

Einleitung

Für die Gewinnung von elektrischer Energie stellen Solarzellen eine nahezu perfekte, nachhaltige Quelle dar. Einmal aufgestellt können diese photovoltaischen Anlagen durch die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität über Zeiträume von mehreren Jahrzehnten im mitteleuropäischen Raum Energie in der Größenordnung von 100kWh pro Quadratmeter und Jahr erzeugen. Daß diese regenerierbare Energie noch nicht stärker genutzt wird und statt dessen vor allem fossile Brennstoffe oder Kernkraft verwendet werden, liegt in erster Linie an der noch nicht kosteneffizienten Herstellung der derzeitigen Solarzellensysteme. Weltweit wird deshalb intensive Forschung betrieben, das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu verbessern.

Die Entwicklung von Solarzellen auf der Basis von Dünnschichttechnologien hat das Potential einer großflächigen, energiesparenden und kostengünstigen Herstellung. Auf der Basis von Chalkopyrit-Absorbern sind im Labormaßstab auf kleinen Flächen bereits Solarzellen mit Wirkungsgraden von 18.8% [Con02] hergestellt worden. Industriell hergestellte, großflächige Module, die aus seriell verschalteten Zellen bestehen, erreichen inzwischen 12.7% Wirkungsgrad [Pro01].

Einige der wissenschaftlich-technologischen Herausforderungen bei der Herstellung dieser Strukturen liegen in der Komplexität der verwendeten Materialien und der Notwendigkeit der Einführung innovativer, skalierbarer Prozesse zu deren großflächiger Abscheidung bei möglichst geringem Energie- und Materialeinsatz. Zudem sollen auch möglichst umweltfreundliche Materialien verwendet werden.

Chalkopyrit-Dünnschicht-Solarzellen bestehen aus einer Abfolge von übereinander gestapelten Schichten mit einer Gesamtdicke von einigen Mikrometern, die auf einem nahezu beliebigen Material abgeschieden werden können. Die Untersuchung des Aufbaus der Dünnschichtstrukturen dieser Solarzellen ist aufgrund der polykristallinen Struktur der Schichten und der Vielzahl der bei der Herstellung verwendeten chemischen Elemente schwierig. Neben den Elementen, aus denen sich die jeweiligen Schichten zusammensetzen, können die optischen, elektrischen und damit die photovoltaischen Eigenschaften der Schichten auch durch Verunreinigungen verändert werden. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit eine zerstörungsfreie Untersuchungsmethode angewendet, die in der Lage ist, die chemischen Bestandteile der untersuchten Proben genau zu charakterisieren.

Diese Methode, die Elastische Rückstredetektionsanalyse - ERDA - ermöglicht auf der Grundlage des Effektes der elastischen Streuung von Ionen in Materie die gleichzeitige Bestimmung der absoluten atomaren Konzentrationen aller in einer Probe vorhandenen chemischen Elemente. Aus der Energieverteilung der gestreuten Ionen kann die Tiefenverteilung der Elemente innerhalb der Proben rekonstruiert werden.

Aufgrund der hohen Massen-, Konzentrations- und Tiefenauflösung sowie der Bestimmbarkeit der absoluten Konzentrationen in einem Tiefenbereich von bis zu einigen Mikrometern eignet sich die Methode besonders gut für die Analyse der zu untersuchenden Chalkopyrit-Dünnschichtstrukturen.

Bisher war die Rekonstruktion der Tiefenverteilung der Elemente allerdings auf glatte Schichtstrukturen beschränkt. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit ein Modell entwickelt, mit dem auch für die typischerweise polykristallinen Schichten der Solarzellen mit entsprechenden Oberflächenrauigkeiten die Konzentration in Abhängigkeit von der Tiefe bestimmt werden kann.

Es ist das Ziel der Arbeit, den Einfluß von Verunreinigungen und Diffusionsprozessen auf die Funktion von Chalkopyrit-Dünnschichtsolarzellen erstmals durch die Kombination der Untersuchung der Schichtstrukturen mit der ERDA-Analyse und der Charakterisierung von Solarzellenmodulen mit optischen und elektrischen Meßmethoden zu untersuchen.

Zur Darstellung wurde diese Arbeit in die folgenden Kapitel gegliedert:

Kapitel 1 beschreibt die Herstellung und die Funktionsweise der für diese Arbeit relevanten Chalkopyrit-Dünnschichtsolarzellen und die Untersuchung ihrer optischen und elektrischen Eigenschaften. Bei der Auswahl der Methoden zur Untersuchung der Solarzellen wurde darauf geachtet, daß sie detaillierte Informationen zur Generation, zur Sammlung und zum Transport von Ladungsträgern liefern.

Kapitel 2 untersucht den thermischen Einfluß der Abscheidung von Kadmium-freien Pufferschichten aus Zinkselenid aus der Gasphase auf die Funktion der Solarzellen. Zur Trennung der thermischen Effekte von herstellungsbedingten Änderungen werden die Proben nach der Herstellung thermisch nachbehandelt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit mit den Erkenntnissen aus den ERDA-Messungen kombiniert.

Kapitel 3 erklärt das Prinzip und die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse der Elastischen Rückstredetektionsanalyse als Basis für die weiteren Diskussionen.

Kapitel 4 geht auf das Auflösungsvermögen von ERDA-Messungen für Chalkopyrit-Absorber ein. Die Tiefenauflösung, die Massenselektivität, die maximale Informationstiefe und die Nachweisgrenze für Konzentrationen werden diskutiert. Die Tiefenauflösung ist dabei für Simulationen von Konzentrationsprofilen besonders wichtig.

Kapitel 5 beschreibt die Entwicklung eines Modelles zur Simulation der Tiefenverteilung bei Proben mit rauen Oberflächen. Erst auf der Basis dieser Simulationen ergibt sich die Möglichkeit der gezielten Bestimmung der tiefenabhängigen Konzentrationsprofile der chemischen Elemente bei dieser Gruppe von Proben, zu denen auch die untersuchten Schichtsysteme von Chalkopyrit-Dünnschichtsolarzellen gehören.

Kapitel 6 präsentiert die aus den ERDA-Messungen resultierenden Erkenntnisse über die chemischen Verunreinigungen der Chalkopyrit-Absorber und der ZnSe-Pufferschichten. Im weiteren wird die Diffusion von Indium aus Chalkopyrit-Absorbern in ZnSe-Pufferschichten qualitativ nachgewiesen. Mit einer Untersuchung der Diffusion von Indium in einen ZnSe-Einkristall wird die Diffusionskonstante quantitativ bestimmt. Der letzte Abschnitt diskutiert als Abschluß die Kombination der Erkenntnisse aus den ERDA-Messungen mit den Resultaten aus Kapitel 2.