

Forschungsberichtsblatt

Dünnschichtsolartechnologien der Zukunft

Kurztitel: SOLAMO

von

F. Kessler, E: Ahlswede, R: Würz, M: Schultes, T: Wahl, J: Küffner, J: Zillner,
T: Schnabel, J: Hanisch

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
Stuttgart

Förderkennzeichen: L7516013

Laufzeit: 15.02.2016 – 30.11.2019

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

April 2020



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

1. Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Forschungsergebnisse CIGS-Dünnschichtsolarzellen:

Der Einfluss des Substratmaterials aufgrund von Zersetzungsprozessen oder ungewollter Diffusion von Substratelementen in den Absorber wurde exemplarisch für unterschiedliche Materialien wie Fensterglas, spezielles Dünnglas, ZrO_2 und Polyimid untersucht. Ergebnis: Es konnte kein relevanter Einfluss festgestellt werden. Vielmehr waren die gewählte Substrattemperatur und eine ausreichende Dotierung die entscheidenden Parameter für die Herstellung eines effizienten Absorbers

Auf Polyimidfolie konnte bei relativ niedriger Substrattemperatur ($< 400^\circ C$) mittels eines 3-stufigen CIGS-Koverdampfungsverfahrens ein Zellwirkungsgrad von bis zu 17,4 % erzielt werden. Bei höheren Substrattemperaturen ($> 550^\circ C$) sind die erzielten Wirkungsgrade dennoch höher.

Im Projekt wurde ein mechanischer Schließmechanismus für Punkt-Verdampferquellen entwickelt, gebaut und erfolgreich getestet. Entscheidend dabei ist die Beheizung des drehbaren Shutters, so dass kein Verdampfungsgut daran kondensieren kann. In einem Hochrate-Koverdampfungsprozess konnte damit CIGS mit einer Rate von bis zu 929 nm/min abgeschieden werden. Bei dieser höchsten Rate findet man allerdings Spritzer (Tröpfchen) von Indium und Gallium auf dem Substrat. Die Absorberqualität nimmt mit zunehmender Rate zwar ab, führt aber bis zu einer Rate von 300 nm/min immer noch zu Wirkungsgraden von deutlich $> 10\%$.

Forschungsergebnisse Perowskit-Dünnschichtsolarzellen:

Perowskitsolarzellen aus lösungsbasierter Abscheidung wurden im Standard- und invertierten Aufbau untersucht. Die Perowskit-Zusammensetzung wurde umgestellt auf einen 2fach-Kation-Perowskit unter Vermeidung des potenziell wenig stabilen Methylammonium-Ions (MA). Die Effizienzen sind auf ähnlichem Niveau wie beim früheren System, die Stabilität verspricht besser zu sein. Die erreichten Effizienzen liegen im Bereich von 17 % für opake Zellen und bei 15 % für semitransparente Zellen.

Mit diesem neuen Materialsystem mussten alle Teilschritte der Solarzellen-Herstellung neu optimiert werden. Ein entscheidender Aspekt war hierbei, dass gleichzeitig mit PTAA auch ein neuer Lochleiter mit höherer Effizienz und Stabilität verwendet wurde, auf dem aber das neue 2fach-Kation-Perowskit-System deutlich schlechter benetzt.

Stabilitätstests zeigten, dass unverkapselte Proben mit dem neuen 2fach-Kation-Perowskit auf PTAA-Lochleiter an normaler Umgebungsluft deutlich stabiler sind als die Referenzzellen. Komplet einlamierte Testproben konnten mehrere hundert Stunden im Standardverfahren für beschleunigte Alterungstests („damp heat“ bei 85 % rel. Feuchte und $85^\circ C$) den äußeren Einflüssen widerstehen, mit zumindest nach 100h-Test nur geringen Effizienz-Einbußen. Diese Ergebnisse zeigen, dass mit verbesserten Perowskit- und Verkapselungsmaterialien das Erreichen der vorgeschriebenen Testroutinen in Zukunft realistisch sein wird.

