JNPV 2025 Journées Nationales du PhotoVoltaïque
Journées Nationales du PhotoVoltaïque 2025
STRASBOURG 4 - 7 novembre 2025

Étude des dynamiques de photoémission résolue en temps dans des matériaux semi-conducteurs pour cellules photovoltaïques

M. Le Coq [a,c*], M. Frégnaux [a], M. Silly [b], D. Aureau [a], P. Schulz [c]

[a] Institut Lavoisier de Versailles (ILV), UMR 8180, CNRS, UVSQ - Université Paris-Saclay, Versailles, France
[b] Synchrotron SOLEIL, Saint-Aubin, France
[c] Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF), UMR 9006, CNRS, Ecole Polytechnique - IP Paris, Chimie Paristech - PSL, Palaiseau, France

*Contact: margaux.le-coq@cnrs.fr

Dans le cadre de la caractérisation avancée des cellules solaires émergentes, l'un des enjeux majeurs réside dans l'ingénierie des alignements de bandes aux interfaces des matériaux. Il est important de connaitre et maîtriser les diagrammes énergétiques pour optimiser ces alignements et ainsi améliorer le rendement final des dispositifs photovoltaïques. Pour cela, certaines méthodes, telles que la sonde de Kelvin (KP) avec la spectroscopie de photoémission ultraviolette (UPS), permettent aujourd'hui de fournir une première approximation des diagrammes de bandes. Ces dernières années, des approches spectroscopiques avancées, en particulier la photoémission résolue en temps (TRPES), ont ouvert de nouvelles perspectives pour l'analyse directe de la dynamique des porteurs photoinduits et donc du photopotentiel de surface (SPV). [1]

Nous avons ainsi mené des études dynamiques sur des substrats de n- et p-GaAs avec différents niveaux de dopage, (1–10) × 10^{17} cm^{-3} (type n) et de 5 × 10^{18} à 5 × 10^{19} cm^{-3} (type p) et terminaisons de surface sur la ligne de lumière TEMPO du synchrotron SOLEIL, en utilisant la TRPES pour analyser l'évolution du SPV sous excitation laser. L'illumination par laser modifie les courbures de bandes éventuellement présentes en surface, tendant à se rapprocher du régime dit de « bandes plates ». Ce phénomène de courbure de bande est crucial à contrôler, notamment aux interfaces, où il influence directement les alignements de bandes et, par conséquent, les performances globales de la cellule solaire. [2] L'évolution de différents niveaux de cœur caractéristiques a été suivie (Figure 1a), à savoir Ga 3d, As 3d et O 1s, ce qui permet de distinguer les effets spécifiques au site de possibles effets électrochimiques transitoires. Une dépendance du SPV à la chimie de surface et au type de dopage a été observée. Au cours de ces expériences pompe-sonde, nous avons systématiquement étudié l'influence de la puissance du laser. La courbure a ainsi pu être modulée, en lien avec la dynamique de séparation et de recombinaison des porteurs (Figure 1b et c). Ces observations permettent de quantifier l'évolution du SPV à des échelles de temps de l'ordre de la microseconde, en lien avec les phénomènes de piégeage ou de recombinaison de surface.

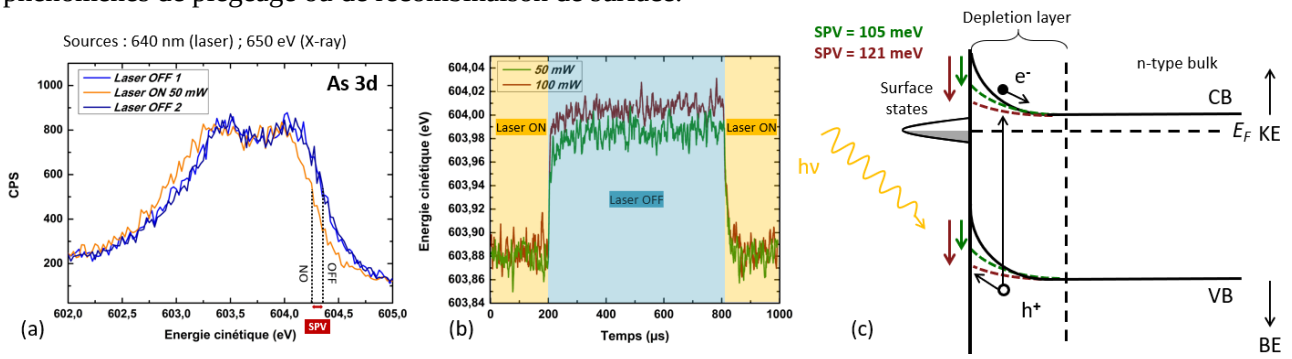

Figure 1 : (a) Spectres XPS de l'As 3d pour n-GaAs enregistrés avant, pendant et après l'illumination laser (laser OFF → ON → OFF). (b) Décalage en énergie cinétique du pic As 3d sous illumination laser (ON/OFF) à deux puissances différentes (50 mW et 100 mW). (c) Schéma de principe de la technique TRPES appliquée à un matériau semi-conducteur de type n.

Au cours de cette étude, la combinaison TRPES et photoluminescence *in situ* pour sonder les propriétés optoélectroniques en conditions *operando* a été démontrée pour la première fois. Cette approche vise à corréler les dynamiques de SPV aux processus de génération et de relaxation des porteurs, ouvrant la voie à une cartographie temporelle des états électroniques aux interfaces. Enfin, nous étendrons cette étude avec des résultats préliminaires sur des matériaux absorbeurs émergents tels que les pérovskites halogénées, qui présentent des dynamiques SPV plus lentes et posent le défi majeur du contrôle de leur stabilité physico-chimique sous illumination.

Références

1. F. Polack *et al. AIP Conf. Proc.* **2010**, *1234*, 185–188
2. Spencer, B. F et al., *Phys. Rev. B* **2013**, *88* (19), 195301

Ce travail a bénéficié de l'aide financière du PEPR TASE (Projet Minotaure ANR-22-PETA-0015)