

## La Jonction, du Solaire à la Microélectronique\*

Jean-Pierre Charles<sup>(1)</sup>, Ahmed Haddi<sup>(1)</sup>, Alain Maouad<sup>(2)</sup>,  
Hazri Bakhtiar<sup>(3)</sup>, Abdellatif Zerga<sup>(4)</sup>, Alain Hoffmann<sup>(1)</sup>, Pierre Mialhe<sup>(5)</sup>.

<sup>1</sup> LICM - CLOES - SUPELEC - Université de Metz, France.

<sup>2</sup> Faculté des sciences 2 - Université Libanaise, Beyrouth, Liban.

<sup>3</sup> Dept. of Physics, Univ. Teknologi Malaysia, Johor, Malaisie.

<sup>4</sup> LPEM, Dept. Physique, Université de Tlemcen, Algérie.

<sup>5</sup> Centre d'Etudes Fondamentales - Université de Perpignan, France.

### 1. INTRODUCTION

Les applications les plus importantes de la conversion photovoltaïque ont longtemps été limitées au domaine spatial. Le développement des techniques et la prise de conscience des problèmes énergétiques et d'environnement concourent à un nouvel essor de cette source d'énergie. Son intérêt est d'autant plus grand que les sources traditionnelles industrielles sont éloignées, que l'habitat est distribué, et que les investissements liés à l'établissement d'un réseau de distribution sont plus élevés. La principale barrière à son développement terrestre a longtemps été le coût élevé des photopiles. Le panneau solaire à base de silicium fournit de l'électricité à 5FF le kW/h. Les recherches sur de nouvelles structures au silicium et sur de nouveaux matériaux permettent d'envisager de meilleurs rendements pour une fiabilité et des coûts attractifs.

La recherche portant sur les mécanismes de base, distorsion des bandes, mécanismes de recombinaison, phénomènes de transport, concernant autant les structures à monocristaux que celles à films minces polycristallins, reste d'actualité et revient même en avant-scène. Les acteurs sont multiples: théoriciens, physiciens expérimentateurs, fabricants, développeurs et utilisateurs. Le théoricien établira des modèles destinés à expliquer le comportement des structures. L'expérimentateur réalisera des mesures sous diverses conditions, déterminera les paramètres caractéristiques du comportement. Caractériser une jonction consiste à effectuer les mesures qui permettront de donner une représentation de ses caractéristiques électriques et à les analyser pour comprendre les mécanismes de conduction. Cette analyse consiste à réaliser une extraction de paramètres, à modéliser les processus, à simuler le fonctionnement. Les outils logiciels de simulation considérés concernent aussi bien la structure microélectronique que le circuit d'utilisation: PISCES-ATLAS de SILVACO ou ISE pour la structure, mettant en jeu la géométrie ainsi que les paramètres microscopiques impliqués dans les mécanismes de conduction, SPICE pour le circuit, demandant la connaissance des paramètres des circuits équivalents des éléments du circuit. La détermination de ces paramètres nécessite la réalisation de mesures électriques en continu, de mesures transitoires (constantes de temps, réponse fréquentielle,..) et de mesures capacitives principalement. Des mesures de réponse spectrale sont demandées pour les photopiles. Dans tous les cas la maîtrise des paramètres physiques de mesure, température, illumination,.. reste indispensable.

Cette caractérisation, prise au sens large, peut être réalisée, schématiquement, par le fabricant, le développeur, ou l'utilisateur. Les buts, cependant, diffèrent. Le fabricant cherchera une information permettant l'amélioration du procédé de fabrication. Le développeur demandera une assurance sur la qualité des composants sélectionnés pour une utilisation déterminée; l'information recherchée concernera les critères de sélections et la détermination de caractères intrinsèques pouvant donner cette assurance. L'utilisateur cherchera, de son côté, à analyser l'origine des dégradations conduisant à la destruction du composant pour sa propre application.

Les mesures réalisées sont de nature électrique ou optique: I(V), C(V), OCVD (Open Circuit Voltage Decay), bruit, réponse spectrale,... Toutes ces mesures doivent être faites sous contrôle parfait des conditions expérimentales telles que la température, le niveau et le spectre de l'illumination, et le temps. Une bonne compréhension des propriétés de l'irradiation solaire, naturelle ou simulée, est indispensable aussi bien au physicien pour son analyse des résultats que pour le concepteur de systèmes pour sa simulation.

Ce travail porte sur un aspect de la caractérisation et est consacré à l'analyse des méthodes d'extraction des paramètres de la jonction pour des mesures courant-tension réalisées en continu. La mesure courant-tension est historiquement la première technique développée par les physiciens pour l'analyse des jonctions. Jusqu'aux années 80 l'analyse était basée sur des approximations géométriques. Ce n'est que depuis le développement déferlant de l'informatique que des méthodes d'analyse numériques ont pu se développer. Malgré cela, dans le milieu industriel, les méthodes les plus couramment utilisées restent celles basées sur des approximations: elles permettent d'effectuer de simples tests destinés notamment à suivre un process. Notre propos n'est pas de préconiser l'élimination totale de ces techniques mais de montrer leurs limitations et de présenter les résultats que peut obtenir le physicien dans l'analyse des jonctions de la microélectronique par analyse numérique.

## 2. DEVELOPPEMENT HISTORIQUE DES MODELES

### 2.1. Photopile solaire idéale et principe de superposition

Sous sa représentation physique la plus simple, le modèle de photopile solaire comporte une zone de charge d'espace complètement vide de porteurs libres et séparant deux régions semiconductrices de types P et N supposées homogènes. L'expression du courant de la jonction  $I_j(V,T)$  est obtenue à partir de l'équation de Boltzmann, des équations de transport de Poisson, et des conditions aux limites, pour un semiconducteur donné. Sa première expression est issue du modèle de diffusion de Shockley [1949].

$$I_d = I_{01} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Sous éclairage, des paires électron-trou sont créées, presque qu'une paire pour chaque photon absorbé, si son énergie est supérieure au gap. Le courant produit est dû à ces porteurs minoritaires car s'il n'y a pas de recombinaison les porteurs photogénérés sont entraînés au loin de la barrière de potentiel. En pratique, cette barrière peut être une homojonction P-N ou une barrière de Schottky, hétérojonction ou contact métal - semiconducteur. Dans tous ces cas le modèle de la photopile solaire est réduit à une jonction et un générateur de courant:

$$I = I_{ph} - I_j \quad (2)$$

Cette équation exprime la superposition des caractéristiques à l'obscurité et sous éclairage par une translation le long de l'axe des courants par un vecteur  $I_{ph}$ . Ceci n'est qu'une première approximation consistant à supposer que les deux courants sont indépendants [Lindhölm et al. 1979] donc que l'éclairage ne modifie pas les mécanismes de transport.

Les mesures réalisées sur des photopiles de structures différentes, dans les mêmes conditions expérimentales, montrent des caractéristiques différentes. Pour une même photopile, les caractéristiques sont également modifiées par la température, le niveau et la distribution spectrale de l'éclairage. Aussi, dès la réalisation des premières photopiles homojonction au silicium stables destinées au spatial [Chapin et al. 1954], les chercheurs ont essayé de relier mesures et caractéristiques des structures avec mécanismes de transport. Des modèles analytiques ont été développés à partir des modèles de conduction électronique.