Bleifreie Perowskit-Materialien zeigen weiterhin deutlich geringere Effizienzen als die konventionellen bleihaltigen Materialien. Mit einem neuen Zinn-basierten System auf der Basis von $FASnI_3$ konnten nun aber robuste Optimierungsversuche durchgeführt und Effizienzen von über 2 % gezeigt werden. Das Material kann durch Beimischung von Blei oder großen Molekülen, die 2-dimensionale Deckschichten ausbilden, stabilisiert werden.

Für die großflächige Rakelbeschichtung wurde zunächst weiterhin auf das bewährte $MAPbI_3$ -Perowskit-Material gesetzt. Hier konnten durch den Einsatz von PTAA ebenfalls erhöhte Leerlaufspannungen und Effizienzen erreicht und durch verschiedene Optimierungsschritte großflächige Beschichtungen auf Flächen bis zu $5 \times 5 \text{ cm}^2$ demonstriert werden. Gerakelte Schichten konnten dabei für Minimodule mit 8 Subzellen auf einer Aperturfläche von $11,6 \text{ cm}^2$ Effizienzen von ca. 10 % erreichen, geschleuderte Minimodule auf einer Fläche von $3,8 \text{ cm}^2$ erreichten sogar 14 %.

2. Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

- Die CIGS-Abscheidungsgeschwindigkeit lässt sich auch bei relativ hohen Raten, d.h. in wenigen Minuten bewerkstelligen, solange gewährleistet ist, dass die Verdampferquellen homogen (d.h. ohne Spritzer) arbeiten. Eine Hochrateabscheidung im Batchbetrieb mit abwechselnd offenen und geschlossenen Quellen ist aber aufgrund des starken Wärmeverlusts der Quellen beim Öffnen aufgrund der daraus folgenden inhomogenen Dampfdrucke nicht zu empfehlen und stattdessen lieber ein kontinuierlicher Inlinebetrieb vorzuziehen.

- Die erzielten Solarzellenergebnisse in der neu aufgebauten CIGS-Anlage zeigen, dass auch auf Alternativsubstraten wie Polyimid- oder Edelstahlfolie, ZrO₂, Dünnglas, etc. gute und für die Anwendung nutzbare Effizienzen erzielt werden können, sofern für eine angemessene Dotierung und ggf. Anpassung der CIGS-Koverdampfung gesorgt wird.

- Für die Perowskit-Entwicklung konnten wichtige Erkenntnisse für Wissenschaft und Technik gewonnen werden durch die Entwicklung stabilerer Zellarchitekturen und großflächiger Beschichtungen bis hin zu Labormodulen. Die Technologie ist auf einem guten Weg, damit auch industriell realisierbar zu sein. Bleifreie Alternativen sind aktuell weiterhin nur mit deutlich geringen Effizienzen realisierbar, aber perspektivisch weiterhin nicht nur wissenschaftlich interessant.

3. Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

- Das Öffnen und Schließen der heißen Hochratequellen (z.B. Cu: 1600°C) in aggressiver Se-Atmosphäre erfordert für die einzelnen Bauteile wie Shutter und Verdampferquelle die Verwendung spezieller Materialien.

- Die vorgestellten Stabilitätstests an Perowskitsolarzellen stellen direkt eine verwertbare Technik zur Verkapselung von diesen Solarzellen dar, um sie langzeitstabil zu machen.

- Die Verwendung von nanopartikulären Zwischenschichten kann Benetzungsprobleme bei großflächiger Beschichtung beseitigen.

4. Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

- Prinzipiell kann das Konzept eines schnell beheizbaren (bis ca. 1600°C) und drehbaren Deckels auch für andere Anwendungen interessant sein (Heizung, Bestrahlung, Verdampfung bestimmter Elemente), unabhängig von der Photovoltaik. Der Dampfdruck durch Sublimation der verwendeten Materialien begrenzt dabei die maximal verwendbaren Temperaturen.

- Das Konzept zur Benetzungsverbesserung von nasschemisch aufgetragenen Dünnschichten durch die Verwendung von Nanopartikeln als Haftvermittler kann auch für andere Anwendungen und Techniken, bei denen schlecht benetzende Filme verwendet werden, zum Einsatz kommen.