



UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN – TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA MATIÈRE
ANNEXE SOUGUEUR

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique & Energies Renouvelables

Par :
Mlle. LAROUBI Amel

THÈME

*Quantification des paramètres caractéristiques d'une
homojonction P-N : Appliquer à l'échantillon
au silicium diode 1N5227*

Soutenue publiquement le :

13/ 10/2020

Devant le Jury composé de:

| | | |
|---------------------------|----------------------|-----------|
| Mr. Bachir KHAROOUBI | Université de Tiaret | Président |
| Mr. Abelmounaim BELFEDHAL | Université de Tiaret | Examineur |
| Mr. Khaled MAHI | Université de Tiaret | Encadreur |

Remerciements

La réalisation de ce mémoire de fin d'étude à été possible grâce à plusieurs personne à qui je voudrais présenter et témoigner toute ma gratitude

Je voudrais tout d'abord présenter mes chers remerciements à monsieur le président pour sa patience et sa disponibilité.

Comme je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance à monsieur l'examineur du juré lire et me dirige encore.

Un grand mercier à monsieur l'encadreur pour ses conseils et qui a grandement facilité mon travail et qui m'apport son soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Je ne saurais terminer sans remercier du font du cœur mes adorables sœur et mes très chère frères qui m'ont toujours soutenu et apporté l'équilibre nécessaire dans ma vie, j'exprime spécialement ma profonde gratitude à mes chères parents pour leur soutien que les mots ne souriaient exprimer.

Je voudrais remercier tous mes amis.

La liste est longue.....Merci à tous

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ❖ **mes très chères parents, que Dieu me garde et que vie nous donne temps pour les remercier**
- ❖ **Mes très chères frères et mes adorable sœur**
- ❖ **A tous mes fidèle amis**
- ❖ **A tous ma famille**

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 01 |
| | |
| CHAPITRE I: Généralité sur les matériaux semi conducteur | |
| | |
| I-1 Introduction | 02 |
| I-2 Les matériaux | 03 |
| I-3 Semi conducteur | 04 |
| I-3-1 Semi conducteur intrinsèque | 04 |
| I-3-2 Semi conducteur extrinsèque | 05 |
| I-4 Description de homojonction | 06 |
| I-4-1 Zone de charge d'espace | 07 |
| I-4-2 Diagramme énergétique de homojonction | 08 |
| I-5 Mécanisme de transport | 09 |
| I-5-1 Mécanisme de diffusion | 09 |
| I-5-2 Mécanisme de génération et recombinaison | 11 |
| I-5-2-a Mécanisme de génération | 12 |
| I-5-2-b Mécanisme de recombinaison | 12 |
| I-6 Conclusion | 13 |
| Références | 14 |

CHAPITRE II: Méthode proposée pour l'extraction des paramètres d'une jonction p-n

| | |
|---|-----------|
| | 15 |
| II-1 Introduction | 18 |
| II-2 Caractéristique I-V d'une structure à jonction p-n | 19 |
| II-2-1 Caractéristique courant -tension idéale | 19 |
| II-2-2 Caractéristique courant-tension réel | 20 |
| II-3 Méthode proposée pour calculer la résistance de shunt | 21 |
| II-3-1 Courant de fuite | 21 |
| II-3-2 Description de la méthode proposée | 23 |
| II-3-3 Test et l'effet des différents paramètres sur la méthode | 25 |
| II-3-3-a Effet de coefficient d'idéalité sur la méthode proposée | 26 |
| II-3-3-b Effet du courant de saturation sur la méthode proposée | 29 |
| II-4 Conclusion | 32 |
| Références | 33 |

CHAPITRE III: Application à un échantillon au silicium diode 1N5227

| | |
|---|-----------|
| III-1 Introduction | 36 |
| III-2 Propriétés cristallographiques de Silicium | 37 |
| III-2-1 Structure cristallin du silicium | 37 |
| III-2-2 Structure de bande d'énergie de silicium | 38 |

| | |
|--|-----------|
| III-3 Description des équipements de mesure et du montage | 41 |
| III-3-1 Equipements utilisés | 41 |
| III-3-2 Description du montage | 41 |
| III-4 Caractéristique I-V expérimentale du Silicium | 43 |
| III-4-1 Pour le système Silicium+Ro | 43 |
| III-4-2 Pour le système Silicium+Ro+Rsh | 43 |
| III-5 Résultat et discussion | 45 |
| III-5-1 Détermination de la résistance de fuite Ro | 45 |
| III-5-2 Correction de la courbe I-V du silicium | 47 |
| III-5-3 Modélisation des mécanismes de transport | 47 |
| III-6 Conclusion | 49 |
| Références | 50 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE | 52 |

Liste des figures du chapitre I

- Figure I-1: Diagramme de bande d'énergie pour les trois grande familles des matériaux.*
- Figure I-2: Distribution des électron et des trou dans un semi-conducteur intrinsèque.*
- Figure I-3: Représentation schématique des diagramme d'énergie dans les cas d'un semi -conducteur intrinsèque et extrinsèque.*
- Figure I-4: Représentation simplifiée de la formation d'une jonction p-n.*
- Figure I-5: Jonction p-n sous polarisation extérieure*
(a) Equilibre,
(b) polarisation direct,
(c) polarisation inverse.
- Figure I-6: Diagramme de bande d'énergie à l'équilibre pour homojonction p-n.*

Liste des figures du chapitre II

- Figure II-1: Représentation linéaire de la courbe I-V idéal d'une structure à jonction p-n.*
- Figure II-2: Représentation semi-logarithmique de la courbe I-V idéale d'une structure à jonction p-n.*
- Figure II-3: Représentation semi-logarithmique de la courbe I-V réelle d'une structure à jonction p-n.*
- Figure II-4: Schéma d'une structure à jonction p-n réelle aux faible polarisation.*
- Figure II-5: Schéma explicatif du principe de la méthode proposée pour déterminer résistance de fuite.*
- Figure II-6: Influence de la résistance shunt sur les courant aux faibles polarisation directes.*
- Figure II-7: Modélisation d'une diode avec $I_s=10^{-10} A, n=1, T=300K$.*
- Figure II-8: Modélisation d'une diode avec $I_s=10^{-10} A, n=1.5, T=300K$.*
- Figure II-9 : Modélisation d'une diode avec $I_s=10^{-10} A, n=2, T=300K$.*
- Figure II-10: Modélisation d'une diode avec $I_s=10^{-9} A, n=1.5, T=300K$.*
- Figure II-11: Modélisation d'une diode avec $I_s=10^{-12} A, n=1.5, T=300K$.*

Liste des tableaux Chapitre II

Tableau II-1: Les valeurs du courant de saturation et du coefficient d'idéalité utilisé pour cette simulation.

Tableau II-2: Les valeurs de la résistance shunt extraites à partir des figures II-7, II-8, et II-9, pour différentes valeurs du coefficient d'idéalité.

Tableau II-3: Les valeur de la résistance de shunt extraites à partir des figure II-8, II-10, et II-11, pour différentes valeurs du courant de saturation.

Liste des figures du chapitre III

- Figure III-1: Structure cristalline du silicium.*
- Figure III-2: Représentation schématique en deux dimensions du silicium.*
- Figure III-3: Représentation de la structure de bandes d'énergie du silicium (Si).*
- Figure III-4: Schéma du montage utilisé pour le prélèvement des caractéristiques I-V directes de l'échantillon 1N5227, à température ambiante.*
- Figure III-5: Caractéristique expérimental courant-tension du système 1N5227+5M Ω*
- Figure III-6: Caractéristique expérimental courant tension du système 1N5227+5M Ω , en échelle semi-logarithmique.*
- Figure III-7: Caractéristique expérimental courant tension du système 1N5227+5M Ω , en échelle logarithmique-logarithmique.*
- Figure III-8: Variations du coutant sur la tension appliqué en fonction de l'inverse de la résistance.*
- Figure III-9: Variation de la résistance R_{sh} en fonction de la tension, en échelle log-log.*
- Figure III-10: Caractéristiques courant-tension en échelle semi-logarithmique corrigé et non corrigé de l'échantillon 1N5227.*
- Figure III-11: Caractéristiques I-V directe théorique et expérimentale pour Si.
a – sans correction,
b – avec correction.*

Liste des tableaux Chapitre III

*Tableau III-1: Paramètres de la structure étudiée (silicium),
à température ambiante.*

Introduction Générale

Introduction Générale

Les dispositifs électroniques présentent différents types de structures, mais quelque soit le dessin d'une structure, l'élément de base est la jonction p-n. Les mécanismes de transport de charge dans ces différentes configurations doivent être effectués dans les meilleures conditions possibles pour permettre une compréhension correcte de la phénoménologie de ces dispositifs.

Parmi les techniques de caractérisation électrique des composants, les mesures courants tensions à l'obscurité ou sous éclairage (cas des photodiodes ou cellules photovoltaïques) sont largement utilisées puisqu'elles rendent compte des performances du composant.

Dans le chapitre I, nous donnerons une brève description des dispositifs à jonction p-n et de son principe de fonctionnement. Les deux mécanismes classiques de transport de charge dans les dispositifs à jonction p-n, à savoir le mécanisme de diffusion et le mécanisme de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace, y sont également décrit.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous proposons une technique simple basée sur la correction des données expérimentales courant-tension. Cette technique est non seulement applicable quelque soit le composant étudié, mais fournit des résultats intéressants là où les autres techniques ne sont pas applicables (cas des basses polarisations).

Nous terminerons ce travail par l'application de notre méthode à un échantillon de l'industrie présentant des courants faibles, pour tester les limites et vérifier la fiabilité de cette technique simple.

Chapitre 1 :
Généralités sur les structures semi-
conductrices a jonction p-n

I-1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions fondamentales sur les matériaux semi-conducteurs en général et les structures semi-conductrices, en particulier. Les dispositifs semi-conducteurs à jonction p-n fait encore l'objet de travaux de modélisations analytiques [1-11] et numériques [12-26] afin de bien comprendre le transport des charges dans ce type de structure.

Dans la première partie nous décrirons brièvement la structure à jonctions p-n, à l'équilibre. Les processus de transport des porteurs de charges dans une structure à jonctions p-n sont traités dans la deuxième partie. Nous y décrirons les différents mécanismes de transport ainsi que les lois qui les régissent. Il s'agit du mécanisme de diffusion due aux porteurs minoritaires, du mécanisme de génération-recombinaison de l'effet tunnel bande à bande et de l'effet tunnel assisté par centres pièges.

I-2 Les matériaux

Les électrons dans les atomes prennent des niveaux d'énergie discrets (Théorie de Niels Bohr en 1914). Lorsque, les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux discrets de chaque atome se différencient pour former des bandes continues d'énergie. Cette structure électronique de bandes nous permet de classer les matériaux en trois grandes familles : les métaux, les isolants et les semi-conducteurs.

Pour un métal, tous les niveaux d'énergies supérieurs au niveau de Fermi étant autorisés et la quasi totalité de ces niveaux étant inoccupés à température ambiante, toutes les longueurs d'onde peuvent être alors absorbées, mais cette énergie absorbée est convertie en phonons (thermalisation des électrons).

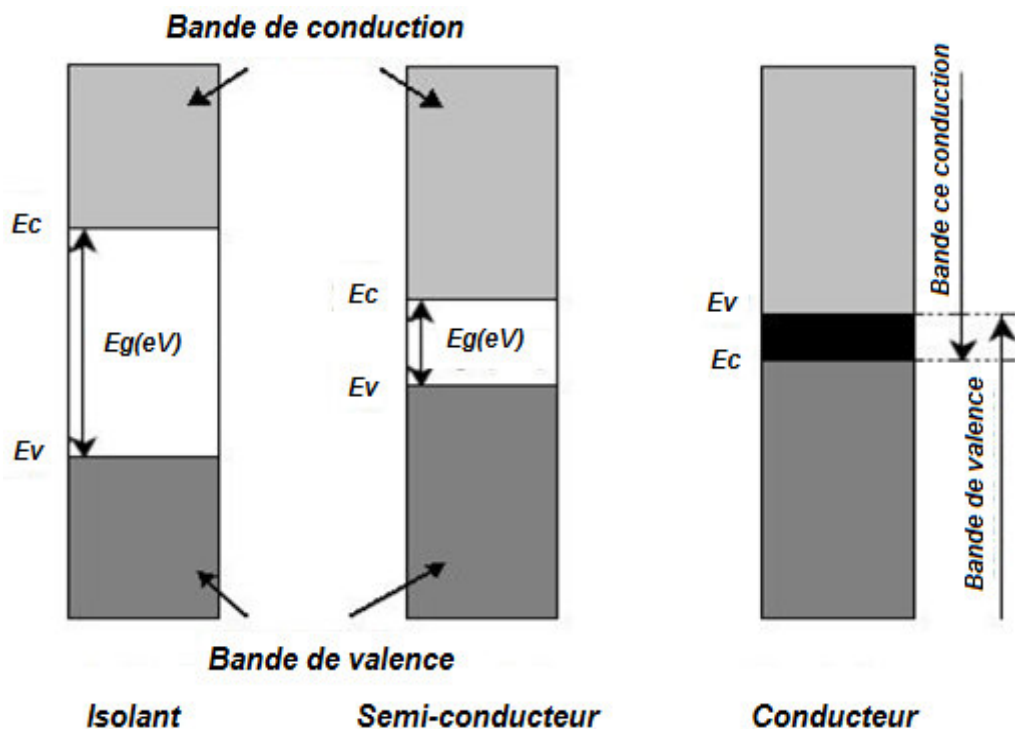


Figure I-1: Diagrammes de bandes d'énergie pour les trois grandes familles des matériaux.

Dans un isolant, le rayonnement solaire ne peut être absorbé par ce dernier car son gap est plus grand que les énergies de ce spectre. Par contre, un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant. A titre d'exemple, le silicium cristallin (Si) a un gap de 1.12 eV, le germanium (Ge) de 0.7 eV, l'arsenic de gallium (GaAs) de 1.42 eV. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs.

I-3 Semi-conducteur

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps solides dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des isolants. Certains isolants deviennent conducteurs à plus haute température, en particulier s'ils contiennent des impuretés, des défauts cristallins ou des défauts de stœchiométrie, ce sont par définition les semi-conducteurs. Ils trouvent de nombreuses applications en électronique, optoélectronique et en informatique en entrant dans la fabrication de diodes, de transistors, de photoconductances et de photodiodes.

Un semi-conducteur est donc un cristal qui est isolant s'il est pur et au zéro absolu, et dont la conductivité électrique est due à l'agitation thermique, à des impuretés ou à différents types de défauts.

I-3-1 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dite intrinsèque lorsque sa structure cristallin ne présente ni défaut chimique ni structural (semi-conducteur pur).

A la température absolue ($T = 0 K$) et pour un semi-conducteur non dégénéré, le niveau de fermi est situé dans la bande interdite, la bande de valence est saturée et la bande de conduction est vide, lorsque la température augmente, les électrons sont excités dans la bande de conduction ils laissent dans la bande de valence des états inoccupés qui dite les trous (Figure I-2).

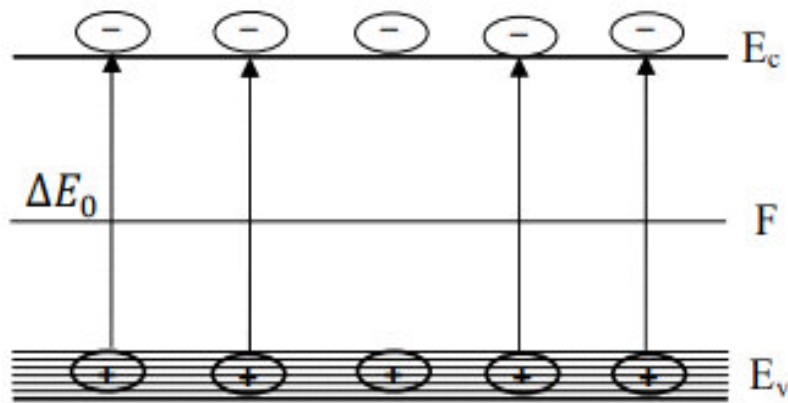


Figure I-2: Distribution des électrons et des trous dans un semi-conducteur intrinsèque.