## 2.2. Photopile réelle

Le modèle de Shockley avait été développé pour les premières diodes de redressement à pointe [Shockley 1950](figure 01). Il était adapté à ces composants dont l'épaisseur du substrat était très grande et exprime une prédominance des pertes résistives par rapport aux autres:  $R_j$  y figure la barrière de potentiel métal-semiconducteur,  $R_s$  est fonction de la surface du contact et est un facteur limitatif important dans cette technologie primitive.

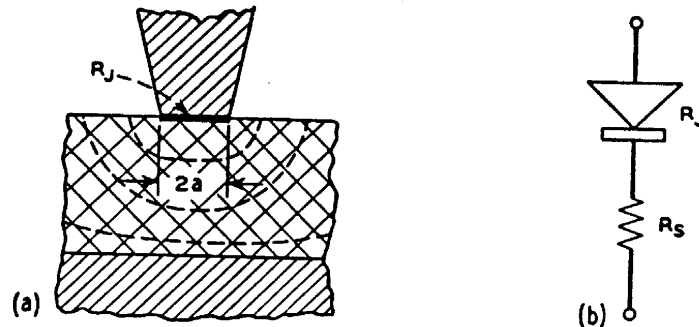


Fig. 1 - Schéma de la diode de redressement à pointe (a) et son circuit équivalent (b).

Le modèle de Rajknan et Shewchun [Rajknan et Shewchun 1979] est dérivé du précédent et adapté aux photopiles (figure 02).

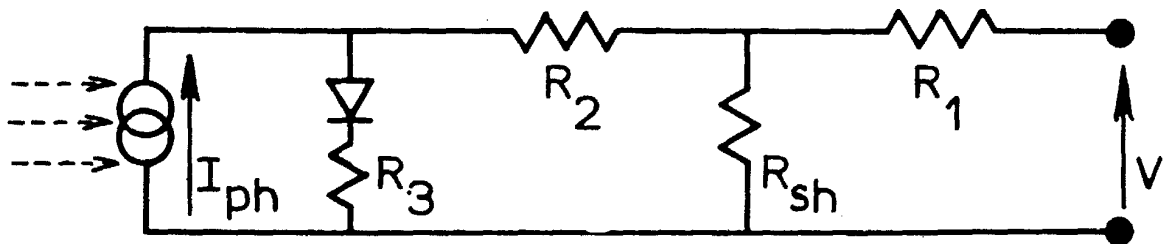


Fig. 2 - Circuit équivalent d'une photopile de technologie ancienne où la résistance série est remplacée par ses composantes  $R_1$  (contact métallique),  $R_2$  (couche superficielle) et  $R_3$  (substrat).

La résistance série y est remplacée par  $R_1$ , résistance du contact métallique,  $R_2$ , résistance superficielle du semiconducteur, et  $R_3$ , résistance de base. La détermination de  $R_3$  à partir d'une seule caractéristique devrait être faite pour de fortes densités de courant mais, dans ce cas, les effets thermiques sont importants et l'analyse plus difficile que pour les modèles examinés ci-après. Ce modèle correspondait aux technologies de l'époque mais les technologies récentes ont permis d'optimiser les structures, la géométrie de grille, et de réduire les pertes [Charles et al. 1981].

Le modèle à deux exponentielles est obtenu, dans des conditions de faible injection, en prenant en compte trois mécanismes essentiels:

- la diffusion [Neugroschel 1977, Fhrenbruch et Aranovich 1979] qui rend compte des mécanismes de recombinaison dans les régions quasi-neutres (notamment aux contacts). Elle s'exprime par un terme exponentiel ( $I_{dd}$ ) comportant un courant de saturation inverse  $I_{0d}$ .
- la recombinaison dans la zone de charge d'espace, par des centres recombinants associés à des niveaux situés dans la bande interdite pour une homojonction, qui est représentée par un terme exponentiel ( $I_{dr}$ ). Le courant de saturation inverse  $I_{0r}$  est une

fonction de la largeur de la zone de charge d'espace, de la durée de vie des porteurs minoritaires et de la section efficace des centre recombinants pour une homojonction. Le facteur de qualité,  $n$ , permet de qualifier les mécanismes de conduction:

- une valeur inférieure à l'unité est associée à une recombinaison de type Auger dans des conditions de forte injection ( $n=2/3$ ) [Hall 1981]. Pour une homojonction dissymétrique ce mécanisme conduit à des durées de vie de porteurs minoritaires réduites et à un courant de recombinaison élevé [Redfield 1979].
- $n=1$  correspond à la jonction idéale (ci-après).
- pour  $n$  compris entre 1 et 2, le niveau des pièges est décentré et  $n$  est alors dépendant de la polarisation [Chou 1971, Stirn 1972, Nussbaum 1973]. Dans le cas où les pièges sont localisés à la surface de la zone de charge d'espace [Chih-Tang Sah 1962] le facteur de qualité ne serait pas fonction de la polarisation [Faulkner et Buckingham 1968].
- la valeur particulière  $n=2$  correspond au modèle de Sah, Noyce et Shockley (ci-après).
- une valeur du facteur de qualité supérieure à 2 peut indiquer que la recombinaison s'effectue par des courants de fuite à la surface de la zone de charge d'espace [Chih-Tang Sah 1962, Fabre 1976], par des courants shunt indépendants de la température [Stirn 1972], et peut correspondre aussi à une distribution de pièges non uniforme avec une densité plus faible au milieu de la zone de charge d'espace [Shockley et Oueisser 1961].
- le troisième type de mécanisme pris en compte est l'effet Joule qui se traduit par des pertes d'énergie dans les résistances série,  $R_s$ , et shunt,  $R_{sh}$ . L'expression résultante correspondant à une caractéristique courant-tension pour une température et pour un éclairement donnés, en mode générateur:

$$I = I_{ph} - (V + R_s \cdot I) / R_{sh} - I_{dd} - I_{dr} \quad (3)$$

où:

$$I_{dd} = I_{0d} \cdot \{\exp[B \cdot (V + R_s \cdot I)] - 1\} \quad (3a)$$

$$I_{dr} = I_{0r} \cdot \{\exp[B \cdot (V + R_s \cdot I)] - 1\} \quad (3b)$$

$$B = q / (k \cdot T) \quad (3c)$$

Les paramètres du circuit équivalent (figure 03) sont donc au nombre de six:  $I_{ph}$ ,  $I_{0d}$ ,  $I_{0r}$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $R_{sh}$ , le facteur de qualité pouvant prendre une valeur différente de l'unité. Nous nommons ce modèle VDEM (deux exponentielles, variable).

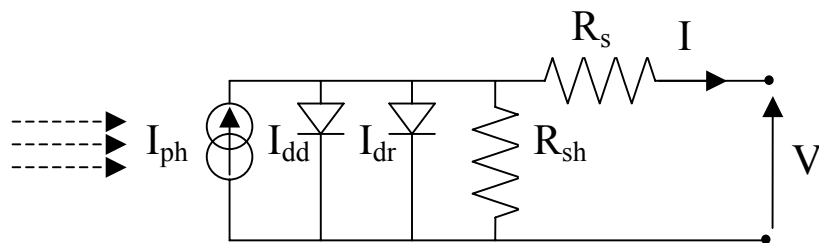


Fig. 3 - Schéma équivalent déduit de l'équation (3) à deux exponentielles (DEM) d'une photopile réelle, tenant compte des pertes résistives dans une technologie moderne et distinguant les mécanismes de recombinaison dans les zone de charge d'espace et dans les régions neutres.

