



Étude de cas

« Le microscope de rêve » pour la recherche sur les pérovskites : Percer les secrets des cellules solaires à pérovskite grâce à la microscopie multimodale corrélative

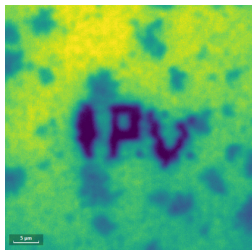
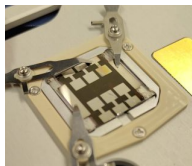
À propos du client

Groupe de microscopie Weber | Université de Stuttgart

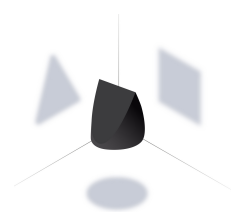
Dirigée par le professeur Stefan Weber à l'Institut de photovoltaïque de l'Université de Stuttgart, l'équipe de microscopie Weber est un groupe interdisciplinaire de chercheurs unis par une passion commune pour la microscopie. Leur mission : combler le fossé entre la physique fondamentale et les dispositifs photovoltaïques fonctionnels en optimisant leurs mécanismes sous-jacents à l'échelle nanométrique.

L'équipe se concentre actuellement sur l'un des matériaux les plus prometteurs et complexes des nouvelles technologies photovoltaïques : les cellules solaires à pérovskite aux halogénures métalliques. Dans le cadre de son projet **NanoPLOT** financé par le CER, l'équipe du professeur Weber a mis en service une plateforme de microscopie corrélative innovante qui intègre la microscopie par photoluminescence à résolution temporelle, l'imagerie hyperspectrale et la microscopie à force atomique (AFM).

Cette approche permet à l'équipe d'associer directement les défauts structuraux aux pertes optoélectroniques, révélant comment les anomalies cristallines influencent l'efficacité et la stabilité à long terme d'une cellule solaire. Cette capacité permet une identification rapide des défauts, une analyse de la ségrégation de phase et un suivi de la dégradation. Ce système multimodal s'avérera sans aucun doute un outil central dans les efforts du groupe pour développer des cellules solaires à pérovskite stables et à haut rendement.



Défi technique : Lier structure, chimie et dynamique des porteurs de charge



Développer la prochaine génération de cellules solaires à pérovskite exige plus que des améliorations progressives des techniques de caractérisation individuelles; cela nécessite de s'attaquer à un problème fondamentalement multidimensionnel.

Aucune modalité de microscopie unique ne peut sonder simultanément les défauts structuraux, les hétérogénéités chimiques, les contraintes mécaniques et la dynamique des porteurs de charge qui limitent collectivement les performances et la stabilité à long terme des dispositifs à pérovskite. Pour comprendre comment chaque variable affecte les autres, il est nécessaire d'examiner le problème sous plusieurs angles. Ce n'est qu'alors qu'il sera possible d'élucider sa véritable nature et de répondre aux questions physiques importantes qui font obstacle à la conception des panneaux de grande surface commercialement viables de demain.

Distinguer les défauts : Comment faire la distinction entre un défaut structural permanent et un « piège électronique » temporaire qui évolue sous la contrainte opérationnelle ?

Identifier les origines de l'extinction : Une baisse locale de l'intensité de photoluminescence est-elle causée par une ségrégation de phase chimique, un changement physique de la rugosité de surface ou un piège de charge caché ?

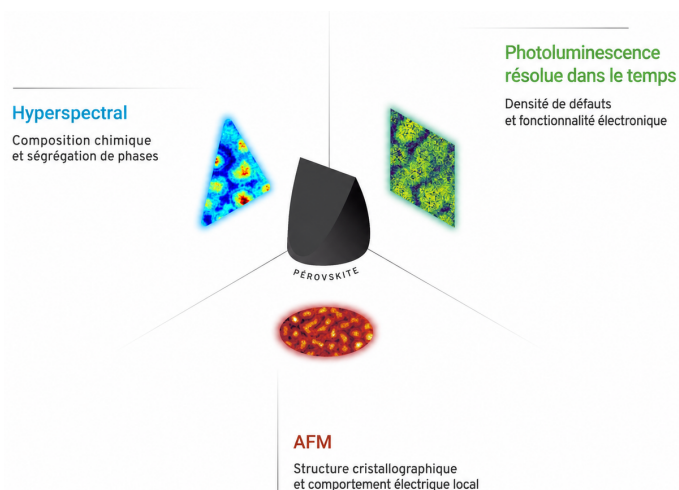
Corrélation spatiale : Où exactement les défauts structuraux (comme les joints de grains) chevauchent-ils les régions de recombinaison accélérée des porteurs ?