I-3-2 Semi-conducteur extrinsèque

Une semi-conduction extrinsèque est obtenue grâce à l'introduction des atomes spécifiques (atome accepteur ou atome donneur) par dopage, ce qui augmente de beaucoup la conductivité des semi-conducteurs intrinsèques.

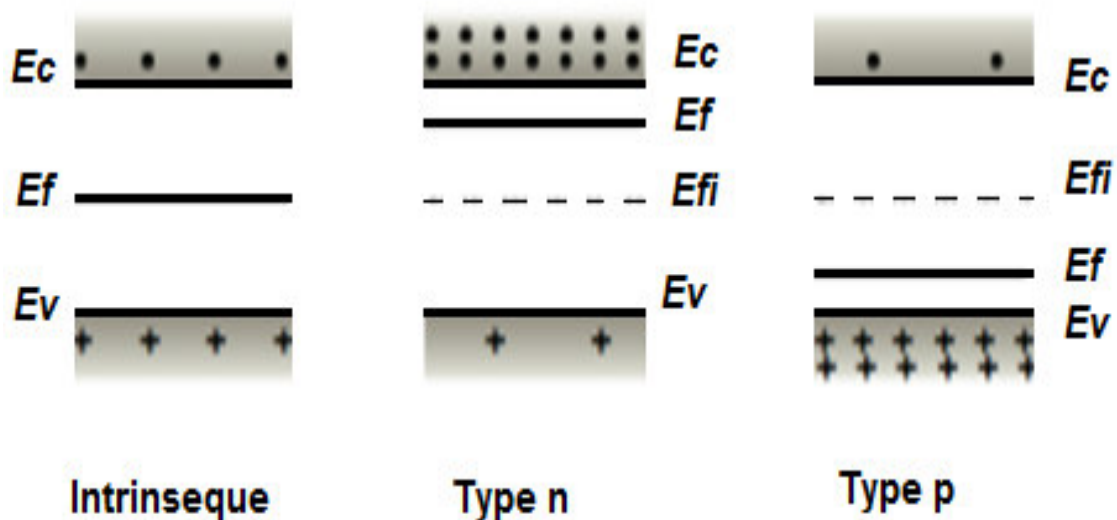


Figure I-3 : Représentation schématique des diagrammes d'énergie dans les cas d'un semi-conducteurs intrinsèque, dopé n et dopé p.

Les porteurs libres introduisent une bande d'énergie supplémentaire entre la bande de conduction et la bande de valence (bande interdite) du semi-conducteur (à un niveau accepteur ou donneur selon le type de dopage p ou n). Un semi-conducteur extrinsèque est dite de type n si la densité des donneurs (N_d) est supérieure à la densité des accepteur (N_a), dans le cas inverse, le semi-conducteur est de type p.

I-4 Description de homojonction

La jonction p-n est constituée de deux zones p et n, lorsque en met en contact deux région P et N, les électrons de côté n diffusent vers le côté P et des trous de côté p vers diffusent de cotée n, une fois l'équilibre atteint, l'interface devient le siège d'un champ électrique E intense et d'une barrière de potentiel électrique V_0 .

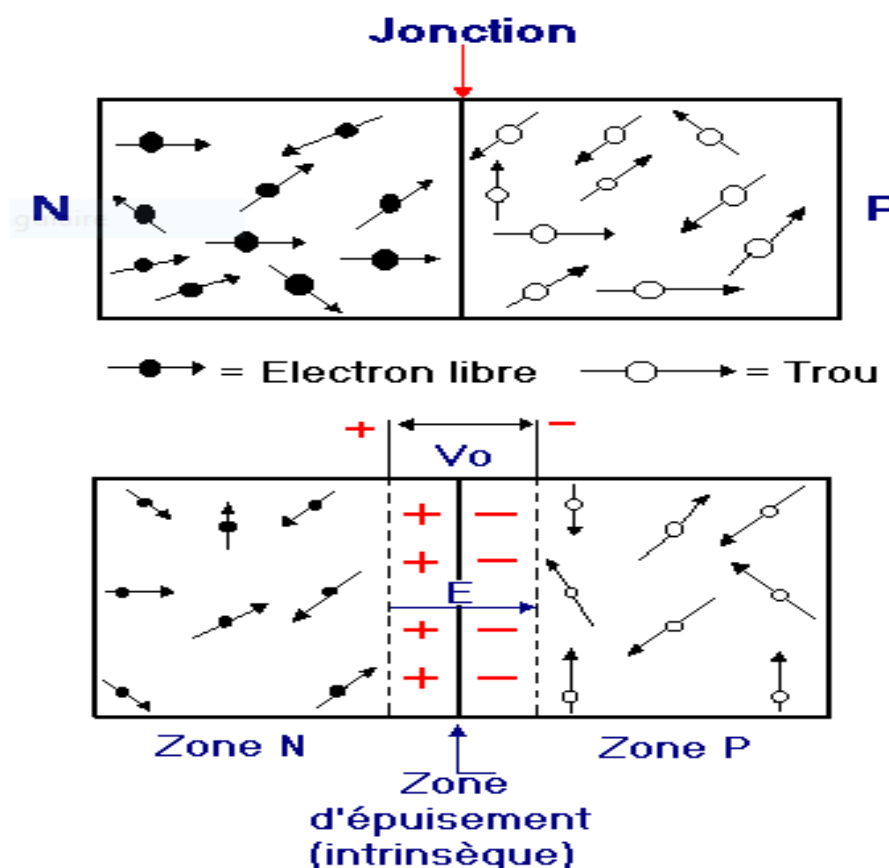


Figure I-4: Représentation simplifiée de la formation d'une jonction p-n.

Dans le cadre de l'approximation de déplétion, on concéder qu'aucun charge libre n'existe au niveau de l'interface. La zone désert, ou zone de charge d'espace s'étale essentiellement du coté le moins dopé et la tension totale qui s'établit au niveau de cette zone est dit potentiel de diffusion.

1-4-1 Zone de charge d'espace

La zone de charge d'espace (ZCE) notée W dite aussi la zone disert, apparaît entre les deux zones neutre p et n. Dans une jonction p-n est soumise à une tension extérieure V , l'épaisseur de la zone de charge d'espace (Z.C.E) varie (Figure I-5).

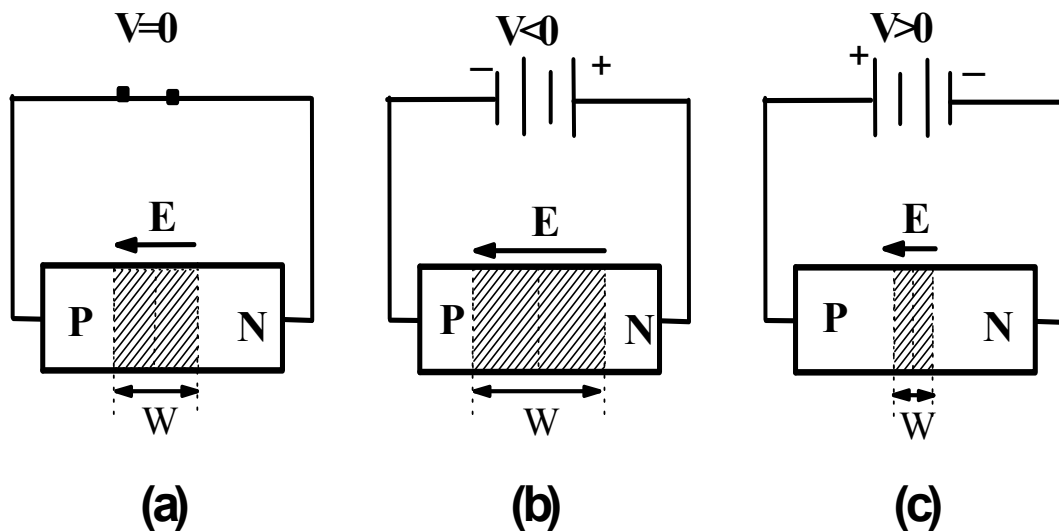


Figure I-5 : Jonction p-n sous polarisation extérieure.

(a) - Equilibre, (b) - Polarisation directe, (c) - Polarisation inverse.

Si la tension extérieure V est positive (polarisation directe), la zone de charge d'espace (W) devient plus courte et la hauteur de barrière diminue (Figure I-5-b). Ainsi, les porteurs de charges peuvent passer d'une zone à l'autre pour être récupérés au niveau des contacts métalliques. Les courants sont, dans ce cas, importants et augmentent de façon exponentielle.

Si la tension extérieure V est négative (polarisation inverse), cette tension appliquée s'ajoute au potentiel de diffusion V_d et la largeur de la zone de déplétion augmente (Figure I-5-c). Dans ce cas la jonction est bloquée.

I-4-2 Diagramme énergétique de homojonction

Nous avons représenté sur la figure (I-6), le diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre d'une l'homojonction p-n. Avant contact les niveaux d'énergies E_c et E_v sont égaux pour deux barreaux semiconducteur à différents type de dopage. Par contre après contact on sait que le niveau de Fermi est unique pour la structure à l'équilibre qui rend les niveaux E_c et E_v ne sont pas les mêmes. Les niveaux E_c et E_v de semiconducteur se raccordent entre eux par une courbe à variation continue.

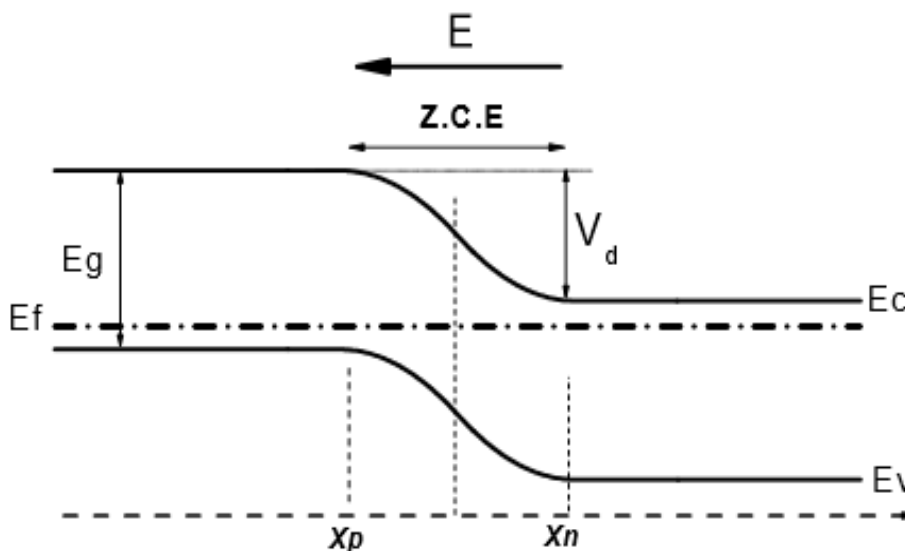


Figure I-6 : Diagramme de bandes d'énergie à l'équilibre pour homojonction p-n

E_c : L'énergie de la bande de conduction.

E_v : L'énergie de la bande de valence.

E_f : L'énergie de niveau de Fermi.

x_n et x_p : Les extensions de la zone de charge d'espace.

E_g : Largeur de la bande interdite.

V_d : La hauteur de barrière.

I-5 Mécanismes de transport

L'étude des mécanismes de conduction électrique, mis en jeu dans différents types de dispositifs à semi-conducteur, a souvent conduit à la mise en évidence de phénomènes de conduction dus à la transition de porteurs en provenance de la bande de conduction ou de valence d'un semi-conducteur.

Les mécanismes de transport de charge dans une jonction p-n sont liés au type de structure, ainsi qu'aux propriétés des matériaux qui le constituent (type de semi-conducteur, épaisseur de couche, dopage). D'autres paramètres tels que la température peuvent influencer le transport et favoriser un mécanisme par rapport aux autres.

Ces mécanismes peuvent avoir lieu simultanément ou séparément selon la tension appliquée au composant [27-29]. Dans ce qui suit, nous décrirons brièvement quelques mécanismes de transport de charge classiques, généralement observés, dans les dispositifs à jonction p-n.

I-5-1 Mécanisme de diffusion

Ce mécanisme il s'agit d'un courant de porteur minoritaire, les trous de la région n qui diffusent vers la région p et les électrons de la région p qui diffusent vers la région n. Les expressions des courants de diffusion pour les électrons et les trous sont données par [27-29] :

$$J_n = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_a} \frac{1}{\text{Th}\left(\frac{dp}{L_n}\right)} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (\text{I-1})$$

$$J_p = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_d} \frac{1}{\text{Th}\left(\frac{dn}{L_p}\right)} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (\text{I-2})$$

J_n : Densité de courant d'électrons.

J_p : Densité de courant de trous.

- D_n : Coefficient de diffusion des électrons dans la région P.
 D_p : Coefficient de diffusion des trous dans la région N.
 d_n : Epaisseur de la zone neutre, coté N.
 d_p : Epaisseur de la zone neutre, coté P.
 L_n : Longueur de diffusion des électrons dans la région P.
 L_p : Longueur de diffusion des trous dans la région N.
 n_i : Densité intrinsèque du matériau.
 V_a : Tension extérieure appliquée.
 k : Constante de Boltzmann.
 T : Température.
 N_a : Dopage dans la région P.
 N_d : Dopage dans la région N.

Les longueurs de diffusion L_n , L_p peuvent être calculées à partir des équations suivant :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (\text{I-3})$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (\text{I-4})$$

τ_p et τ_n représente respectivement les durée de vie des électron et les trous dans les région neutre n et p, ces quantité sont liées aux mobilité des porteurs μ_p et μ_n par la relation :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (\text{I-5})$$

La densité de courant de diffusion totale est donnée par la somme $J_n + J_p$ selon les propriétés physique du matériau utilisé et les dimensions du dispositif, deux cas peuvent se présenter :

Diode courte :

Dans le cas ou les longueurs de diffusion L_n et L_p sont supérieur aux largeurs de zones neutres d_n et d_p ($L_n > d_n$) et ($L_p > d_p$), les densités de courant d'électrons et des trous se simplifier et deviennent:

$$J_n = \frac{q D_n n_i^2}{N_a d_p} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (\text{I-6})$$

$$J_p = \frac{qD_p n_i^2}{N_d d_n} (e^{\frac{qV}{KT}} - 1) \quad (\text{I-7})$$

La densité de courant de diffusion totale sera donné par :

$$J_d = \left[\left(\frac{KTn_i^2}{Na} \right) \left(\frac{\mu_n}{d_n} \right) + \left(\frac{KTn_i^2}{Nd} \right) \left(\frac{\mu_p}{d_p} \right) \right] \times (e^{\frac{qV}{KT}} - 1) \quad (\text{I-8})$$

Diode longue :

Si L_n et L_p sont inférieure de largeur des zones neutres ($L_n < d_n$ et $L_p < d_p$), les densités de courant d'électrons et des trous s'écrivant cette fois se forme :

$$J_n = \frac{qD_n n_i^2}{L_n Na} (e^{\frac{qV_a}{KT}} - 1) \quad (\text{I-9})$$

$$J_p = \frac{qD_p n_i^2}{L_p Nd} (e^{\frac{qV_a}{KT}} - 1) \quad (\text{I-10})$$

Dans ce cas le courant total s'écrit, en fonction des mobilités et des durées de vies des porteurs, sous la forme :

$$J_d = \left[\frac{qn_i^2}{Na} \left(\frac{kT\mu_e}{q\tau_e} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{qn_i^2}{Nd} \left(\frac{kT\mu_p}{q\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{I-11})$$

I-5-2 Mécanisme de génération et de recombinaison

Dans le cas d'une diode idéale ou il existe seulement le courant de diffusion, les phénomènes de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace ont été négligés.

