

Kapitel 7

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit konnte erstmalig erfolgreich eine Solarzelle mit extrem dünnem Absorber (η -Solarzelle) auf der Basis eines strukturierten pn-Heteroüberganges zwischen TiO_2 und CdTe realisiert werden. Dabei wurde eine Photospannung von $U_{oc}=680\text{mV}$ und ein Kurzschlußstrom von $j_{sc}=8.9\text{mA/cm}^2$ erreicht. Das neue Solarzellenkonzept nutzt die Trennung von Absorptions- und Transportweg durch eine Vergrößerung der Grenzfläche zwischen n- und p-Halbleiter, so daß auch Materialien von elektronisch geringer Qualität, d.h. geringen Diffusionslängen für Minoritätsladungsträger, jetzt für die Photovoltaik als Absorber genutzt werden können.

Zunächst wurde diskutiert, welche Anforderungen an die zu verwendenden Materialien und Strukturen gestellt werden müssen, um die η -Solarzelle zu verwirklichen. Für die Substratauswahl wurden sowohl poröse Strukturen aus TiO_2 und ZnTe als auch Strukturen mit eher vertikaler Ausrichtung auf der Grundlage von ZnTe und ZnO präpariert und für die η -Solarzelle in Betracht gezogen. Morphologischen und optischen Gesichtspunkten folgend erwiesen sich aus dieser Materialauswahl sowohl das ZnO als auch das mikroporöse TiO_2 als vielversprechende Substrate für die η -Solarzelle.

Das in dieser Arbeit hergestellte mikroporöse TiO_2 stellte sich sowohl von der Oberflächenvergrößerung, von den Streueigenschaften als auch von der chemischen Stabilität her als am besten geeignet für eine Verwendung in der η -Solarzelle heraus. Daher wurde ein Zellaufbau aus TiO_2 und

dem Absorber CdTe zur Demonstration der Vorteile des neuen Solarzellenkonzeptes gewählt. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Bild vom Aufbau und von der Funktionsweise der realisierten Solarzelle erarbeitet, wie es in Abb. 7.1 dargestellt ist.

Auf dem mikroporösen TiO_2 konnte erfolgreich die konformale Bedeckung mit CdTe gezeigt werden. Durch geeignete Wahl der Abscheidebedingungen in der Elektrodeposition folgt die CdTe-Bedeckung der porösen Struktur des TiO_2 gleichmäßig, ohne diese komplett aufzufüllen. Dabei werden zunächst unabhängig von der Schichtdicke Kristallite mit etwa 40nm Kristallitgröße auf der TiO_2 -Oberfläche deponiert. Eine chemisch-thermische Nachbehandlung führt zur Rekristallisation des CdTe und somit zu einzelnen nebeneinanderliegenden Kristalliten auf der TiO_2 -Substratoberfläche. Gemäß der Oberflächenvergrößerung des TiO_2 von etwa 10 liegt damit die Kristallitgröße von optisch dichten CdTe-Schichten von etwa $1.5\mu\text{m}$ makroskopischer Dicke bei ungefähr 150nm. Dieser Wert stellt in diesem Zellkonzept die mikroskopische Schichtdicke des CdTe und somit die maximale Transportdistanz für die Minoritätsladungsträger im Absorber dar.

Mit der exemplarischen Struktur TiO_2/CdTe konnte gezeigt werden, daß das Prinzip einer Solarzelle mit extrem dünnem Absorber bei geringer elektronischer Qualität des Absorbermaterials als einem vergleichbaren planaren Aufbau weit überlegen ist. Die verbesserten Solarzelleneigen-