Ces paramètres varient avec le niveau d'éclairement et avec la température [ Wolf and Rauschenbach 1963, Imamura et Portscheller 1970, Hovel 1975] selon les mécanismes impliqués, donc, selon le composant considéré.

Ce modèle à deux exponentielles donne une description précise de la caractéristique  $I(V)$  d'une photopile solaire fonctionnant comme générateur. Il correspond au modèle de la diode dans le simulateur SPICE. Pour une diode électronique (obscurité),  $I_{ph}$  est nul et l'équation est habituellement écrite pour un courant fourni par le circuit, en mode récepteur:

$$I = (V - R_s \cdot I) / R_{sh} + I_{dd} + I_{dr} \quad (4)$$

Un cas particulier se rencontre lorsque le facteur de qualité prend la valeur 2.

Cette valeur particulière,  $n=2$ , caractérise un niveau de centres recombinants central au gap et de distribution uniforme dans la zone de charge d'espace [Chih-Tang Sah et al. 1957S, Stirn 1972]. Ce cas est fréquent dans les jonctions des structures microélectroniques modernes (bipolaires,...). Les paramètres du circuit équivalent sont alors au nombre de cinq:  $I_{ph}$ ,  $I_{0d}$ ,  $I_{0r}$ ,  $R_s$  et  $R_{sh}$  et ce cas particulier est nommé, ici, CDEM (deux exponentielles, constant). Il correspond au même schéma de circuit équivalent que le VDEM( figure 03).

Un autre cas particulier correspond à deux possibilités, soit la jonction est de suffisamment bonne qualité pour que les mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace aient des effets négligeables devant ceux de la diffusion ( $n=1$ ), soit, au contraire, la recombinaison est le processus dominant et le facteur de qualité a une valeur différente de 1. L'équation se réduit à une seule exponentielle:

$$I = I_{ph} - (V + R_s \cdot I) / R_{sh} - I_{00} \cdot \{ \exp[B \cdot (V + R_s \cdot I)] - 1 \} \quad (5)$$

Les paramètres sont alors:  $I_{ph}$ ,  $I_{00}$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Le schéma du circuit équivalent simplifiée est donnée Figure 4. Ce modèle, nommé ici SEM (exponentielle simple), ne doit pas être confondu avec le modèle de même forme proposé aux débuts de l'histoire solaire: les modèles n'avaient alors pas été développés et  $n$ , déterminé graphiquement, sans base théorique, était qualifié d' 'empirique'.

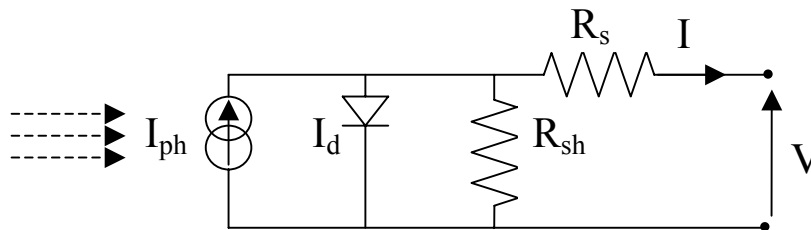


Fig. 4 - Schéma équivalent déduit de l'équation (5) à une exponentielle (SEM) associé aux cas de prépondérance de l'un des deux mécanismes de recombinaison.

Il apparaît donc ici évident que les modèles des équations 4 (CDEM) et 5 (SEM) sont des cas particuliers du modèle VDEM (équation 3).

### 2.3. Les modeles "utilisateurs"

Il faut encore préciser que les différentes familles d'utilisateurs ont adopté des "modèles" qui sont des réductions du modèle général mais qui répondent aux besoins de leurs applications.

#### - MODELE APPROXIMATION 1

C'est la diode de commutation pour laquelle on ne considère que le seuil de coupure  $V=0,7V$  pour le silicium.

### - MODELE APPROXIMATION 2

La tension varie linéairement avec le courant au dessus d'un certain seuil:

$$V_{BE} = V_{BE0} + h_{11}I_B \quad (6)$$

C'est l'équation correspondant au circuit équivalent d'entrée d'un transistor bipolaire en émetteur commun (Figure 5) dont la caractéristique est généralement représentée dans le troisième quadrant des caractéristiques d'un bipolaire.

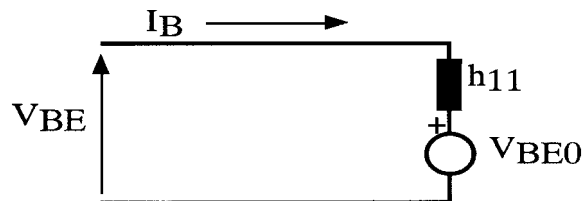


Fig. 5 - Schéma équivalent du circuit d'entrée d'un transistor bipolaire en émetteur commun.

### - MODELE APPROXIMATION 3

L'équation 2 est celle du Modèle SPICE de la diode en continu considérée comme un récepteur avec pertes résistives série et parallèle. Les paramètres sont  $I_{0d}$  et  $I_{0r}$ , courants de saturation inverses associés à la conduction et à la recombinaison,  $n$ , le facteur de qualité (Ideality Factor),  $R_s$  et  $R_{sh}$ , les résistances série et parallèle. Un jeu de paramètres devrait décrire toute la caractéristique, en admettant qu'aucun des paramètres ne dépend de la polarisation, ce qui semble être une approximation lorsqu'on sait qu'une caractéristique modélisée en direct ne reproduit pas les mesures en mode inverse..

Le problème, maintenant, est de déterminer les paramètres de cette équation générale ou particulière.

## 3. DETERMINATION DES PARAMETRES DU CIRCUIT EQUIVALENT

### 3.1. Méthodes géométriques

Les méthodes d'extraction des paramètres utilisés pour les photopiles et diodes peuvent être classées selon leur niveau d'approximation correspondant d'ailleurs généralement au développement historique des techniques de mesure et d'analyse. Les premières méthodes étaient graphiques. Certaines passaient par l'établissement d'abaques. Elles entraînent des erreurs de méthode supérieures aux erreurs de mesure. Nous les avons classées en trois catégories principales selon le type de données utilisées pour la détermination:

- **CARACTERISTIQUES A L'OBSCURITE ET SOUS ECLAIREMENT**  
Des paramètres du modèle à une seule exponentielle sont calculés à partir de deux caractéristiques prises à l'obscurité et sous éclaircissement: Imamura et Portscheller 1970, Rajkanan et Shewchum 1979, Singh et Singh 1983.
- **CARACTERISTIQUES SOUS DES ECLAIREMENTS VOISINS**  
La détermination est faite à partir de caractéristiques relevées pour des éclaircissements voisins: Wolf et Rauschenbach 1963, Panayotatos et Card 1978.
- **CARACTERISTIQUE SOUS UN SEUL ECLAIREMENT**  
La détermination est réalisée pour des points particuliers (circuit ouvert, court-circuit,..), sur une partie réduite de la caractéristique ou pour de forts éclaircissements

seulement [ Stirn 1972, Kammer et Ludington 1977, Neugroschel 1977, Fang et Hausser 1978, Chaffin et Osbourn 1980, Cape et Zehr 1980, Warashina et Ushirokawa 1980, Cape et al. 1981, Singal 1981, Araujo et Sanchez 1982, Miahle et Charrette 1983 ].