En pratique cette hypothèse est incorrecte, les processus de génération et de recombinaison dans la région déserte sont également contribuent aux courants totaux de la diode dans les deux sens de polarisation, direct et inverse.

La zone de charge d'espace peut être le siège de mécanismes de génération et de recombinaison de porteurs de charges. Sous polarisation extérieure V_a , le taux de recombinaison r est donné par la loi de Shockley-Read [27-29] :

$$r = \frac{1}{\tau} \frac{n_i^2}{2n_i + p + n} \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{I-12})$$

τ : représente la durée de vie de génération recombinaison.

I-5-2-a Mécanisme de génération

Dans le cas d'une polarisation inverse, le taux de recombinaison est négatif. La zone de charge d'espace devient le siège d'un mécanisme de génération de porteur de charge, la densité de courant de génération s'écrit [27, 28] :

$$J_{gr} = J_g = \int_{x_p}^{x_n} -\frac{qn_i}{2\tau} dx = -\frac{qn_i}{2\tau} X(V_a) \quad (\text{I-13})$$

I-5-2-a Mécanisme de recombinaison

Dans le cas d'une polarisation direct, la largeur de la zone de charge d'espace diminue et les quantités n et p ne sont pas négligeables devant la densité intrinsèque n_i . Le taux r est positif et le courant de recombinaison sera donné par [27, 28] :

$$J_{gr} = J_r = q \int_{x_p}^{x_n} r dx = q \int_{x_p}^{x_n} \frac{n_i}{2\tau} e^{\frac{qV_a}{2kT}} dx = \frac{qn_i}{2\tau} x(V_a) \left(e^{\frac{qV_a}{2kT}} \right) \quad (\text{I-14})$$

x_p et x_n sont des largeurs de dépeuplement dans chaque région.

$x(V_a)$ l'épaisseur totale de la zone de dépeuplement.

I-6 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre une structure particulière (homojonction p-n), très utilisées pour la réalisation de composants pour l'électronique ou l'optoélectronique.

Les mécanismes de transport théoriques, souvent observés dans les dispositifs basés sur la structure à jonction p-n, ont été également décrits.

Une comparaison entre les prévisions théoriques et le comportement expérimental courant-tension montre que la caractéristique réelle n'est pas toujours facile à interpréter. Aux faibles polarisations, des effets parasites, dues aux défauts de structures et de fabrication provoquent des écarts par rapport à la théorie. Cela rend l'identification des mécanismes de transport très difficile.

Références

- [1] H. Norde,
A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance,
J. Appl. Phys. 50 (1979) 5052–5053.
- [2] A. Jain, S. Sharma and A. Kapoor,
Solar cell array parameters using Lambert W-function,
Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 90 (2006) 25–31.
- [3] F.J. Toledo, José M. Blanes,
Analytical and quasi-explicit four arbitrary point method for extraction of solar cell single-diode model parameters,
Renewable Energy. 92 (2016) 346–356.
- [4] Xiankun Gao, Yan Cui, Jianjun Hu, Guangyin Xu, Yongchang Yu,
Lambert W-function based exact representation for double diode model of solar cells: Comparison on fitness and parameter extraction,
Energy Conversion and Management. 127 (2016) 443–460
- [5] N. Kavasoglu, A.S. Kavasoglu and S. Oktik,
A new method of diode ideality factor extraction from dark I–V curve,
Current Applied Physics. 9 (2009) 833–838.
- [6] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, R. Uzdin,
Extraction of Schottky parameters with a bias dependent barrier height,
Solid-State Electron. 45 (2001) 143–148.
- [7] D.S.H. Chan and J.C.H. Phang,
Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics,
IEEE Trans. Electron Dev. 34 (1987) 286–293.
- [8] S.K. Cheung, N.W. Cheung,
Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics,
Appl. Phys. Lett. 49 (1986) 85–87.

- [9] T.C. Banwell and A. Jayakumar,
Exact analytical solution for current flow through diode with series
resistance,
Electronics Letters. 36 (2000) 291–292.
- [10] M. Lyakas, R. Zaharia, and M. Eizenberg,
Analysis of nonideal Schottky and p-n junction diodes-Extraction of parameters
from I-V plots,
J. Appl. Phys.78 (1995) 5481–5489.
- [11] W. Jung and M. Guziewicz,
Schottky diode parameters extraction using Lambert W function,
Materials Science and Engineering B. 165 (2009) 57–59.
- [12] E.K. Evangelou, L. Papadimitriou, C.A. Dimitriades and G.E. Giakoumakis,
Extraction of Schottky diode (and p-n junction) parameters from I-V
characteristics, Solid-State Electron. 36 (1993) 1633–1635.
- [13] A. Ferhat-Hamida, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann and R. Weiss,
Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a
vertical optimization method,
Solid-State Electron. 46 (2002) 615–619.
- [14] D. H. Muhsen, A. B. Ghazali, T. Khatib, I. A. Abed,
Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid
evolutionary algorithm,
Energy Conversion and Management. 105 (2015) 552–561.
- [15] Shu-xian Lun, Ting-ting Guo, Cun-jiao Du,
A new explicit I–V model of a silicon solar cell based on chebyshev
polynomials, Solar Energy. 119 (2015) 179–194.
- [16] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou,
Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt
resistance,
Solar Energy Materials & Solar Cells. 91 (2007) 1647–1651.
- [17] D.S.H. Chan, G.R. Philips, J.C.H. Phang,
A comparative study of extraction methods For solar cell model
parameters,
Solid-State Electron. 29 (1986) 329–337.

- [18] J. Cabestany, L. Castaner,
Evaluation of solar cell parameters by nonlinear algorithms,
Appl. Phys. 16 (1983) 2547–2558.
- [19] D. Fuchs, H. Sigmund,
Analysis of the current-voltage characteristic of solar cells,
Solid-State Electron. 29 (1986) 791–795.
- [20] J.P. Charles, I. Mekkaoui-Allaoui, G. Bordure,
A critical study of the effectiveness of the single and double exponential models for I-V characterization of solar cells,
Solid-State Electron. 28 (1985) 807–820.
- [21] S.K. Datta, K. Mukhopadhyay, S. Bandopadhyay, H. Saha,
An improved technique for the determination of solar cell parameters,
Solid-State Electron. 11 (1992) 1667–1673.
- [22] J.P. Charles, M. Abdelkrim, Y.H. Muoy, P. Mialhe,
A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells,
Sol. Cells. 4 (1981) 169–178.
- [23] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, C. Boutrit,
Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers,
Int J Sol Energy. 4 (1986)1–12.
- [24] F. Ghani, M. Duke,
Numerical determination of parasitic resistances of a solar cell using the Lambert W-function,
Sol. Energy. 85 (2011) 2386–2394.
- [25] V. Khanna, B.K. Das, D. Bisht, Vandana, P.K. Singh,
A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm,
Renewable Energy. 78 (2015) 105–113.
- [26] R. Navabi, S.Abedi, SH. Hosseinian, R. Pal,
On the fast convergence modeling and accurate calculation of PV output energy for operation and planning studies,
Energy Convers Manage. 89 (2015) 497–506.

- [27] S. M. SZE
Physique of Semiconductor Devices.
Wiley-Interscience, New York, (1986)
- [28] H. Mathieu
Physique des Semiconducteurs et des Composants Electroniques.
Masson ed., Paris (1998)
- [29] J. D. Chatelain
Dispositifs à Semiconducteurs.
Dunod, (1979).

Chapitre 2 :
Méthode proposée pour l'extraction la
résistance de fuite d'une
jonction p-n

II-1 Introduction

Les courants supplémentaires sont responsables déviations importantes de la caractéristique courant-tension de la structure, par rapport au comportement prévu par les modèles théoriques. Ce fait rend l'utilisation des méthodes de la littérature pour l'extraction les paramètres caractéristique des dispositifs a jonction p-n très peu fiable.

Dans ce chapitre nous avons tenté de résoudre ce problème en examinant d'abords les courants de fuites au lieu de s'attaquer directement à l'extraction les paramètres caractéristique des dispositifs a jonction p-n.

La méthode que nous proposons se base sur la correction de la caractéristique courant-tension en quantifiant, de la façon la plus précise possible, les courants de fuites. Ces courants sont par la suite retranchés aux courants mesurés.

II-2 Caractéristique I-V d'une structure a jonction p-n

II-2-1 Caractéristique courant-tension idéale

La caractéristique I-V est dite idéale, lorsque la courbe mesuré du courant ne présente aucune déviation par rapport aux variations exponentielles, prévues par la loi de Shokley.

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-1})$$

V : Tension de polarisation.

n : Coefficient d'idéalité.

I_s : Courant de saturation.

q : Charge électrique.

k : Constante de Boltzmann.

T : Température de la diode.

Une représentation linéaire et semi-logarithmique de cette loi est donnée sur les figures II-1 et II-2 respectivement.

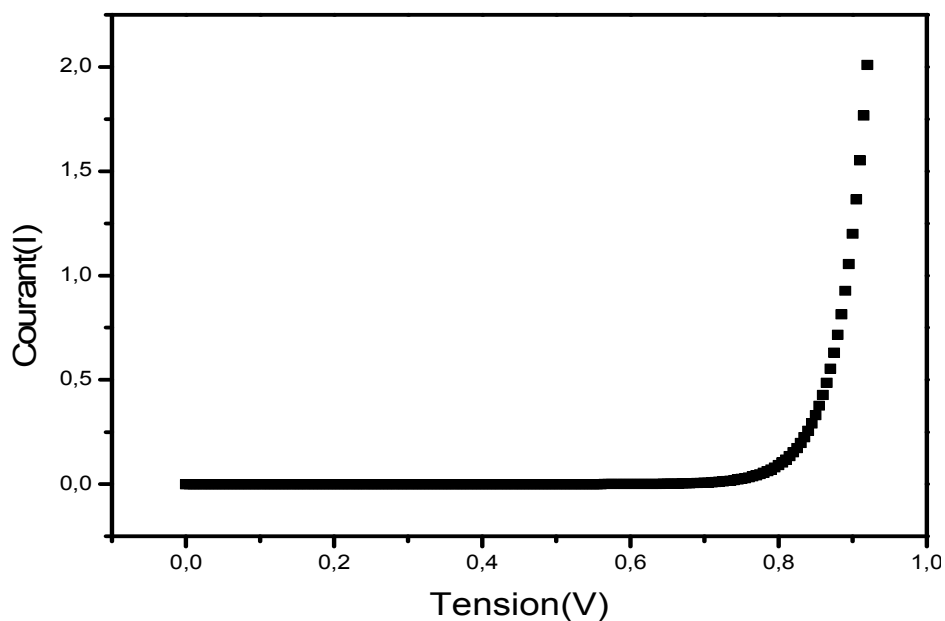


Figure II-1 : Représentation linéaire de la courbe I-V idéale d'une structure à jonction p-n.

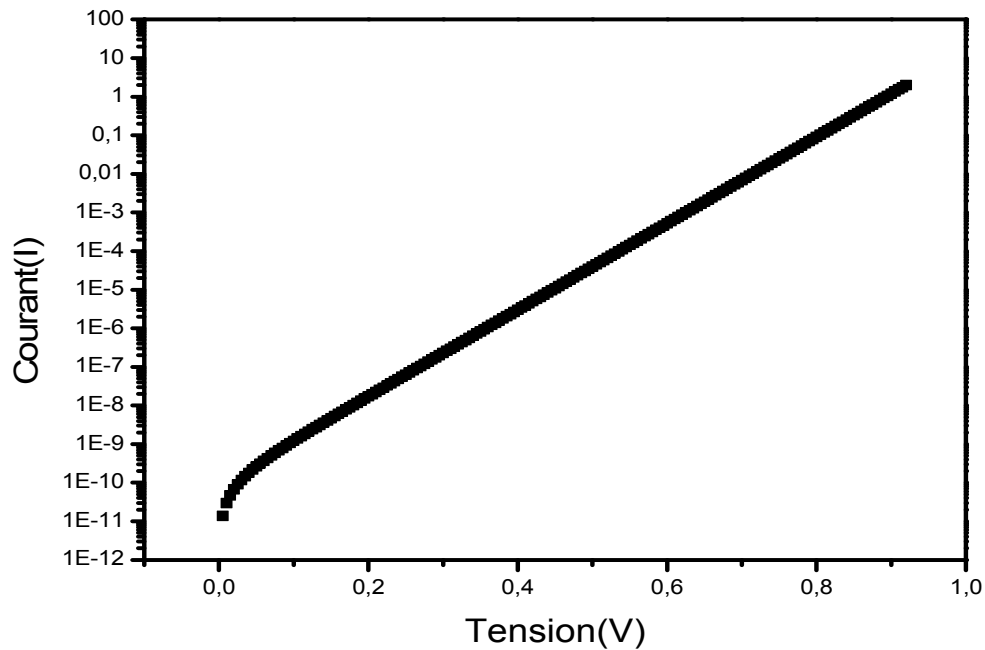


Figure II-2 : Représentation semi-logarithmique de la courbe I-V idéale d'une structure à jonction p-n.

La représentation semi-logarithmique de la caractéristique courant-tension idéale d'une structure à jonction p-n et pour des polarisations directes, supérieures à quelques kT/q , la courbe courant-tension est linéaire.

II-2-2 Caractéristique courant-tension réelle

La caractéristique courant-tension aux faibles polarisations d'une diode réelle présente en général deux régions :

Aux très faibles polarisations, le dispositif présente des courants importants (courants des fuites).

Pour les polarisations intermédiaires, la caractéristique courant-tension d'un dispositif réel présente un comportement exponentiel classique, correspondant à la région linéaire de la figure II-2.

Une représentation exponentielle avec un terme de courant de fuite peut être utilisée pour expliquer les caractéristique courant-tension d'un dispositif a jonction p-n réelle :

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) + \frac{V}{Rsh} \quad (\text{II-2})$$

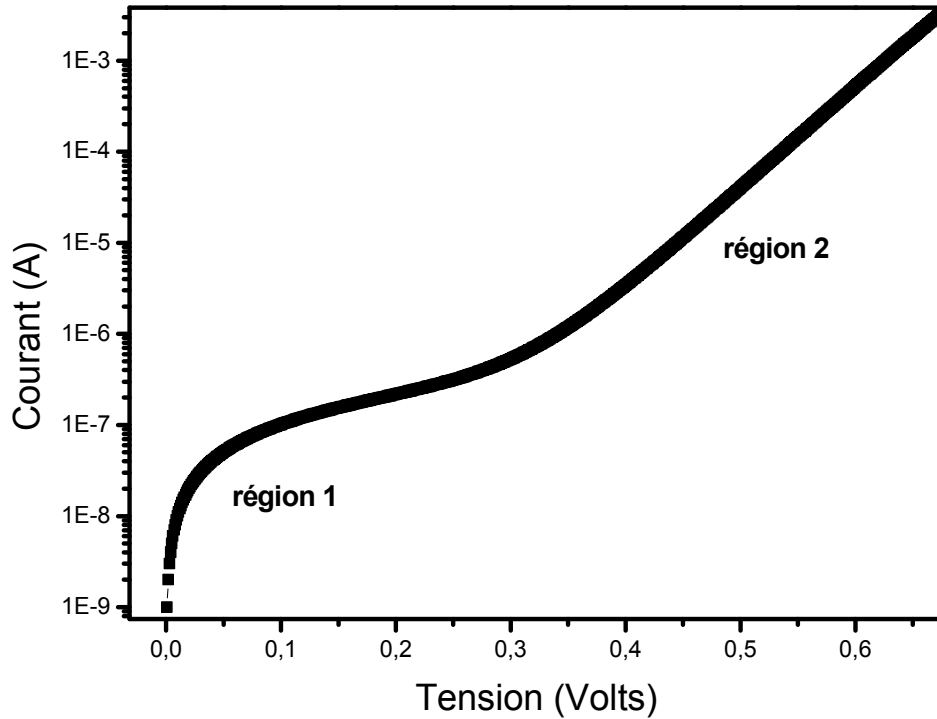


Figure II-3 : Représentation semi-logarithmique de la courbe I-V réelle d'une structure à jonction p-n.