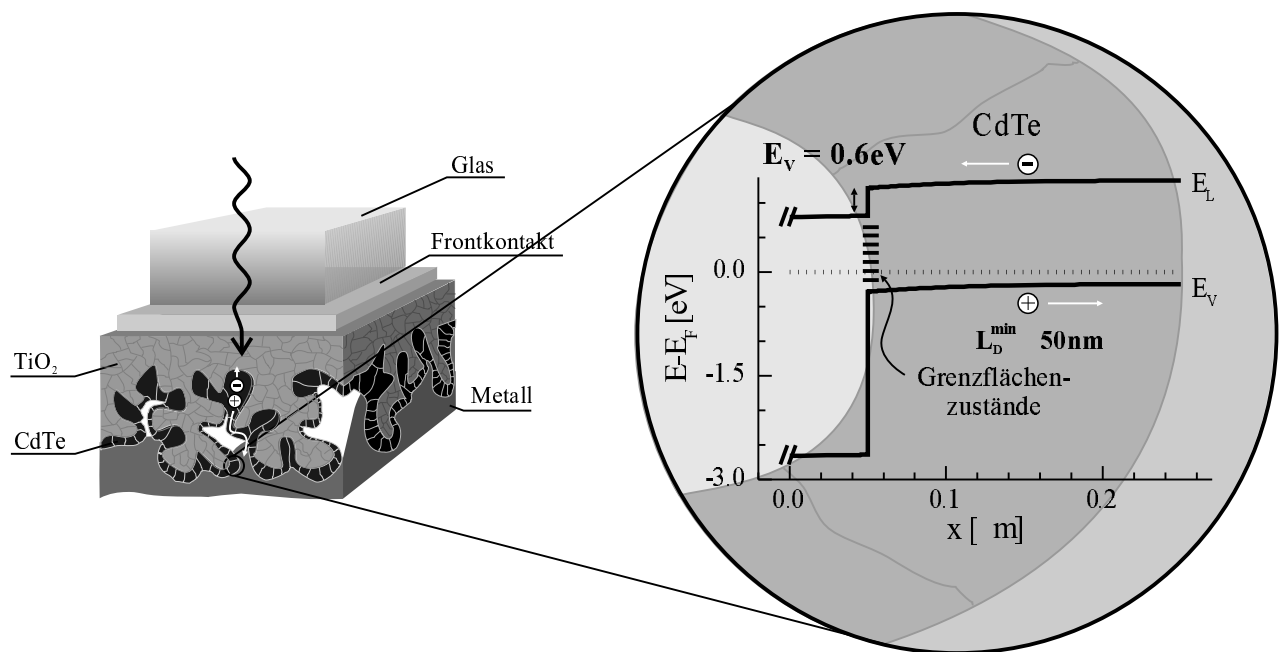


Abb. 7.1: Schematische Skizze der CdTe- η -Solarzelle und vorgeschlagene Bandstruktur auf der Grundlage der Untersuchungen dieser Arbeit.

schaften begründen sich in erster Linie auf dem etwa um einen Faktor 50 höheren Kurzschlußstrom: In einem planaren Aufbau kann die Sammlung der photogenerierten Ladungsträger aufgrund der geringen Diffusionslänge fast nur innerhalb der Raumladungszone erfolgen, die mit etwa 150nm Ausdehnung nur einen sehr geringen Anteil an der gesamten Absorberdicke von $1.5\mu\text{m}$ hat. In der η -Solarzelle dagegen kann aufgrund der um einen Faktor 10 geringeren mikroskopischen Dicke des CdTe die Sammlung im gesamten Absorbermaterial erfolgen, da die Raumladungszone sich nun über den größten Teil des Absorbers erstreckt. Damit gehen im Vergleich zum planaren Aufbau deutlich weniger photogenerierte Ladungsträger durch Rekombination verloren.

Optische Untersuchungen an der gefalteten TiO_2/CdTe -Grenzfläche ergaben, daß im CdTe bei einer Schichtdicke von $1.5\mu\text{m}$ keine erhöhte Absorption aufgrund von Streuprozessen im TiO_2 zu verzeichnen ist. Nur bei dünnen CdTe-Schichten bis zu 200nm makroskopischer Schichtdicke kann sich die Streuung positiv auf

die Absorption im Absorbermaterial auswirken und man erhält dann eine Verlängerung der optisch wirksamen Wegstrecke im Absorber von bis zu einem Faktor 5 gegenüber der makroskopischen Dicke der CdTe-Schicht.