Chacune de ces méthodes ne permet de déterminer qu'un seul et parfois jusqu'à trois paramètres seulement sur les cinq ou six paramètres requis. Ceci explique leurs validité pour certaines structures lorsque les paramètres manquant sont négligeables. Elles produisent des valeurs souvent très différentes les unes des autres ce qui est bien plus grave. Sous faible éclairage certaines donnent même des valeurs négatives pour la résistance série. Nous les avons appliquées en remplaçant les déterminations géométriques par des calculs numériques équivalents de façon à réduire l'erreur de méthode au minimum [ Charles et al. 1984]. Les résultats obtenus pour la détermination de la résistance série sont donnés Figure 06 pour des éclairagements de 0,2 à 1,5xAM1.

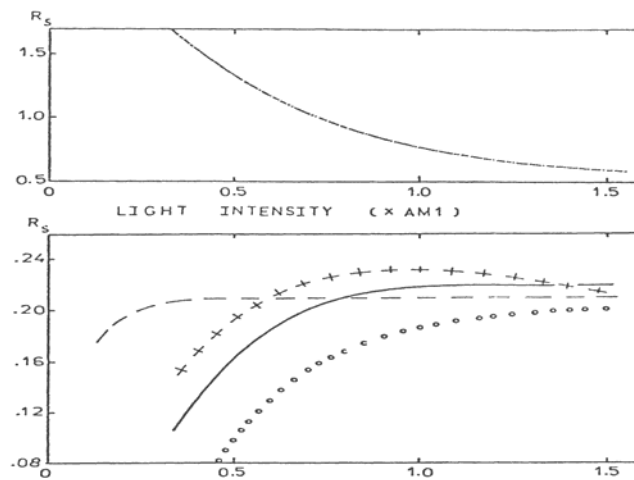


Fig. 6 - Variations de la résistance série en fonction de l'éclairement obtenues à partir des méthodes proposées par: [Cape et Zehr 1980] en petit pointillé représentée dans le cadre supérieur et [Singal 1981] ligne de croix, [Warashina et Ushirokawa 1980.] ligne de traits, [Araujo et Sanchez 1982] ligne de ronds, et la ligne pleine obtenue par résolution numérique du SEM, dans le cadre inférieur.

La difficulté d'appréciation de la validité d'un résultat provient souvent du fait du manque de référence. La seule référence dans cette analyse est la mesure elle même. La justification de la qualité d'une détermination se trouvera donc dans la comparaison entre la caractéristique mesurée et celle calculée à partir des paramètres déterminés. Les méthodes présentées ne permettent de déterminer qu'une partie des paramètres et il n'est pas possible ainsi de reconstruire une caractéristique pour comparaison-évaluation à partir d'une seule d'entre elles. Nous avons donc associé des méthodes de même catégorie et comparé leurs résultats avec ceux obtenus par analyse numérique [ Mekkaoui 1984]. Les mesures ont été réalisées sur deux photopiles au silicium, l'une ayant une résistance shunt très importante (2000  $\Omega$ ) et l'autre assez faible (40 $\Omega$ ). Les cas considérés représentent des cas quasi extrêmes d'utilisation normale.

L'analyse des mesures à l'obscurité (figure 7) et sous 1,3AM1 (figure 8) pour la photopile de bonne qualité (2000 $\Omega$ ), sous 0,2AM1 (figure 9) et sous AM0 (figure 10) pour la photopile de mauvaise de qualité (40  $\Omega$ ), montre que seule l'analyse numérique (présentant ci-après) permet d'obtenir une bonne représentation dans toutes les conditions de fonctionnement en polarisation et en éclairage. Les écarts entre mesures et courbes reconstituées sont parfois considérables et mettent en question toute interprétation physique donnée aux valeurs des

paramètres correspondants ! Les représentations auraient pu être données en  $\log I(V)$  habituelle à certains, cela n'aurait pas changé les conclusions tirées.

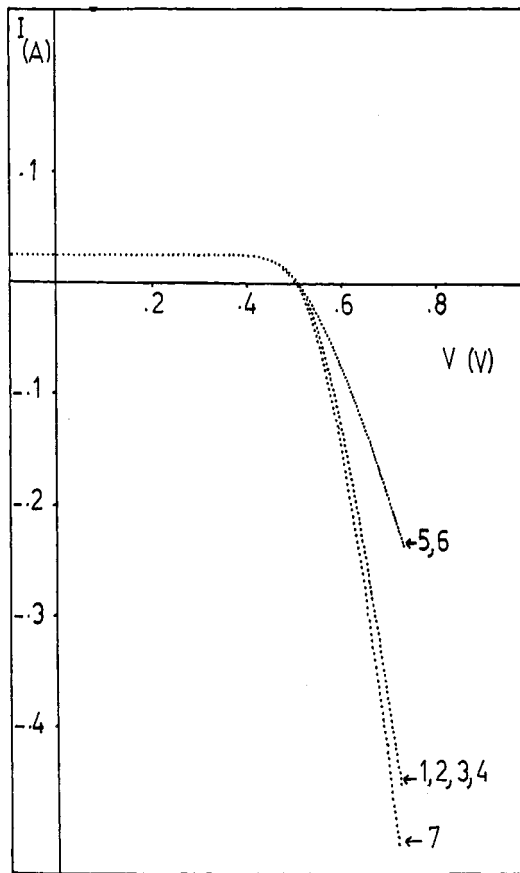


Fig. 7: Cas d'une photopile de bonne qualité ( $R_{sh}$  de 2000 Ohm) à l'obscurité. Comparaison de la mesure (1) avec les courbes reconstituées à partir des déterminations de paramètres effectuées par résolution numérique SEM (2) et VDEM (3), et à l'aide des méthodes approximatives de [Kammer et Ludington 1977, Neugroschel et al 1977, et Fang et hauser 1978] (4), [Kammer et Ludington 1977, Neugroschel et al 1977, et Rajkanan et Shewchum 1979] (5), et [Kammer et Ludington 1977, Imamura et Portscheller 1970, et Stirn 1972] (6).

