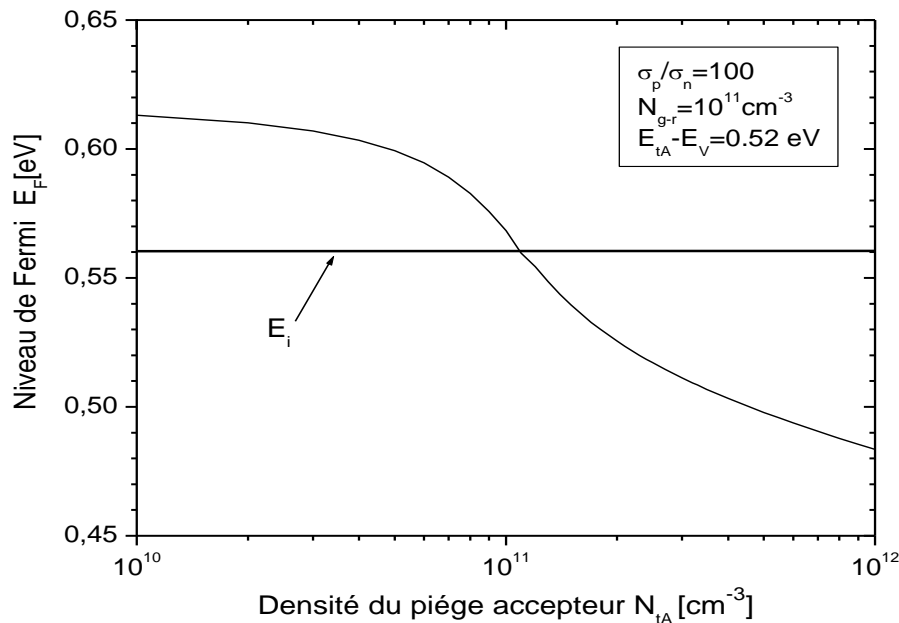


Fig.2 : Niveau de Fermi en fonction de densité du piège accepteur N_{tA} avec un niveau d'énergie de $E_{tA} - E_V = 0.52 eV$.

La Fig.2 montre que le niveau de Fermi E_F est au-dessus de niveau intrinsèque E_i pour les faibles densités du piège accepteur N_{tA} , le niveau de Fermi est égale le niveau intrinsèque ($E_F = E_i = 1.2 \times 10^{11} cm^{-3}$) c'est le point d'inversion de type. Après cette valeur de densité N_{tA} la structure devient plus de type p.

4. Conclusion

L'étude présentée dans ce travail est la résistivité de la diode p^+n^+ au silicium utilise comme détecteur de particules.

Les radiations créent des pièges et des centres de g-r. Ceci peut entraîner un changement dans la résistivité maximale qui montre le point d'inversion du type de semi-conducteur si les pièges créent sont des accepteurs.

La résistivité augmente avec l'augmentation de la densité du piège accepteur ceci est due à la compensation des donneurs superficiels par les pièges accepteurs. Elle atteint une valeur maximale (proche de la résistivité maximale de silicium donnée par $3.19 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$) quand la compensation totale est satisfaite. Après que la compensation est satisfaite la résistivité commence à diminuer avec l'augmentation de la densité du piège accepteur. Cette diminution indique que le matériau se convertit et change de type et devient de type p.

Les résultats de simulation numérique obtenus sont conduisant à expliquer un phénomène observé expérimentalement. Ceci conduit à la conception des détecteurs plus résistants aux radiations.

References

- [1] Bates S.J., Munday D.J., and all. (1994) *Recent results of radiation damage studies in silicon*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A. 344, pp.228-236.
- [2] Patrick R., (1999) *Etude des caractéristiques électriques de détecteurs au silicium dans les conditions d'irradiation du LHD*, thèse PhD, Université de Montréal.
- [3] McPherson M. (1997), *Irradiated Silicon Detectors as Relaxation Devices*, PhD Thesis, Lancaster University.
- [4] Croitoru N, Dahan R, and all. (1998) *Study of Resistivity and Majority Carrier Concentration of Silicon Damaged by Neutron Irradiation*. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 61, pp.456-463
- [5] Lang D.V, (1974) *Fast capacitance transient apparatus: application to ZnO and O centers in GaP p-n junctions*, J. Appl. Phys. Vol. 45, N° 7, pp.3014-3022.
- [6] Lang D.V, (1974) *Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors*, J. Appl. Phys. Vol. 45, N° 7, pp.3023-3032.
- [7] Kurata M. (1982) *Numerical Analysis for Semiconductor Devices*, D.C. Heath and Company, Canada.
- [8] B. McEvoy, "Defect kinetics in silicon detector material for applications at the Large Hadron Collider", PhD thesis, (1996) Imperial College, London.
- [9] Biggeri U, Borchini E, Bruzzia M, Lazanub S, Li Z. *CV and Hall effect analysis on neutron irradiated silicon detectors*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 388, (1997) pp.330-334