Impact morphologique : Comment quantifier la relation directe entre la morphologie des cristaux de pérovskite et la densité des sites de piégeage localisés ?

Optimisation des procédés : Comment les paramètres de traitement interdépendants doivent-ils être optimisés pour concevoir des structures « tolérantes aux défauts » qui sont à la fois durables et performantes ?

La solution : Le « microscope de rêve »

Une plateforme multimodale corrélative pour l'analyse des pérovskites



Le choix du bon équipement de test est une étape cruciale du processus de recherche. Le système de rêve doit offrir la haute résolution nécessaire pour résoudre les nanostructures complexes de pérovskite, tout en étant polyvalent, fiable et en maintenant un profil de mesure non intrusif. L'instrument doit s'adapter à la recherche, et non l'inverse.

Cherchant à apporter une nouvelle perspective au domaine des pérovskites, le professeur Weber a entrepris de concevoir son système de test idéal et, soutenu par une généreuse subvention du Conseil européen de la recherche, il a pu concrétiser le «microscope de rêve».

Principales informations tirées de trois techniques de microscopie



Microscopie hyperspectrale

- ✓ Photoluminescence résolue spectralement
- ✓ Ségrégation de phases et profilage stœchiométrique estimé
- ✓ Identification des défauts du substrat
- ✓ Mesure rapide de grandes zones dans des conditions réalistes d'éclairage extérieur
- ✓ Possibilité de réaliser des cartes de bande interdite, de Voc et de PLQY à haute résolution

Microscopie à force atomique (AFM)

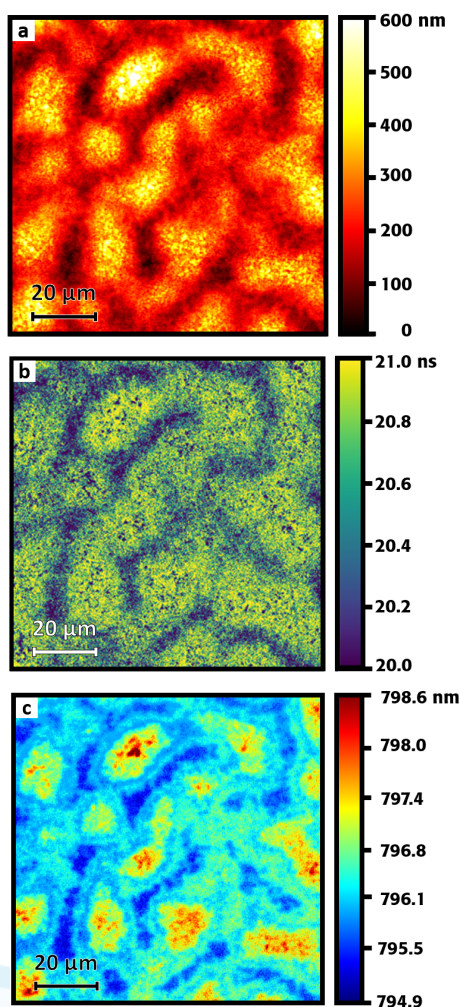
- ✓ Topographie à l'échelle nanométrique et rugosité de surface
- ✓ Profilage de la taille des grains et de la morphologie
- ✓ Résolution structurale à l'échelle atomique
- ✓ Modes d'imagerie en contact et en non-contact pour le profilage des courants locaux

Microscopie confocale résolue dans le temps

- ✓ Cartographie de la durée de vie des porteurs résolue spatialement
- ✓ Identification des sites de recombinaison non radiative
- ✓ Suivi de la dynamique des porteurs et de la migration ionique
- ✓ Sensibilité aux interfaces et aux voies de recombinaison en volume

Avantage scientifique : L'avantage technique du microscope de rêve de NanoPLOT

Des connexions directes entre structure et fonctionnalité grâce à la microscopie multimodale



Aperçu des résultats I : Caractérisation multimodale d'une cellule photovoltaïque à pérovskite. (a) Micrographie AFM montrant une topographie accidentée. (b) Carte TRPL correspondante montrant une forte corrélation entre la durée de vie des porteurs et la topographie. (c) Cartographie correspondante des pics du spectre hyperspectral montrant des régions de ségrégation de phase.

Bien que le système ait été mis en service très récemment, l'équipe du professeur Weber « voit » déjà la différence apportée par les mesures corrélées.

