

The Influence of Hydrogen on Silicon Solar Cells: Investigating the Link to Degradation Mechanisms - Zusammenfassung

Für Siliziumsolarzellen ist Wasserstoff aufgrund seiner passivierenden Eigenschaften prinzipiell vorteilhaft. Er wird sogar häufig künstlich zugeführt, um die Materialqualität zu verbessern. Allerdings hängt auch eine bestimmte Degradation der Solarzelleffizienz mit Wasserstoff zusammen. Das Degradationsphänomen ist als light- and elevated-temperature-induced degradation (LeTID) bekannt, und ist eine der größten Herausforderungen für Siliziumsolarzellen. Das Ziel dieser Arbeit ist deswegen, die Wirkweise von Wasserstoff und insbesondere die Rolle von Wasserstoff bei der Degradation von Solarzellen genauer zu verstehen. Idealerweise ist es mithilfe dieses Verständnisses möglich, die positiven Eigenschaften von Wasserstoff beizubehalten, während die negativen Auswirkungen vermieden werden können. Dazu werden Proben mit industriell relevanten Prozessen hergestellt und bei erhöhten Temperaturen im Dunkeln sowie unter Beleuchtung untersucht. Wasserstoff wird über eine Kombination aus widerstandsbasierten Messungen und Fourier-transformierter Infrarotspektroskopie untersucht. Ein spezielles Probendesign ermöglicht es, die Kinetik von Wasserstoff parallel zur effektiven Ladungsträgerlebensdauer zu untersuchen, wobei Letzteres zur Untersuchung der Degradationsphänomene eingesetzt wird.

Zuerst wird die Kinetik von Wasserstoff unter den jeweiligen Behandlungsbedingungen untersucht. Dies führt zu Einblicken in die Interaktion der verschiedenen Komplexe, wie unterschiedlich geladenen atomaren Wasserstoff (H^+ , H^- , H^0), Wasserstoffmoleküle (H_2), Boratome, Bor-Wasserstoff (BH) -Paare, und andere, unbekannte Komplexe. Dabei werden Unterschiede zwischen den Untersuchungen im Dunkeln und unter Beleuchtung festgestellt und ein theoretischen Modells entwi-

ckelt. Dieses Modell beschreibt die experimentell beobachteten Effekte gut und dient als Basis für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit.

Zweitens wird untersucht, wie Wasserstoff in eine Solarzelle gelangt und diskutiert, wie dieser Vorgang beeinflusst werden kann. Dabei ist der sogenannte Feuerschritt wichtig, bei dem Wasserstoff aus dem Siliziumnitrid in das Siliziumvolumen diffundiert. Der Einfluss des Siliziumnitrids und des Feuerschritts auf die finale Wasserstoffkonzentration werden jeweils untersucht und Möglichkeiten zur Manipulation des Wasserstoffgehalts vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf der Abkühlrampe während des Feuerprozesses, da hier Wasserstoff wieder aus dem Volumen ausdiffundiert. Dieser Vorgang tritt bei Temperaturen unter etwa $\approx 700\text{ °C}$ auf, wobei die Ausdiffusion mit sinkender Temperatur geringer wird.

Zuletzt wird die Rolle von Wasserstoff in den zwei untersuchten Degradationsphänomenen, LeTID und der Degradation der Oberflächenpassivierung (surface related degradation (SRD)) beleuchtet. Dabei werden wichtige Eigenschaften und die jeweiligen Kinetiken von LeTID und SRD mit der Wasserstoffkinetik verglichen, um Einsichten in Zusammenhänge zu bekommen. Dies führt zu einem Modell, das die verschiedenen LeTID-Defektzustände mit den anderen auftretenden Wasserstoffreaktionen zusammenbringt. Es zeigt sich, dass molekularer Wasserstoff (H_2) eine Schlüsselrolle bei der Bildung des LeTID-Defekts innehat. Die Ergebnisse deuten auch daraufhin, dass die Regeneration, bei der der Defekt rekombinationsinaktiv wird, vermutlich durch eine Passivierung mit Wasserstoff zustande kommt. Zusätzlich sprechen die Ergebnisse dafür, dass Wasserstoff zur Oberfläche diffundiert, was in einer Degradation der Oberflächenpassivierung resultiert. Hier wird die Theorie aufgestellt, dass diese Degradation durch die Bildung von oberflächennahen, rekombinationsaktiven Wasserstoffplatelets verursacht wird.

In dieser Arbeit werden die ersten detaillierten Untersuchungen zur Kinetik von Wasserstoff in solarzellähnlichen Siliziumproben gezeigt, mit einem besonderen Fokus auf den zwei Degradationsphänomenen, LeTID und SRD. Die Resultate der vorgestellten Studien führen zu einer Theorie, die die Verbindung zwischen den verschiedenen Wasserstoffkomplexen und -zuständen und den beobachteten Degradationsphänomenen herstellt. Diese Erkenntnisse zeigen, dass es nötig ist die Wirkweise von Wasserstoff zu verstehen, um die Vorgänge hinter den Degradationsphänomenen zu ergründen. Mit dem hier entwickelten Verständnis lassen sich Strategien entwickeln, um die untersuchten Degradationsphänomene zu vermeiden. Dies kann schlussendlich zu langzeitstabileren Siliziumsolarzellen führen.