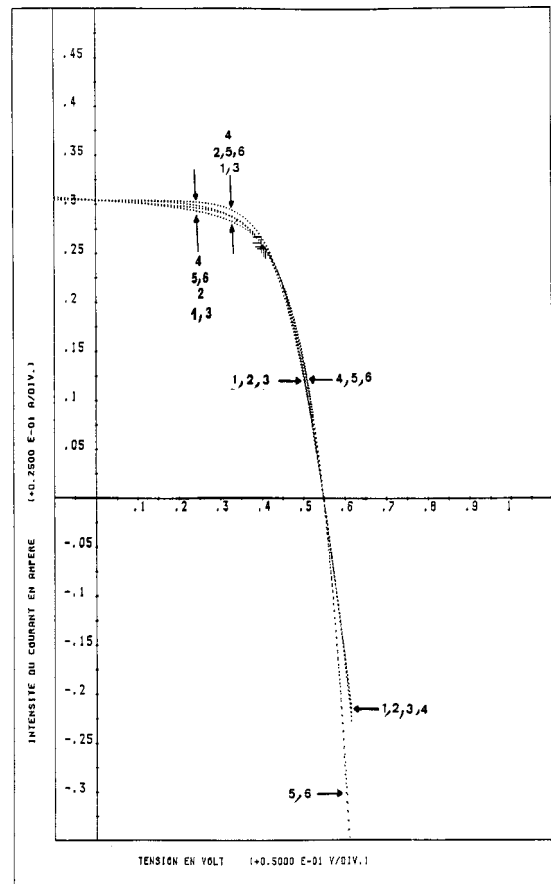


Fig. 8 : Cas d'une photopile de bonne qualité ( $R_{sh}$  de 2000 Ohm) sous fort éclaircissement  $1,3 \times AM1$ . Comparaison de la mesure (1) avec les courbes reconstituées à partir des déterminations de paramètres effectuées par résolution numérique SEM (2) et VDEM (3), et à l'aide des méthodes approximatives de [Warashina et Ushirokawa 1980] (4), [Singal 1981] (5), [Araujo et Sanchez 1982] (6), et la combinaison des méthodes [wolf et Rauschenbach 1963, et Panayotatos et Card 1978] pour la courbe (7).



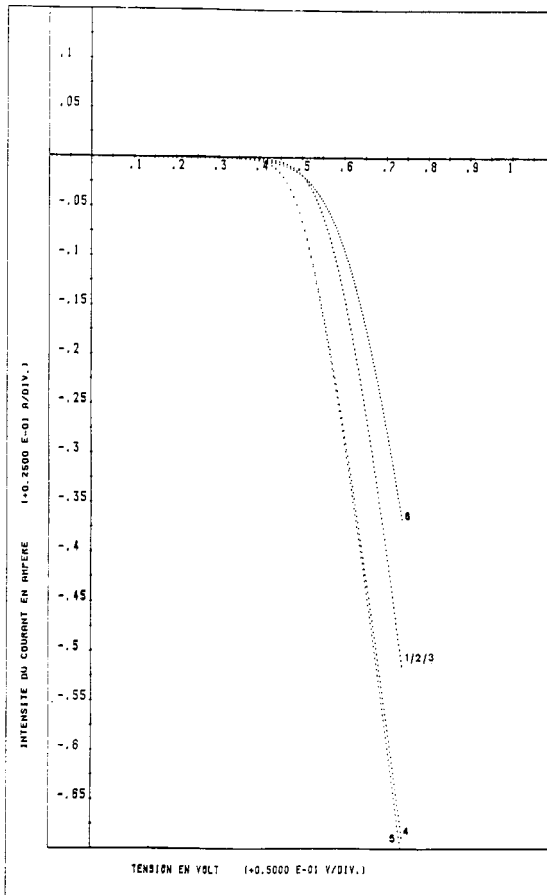


Fig. 9: Cas d'une photopile de qualité médiocre ( $R_{sh}$  de 40 Ohm) sous faible éclaircment  $0,2xAMI$ . Comparaison de la mesure (1) avec les courbes reconstituées à partir des déterminations de paramètres effectuées par résolution numérique SEM (2) et VDEM (3), et à l'aide des méthodes approximatives de [80WAR.U.] (4), [Singal 1981] (5), [Araujo et Sanchez 1982] (6), et la combinaison des méthodes [[wolf et Rauschenbach 1963, et Panayotatos et Card 1978] pour la courbe (7).

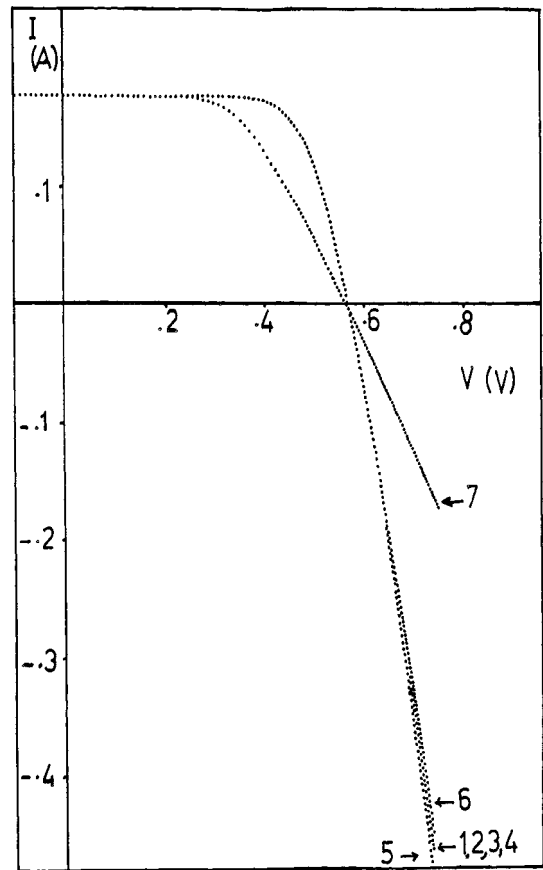


Fig. 10 : Cas d'une photopile de qualité médiocre ( $R_{sh}$  de 40 Ohm) sous éclaircment AMØ. Comparaison de la mesure (1) avec les courbes reconstituées à partir des déterminations de paramètres effectuées par résolution numérique SEM (2) et VDEM (3), et à l'aide des méthodes approximatives de [Kammer et Ludington 1977] (4), [Singal 1981] (5), et [Araujo et Sanchez 1982] (6).

### 3.2. ANALYSE NUMERIQUE

La possibilité, depuis de nombreuses années, d'obtenir un fichier informatique de mesure pour une caractéristique  $I(V)$ , permet d'effectuer une analyse numérique. La mesure automatique permet également d'effectuer des mesures de meilleure qualité pour de forts courants par minimisation des effets thermiques. Les méthodes d'analyse numériques sont nombreuses [Enebish et al. 1993, Kerschaver 1997] et devraient toutes, théoriquement, permettre d'arriver à un résultat dont la précision sera celle de la mesure même puisque la précision de calcul est réglable numériquement. La nature même de l'équation exponentielle implicite (eq. 3) à résoudre provoque des instabilités numériques et une grande sensibilité à des coefficients de calcul attachés à chaque méthode numérique. Là encore, la meilleure justification du résultat est la comparaison avec la mesure. La méthode que nous avons

développé [Charles et al. 1981, 1982 et 1985] est basée sur la méthode de Newton-Raphson et obtient une solution avec ajustage dans trois régions: court-circuit, point de puissance maximum et circuit ouvert sous éclairnement. Les paramètres de calcul propres à la méthode sont ajustés par optimisation du jeu de paramètres obtenus. Cette optimisation est réalisée en calculant l'écart quadratique moyen entre les points de mesure et la courbe calculée. L'efficacité de cette méthode a pu être appréciée lors des comparaisons présentées sur les figures 7-10 par des photopiles en utilisation extrême.

Nous allons maintenant présenter deux exemples d'application à des circuits microélectroniques modernes.

#### 4.EFFET DE LA GEOMETRIE D'UN MOS SUR LA JONCTION DRAIN SUBSTRAT

Pour une polarisation de grille nulle ( $V_{GS} = 0V$ ), les caractéristiques de la jonction drain-substrat, mesurées sur des transistors de différentes géométries ( $W/L$ ) (figure 11), sont données sur la figure 12. Les transistors ayant une même géométrie ne présentent pas de dispersion.