En injectant un courant local avec la pointe de l'AFM et en mesurant l'électroluminescence correspondante induite par la pointe, l'équipe est en mesure d'extraire des informations sur la diffusion des porteurs de charge, le couplage latéral entre les grains de pérovskite et les effets de guidage d'ondes optiques. La combinaison des méthodes de spectroscopie et de microscopie permettra des approches de caractérisation uniques pour des expériences localisées résolues en temps.

La corrélation de l'AFM et des micrographies résolues en temps permet d'estimer les densités de défauts et révèle comment les variations de l'épaisseur du film ont un impact sur la durée de vie des porteurs et la dynamique de transport.

En comparant les cartographies hyperspectrales et AFM, l'équipe est en mesure de relier la morphologie du film à la composition chimique sur l'ensemble du substrat. De plus, la corrélation de la photoluminescence résolue en temps aux cartographies hyperspectrales révèle comment la ségrégation de phase se traduit par une dégradation des performances électriques au fil du temps.

L'approche multimodale offre un moyen robuste de confirmer ou de remettre en question les hypothèses sur la dynamique des pérovskites, et constitue une boussole puissante pour comprendre comment les variations des paramètres de traitement influencent l'amélioration de la stabilité et de l'efficacité.

Auparavant, la recherche était limitée par des ensembles de données fragmentés, l'absence d'informations simultanées sur la composition et la morphologie, et des temps d'acquisition longs qui entravaient l'optimisation ciblée.

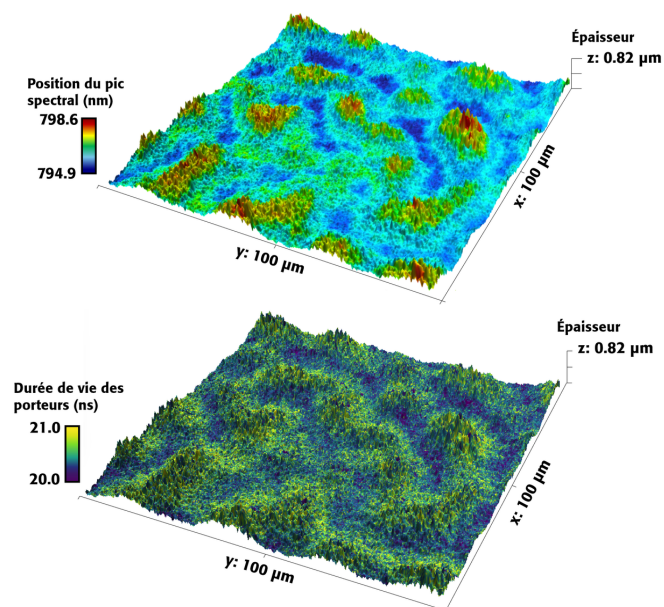
Ces limitations créaient un vide dans l'identification des anomalies microscopiques et limitaient la capacité à les associer aux performances macroscopiques des dispositifs. Mais aujourd'hui, le microscope de rêve a comblé ce vide. L'équipe peut désormais établir des liens directs entre structure, chimie et fonction !



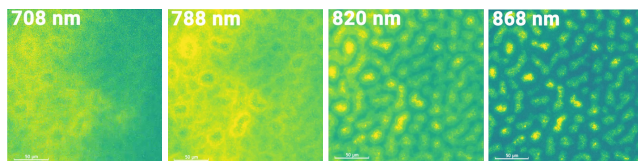
« L'AFM me donne des informations structurales et sur les performances électriques locales, mais ce n'est qu'une partie de l'histoire... l'autre partie de l'histoire est racontée par les propriétés optiques et la dynamique de la photoluminescence. Pour avoir un tableau complet, nous avons besoin d'une combinaison de techniques - et c'était essentiellement notre point de départ. Je me suis demandé, à quoi ressemblerait mon microscope de rêve ? »