II-3 Méthode proposée pour calculer la résistance shunt

II-3-1 Courants de fuites

Excès des courants, qui apparaissent aux faibles polarisations directes ou inverses, sont généralement modélisés par une résistance parallèle à la jonction [1-6]. Dans la figure II-4 nous donnerons une représentation simplifiée de cette modélisation.

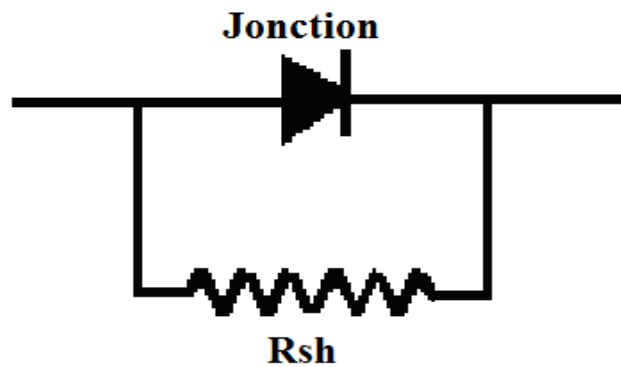


Figure II-4 : Schéma d'une structure à jonction p-n réelle aux faibles polarisations.

La valeur de cette résistance donne des informations sur la qualité du composant et ces performances. Dans littérature il existe certaine méthodes proposées permettant de quantifier les courants de fuite R_{sh} à partir des données expérimentales courant-tension d'un composant a jonction p-n [7-11].

Cependant, la valeur de la résistance shunt R_{sh} est souvent déduite par extrapolation de la partie linéaire de la courbe courant-tension expérimental en polarisation inverse pour tous les dispositifs a jonction p-n [12-15].

Lorsque le dispositif présente de faibles courants, comme il est le cas des dispositifs à semiconducteurs à large bande interdite, la méthode traditionnelle pour déterminer la valeur de la résistance shunt R_{sh} reste difficile à appliquer à cause des bruits dans mesures, aux faibles polarisations.

Dans les paragraphes qui suite dans ce chapitre, nous avons proposée une méthode expérimentale, pour quantifier les courants de fuite (détermination la valeur de la résistance shunt) des composants à jonction p-n, nous avons choisi d'utiliser les variations courant-tension directs (polarisation direct) car les mesures sont plus aisées et les courants sont détectables avec un minimum de bruit, même avec des appareils de mesure de moyenne précision (de l'ordre du μA).

II-3-2 Description de la méthode proposée

La méthode que nous avons proposé pour déterminer la valeur de la résistance shunt est purement expérimentale, consiste à imposer différents courants de fuites supplémentaires en connectant des résistances parallèles à l'échantillon. La figure II-5 représente un schéma explicatif du principe de la méthode proposée.

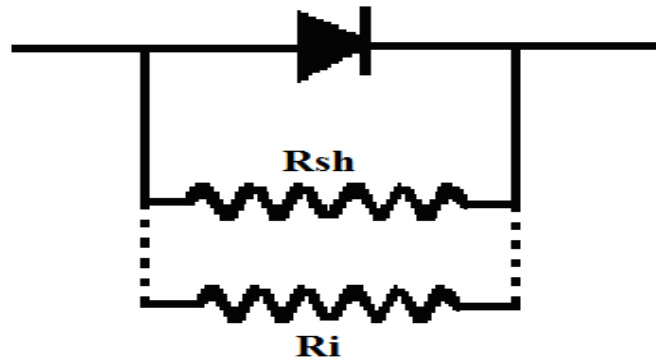


Figure II-5 : Schéma explicatif du principe de la méthode proposée pour déterminer résistance de fuite.

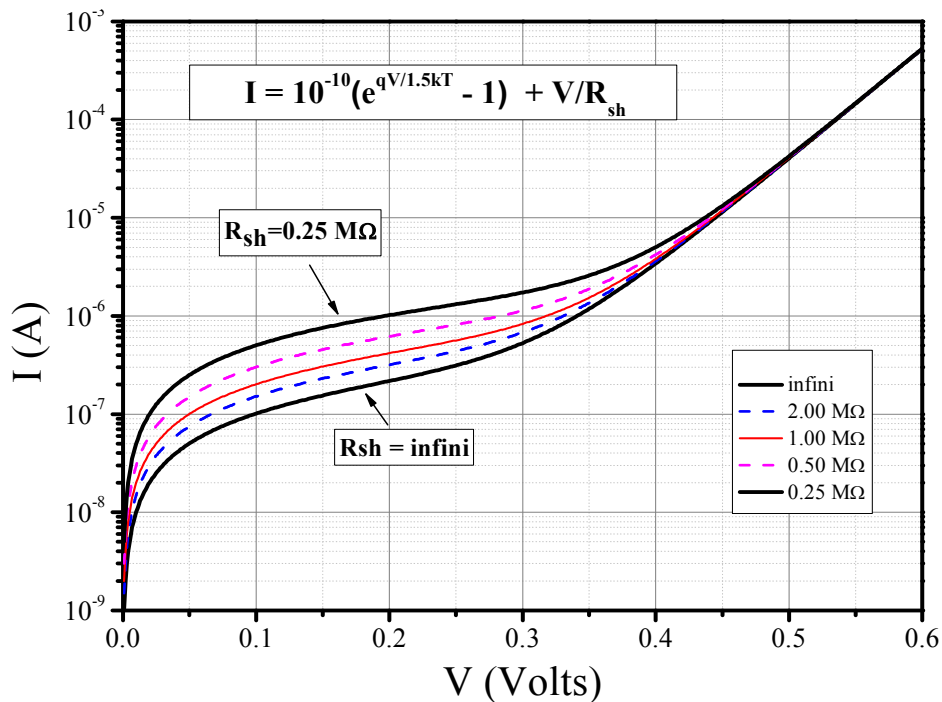


Figure II-6 : Influence de la résistance Shunt sur les courants aux faibles polarisations directes.

Si nous appliquons une différence de potentiel aux bornes de l'ensemble (*Jonction* + $R_{sh} + R_i$) les courants résultants aux faibles polarisations s'ajoutent aux courants de la diode, tant que cette dernière présente un comportement résistif. Lorsque la polarisation directe atteint une valeur pour laquelle le composant est redresseur, les courbes se rejoignent pour former une droite (Figure II-6).

Les expressions phénoménologique des courants qui traversant les dispositifs à jonction p-n sous polarisation externe en inverse ou en directe présente différents et plusieurs modèles mathématiques, selon l'intervalle des tensions à étudier [1, 16-19], dans la gamme de faible polarisation la loi empirique du courant dans ces dispositifs s'écrit sous la forme suivante [1, 20]:

$$I = I_S \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) + \frac{V}{R_{sh}} \quad (\text{II-3})$$

Lorsque la valeur de la résistance shunt est faible, les composants présente des courants de fuites importants aux faibles polarisations, le terme V/R_{sh} devient prépondérant et l'équation II-3 se réduit à la simple loi d'ohm [21, 22]:

$$I = \frac{V}{R_{sh}} \quad (\text{II-4})$$

Selon les lois de l'association des résistances, le fait de rajouter une résistance R_i , parallèle à l'échantillon, implique une augmentation du courant pour une tension fixée V . L'équation II-4 devient :

$$I_i = V \left(\frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_i} \right) \quad (\text{II-5})$$

$$G_i = \frac{I_i}{V} = \frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_i} \quad (\text{II-6})$$

L'équation II-6 montre que la conductance $G_i = I_i / V$ varie linéairement avec l'inverse de la résistance R_i . Le tracé $G = f(1/R_i)$, doit donner une pente égale à 1, quelque soit la gamme des résistances R utilisées. L'ordonnée à l'origine fournit alors directement la valeur de la résistance de fuite R_{sh} , caractéristique de la jonction. Si le calcul est effectué pour différentes valeurs de V , un calcul de la moyenne des valeurs obtenues pour R_{sh} devrait fournir une valeur suffisamment précise :

$$R_{sh} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{shi}}{N} \quad (\text{II-7})$$

II-3-3 Test et l'effet des différents paramètres sur la méthode

Afin de vérifier la validité de la méthode proposée, nous avons effectué une simulation simple de la caractéristique courant-tension réel d'un échantillon a jonction p-n, basée sur l'équation phénoménologique II-3. Nous supposons que l'homojonction simulée présente une résistance parallèle (shunt) de $1M\Omega$. Des courants de fuites sont rajoutés en supposant des résistances supplémentaires allant de $250 K\Omega$ à $2 M\Omega$, par pas de $250 K\Omega$.

Cette simulation nous a permet d'examiner les valeurs extraites de la résistance shunt pour différentes valeurs du courant de saturation I_s et du coefficient d'idéalité n . Pour les calculs, nous avons choisi pour n et I_s les valeurs réalistes suivantes :

| | | | | |
|--------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Cas a | $I_s = 10^{-10} A$ | $n = 1.0$ | $n = 1.5$ | $n = 2.0$ |
| Cas b | $n = 1.5$ | $I_s = 10^{-9} A$ | $I_s = 10^{-10} A$ | $I_s = 10^{-12} A$ |

Tableau II-1 : Les valeurs du courant de saturation et du coefficient d'idéalité utilisée pour cette simulation.

Nous regroupons dans les figures II-7 a II-11 les caractéristiques courant-tension en échelle semi-logarithmique, ainsi que les courbes de la variation I/V en fonction de l'inverse de la résistance $1/R$, calculées pour les deux cas **a** et **b**.

II-3-3-a *Effet du coefficient d'idéalité sur la méthode proposée*

$I_s = 10^{-10} \text{ A}, n = 1$

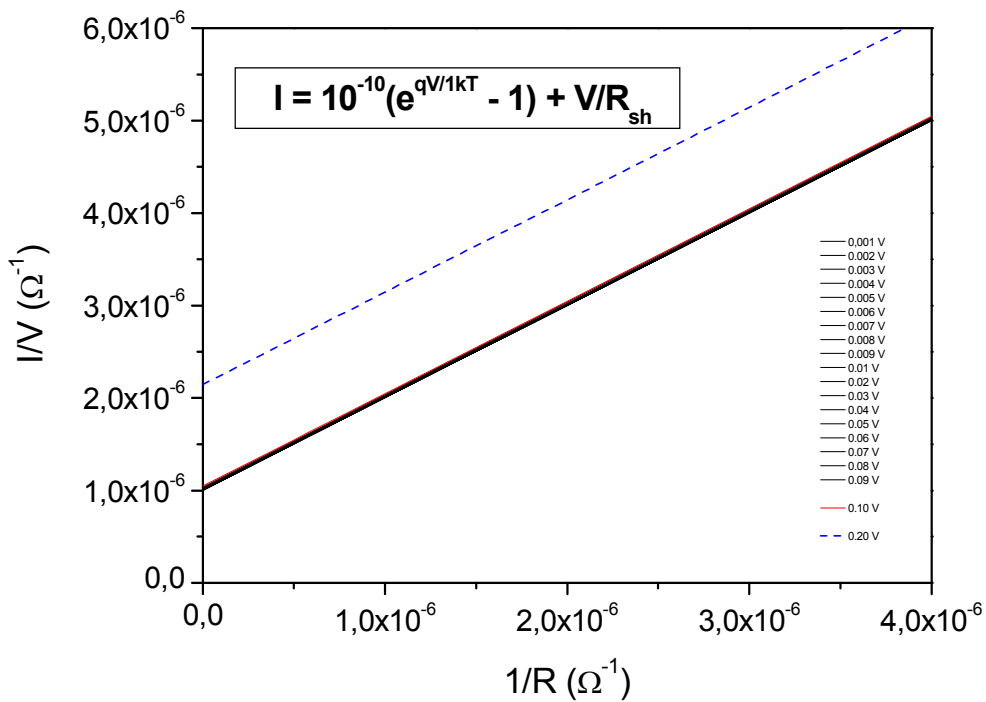
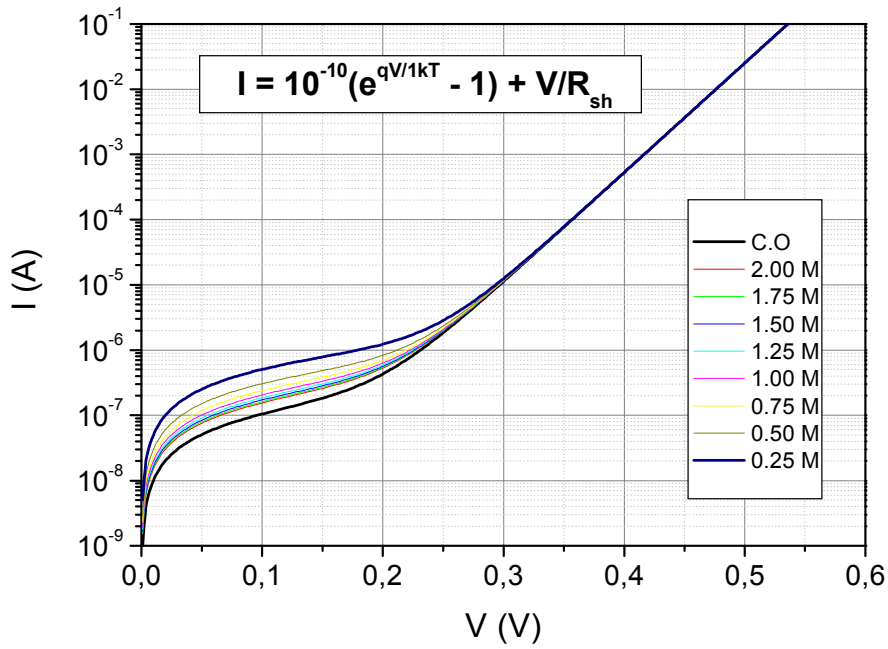


Figure II-7 : Modélisation d'une diode avec $I_s = 10^{-10} \text{ A}, n = 1, T = 300\text{K}$.

a - Variations I-V en échelle semi-logarithmique.

b - Variations $I / V = f(1/R)$ pour différentes tensions de polarisation.