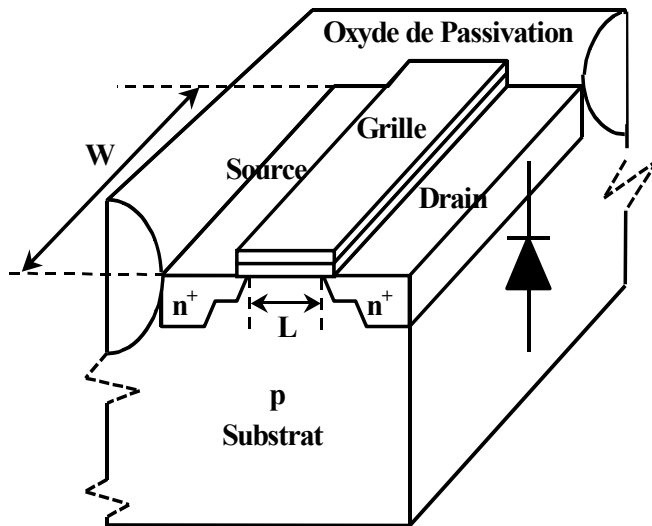


Fig. 11 - Représentation de la structure des transistors MOS (technologie mémoire) de largeurs ( $W$ ) et longueurs ( $L$ ) de canal différentes, permettant de localiser la jonction drain-substrat.

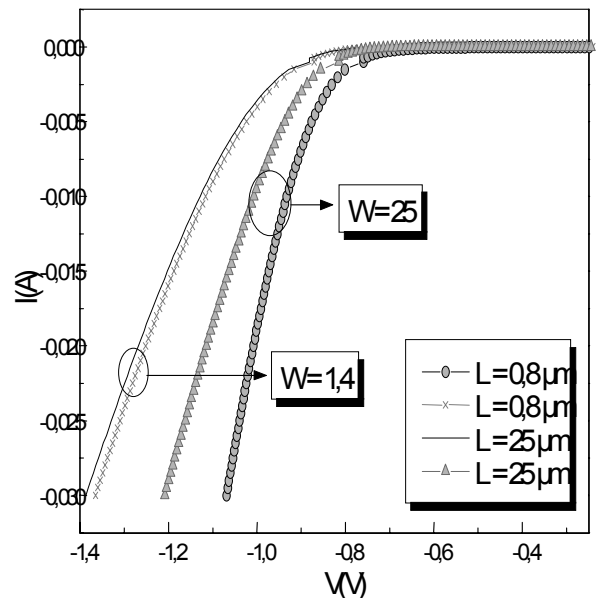


Fig. 12 - Caractéristiques  $I(V)$  de jonctions drain-substrat pour des transistors de même longueur de canal ( $L$ ) illustrant l'influence importante de la valeur de la largeur ( $W$ ) du canal.

Dans l'étude de la jonction, les structures ayant une même largeur  $W$  ne devraient pas présenter d'influence notable en fonction de la longueur du canal du MOSFET,  $L$ . Cependant, les paramètres extraits à partir du logiciel sont rapportés sur les figures 13.a ,b, c et d et montrent bien un influence de la géométrie. Le modèle VDEM est celui qui présente la meilleure description des mesures [Kerschaver et al. 1997].

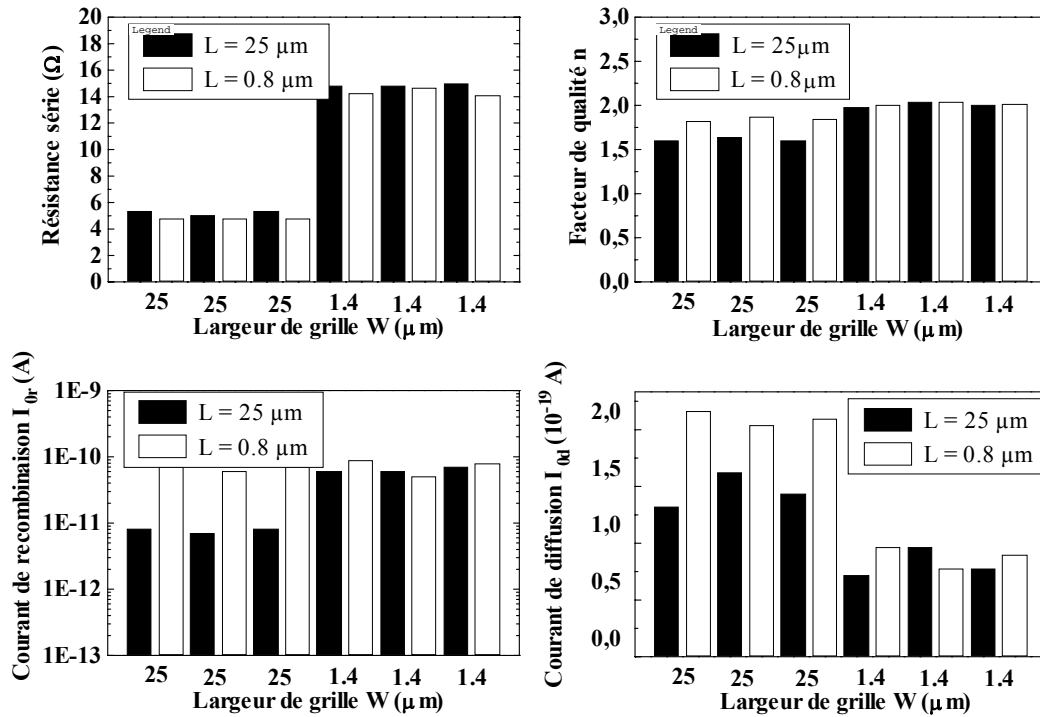


Fig. 13 - Variations des paramètres de la jonction en fonction des dimensions de la grille (W/L).

Le facteur de qualité  $A$  augmente lorsque la géométrie diminue traduisant une augmentation du processus de recombinaison dans la zone de charge d'espace. La résistance série  $R_s$  diminue fortement avec la largeur  $W$ , cependant, elle présente également une diminution avec la longueur  $L$  du canal du MOSFET. Les courants de saturation associés à la diffusion  $I_{0d}$  et à la recombinaison  $I_{0r}$  varient également avec la géométrie. Pour des MOSFETs de très petites surfaces les défauts introduits lors de la fabrication, jouent un rôle important dans l'étude du courant de diode. Leurs effets sont responsables de l'augmentation du courant de recombinaison et du facteur de qualité [de la Barbonnie et al. 1998]. L'étude des jonctions peut-être ainsi un moyen d'évaluation du processus technologique et permet de mettre en évidence une détérioration dans le domaine submicronique.

### 5. RESISTANCE SERIE ET RESISTANCE DU CANAL D'UN IGBT

La complémentarité des avantages des structures MOS et bipolaires a permis de réaliser des composants à forte capacité en courant, mais n'exigeant que de faibles puissances de commande pour de grandes performances en commutation. L'IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) est l'un des composants intégrant dans une même structure un MOSFET et un transistor bipolaire [96LM.]. La figure 14 montre une coupe verticale d'une cellule non à l'échelle ainsi qu'une vue de dessus de plusieurs cellules.