Als limitierend für die Effizienz der vorgestellten η -Solarzelle hat sich die spannungsabhängige Photostromsammlung im Bereich positiver Vorspannungen herausgestellt. Erhöhte Grenzflächenrekombination konnte als Ursache für die Spannungsabhängigkeit durch Vergleich mit der planaren TiO_2/CdTe -Solarzelle ausgeschlossen werden. In eingehenden Untersuchungen des Rückkontaktes zum CdTe konnte auch kein signifikanter Einfluß einer Barriere am Metall-Rückkontakt auf die photoelektrischen Eigenschaften der η -Solarzelle festgestellt werden. Daraus wurde geschlossen, daß die Ursache für die spannungsabhängige Photostromsammlung auch nicht in einer spannungsabhängigen Barriere am Rückkontakt zum CdTe liegen kann.

Die Spannungsabhängigkeit des Photostromes wurde letztendlich auf einen kombinierten Effekt

eines sehr geringen elektrischen Feldes und einer geringen Diffusionslänge für Minoritätsladungsträger im CdTe zurückgeführt. Das geringe elektrische Feld begründet sich hauptsächlich in einer Leitungsbanddiskontinuität zwischen TiO_2 und CdTe, die zu einer Herabsetzung des erwarteten Feldes führt. Photoelektronenmessungen an einer TiO_2/CdTe -Heterogrenzfläche ergaben abweichend von der Bandanpassung nach Anderson, die eine maximale Leitungsbanddiskontinuität von 0.1eV vorhersagt, einen deutlich höheren Wert von 0.6eV. Damit wird im UHV an der Grenzfläche ein signifikanter Grenzflächendipol von 1.1eV bestimmt, was sich aller Wahrscheinlichkeit nach in der Polarität beider Halbleiter begründet. Aus den Photoelektronenmessungen wurde eine Bandverbiegung im CdTe von 350meV vor der CdCl_2 -Nachbehandlung bestimmt, die sich durch die Nachbehandlung noch vergrößern sollte. Allerdings werden diese Messungen aufgrund der UHV-Umgebung zwangsweise an einem hochdotierten TiO_2 vorgenommen, das in dieser Form in der η -Solarzelle nicht vorliegt. Nimmt man für das TiO_2 stattdessen eine Position des Fermi-niveaus von 0.8eV unter der Leitungsbandkante an, so bestätigen die Photoelektronenmessungen, bedingt durch die Leitungsbanddiskontinuität, ein sehr geringes elektrisches Feld im CdTe. Unter Anlegen einer positiven Vorspannung an die Solarzelle wird daher die Ausdehnung der Raumladungszone im CdTe verringert, so daß nicht mehr in gesamten Absorberschicht feldunterstützt gesammelt werden kann. Die geringe Diffusionslänge für die Minoritätsladungsträger führt dann zu deutlichen Rekombinationsverlusten, die für den beobachteten spannungsabhängigen Photostrom und damit für den beobachteten geringen Füllfaktor verantwortlich gemacht werden.

Diese Arbeit hat erfolgreich gezeigt, daß sich mit Hilfe des η -Solarzellenkonzeptes auch Materialien mit geringer Diffusionslänge für Minoritätsladungsträger in Solarzellen als Absorber verwenden lassen, wenn das interne Feld im Ab-

sorber feldunterstützte Sammlung gewährleistet. Das ausgewählte Modellsystem TiO_2/CdTe bedarf insbesondere bezüglich des internen Feldes im CdTe allerdings noch Verbesserung, sei es durch schwächere Dotierung des CdTe, stärkere Dotierung des TiO_2 oder aber Herabsetzung des Grenzflächendipols durch geeignete Oberflächenkonditionierung des TiO_2 vor Aufbringen des CdTe.