

## Sujet de thèse

### **Etude et Développement de la mesure par OCVD (Open Circuit Voltage Decay) de durées de vie des porteurs minoritaires pour applications PV et photodétecteurs**

**Directeur de thèse :** Alain Dollet, Directeur de Recherche, dollet@univ-perp.fr

**Codirecteur :** Arnaud Perona, Maître de Conférences, arnaud.perona@univ-perp.fr

**Coencadrant :** Matthieu Caussanel, Maître de Conférences, matthieu.caussanel@univ-perp.fr

**Mots-clés :** modélisation, expérimentation, physique du semiconducteur, semiconducteurs III/V, durée de vie de porteurs minoritaires.

#### **Contexte**

Les systèmes de conversion photonique (spectre visible ou infra rouge) utilisent en très grande majorité des jonctions à base de semiconducteurs. La technologie à base de silicium est la plus répandue pour fabriquer des cellules photovoltaïques (rendement maximum : 27,6%). Sous concentration solaire, les rendements des cellules multijonctions à base de semiconducteurs III/V (arséniures et phosphures) sont les plus élevés (rendements max 47,1%, 6 jonctions à 143 soleils [1]). Ces cellules sont également candidates aux applications de couplage CSP/CPV (Concentrated Solar Power/Concentrated PhotoVoltaics). Mais leur réalisation est chère et complexe. Les antimoniures sont actuellement à l'étude pour fabriquer des cellules multijonctions. En effet leur utilisation simplifie grandement le processus de fabrication puisqu'elle permet une croissance monolithique de la structure sur un seul substrat. Le laboratoire PROMES (UPR 8521 CNRS en convention avec l'UPVD) collabore en région dans le cadre du LABEX SOLSTICE avec l'IES de Montpellier (Institut d'Électronique et des Systèmes), pour développer des cellules PV multi-jonctions à base d'éléments III du tableau périodique des éléments et d'antimoine (Sb) types  $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$  et  $Al_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ , pour des applications CPV [2, 3, 4]. Ces mêmes antimoniures sont également étudiés pour application à la vision nocturne puisque leur petit gap permet de convertir des photons dans l'infrarouge.

Le design de ces composants est tributaire du comportement des porteurs de charge minoritaires. De nombreuses techniques existent pour caractériser la Durée de Vie des Porteurs de Charge Minoritaires (DVPM). Ces techniques dépendent du type de matériau à caractériser. La PCD (PhotoConductivity Decay), la QssPC (Quasi-Steady-State Photoconductance) et la TRPL (Transient PhotoLuminescence). La PCD et la QssPC basées sur les mesures transitoires de photoconductivité ne sont pas adaptées aux DVPM très courtes (< 10 ns) telles que celles des matériaux III/Sb. La TRPL, basée sur les mesures transitoires de photoluminescence est, quant à elle, très onéreuse et difficilement adaptable à la caractérisation de matériaux à petits gaps (< 0.75 eV) comme le GaSb.

Il existe une autre méthode de caractérisation de DVPM : l'OCVD pour Open Circuit Voltage Decay [5,6,7]. C'est une technique fonctionnant uniquement sur des jonctions PN. Son utilisation, dédiée historiquement à la mesure de DVPM > 100 ns comme dans le silicium, est délicate pour des DVPM < 1 ns.

## Présentation détaillée du projet doctoral

La réalisation de structures optoélectroniques (cellules PV, photodétecteurs) passe avant tout par l'optimisation de ses niveaux de dopage et des épaisseurs de ses couches. Ces dernières dépendent directement de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires (électrons dans la zone dopée p, trous dans la zone dopée n), c'est-à-dire de la distance moyenne parcourue par les porteurs minoritaires avant recombinaison. Elle doit donc être au moins égale à l'épaisseur de la couche concernée. Elle est définie par la relation suivante :  $L_{n,p} = \sqrt{D_{n,p}\tau_{n,p}}$  où  $D_{n,p}$  est le coefficient de diffusion (capacité à diffuser d'une espèce en fonction de la température) et  $\tau_{n,p}$  est la durée de vie des porteurs minoritaires, durée moyenne au bout de laquelle les porteurs se recombinaison. Cette durée de vie dépend du matériau lui-même et de la quantité de défauts dans la structure.