2 - $I_s = 10^{-10} A, n = 1.5$

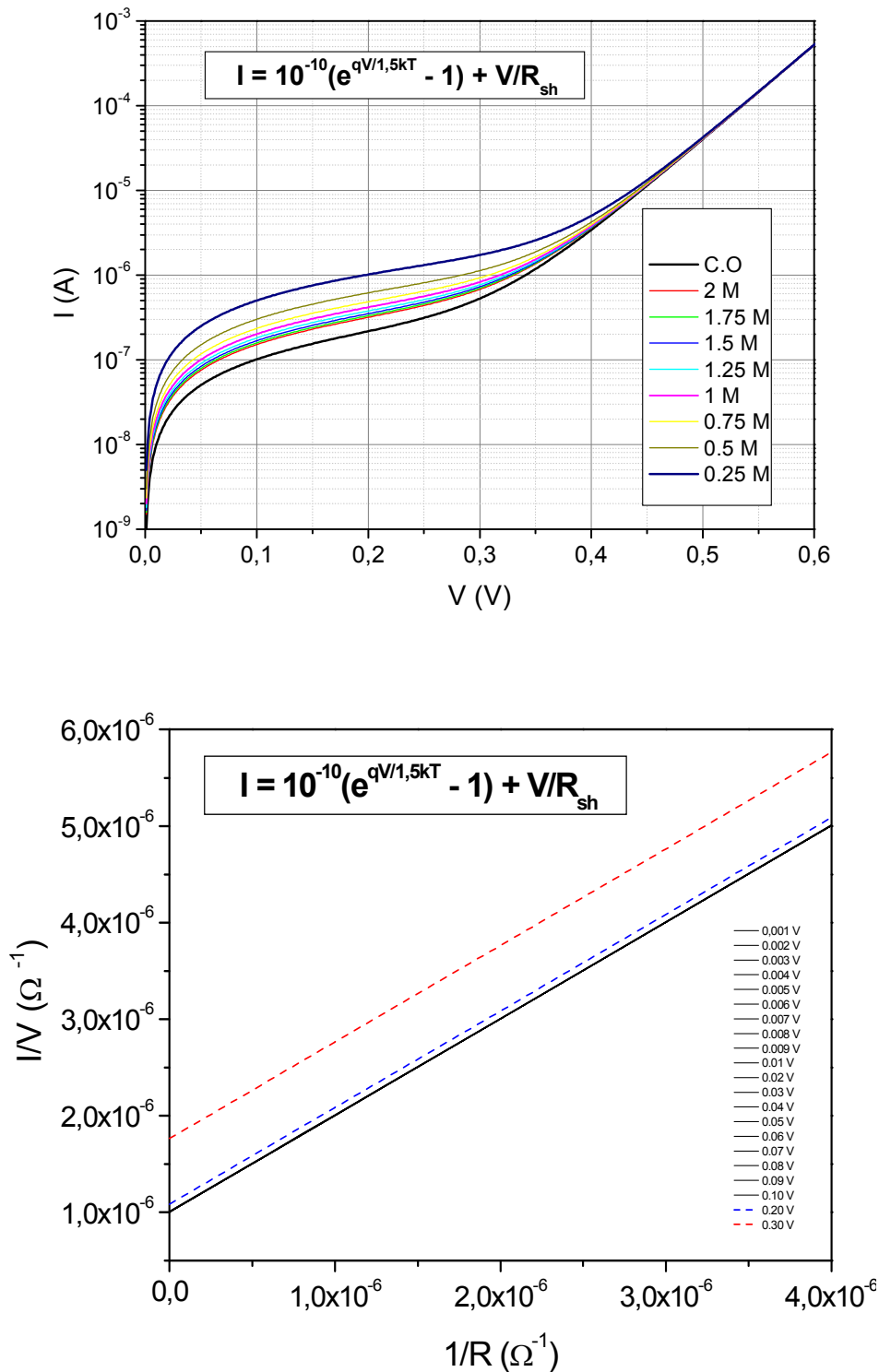


Figure II-8 : Modélisation d'une diode avec $I_s = 10^{-10} A, n = 1.5, T = 300K$.

a - Variations I-V en échelle semi-logarithmique.

b - Variations $I / V = f(1/R)$ pour différentes tensions de polarisation.

3 - $I_s = 10^{-10} A, n = 2$

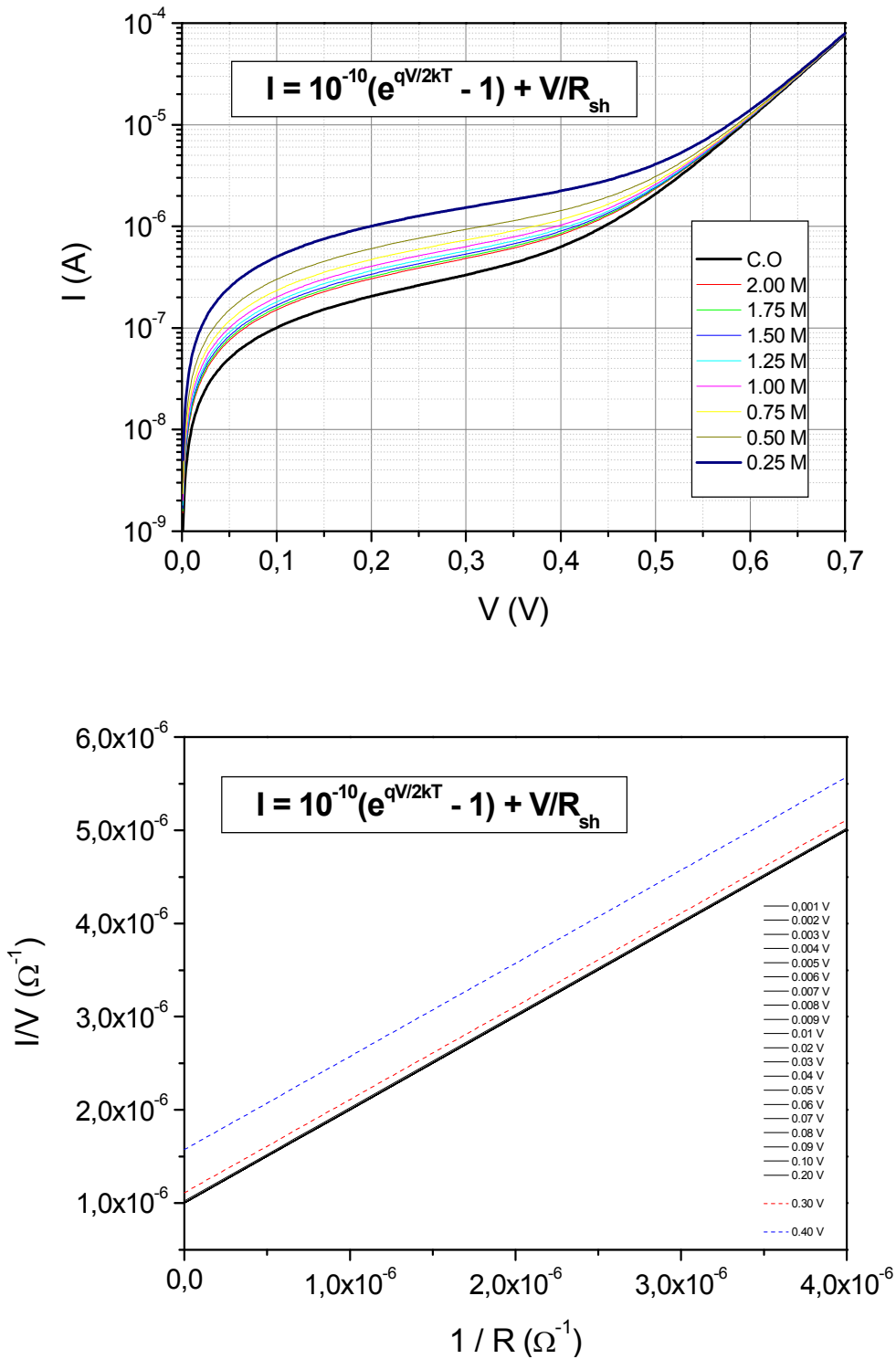


Figure II-9 : Modélisation d'une diode avec $I_s = 10^{-10} A, n = 2, T = 300K$.

a - Variations I-V en échelle semi-logarithmique.

b - Variations $I / V = f(1/R)$ pour différentes tensions de polarisation.

II-3-3-b Effet du courant de saturation sur la méthode proposée

$I - I_s = 10^{-9} A, n = 1.5$

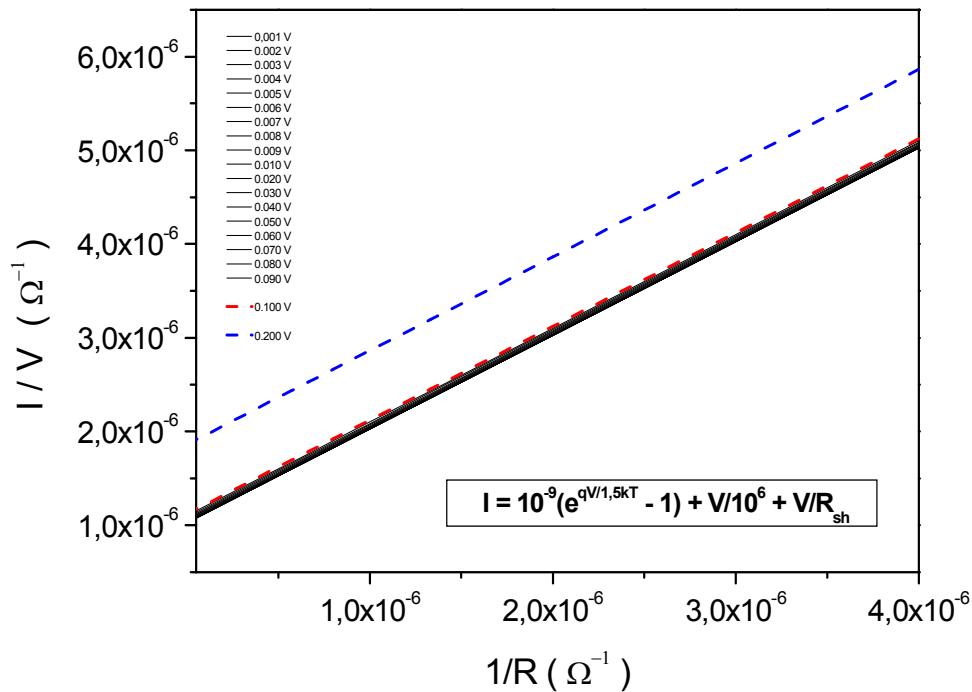
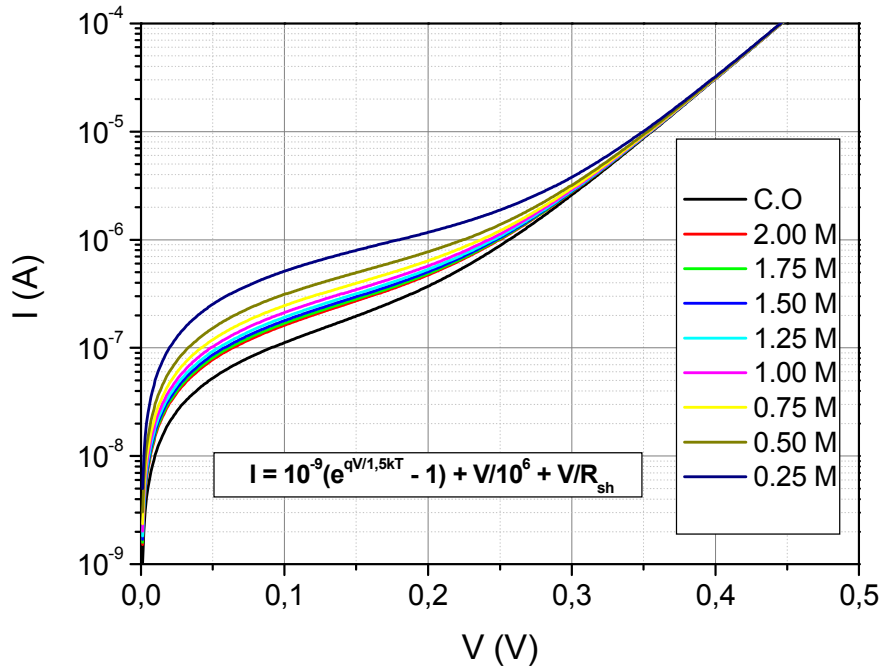


Figure II-10 : Modélisation d'une diode avec $I_s = 10^{-9} A, n = 1.5, T = 300K$.

a - Variations I-V en échelle semi-logarithmique.

b - Variations $I / V = f(1/R)$ pour différentes tensions de polarisation.

2 - $I_s = 10^{-12} A, n = 1.5$

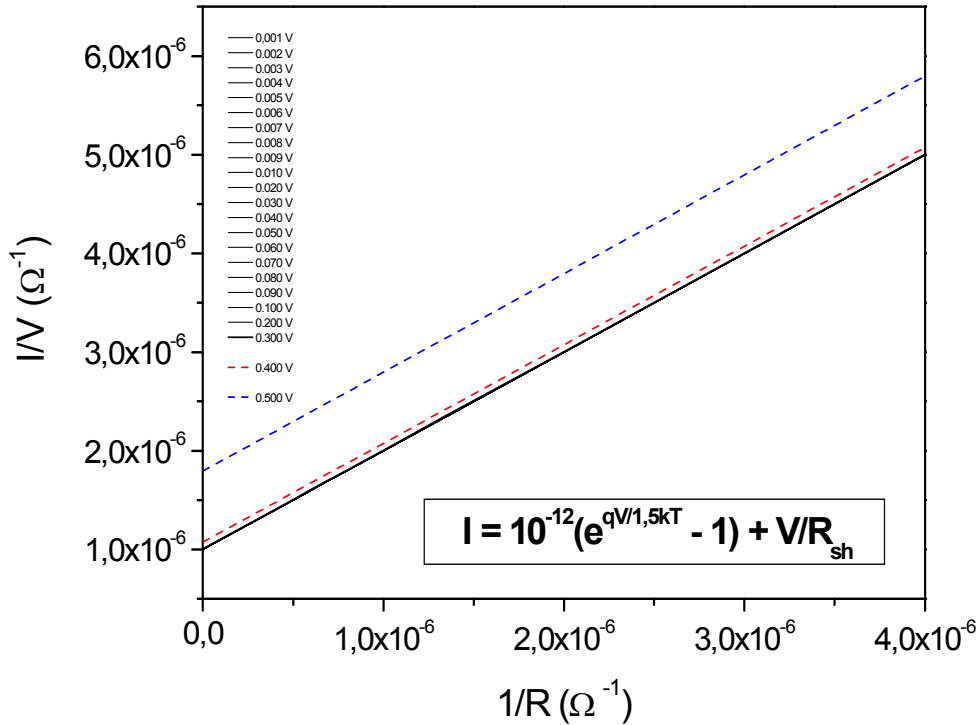
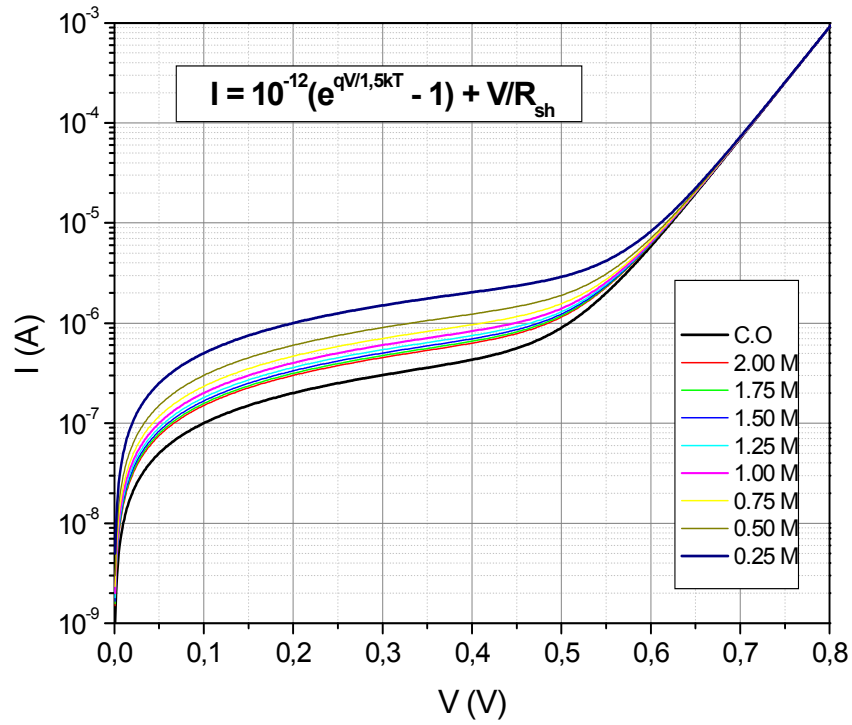


Figure II-11 : Modélisation d'une diode avec $I_s = 10^{-12} A, n = 1.5, T = 300K$.

a - Variations I-V en échelle semi-logarithmique.

b - Variations $I / V = f(1/R)$ pour différentes tensions de polarisation.

| Courant de salutation fixée $I_s = 10^{-10} A$ | |
|--|---|
| Coefficient d'idéalité (n) | Résistance shunt obtenu Rsh (MΩ) |
| 1 | 1.95 10 ⁶ |
| 1.5 | 1.98 10 ⁶ |
| 2 | 1.00 10 ⁶ |

Tableau II-2 : Les valeurs de la résistance Shunt extraites à partir des figure II-7, II-8 et II-9, pour différentes valeurs du coefficient d'idéalité.

| Coefficient d'idéalité fixée $n = 1.5$ | |
|--|--|
| Courant de salutation $I_s(A)$ | Résistance shunt obtenu Rsh (Ω) |
| 10 ⁻⁹ | 9.70 10 ⁶ |
| 10 ⁻¹⁰ | 9.85 10 ⁶ |
| 10 ⁻¹² | 1.00 10 ⁶ |

Tableau II-3 : Les valeurs de la résistance Shunt extraites à partir des figure II-8, II-10 et II-11, pour différentes valeurs du courant de salutation.

