

## Utilisation de la technique de photoluminescence modulée en fonction de la température pour déterminer les propriétés des défauts dans les semi-conducteurs : simulations numériques et résultats expérimentaux

H. Haddara<sup>1,2,3</sup>, B. Bérenguier<sup>2,3</sup>, S. Le Gall<sup>1,3</sup>, J.-F. Guillemoles<sup>2,3</sup>, J.-P. Kleider<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> GeePs, Université Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, Sorbonne Université, 91192, Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> UMR IPVF 9006, CNRS, Ecole Polytechnique, PSL Chimie Paris Tech, IPVF SAS, 91120 Palaiseau, France

<sup>3</sup> IPVF SAS, 30 Route Départementale 128, 91120, Palaiseau, France

Les techniques sans contact permettent la caractérisation des défauts électroniques dans les matériaux et les composants et sont essentielles pour l'évaluation des nouvelles technologies photovoltaïques. La technique de photoluminescence modulée (MPL), qui peut fonctionner dans une large gamme de fréquences [10Hz-200MHz], s'est avérée être un candidat prometteur, démontrant son utilité dans la caractérisation des défauts dans les matériaux semi-conducteurs.

Une étude antérieure [1] a révélé des singularités dans l'évolution de la phase de MPL en fonction de la fréquence, appelées V-shapes, où le déphasage du signal de MPL par rapport à l'excitation sinusoïdale ne varie pas de manière monotone avec la fréquence, mais présente un extremum local. L'expression de cette phase en fonction de la fréquence a été décrite (en se basant sur un calcul analytique) en faisant intervenir 3 fréquences caractéristiques [2, 3].

Par la suite, nous avons développé un modèle numérique (sous Matlab [3, 4]) qui résout les équations de continuité et de neutralité en présence d'un défaut de type Shockley-Read-Hall (SRH) afin de déterminer le déphasage de MPL en fonction de la fréquence (voir Fig 1(a)). Les paramètres d'entrée du matériau seront ceux typiques du CIGS dopé p. Les simulations numériques montrent bien la présence de V-shapes sous certaines conditions (voir Fig 1(a)), en accord avec les calculs analytiques de l'étude antérieure. En étudiant la variation du V-shape avec la température (voir Fig 1(a)), nous avons identifié des règles pour l'apparition et la disparition de cette forme en V dans les diagrammes de déphasage MPL du matériau sondé en présence de centres de recombinaison SRH. En condition de faible injection et à partir d'une étude paramétrique en faisant varier la position du niveau d'énergie du défaut et les sections efficaces de capture des porteurs minoritaires et majoritaires, nous montrons que les V-shapes apparaissent lorsque le défaut est un piège peu profond à porteurs minoritaires. Dans ce cas, nous proposons une méthode pour extraire des informations sur les propriétés du défaut telles que la position en énergie, la section efficace de capture pour les minoritaires, la concentration du défaut, ainsi que la durée de vie effective des porteurs minoritaires [4]. Cependant, pour d'autres conditions telles qu'une injection plus élevée et un matériau intrinsèque, les courbes en V peuvent apparaître même si le défaut est un piège à porteurs majoritaires. La méthode sera testée expérimentalement sur des échantillons de CIGS ultra-minces (programme ANR

PASTEL), comme nous montre le déphasage MPL en fonction de la fréquence de la Fig.1(b). Après analyse, nous trouvons un défaut positionné à 0,13 eV de la bande de conduction et une section efficace de  $2.10^{-16} \text{ cm}^2$ , et une durée de vie effective MPL de  $\sim 1\text{ns}$  [4]. Ces résultats seront comparés à d'autres mesures de PL en régime continu en transitoire (TRPL).

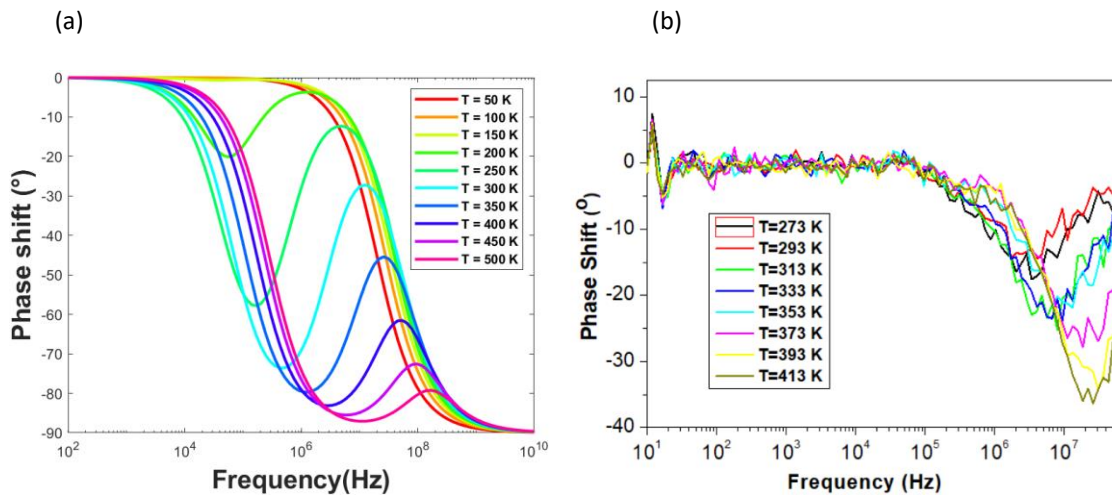


Fig. 1 : Illustration de déphasage MPL en fonction de la fréquence pour plusieurs températures pour un matériau de CIGS dopé P : (a) simulation (b) expérimental

[1] Baptiste Bérenguer, Nicolas Moron, Wei Zhao, Jean Francois Guillemoles, Jean-Paul Kleider, and Laurent Lombez. High-Frequency Modulated Photoluminescence : a simulation study of cases describing the signature of carrier recombination and trap centers. In *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pages 0352–0358, Chicago, IL, USA, June 2019.

[2] N. Moron, B. Bérenguer, J. Alvarez, et J.-P. Kleider, « Analytical model of the modulated photoluminescence in semiconductor materials », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. **55**, 105103 (2022).

[3] B. Bérenguer, A. Asseko, H. Haddara, S. Le Gall, J-P. Kleider, JF. Guillemoles, « Contactless Defects Detection Using Modulated Photoluminescence Technique, Model for a Single Shockley-Read-Hall Trap in a Semiconductor Thin Layer », soumis à EPJVP (2024)

[4] H. Haddara, B. Bérenguer, , S. Le Gall, JF. Guillemoles, J-P. Kleider, « Improving the investigation of defect properties through temperature dependent modulated photoluminescence » EUPVSEC 2024