L'OCVD pour Open Circuit Voltage Decay est une technique de mesure de durée de vie de porteurs minoritaires à faible coût de réalisation, basée sur l'enregistrement de la tension aux bornes d'une jonction PN après arrêt soudain de sa polarisation. En théorie, cette décroissance suit une loi linéaire en fonction du temps, dont l'inverse de la pente est proportionnel à la durée de vie à caractériser (figure 1).

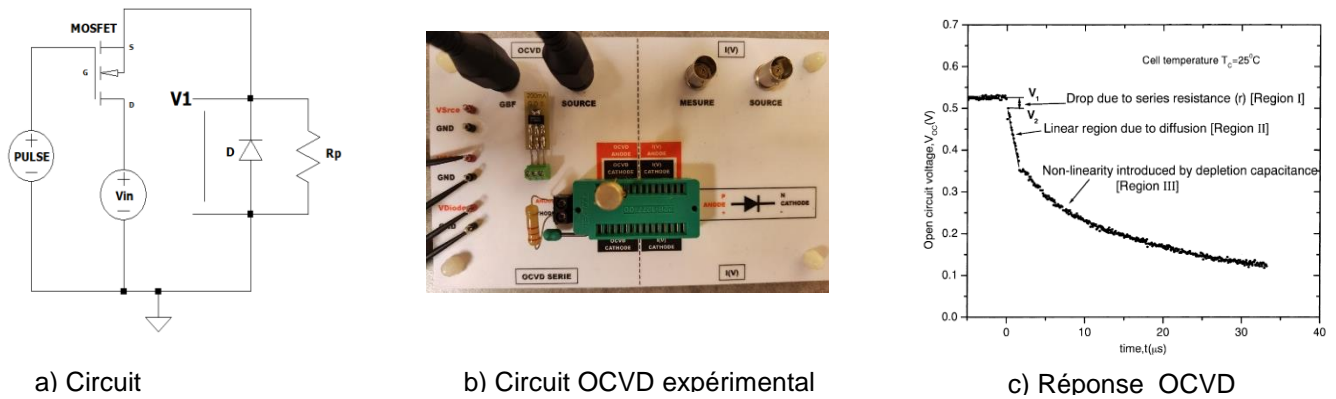


Figure 1

Cette méthode tout électrique, est d'autant plus sensible au circuit qui la compose, que les phénomènes à mesurer sont courts. Mais elle présente aussi l'avantage, pour des applications industrielles, de pouvoir caractériser les durées de vie de porteurs minoritaires dans les composants optoélectroniques en bout de chaîne de fabrication, munis de contacts électriques, ce que ne permet pas par exemple la TRPL (TRANSIENT PhotoLuminescence), qui fonctionne sous excitation optique et comptage de photons émis. L'OCVD peut donc être un précieux outil d'estimation de la quantité de défauts générés lors du processus de réalisation et servir alors à l'optimisation du processus de gravure et de métallisation du composant.

De précédents travaux de thèse ont permis de mettre en évidence l'importance du design des jonctions à caractériser afin d'extraire au mieux la durée de vie et de comprendre les phénomènes mis en jeu lors de l'arrêt soudain de l'excitation électrique [8,9].

Le banc de mesure a pu être amélioré après avoir étudié l'effet de l'ajout de résistances et de capacités parallèles [10,11].

Grâce à ces travaux de thèse, la compétition entre les différents phénomènes capacitifs masquant la partie linéaire d'intérêt de la courbe OCVD, est maintenant assimilée et peut-être maîtrisée.

## Objectifs

L'objectif de ce nouveau travail de thèse est de rendre opérationnel le banc de mesure OCVD afin de caractériser les durées de vie de porteurs minoritaires de n'importe quel type de matériaux semiconducteur, de 80 à 500 K.

Les matériaux étudiés étaient à base de silicium et de GaAs. La poursuite de ce travail portera sur la simulation de la réponse de matériaux antimoniures au moyen du logiciel TCAD Santaurus, et sur l'optimisation du banc d'essai expérimental qui est déjà opérationnel. Ce dernier qui fonctionne à température ambiante avec des jonctions en silicium dont les durées de vie sont élevées devra fonctionner avec des matériaux III/V, de durées de vie beaucoup plus faibles, et cela dans des plages de température de 80 à 400 K. Ces plages de température sont celles auxquelles fonctionnent les différents systèmes à base de III/V que sont les photodétecteurs de vision nocturne (80 K), les cellules PV sous concentration solaire (380 K) et celles dédiées au couplage CSP/CPV (500 K).