Nous avons remarqué d'après les figures II-7 à II-11 et les tableaux II-2 et II-3 que cette comparaison montre bien une petite différence dans la valeur de la résistance shunt calculé pour différentes valeurs de coefficient d'idéalité et courant de salutation.

Lorsque le courant de saturation est fixé, une valeur du coefficient d'idéalité n autour de 2 donne une valeur de R_{sh} plus correcte que la valeur de n près de 1. Par contre, dans les figures II-8, II-10 et II-11 où le coefficient d'idéalité est constant, en déduire que lorsque le courant de saturation est diminué, la résistance shunt obtenue tend vers à une valeur plus exacte.

II-4 Conclusion

Par une modélisation simple, basée sur des équations empiriques, nous avons mis en évidence l'influence des courants indésirables sur le comportement électrique courant-tension des diodes à jonction en général.

Nous avons donc été amenés à mettre au point une technique expérimentale simple pour quantifier les courants de fuites et les éliminer pour extraire les caractéristiques réelles du composant.

Après avoir fait quelques simulations simples par cette méthode, avec différentes valeurs du coefficient d'idéalité n et du courant de saturation I_s . Les résultats obtenus sont très encourageants et l'idée de corriger les variations expérimentales $I-V$ en retranchant les courants de fuites s'est avérée très efficace.

Références

- [1] V. Aubry and F. Meyer
Schottky diode with high series resistance: Limitation of forward I-V methods.
J. Appl. Phys. 76 (12), 7973-7984 (1994)
- [2] P. Chattopadhyay
The effect of shunt resistance on the electrical characteristics of Schottky barrier diodes
J. Phys. D: Appl. Phys. 29, 823-829 (1996)
- [3] V. Gopal
Variable-area diode data analysis of surface and bulk effects in HgCdTe photodetector arrays
Semicond. Sci. Technol. 9 (1994) 2267–2271.
- [4] SR. Rummel, TJ. McMahon
Effect of cell shunt resistance on module performance at reduced light levels
Proceedings of the 13th NREL Photovoltaics Program Review; 1995, p. 581–6.
- [5] Priyanka, Mohan Lal, S.N. Singh
A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells.
Solar Energy Materials & Solar Cells 91 137–142 (2007)
- [6] E.E. Van Dyk , E.L. Meyer
Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules.
Renewable Energy 29 333–344 (2004)
- [7] O. Breitenstein, M. Langenkamp
Lock-In Thermography, Springer, Berlin, 2003.
- [8] A. Kaminski, J.J. Marchand, A. Laugier
I–V methods to extract junction parameters with special emphasis on low series resistance
Solid-State Electronics. 43 (1999) 741–745.

- [9] Paul R. Thompson, Thomas C. Larason
Method of measuring shunt resistance in photodiodes
Measurement Science Conference, Anaheim, CA (2001)
- [10] D.K. Schroder
Semiconductor Material and Device Characterization
Wiley, New York, 1998.
- [11] Vincenzo d'Alessandro, Pierluigi Guerriero, Santolo Daliento, Matteo Gargiulo
A straightforward method to extract the shunt resistance of photovoltaic cells from current-voltage characteristics of mounted arrays
Solid-State Electronics, 63 (2011) 130-136
- [12] V. Gopal, S. Gupta
Temperature dependence of ohmic shunt resistance in mercury cadmium telluride junction diode
Infrared Physics & Technology. 45 (2004) 265–271
- [13] Z. Ouennoughi , M. Chegaar
A simpler method for extracting solar cell parameters using the conductance method.
Sol. Stat. Electron. 43, 1985-1988 (1999)
- [14] J. H. Werner
Schottky Barrier and pn-Junction I/V Plots-Small Signal Evaluation.
Appl. Phys. A 47, 291-300 (1988)
- [15] S. M. SZE
Physique of Semiconductor Devices.
Wiley-Interscience, New York, (1986)
- [16] M.C. Alonso-Garcia, J.M. Ruiz
Analysis and modelling the reverse characteristic of photovoltaic cells
Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1105–1120
- [17] A. Ferhat-Hamida, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann and R. Weiss
Extraction of Schottky Diode Parameters Including Parallel Conductance Using a Vertical Optimization Method
Solid-State Electron 46 (2002) 615–619.

- [18] J.C. Ranuarez, A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez
A new method to extract diode parameters under the presence of parasitic series and shunt resistance
Microelectronics Reliability 40 (2000) 355–358
- [19] J. C. Ranuarez, F. J. Garcia Sanchez, A. Ortiz-Conde
Procedure for determining diode parameters at very low forward voltage.
Sol. Stat. Electron. 43, 2129-2133 (1999)
- [20] R. Navabi, S.Abedi, SH. Hosseinian, R. Pal
On the fast convergence modeling and accurate calculation of PV output energy for operation and planning studies
Energy Convers Manage. 89 (2015) 497–506.
- [21] V. Gopal
Semicond. Sci. Technol. 11 (1996)1070
- [22] S. K. Singh, V. Gopal, R. K. Bhan and V. Kumar
An analysis of the dynamic resistance variation as a function of reverse bias voltage in a HgCdTe diode
Semicond. Sci. Technol. 15 (2000) 752–755

Chapitre 3 :
Application a un échantillon au
silicium diode 1N5227

III-1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la caractéristique courant-tension directe et à température ambiante d'un échantillon industriel 1N5227. La technologie du Silicium étant bien maîtrisée, le composant présente de très faibles courants ou de fuites.

Dans un premier temps nous décrirons les différents équipements utilisés dans la réalisation du banc expérimental et expliquerons le choix de notre montage courte dérivation pour le prélèvement de la caractéristique courant-tension directe de la diode.

Nous terminerons par donner les caractéristiques courant-tension expérimentales sous polarisations directes, relevées sur l'échantillon de silicium 1N5227. Nous donnerons également les résultats obtenus pour la valeur de la résistance Shunt en utilisant la technique proposée décrites dans ce travail de mémoire.

III-2 Propriétés cristallographiques de Silicium

Le silicium est un semiconducteur avec des propriétés physique (électrique et optique) très intéressantes, est un matériau typique le plus couramment utilisé dans la technologie pour fabriquer les dispositifs électroniques et optoélectroniques tel que les diodes, les cellules solaires, les détecteurs.

III-2-1 Structure cristallin du silicium

Sur la figure III-1 nous représentons la structure cristallin du silicium est similaire à celle du réseau du diamant, correspond à deux réseaux cubiques à faces centrées, translattés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale du cube. Chaque atome de silicium est ainsi entouré de quatre premiers voisins qui forment un tétraèdre. La base primitive de cette structure possède deux atomes identiques de coordonnées $(0,0,0)$ et $(1/4,1/4,1/4)$ définies dans une base cartésienne. La maille conventionnelle de la structure diamant contient 8 atomes.

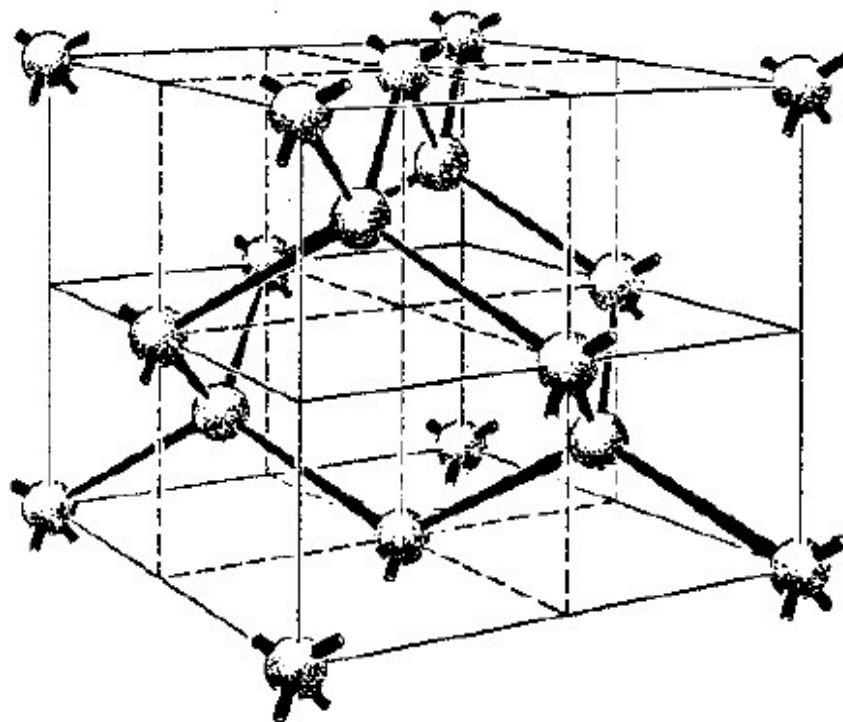


Figure III-1 : Structure cristalline du silicium.

Etat cristallisé du silicium caractérisé par un arrangement régulier et périodique et bien défini des atomes. En deux dimensions, nous montrons sur la figure III-2 une représentation schématique cette structure. Chaque atome de silicium forme quatre liaisons avec ses premiers voisins, et chaque atome contribue un électron par liaison, ce qui donne un total de deux électrons par liaison (un électron par atome).

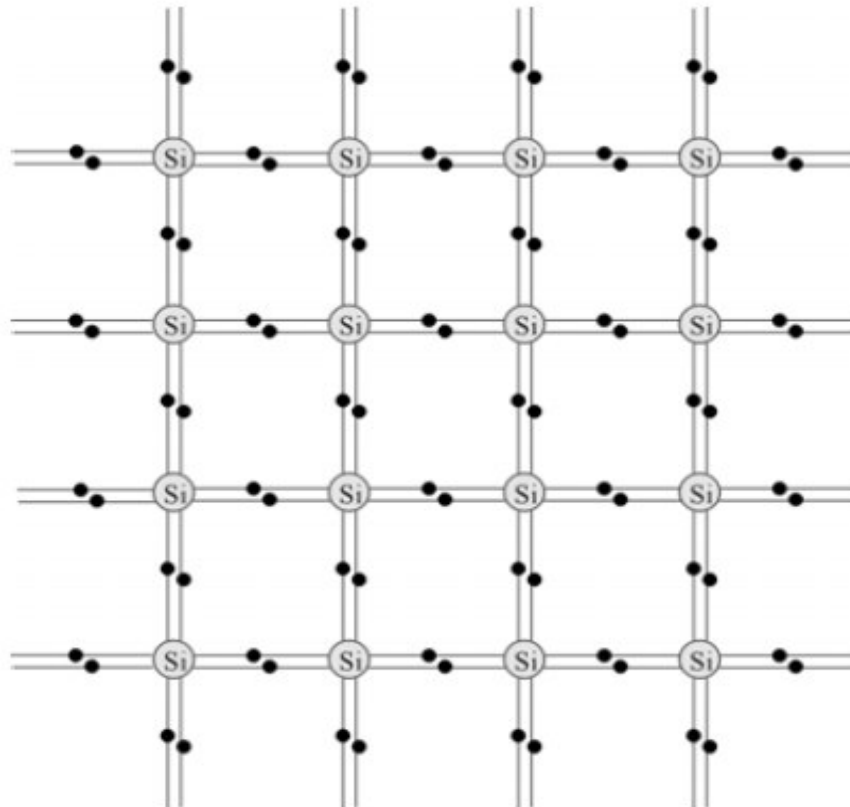


Figure III-2 : Représentation schématique en deux dimensions du silicium.

III-2-2 Structure de bande d'énergie de silicium

Le silicium est un élément possédant des caractéristiques semi-conductrices. En effet, il est beaucoup moins conducteur que de nombreux métaux. Les matériaux semi-conducteurs, peut être divisée en deux groupes, les matériaux à gap direct, comme la plupart des composés issus des colonnes III et V du tableau périodique et les matériaux à gap indirect, comme le silicium (colonne IV).

La figure III-3 montre les différentes transitions, directes et indirectes dans le matériau de silicium cristallin :

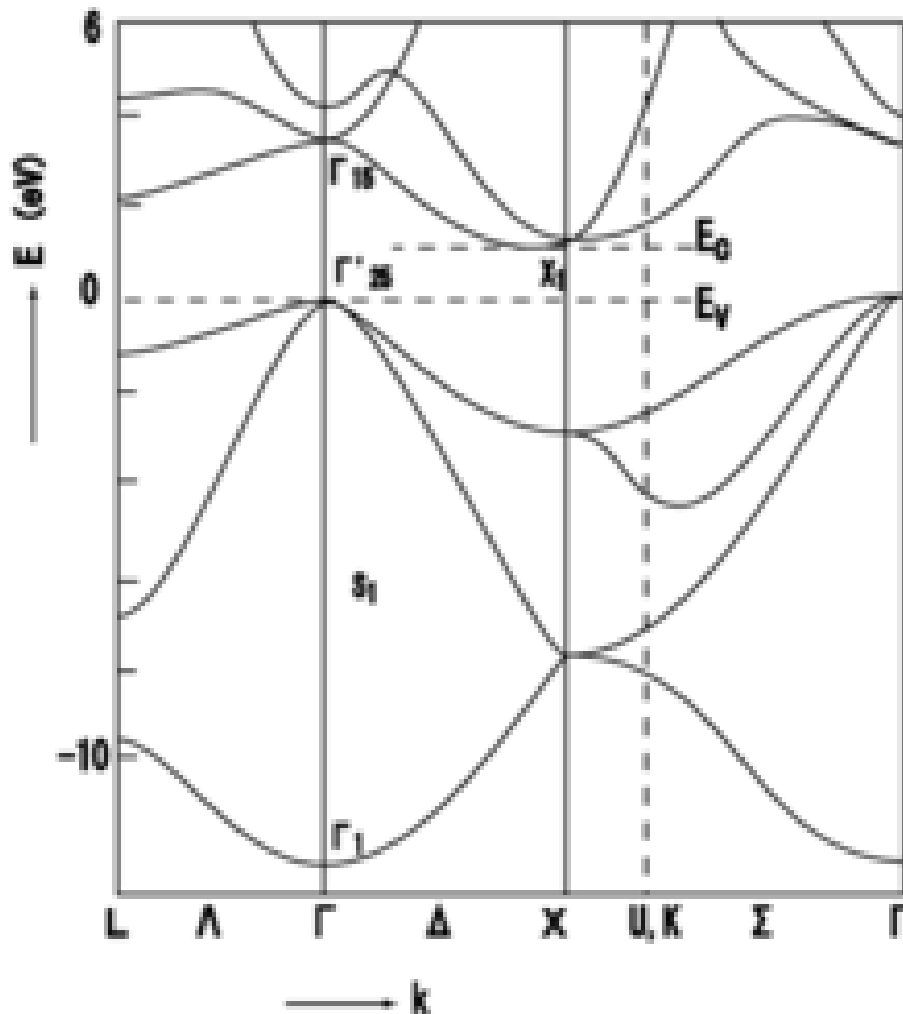


Figure III-3 : Représentation de la structure de bandes d'énergie du silicium (Si).

La notion de gap direct et indirect est liée à la représentation énergétique d'un semi-conducteur (Diagramme énergie E en fonction du nombre d'onde k). Ce diagramme permet de définir spatialement les extrema de la bande de conduction et la bande de valence. Ces extrema représentent, dans un semi-conducteur à l'équilibre.

Un semi-conducteur à gap direct lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à la même valeur du nombre d'onde k sur le diagramme $E(k)$.

Cependant, un semi-conducteur à gap indirect lorsque le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à des valeurs distinctes du nombre d'onde k sur le diagramme $E(k)$.