– Dr. Stefan Weber

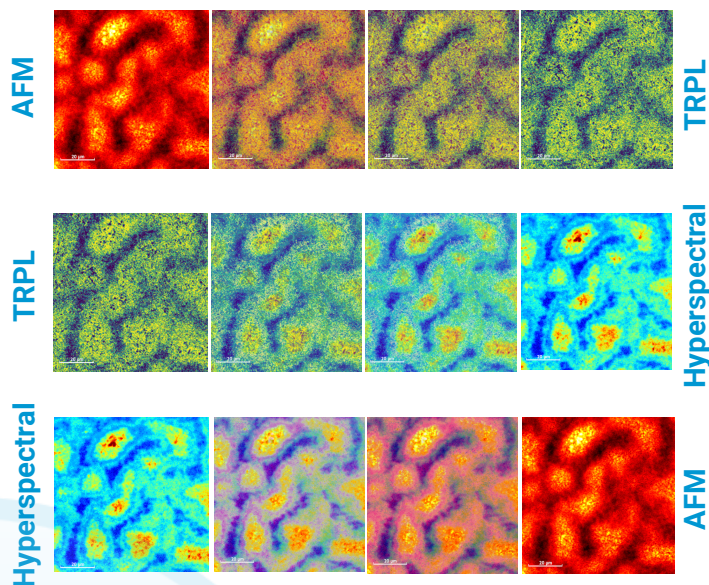
« Le microscope de rêve » pour la recherche sur les pérovskites



Aperçu des résultats II: Microscopie corrélative de la surface d'une cellule solaire à pérovskite. (Haut) Superposition 3D des cartes AFM et hyperspectrales montrant que les régions les plus épaisses coïncident avec un pic spectral plus élevé. (Bas) Superposition 3D de la topographie AFM et de la photoluminescence résolue en temps montrant que les régions plus minces dans les vallées de pérovskite sont corrélées avec des durées de vie de porteurs plus courtes.



Aperçu des résultats III: Cartes de photoluminescence hyperspectrale montrant la ségrégation spatiale des phases et l'hétérogénéité de la composition dans un film mince de pérovskite à quatre longueurs d'onde d'émission distinctes. Barres d'échelle: 50 µm.

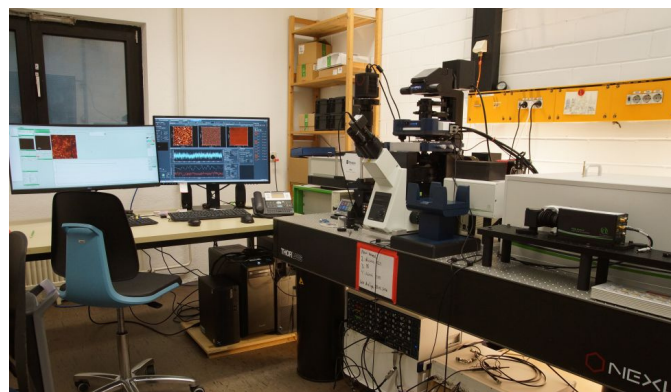


Aperçu des résultats IV: Transitions de microscopie multimodale corrélative sur un seul champ de vision d'un film mince de pérovskite. Chaque ligne montre une transition progressive d'images colocalisées correspondant à la topographie AFM, à la cartographie de durée de vie TRPL et à l'imagerie hyperspectrale. Les transitions mettent en évidence comment la morphologie localisée des grains de pérovskite et les limites de domaines dictent directement la dynamique de durée de vie des porteurs et les caractéristiques d'émission spectrale. Barres d'échelle: 20 µm.

“

« Jusqu'à présent, nous avons fait qu'effleurer la surface de ce qui est possible avec de microscope... on s'en rend vraiment compte lors de nos réunions de groupe, nous discutons pendant des heures de ce que nous pouvons observer. C'est vraiment excitant, ce système est un bête ! »

– Prof. Stefan Weber



Perspectives d'avenir : Vers des pérovskites durables et au-delà !

Bien que l'accent soit actuellement mis sur la recherche sur les pérovskites, l'équipe de Weber voit déjà d'autres domaines de recherche qui pourraient bénéficier de cette approche de microscopie corrélative et est impatiente de s'étendre à d'autres domaines tels que :

- Inspection des dispositifs semi-conducteurs
- Analyse des matériaux LED
- Caractérisation des points quantiques
- R&D sur les matériaux avancés
- Amélioration des cellules solaires organiques (OPV)

Les possibilités sont infinies et la science n'est plus limitée par les perspectives de l'instrument !

Learn More:

Institut de photovoltaïque – Université de Stuttgart



Prof. Dr. Stefan Weber

Chef de groupe

Microscopie et caractérisation à l'échelle nanométrique
weber-nano.com

 **PICOQUANT | MicroTime 200**

Solutions de photoluminescence à résolution temporelle PicoQuant

picoquant.com/products/microscope-systems



 **Photon Etc | Hypercube**

Filtre hyperspectral Photon Etc

photonetc.com/products/ima



Bruker | Module AFM NanoWizard

bruker.com/en/products-and-solutions/microscopes/materials-afm/jpk-nanowizard-nanooptics.html