Deux types de circuit OCVD peuvent être exploités : i) le circuit parallèle, fonctionnant avec une source de courant et dans laquelle MOSFET est parallèle à l'échantillon à caractériser et ii) le circuit série, fonctionnant avec une source de tension, avec le MOSFET est en série.

Dans chaque type de circuit, un ou deux MOSFETs associés tête bêche peuvent jouer le rôle d'interrupteur. Il faudra déterminer quelle configuration offre les réponses OCVD les plus franches (décroissances linéaires de la tension aux bornes de la diode après arrêt soudain de sa polarisation). L'effet de la température devra être soigneusement analysé.

Les simulations des comportements des différents interrupteurs électroniques seront réalisées avec le logiciel TCAD Santaurus.

Une fois le banc mis au point pour fonctionner dans les différentes gammes de température, des caractérisations seront effectuées sur des alliages à base d'antimoniures dédiés au PV sous concentration solaire, au couplage CSP/CPV et à la vision nocturne. Cet objectif est ambitieux, car il n'existe pas de mesures de Durée de Vie des Porteurs Minoritaires d'alliages d'antimoniures dans les plages de températures correspondant à ces applications.

## Résultats attendus

Après optimisation du banc de mesure OCVD :

- Simulation du signal OCVD de jonctions à base d'antimoniures.
- Identification de durées de vie dans les antimoniures entre 80 et 400 K.
- Diagnostic de défauts induits par le procédé technologique de fabrication.

## Modalité d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant

Le doctorant sera accueilli au sein de la thématique MEE (Matériaux pour l'Énergie et l'Espace) du laboratoire PROMES (UPR CNRS 8521). PROMES est rattaché à l'INSIS (Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes) et conventionné avec l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD). Un comité de suivi individuel (CSI) vérifiera chaque année la bonne avancée des travaux et autorisera la réinscription en thèse du doctorant. Ce dernier complètera sa formation grâce aux différents modules proposés par l'école doctorale ED 305 « Énergie et environnement ».

### Profil du candidat et compétences recherchées

Le profil recherché est celui d'un titulaire d'un master ou d'un diplôme d'ingénieur avec une forte composante en physique des semiconducteurs.

Le devra avoir une bonne connaissance en physique, en physique des semiconducteurs, en instrumentation et en modélisation.

### Références bibliographiques

- [1] : <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200925.pdf>
- [2] Y. Cuminal, N. Cammalleri, J.B. Rodriguez, P. Christol, A. Foucaran, A. Dollet, A. Perona and L. Pujol, International Photovoltaic Technical Conference- Thin Film 2010, Aix en Provence (France), 27-28 May 2010.
- [3] P. Christol, Y. Cuminal, N. Cammalleri, A. Dollet, A. Perona and L. Pujol. International Conference Nanomeeting 2011, Minsk, Belarus, May 2011.
- [4] E. Giudicelli. Thèse, Montpellier 2016.
- [5] B. R. Gossick. J. Appl. Phys. 26, 1955, p. 1356.
- [6] U. C. Ray, S. K. Agarwal and S. C. Jain. J. Appl. Phys. 53, 1982, p. 9122.
- [7] M. A. Green. Solar cells, 11, 1984, p. 147.
- [8] A.Lemaire, A. Perona, M. Caussanel and A Dollet, Microelectronics Journal, 2020,p. 104735
- [9] A.Lemaire, A. Perona, M. Caussanel, H. Duval and A Dollet, IET Circuits, Devices & Systems,14, 2020, p.947-955
- [10] A. Houbert, A. Perona, M. Caussanel, H. Duval, A. Lemaire, and A. Dollet, Amélioration de la méthode OCVD compensée pour la mesure de la durée de vie des porteurs minoritaires dans des jonctions en GaAs et InP-InGaAs in JNPV, Journées Nationales du PhotoVoltaïque. 2023: Dourdan, France.
- [11] A. Houbert, A. Perona, M. Caussanel, H. Duval, A. Lemaire, and A. Dollet, *Etude expérimentale et numérique de la réponse OCVD de jonctions à base de GaAs*, JNPV, Journées Nationales du PhotoVoltaïque. 2022: Dourdan, France.