Dans ce paragraphe, on cite quelques propriétés physiques de la structure Si. Le tableau III-1 regroupe quelque propriété rencontrée dans la littérature pour le Silicium à température ambiante (Largeur de la bande interdite, la mobilité des électrons et des trous, la densité intrinsèque, la conductivité thermique, constante diélectrique, champ critique et Vitesse de saturation).

| Paramètres 300 K | Silicium (Si) |
|--|--------------------------|
| Eg (eV) | 1.12 |
| ni (cm⁻³) | 1×10^{10} |
| Conductivité thermique | 1.5 |
| Vitesse de saturation | 1×10^7 |
| Mobilité des électrons | 1400 |
| Mobilité des trous | 450 |
| Champ critique (V/cm) | 3×10^5 |
| Constante diélectrique | 11.8 |
| Conductivité électronique (S/m) | 2.52×10^4 |

**Tableau III-1 : Paramètres de la structure étudiée (silicium),
à température ambiante.**

III-3 Description des équipements de mesure et du montage

III-3-1 Equipements utilisés

Le banc de mesure se compose des équipements suivants :

- Générateur de tension.
- Electromètres.
- Voltmètre.
- Cage de Faraday.
- Boite à décades.
- Câbles.

III-3-2 Description du montage

Le générateur de tension, l'électromètre et notre l'échantillon sont connectés en série. Le voltmètre, branché en parallèle avec le générateur de tension, permet une lecture directe de la tension débitée par ce dernier. L'électromètre donne une lecture du courant qui traverse l'échantillon.

La technologie du Silicium est bien métrisée, donc l'échantillon étudié ne présente pas de courants de fuite.

Pour simuler une diode fuyante, nous avons disposé dans la cage de Faraday la diode 1N5227, relié en parallèle à une résistance R_o importante, de l'ordre de 5 M Ω .

L'ensemble diode + résistance R_o est relié à son tour et en parallèle, à la boite à décades. En faisant varier la valeur R_i dans la boite à décades, il est possible d'observer les variations du courant même aux faibles polarisations directes et inverses.

La figure III-4 montre le montage utilisé pour les mesures des caractéristiques courant-tension directes de l'échantillon de Silicium, à température ambiante.

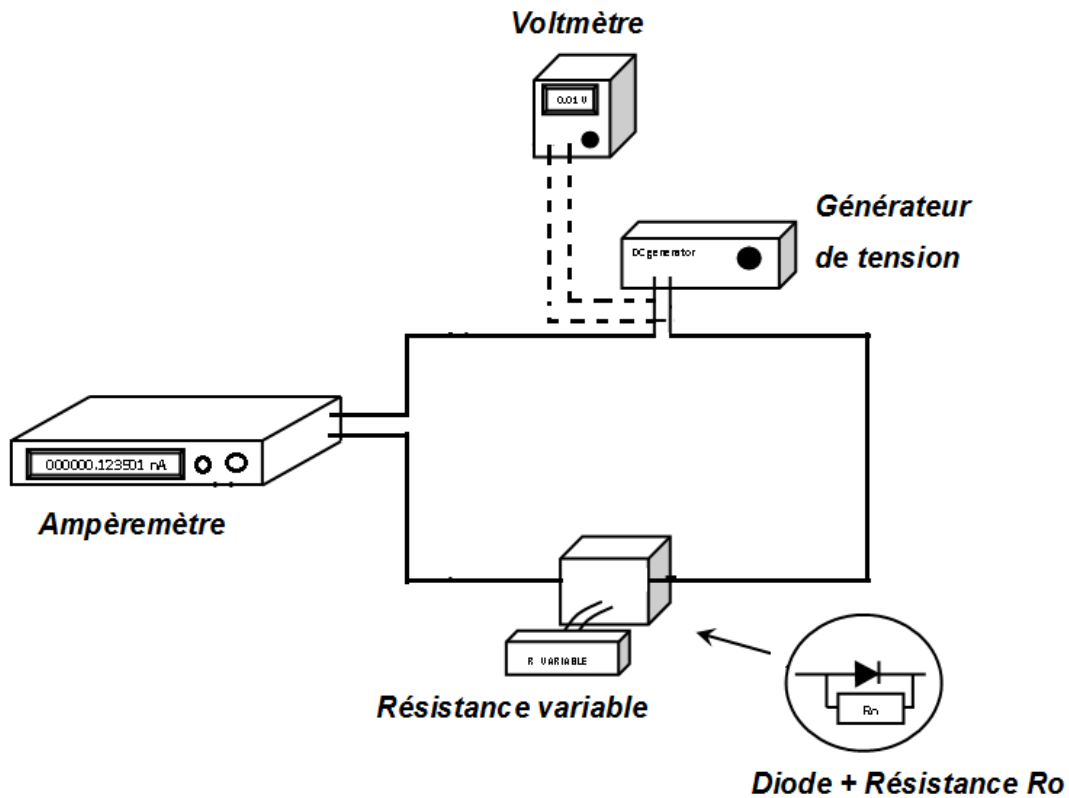


Figure III-4 : Schéma du montage utilisé pour le prélèvement des caractéristiques I-V directes de l'échantillon 1N5227, à température ambiante.

La tension V_G , débitée par le générateur et mesurée par le voltmètre, est la tension totale aux bornes du circuit. La tension V_D aux bornes du système diodes de boîte à décades est déduite par une correction de V_G à la chute de tension aux bornes de l'ampèremètre.

$$V_D = V_G - V_A$$

avec $V_A = R_A \cdot I$

V_G : Tension de générateur.

V_D : Tension aux bornes du système.

V_A : Tension aux bornes de l'électromètre.

R_A : Résistance interne de l'ampèremètre.

I : Courant qui traverse le circuit.

III-4 Caractéristique I-V expérimentale du Silicium

III-4-1 Pour le système Silicium+Ro

Nous montrons sur la figure III-5 la caractéristique expérimentale courant-tension, directe, obtenue sur une diode de silicium (Si) reliée en parallèle avec une résistance de $5\text{ M}\Omega$. Les mesures sont effectuées à température ambiante (300 K) entre 0 V et 0.7 V. Aux faibles polarisations les courants mesurés sont importants.

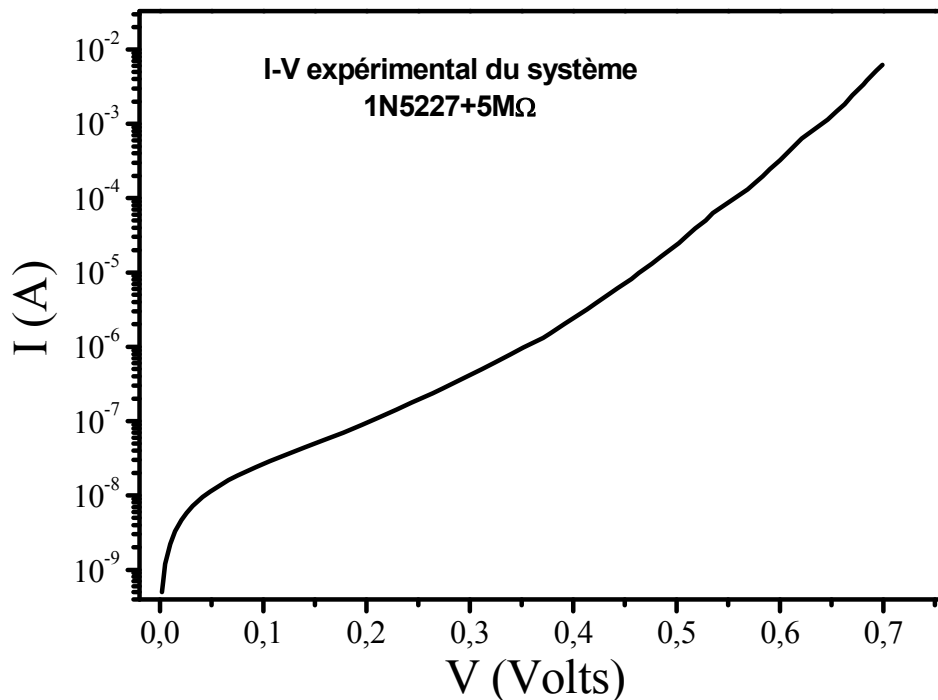


Figure III-5 : Caractéristique expérimental courant-tension du système 1N5227+5MΩ

III-4-2 Pour le système Silicium+Ro+Rsh

Nous avons repris les mesures courant-tension en connectant au système (1N5227//Ro) des résistances parallèles allant de $0,56\text{ M}\Omega$ à $5,6\text{ M}\Omega$. Les caractéristiques obtenues sont représentées en échelle semi-log et log-log respectivement sur les figures III-6 et III-7.

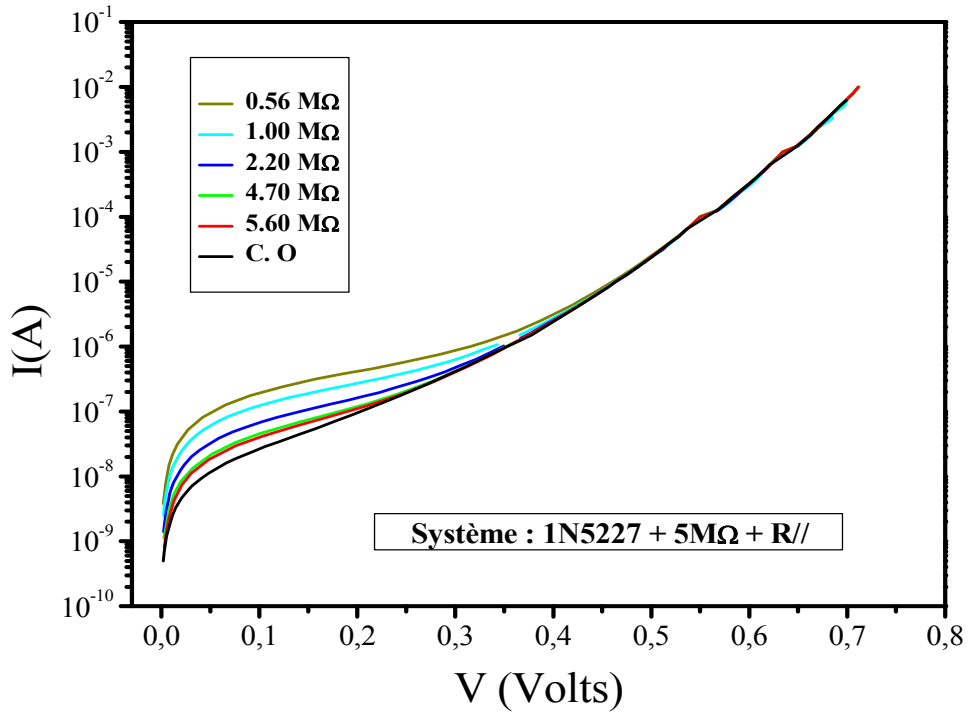


Figure III-6 : Caractéristique expérimental courant tension du système 1N5227+5MΩ, en échelle semi-logarithmique.

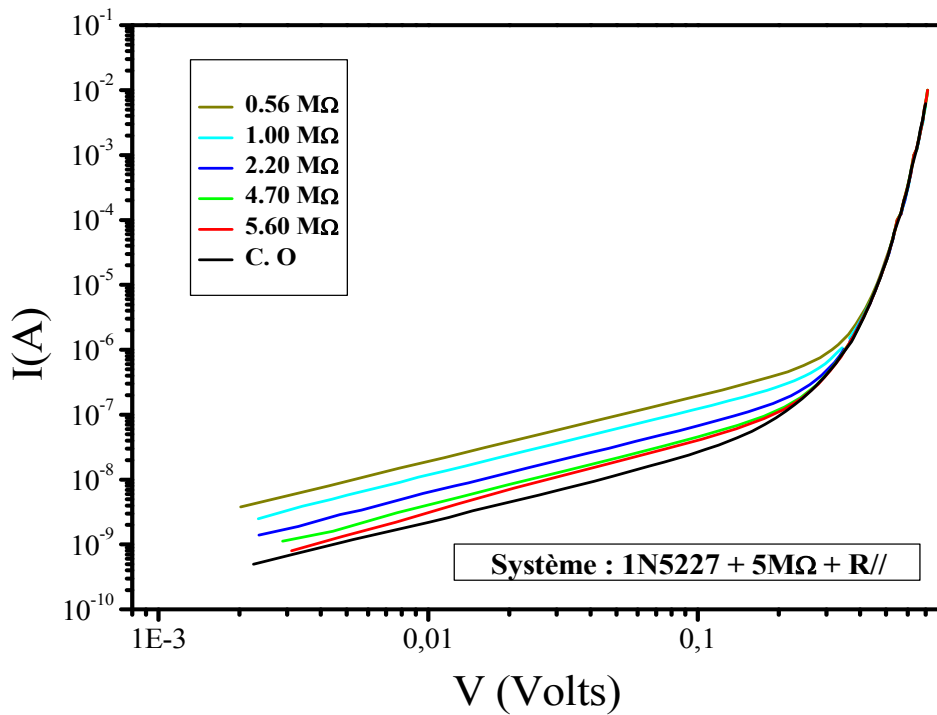


Figure III-7 : Caractéristique expérimental courant tension du système 1N5227+5MΩ, en échelle logarithmique-logarithmique.

III-5 Résultat et discussion

III-5-1 Détermination de la résistance de fuite R_o

Nous représentons sur la figure III-8 les variations du courant mesuré sur la tension appliqué (I/V) en fonction de l'inverse de la résistance ($1/R$), obtenues sur le système ($1N5227 + 5M\Omega$) et différents résistances.

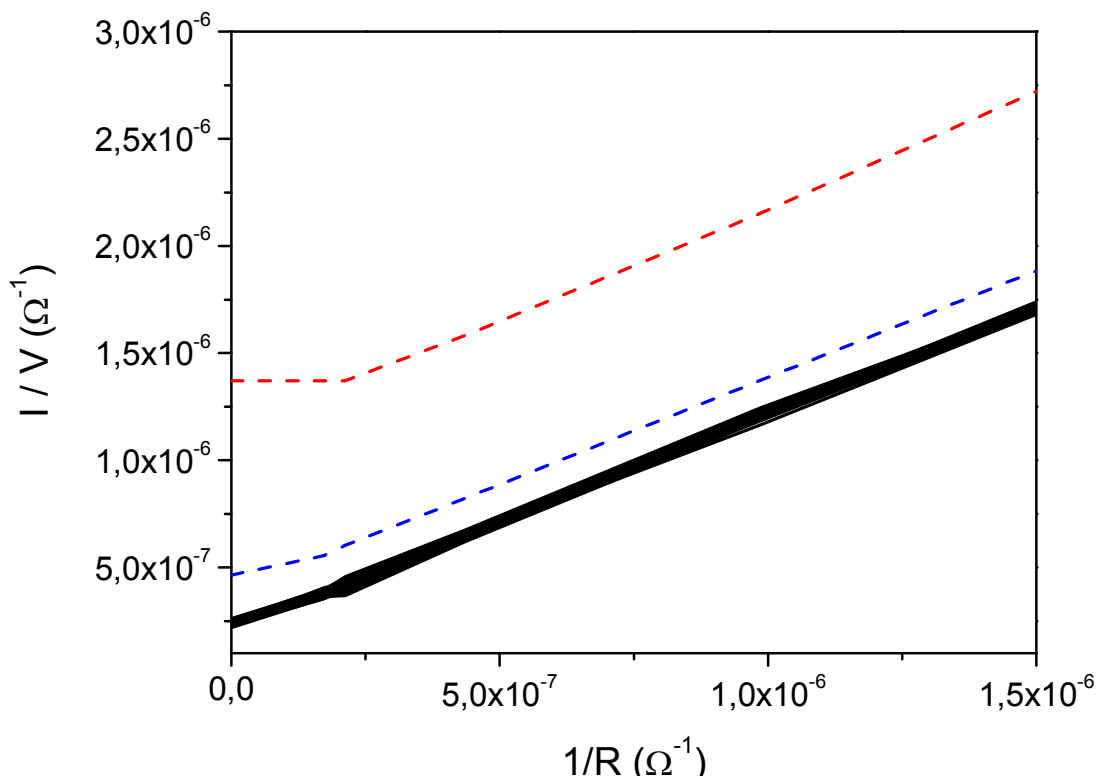


Figure III-8 : Variations du courant sur la tension appliqué en fonction de l'inverse de la résistance.