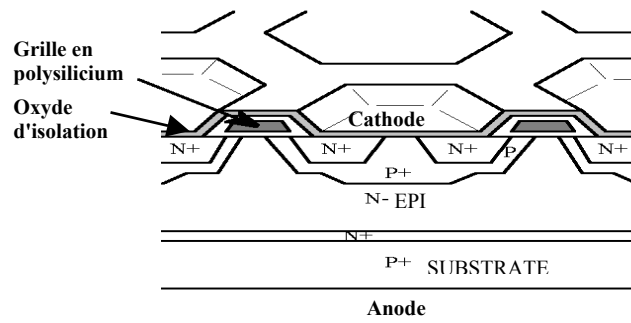


Fig. 14 : Coupe verticale d'une cellule (non à l'échelle épaisseur) parmi les quelques 4 000 cellules d'un IGBT. La perspective montre la forme hexagonale avec les contacts des cathodes dans les cuvettes

Certains paramètres électriques de l'IGBT peuvent être déterminés pour différentes valeurs de la tension de commande  $V_{GK}$  à partir des caractéristiques de sortie  $I_{AK} = f(V_{AK})$  et de transfert  $I_{AK} = f(V_{GK})$

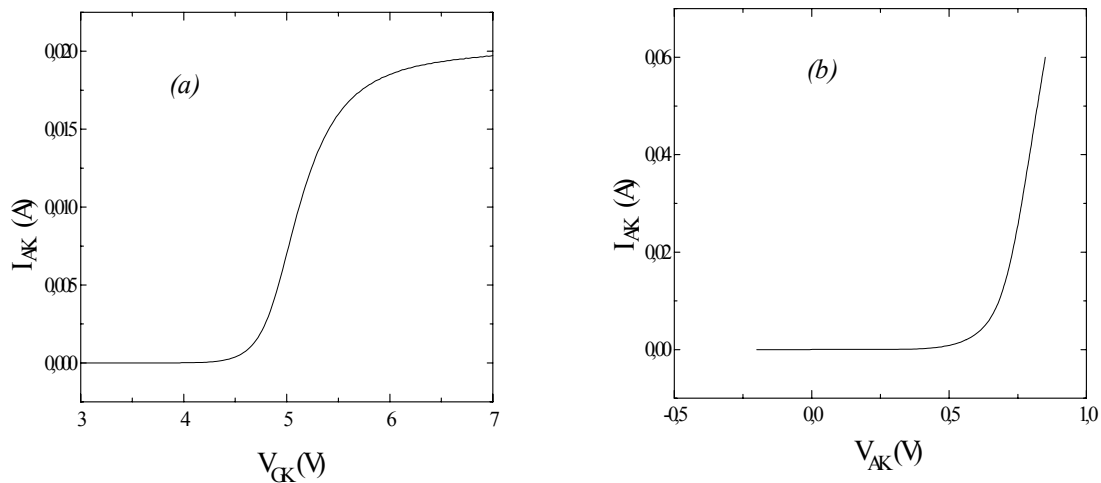


Fig. 15 - Caractéristique de transfert  $I_{AK}(V_{GK})$  en fonctionnement IGBT (courbe a) et caractéristique de sortie  $I_{AK}(V_{AK})$  obtenue pour une tension de grille au moins supérieure à la tension de seuil de façon à rendre le canal conducteur; cette caractéristique est donc celle de la jonction interne structurale substrat-épi.

La caractéristique de transfert, représentée sur la figure 15(a), permet par une simple extrapolation de la zone linéaire de déterminer la tension du seuil du MOSFET (ici  $V_{TH} = +4,5$  V). L'analyse numérique des caractéristiques expérimentales  $I_{AK} = f(V_{AK})$  (Fig.15b) obtenues, chacune, pour un  $V_{GK}$  supérieur ou égal à la tension de seuil  $V_{TH}$ , permet d'extraire la valeur de la résistance série  $R_S$ . Le tableau 01 montre les valeurs des paramètres extraits par analyse [Haddi 1999, Maouad 1999].

**Tableau 1** : Valeurs des paramètres extraits par analyse numérique VDEM.

	$I_{0d}$ (A)	$I_{0r}$ (A)	n	$R_S$ ( $\Omega$ )	$R_C$ ( $\Omega$ )
$V_{GK} = 5V$	$2,7 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	3,2	2	1,4
$V_{GK} = 7V$	$2,3 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	2,8	0,7	0,1
$V_{GK} = 9V$	$3,7 \cdot 10^{-14}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	2,5	0,6	0

La résistance série  $R_S$  comporte, dans ce cas, la résistance d'accès  $R_A$  et celle du canal  $R_C$ . La résistance du canal est presque nulle en régime de forte inversion ( $V_{GK} \gg V_{TH}$ ). La résistance d'accès  $R_A$  est déterminée:

$$R_S = R_A = 0,6 \Omega \quad (10)$$

La variation de la résistance du canal peut alors être déduite de celle de  $R_S$ :  $R_C = R_S - R_A$ . On remarque, en lisant ce tableau, que la simple modification de la résistance du canal par action électrostatique ( $V_{GK}$ ) entraîne un rééquilibrage des paramètres de la jonction correspondant donc à une modification de ses processus de conduction bien qu'aucune action physique ne soit exercée au niveau de la zone de charge d'espace hors la variation de sa largeur due à la redistribution des potentiels dans la structure. Ces résultats confirment l'étude de la dépendance des paramètres avec la polarisation [ Charles et al. 1985]. Cette méthode originale permet aussi de caractériser les dégradations dans le canal suite à des dégradations d'origines industrielles (porteurs chauds) [Maouad 1999] ou radiatives (charges piégées dans l'oxyde et à l'interface Si/SiO<sub>2</sub>) [ Haddi 1999].

## 6. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons voulu montrer l'interconnexion profonde entre les techniques d'analyse et de caractérisation pour les différentes technologies, depuis les photopiles jusqu'à des structures de pure microélectronique: technologies de mémoires MOS et d'électronique de puissance. Ce chemin, du solaire à la microélectronique, peut et doit être pris à l'envers par le chercheur: les progrès et les développements de nouvelles techniques de mesure, d'analyse et de procédés en microélectronique doivent être guettés car ils peuvent souvent être adaptés au domaine solaire. La filière photovoltaïque, du fait des progrès de la technologie, reste partie intégrante de la microélectronique.

## . REFERENCES

W. Shockley *The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors..* The Bell System Technical Journal, 28/3 (1949) 435-489.

W. Shockley *Electrons and Holes in Semiconductors.* The Bell Telephone Laboratories Series, Van Nostrand, New York, 1950.

D.M. Chapin, C.S. Fuller, and G.L. Pearson., *A New Silicon p-n Junction Photocell for Coverting Solar Raditation into Electrical Power.* J. of Applied Phys., 25/5(1954)676-677.