Nous avons remarqué que les courbes obtenues sont linéaires, pour des tensions directes allant jusqu'à 100 mV les droites sont lignes confondues avec une pente très voisine de 1. Ces mêmes courbes admettent, à très peu de choses près, la même ordonnée à l'origine (même valeur de l'inverse de la résistance Shunt $1/R_{sh}$).

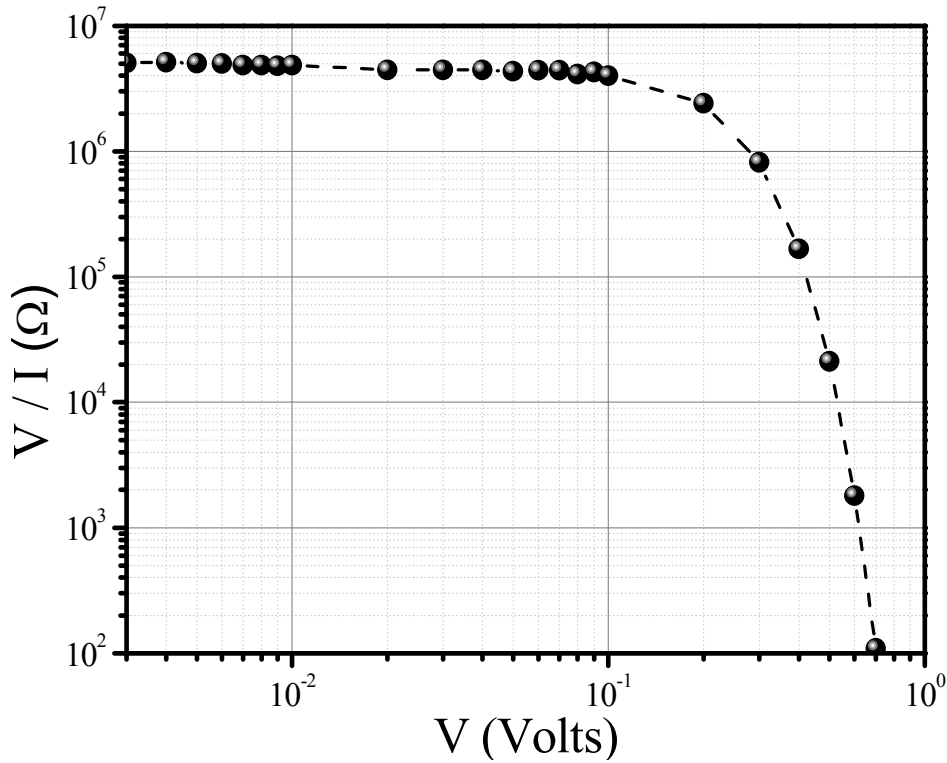


Figure III-9 : Variation de la résistance R_{sh} en fonction de la tension, en échelle log-log.

Au delà de 100 mV, les droites $I/V = f(1/R)$ présentent des ordonnées à l'origine plus faibles. Cela s'explique par le comportement exponentiel du courant qui traverse le système étudié. Ces courbes ne sont exploitables.

La valeur moyenne de la résistance shunt, déduite à faibles polarisations, entre 3 mV et 100 mV, correspond bien à la valeur de la résistance R_0 (5 MΩ.) mise en parallèle avec la structure étudiée :

$$R_{sh} = (5.316 \pm 0.055) M\Omega.$$

Cette valeur de la résistance Shunt sera utilisée par la suite pour corriger la courbe courant-tension de notre système en extraire les variations I-V réelle de la diode de silicium à température ambiante.

III-5-2 Correction de la courbe I-V du silicium

Avant de déterminer les paramètres de la diode, une correction est apportée aux données expérimentales [1-8]. Les courants de fuites quantifiés en utilisant la valeur obtenue pour la résistance Shunt R_{sh} sont retranchés à la caractéristique courant-tension expérimentale de notre système ($1N5227+R_o$). Le résultat de cette correction est représenté sur la figure ci-dessous.

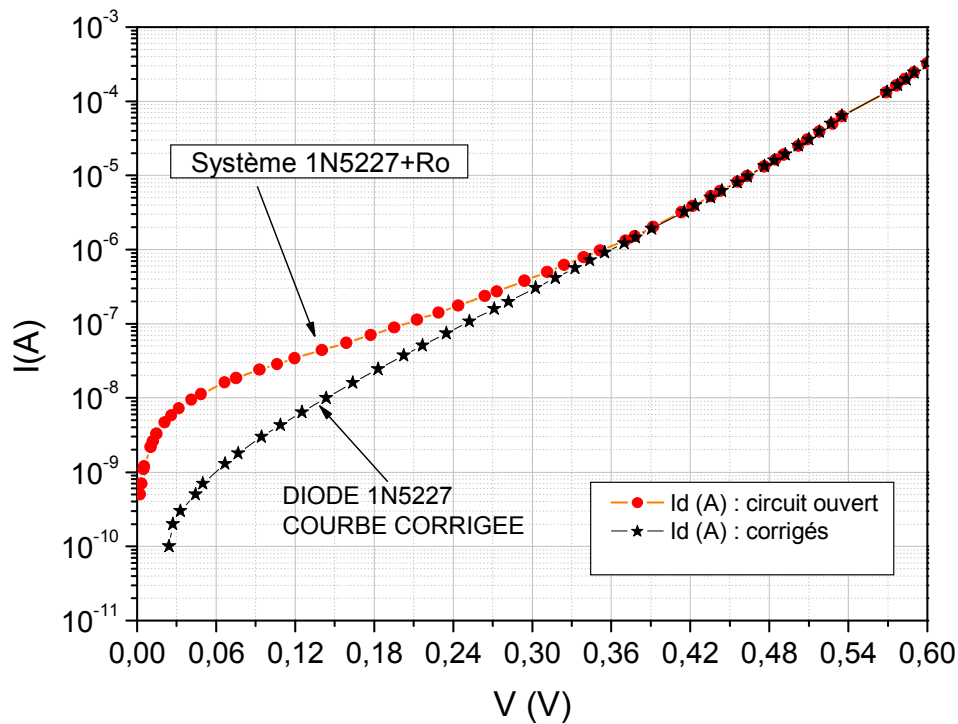
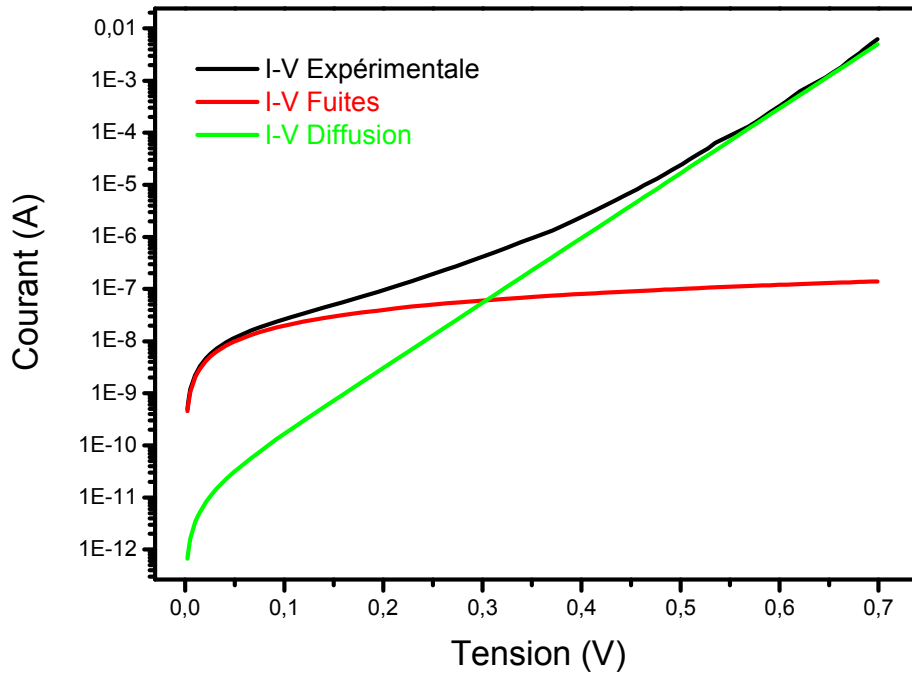


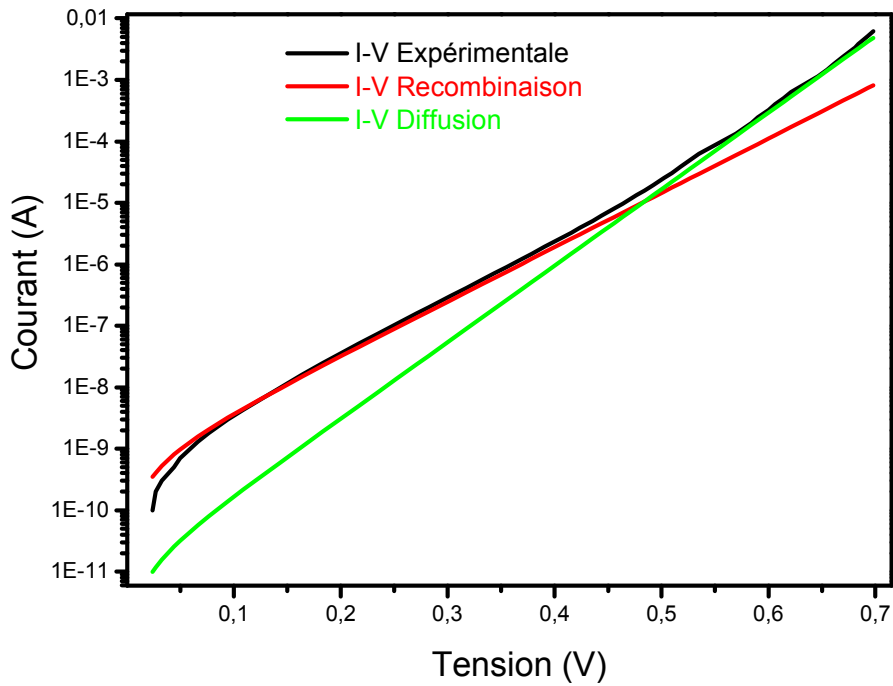
Figure III-10 : Caractéristiques courant-tension en échelle semi-logarithmique corrigée et non corrigée de l'échantillon 1N5227.

III-5-3 Modélisation des mécanismes de transport

Sur la figure III-11, nous avons comparés les résultats de calculs théoriques avec les valeurs expérimentales de la caractéristique courant-tension pour notre échantillon de silicium corrigé et non corrigé. La courbe noire représente les valeurs expérimentales et les courbes colorées les courants théoriques.



(a)



(b)

Figure III-11 : Caractéristiques I-V directe théorique et expérimentale pour Si.

a – sans correction,

b – avec correction.

III-6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, après une brève description de la structure étudié, utilisé pour les mesures, nous avons exposé l'ensemble des résultats de nos caractérisations électriques courant-tension à température ambiante.

Dans un premier temps, nous avons effectué une correction des caractéristiques obtenues sur échantillons de Silicium. La résistance de fuite trouvée expérimentalement par la technique proposée est de l'ordre de 5 M Ω . Ce procédé de rectification des données expérimentale s'est avéré très utile. Par cette méthode, les résultats obtenus sur un échantillon de l'industrie sont extrêmement encourageants.

La modélisation simple, basé sur les lois classiques des mécanismes de courants, confirme l'existence du phénomène de génération recombinaison dans notre échantillon (Silicium) aux faibles polarisations directes pour la courbe corrigé. Au-delà de 400 mV, la structure devient fortement polarisée et le mécanisme de diffusion domine le courant pour les deux courbes (sans correction et avec correction).

Références

- [1] Jurgen. H. Werner,
Schottky barrier and pn-junction I/V plots-small signal evaluation,
Appl. Phys. A 47, (1988) 291–300.
- [2] K. Mahi, K. A. Zemallache, A. Belasri, M. Mebarki et H. Aït Kaci,
Méthode expérimentale pour la quantification des courant de fuite et correction de la
caractéristique courant tension (I-V) dans un composant à semiconducteur,
Conférence internationale sur la physique et ses applications. CIPA
Oran (Algeria), Décembre 2-4 (2007).
- [3] K. Mahi, B. Messani, S. Mechraoui, H. Aït-Kaci,
New method for determination of the diode parameters in the presence of the
Leakage currents,
in: The International IEEE Conference on Microelectronics
(ICM), 17–20 december, (2012).
- [4] A. Kaminski, J. J. Marchand, A. Laugier,
I–V methods to extract junction parameters with special emphasis on low
series resistance,
Solid-State Electron. 43 (1999) 741–745.
- [5] M. Lyakas, R. Zaharia, and M. Eizenberg,
Analysis of nonideal Schottky and p-n junction diodes-Extraction of
parameters from I-V plots,
J. Appl. Phys. 78 (1995) 5481–5489.
- [6] K. Mahi, B. Messani, H. Aït-Kaci
Extraction of diode's electrical parameters under forward and room temperature
conditions in an InAsSb based device
J. Nano- Electron. Phys. 11, 04030, (2019)
- [7] A.Cheriet
Contribution à l'étude des dispositifs à hétérojonctions et à base
d'antimoniures: Application au photovoltaïque.
Thèse de doctorat, Université d'Oran1 (2017)

- [8] Nese Kavasoglu, A. Sertrap Kavasoglu, Sener Oktik,
A new method of diode ideality factor extraction from dark I–V curve,
Curr. Appl. Phys. 9 (2009) 833–838.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre travail de mémoire de master a porté sur l'étude de la caractéristique électrique courant tension d'une structure semiconductrice à jonction p-n. Pour comprendre la physique des semiconducteurs, les mécanismes de transport de charges dans les structures à la base de la jonction p-n sont étudiés ainsi que les paramètres qui les influencent.

La caractéristique électrique courant-tension est très importante puisqu'elle décrit le fonctionnement et les performances des dispositifs électroniques, particulièrement aux faibles niveaux d'injection (faibles polarisation). Le transport de charge électrique dans les composants à jonction p-n est conditionné par des courants de fuites (Résistance Shunt) qui se forme à la zone déserte (Z.C.E) entre les deux régions p et n de semiconducteur.

Par la méthode proposée, pour quantifie des courants de fuites, les résultats obtenus sur un échantillon de l'industrie sont extrêmement encourageants. L'idée de corriger les variations expérimentales courant-tension en retranchant les courants de fuites s'est avérée très efficace.

Une étude simple, basée sur des équations de transports, nous avons essayé de mettre en évidence l'influence de ces courants indésirables (courants des fuites) sur les mécanismes de conduction dans les composants à jonction p-n. Enfin nous avons effectué une modélisation phénoménologique des caractéristiques courant-tension à température ambiante (300K), par les lois théoriques du transport. Nous avons conclu:

Dans le sens direct des polarisations, inférieures à 200 mV, seul le mécanisme de recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace de la structure et responsable du courant d'obscurité. Au-delà de 400 mV, la structure devient fortement polarisée et le mécanisme de diffusion domine les courants.

Résumé

La caractéristique électrique courant-tension est très importante puisqu'elle décrit le fonctionnement et les performances des dispositifs électroniques, particulièrement aux faibles niveaux d'injection (faibles polarisation). Dans le cadre de ce mémoire de Master, nous nous sommes intéressés à un échantillon à homojonction, réalisé par la croissance de Silicium (Si). Afin de mettre en évidence les processus de transport électronique dans un composant à base de jonctions ou d'hétérojonctions p- n, nous avons mis au point une technique expérimentale simple pour quantifier les courants de fuites et corriger les caractéristiques expérimentales courant-tension. Cette technique a été appliquée avec succès sur un composant industriel au silicium.

Mots clés : *semiconducteur, jonction p-n, caractéristique I-V, résistance shunt.*