Chih-Tang Sah, Robert N. Noyce, and William Shockley. *Carrier Generation and Recombination in p-n Junctions Characteristics.* Proceedings of the IRE, 45, Sept. (1957) 1228-1243

- W. Shockley and H.J. Oueisser. *Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells*. J. of Applied Physics, 32/3(1961)510-519.
- Chih-Tang Sah. *Effect of Surface Recombination and Channel on p-n Junction and Transistors Characteristics*. IRE Transactions on Electron Devices, ED-9, Jan. (1962) 94-108.
- M. Wolf and H. Rauschenbach. *Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements*, Advanced Energy Conversion, 3(1963)455-479.
- E.A. Faulkner and M.J. Buckingham, *Modified Theory of the Current/Voltage Relation in Silicon p-n Junctions*, Electronics Letters, 4/17(1968)359-360.
- M.S. Imamura and J.I. Portscher, *An Evaluation of the Methods of Determining Solar Cell Series Resistance*, Proc. 8th Photovoltaic Specialists' Conf., Seattle, WA, 1970, pp. 102-107.
- S. Chou, *An Investigation of Lateral Transistors - D.C. Characteristics*. Solid - State Electronics, 14/9(1971)811-826.
- R.J. Stirn, *Junction Characteristics of Silicon Solar Cells*, Proc. 9th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., Silver Spring, Maryland, May 2-4, 1972, pp. 72-82.
- A. Nussbaum, *Generation-Recombination Characteristic Behavior of Silicon Diodes*, Phys. Stat. Sol.(a), 19/2(1973)441-450.
- H.J. Hovel., *Semiconductors and Semimetals*. in "Solar Cells", Vol. 11, Academic Press, New York, 1975.
- F. Fabre, *MIS Silicon Solar Cells*. . Applied Phys. Letters, 29/9(1976)607-610.
- D.W. Kammer and M.A. Ludington, *Laboratory Experiments with Silicon Solar Cells*. Am. J. Phys., 45/7(1977)602-605.
- A. Neugroschel, F.A. Lindholm, and C. Sah, *A Method for Determining the Emitter and Base Lifetimes in p-n Junction Diodes*, IEEE Transactions on Electron Devices, ED-24/6 (1977) 662-671.
- C.R. Fang and J.R. Hauser, *A Two Dimensional Analysis of Sheet Resistance and Contact Resistance Effects in Solar Cells*, . Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., Washington, D.C., June 5-8, 1978, pp. 1306-1311.
- P. Panayotatos and H.C. Card, *Experimental Critique of the Simple Schottky Theory of Metalsilicon Solar Cells Using a Range of Metals and Illumination Levels*, Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., Washington, D.C., June 5-8, 1978, pp. 634-638.
- A.L. Fhrenbruch and F. Aranovich, *Heterojunction Phenomena and Interfacial Defects in Photovoltaic Converters*, Topics in Applied Physics, Vol. 31, ed. B.O. Seraphin, Springer-Verlag, Berlin, 1979. p. 257
- F. A.Lindholm, J. G. Fossum, and E. L. Burgess, *Application of the Superposition Principle to Solar-Cell Analysis*. IEEE Transactions on Electron Devices, ED-26/3 (1979) 165-171.
- K. Rajkanan and J. Shewchum, *A Better Approach to the Evaluation of the Series Resistance of Solar Cells*. Solid-State Electronics, 22/2(1979)193-197.
- D. Redfield, *Doping Effects in Silicon: the Role of Auger Processes*. Solar Cells, 3(1981)313-326.
- J.A. Cape and S.W. Zehr, *Effect of Temperature Variation in Concentrator Cell Series Resistance Measurement*, Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., San Diego, California, Jan 6-10, 1980, pp 449-452.
- R.J. Chaffin and G.C. Osbourn, *Measurement of Concentrator Solar Cell Series Resistance by Flash Testing*, Appl. Phys. Lett., 37/7(1980)637-639.

- M. Warashina and A. Ushirokawa, Simple Method for the Determination of Series Resistance and Maximum Power of Solar Cells, *Jap. J. Appl. Phys.*, 19/2(1980)179-182.
- J.A. Cape, J.R. Oliver, and R.J. Chaffin, A Simplified Flashlamp Technique for Solar Cell Series Resistance Measurements.. *Solar Cells*, 3(1981)215-219.
- J.-P. Charles, M. Abdelkhrim, Y.H. Muoy, and P. Mialhe, A Practical Method of Analysis of the Current-Voltage Characteristics of Solar Cells. *Solar Cells*, 4 (1981) 169-178.
- R.N. Hall, Review Paper: Silicon Photovoltaic Cells, *Solid-State Electronics*, 24/7A (1981)595-616.
- C.M. Singal, Analytical Expressions for the Series-Resistance-Dependent Maximum Power Point and Curve Factor for Solar Cells, . *Solar Cells*, 3(1981)163-177.
- C.L. Araujo and E. Sanchez, Analytical Expressions for the Determination of the Maximum Power Point and the Fill Factor of a Solar Cell, . *Solar Cells*, 5(1982)377-386.
- J.-P. Charles, L. Bayo, P. Mialhe, and G. Bordure, Electrical Modelling of Solar Cells as Power Systems, *Proc. International AMSE Conf. Modelling and Simulation, Paris-Sud, July 1-3, 1982 AMSE Press*, 69160 Tassin, 8 (1982) 75-79.
- V.N. Singh and P.P. Singh, A Method for the Measurement of Solar Cell Series Resistance. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16(1983)1823-1825.
- P. Mialhe and J. Charette, Experimental Analysis of I-V Characteristics of Solar Cells, *Am. J. Phys.*, 51/1(1983)68-70.
- Etude Comparative des Méthodes de Détermination des Paramètres des Modèles de I. Mekkaoui Alaoui, Caractérisation I(V) des Photopiles Solaires, Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle - Université des Sciences et Techniques du Languedoc- France (1984).
- J.-P. Charles, I. Mekkaoui-Alaoui, G. Bordure et P. Mialhe, Etude comparative des circuits équivalents à une ou deux diodes en vue d'une simulation précise des photopiles, *Revue de Physique Appliquée*, 19 (sept) (1984) 851-857.
- J.-P. Charles, I. Mekkaoui-Alaoui, and G. Bordure, A Critical Study of the Effectiveness of the Single and Double Exponential Models for I-V Characterization of Solar Cells, . *Solid-State Electronics*, 28/8(1985)807-820.
- N. Enebish, D. Agchbayar, S. Dorjkhanda, D. Baatar, and I. Ylemj, Numerical Analysis of Solar Cell Current-Voltage Characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29(1993)201-208.
- Omar Elmazria, Caractérisation et simulation de l'IGBT dans le but d'optimiser ses performances au moyen d'irradiation par électrons, . Thèse de Doctorat, 15 novembre 1996, Université de Metz.
- Eloi Blampain, Analyse et étude de transistors nLDDMOSFETs de technologie 1,2 $\mu$ m et des effets induits par irradiations, Thèse de Doctorat, 12 mai 1997, Université de Metz.
- E. Van Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, and R. Mertens, Simple and Fast Extraction Technique for the Parameters in the Double Exponential Model for the I-V Characteristics of Solar Cells, 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, June 30- July 4, 1997, pp. 2438-2445.
- M. de la Bardonnie, P. Mialhe, E. Bendada, E. Blampain, A. Hoffmann, and J.-P. Charles Diode Parameter Determination Applied to LDD MOSFETs for Device Characterization, *Active and Passive Elect. Comp.*, 20(1998)157-163.
- A. Haddi, Analyse des défauts induits par irradiations ionisantes et à effets de déplacement dans des structures MCT (MOS Controlles Thyristor) à partir de mesures et par simulation, Thèse de Doctorat, 15 novembre 1999, Université de Metz.

A. Maouad, Caractérisation des dégradations des IGBTs en milieu industriel.. Thèse de Doctorat, 26 novembre 1999, Université de Metz.