

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Theoretische Modelle postulieren die Nutzung von heißen Ladungsträgern in Solarzellen. In dieser Arbeit wurde die energetische Verteilung der Elektronendichte nahe der Grenzfläche einer Solarzelle untersucht und der Fragestellung nachgegangen, ob heiße Ladungsträger die Grenzfläche erreichen?

Zur Bestimmung dieser Elektronendichte wurde in zwei Schritten vorgegangen. In einem ersten Schritt wurde die Relaxationszeit bei tiefen Temperaturen gegenüber Raumtemperatur verlängert und die resultierenden Verteilungen der optisch erzeugten Elektronen untersucht. Dazu wurde bei tiefen Temperaturen eine stationäre Anregungsspektroskopie des Photostroms in der Nähe der Bandkante durchgeführt. Die relevanten Relaxationsprozesse sind stark abhängig von der Temperatur und laufen mit deutlich reduzierten Raten ab. Auf diese Weise wird der Thermalisierungsprozess verlangsamt. Bei Temperaturen unterhalb von 96 K wurden im Photostromspektrum periodische Minima festgestellt, die mit einer kaskadenartigen Emission von LO-Phononen korrelieren. Durch diese LO-Emission werden Elektronen in Richtung des Leitungsbandminimums gestreut. Die Erhöhung des Photostroms zwischen den Minima ist eine Art "Fingerabdruck" der heißen Elektronen. Im Temperaturbereich unterhalb 35 K endet die LO-Kaskade auf dem Leitungsbandminimum. Für höhere Temperaturen schiebt dieses Endniveau kontinuierlich bis zu 4,5 meV in die Bandlücke hinein. Flache Störstellenbänder können als Einfangzentren in Frage kommen.

Zur Identifikation dieser Einfangniveaus wurde die Photolumineszenz des InP:Zn-Absorbers und des vollständig prozessierten InP:Zn/SnO₂:F-Heterokontaktes untersucht. Es zeigt sich, dass während der Prozessierung des Heterokontaktes der Absorber verändert wird.

Vor der Weiterprozessierung zeigt der Absorber eine Lumineszenz-Linie, die Zn_i-Atomen auf Zwischengitterplätzen zugeschrieben wird. Dies ist in dem fertigen Heterokontakt nicht mehr festzustellen und wird durch die Ausdiffusion der sehr mobilen Zn_i erklärt. Bei 30 K werden im Heterokontakt zusätzliche strahlende Übergänge bei 1,361 eV, 1,335 eV und 1,29 eV beobachtet, die auf neue Akzeptor- und Donator-Niveaus bzw. -Bänder hindeuten. Eine genaue

Identifikation war nicht möglich. Mit Hilfe der Photolumineszenz konnte das Endniveau E_0 der LO-Kaskade nicht genau identifiziert werden. Es wurde jedoch gezeigt, dass der strahlende Rekombinationsprozess oberhalb von 30 K in dem InP:Zn/SnO₂:F-Heterokontakt sehr komplex ist.

Eine Beschreibung der Photostromspektren erfolgte mit einem Modell, in dem mit Hilfe der Monte-Carlo-Technik die Bewegung eines Elektrons durch den Kristall simuliert wird, bis es die Grenzfläche erreicht oder rekombiniert. Hierbei wurden die relevanten Streuprozesse mit Phononen, Störstellen und Löchern berücksichtigt. Mit diesem Modell konnten die Minima im Photostrom und die Abnahme des Photostromüberschusses mit steigender Temperatur qualitativ dargestellt werden.

Eine genaue Analyse der Bewegung der Elektronen zeigt, dass die Elektronen innerhalb weniger Pikosekunden die Grenzfläche erreichen, wenn diese 100 nm vom Ort der Ladungsträgererzeugung entfernt ist. Die damit verbundene energetische Verteilung der Elektronendichte ist unterhalb von 50 K nicht-thermisch und hängt signifikant von der Anfangsenergie der Elektronen ab. So ist eine deutliche Erhöhung der Besetzungsdichte an den Energien entlang der LO-Kaskade um die Anfangsenergie festzustellen. Mit zunehmender Anzahl der Streuprozesse nähert sich die Besetzungsdichte einer thermischen Verteilung an. Die Streuung zwischen Elektronen und thermisch aktivierten Löchern wurde hierbei als der dominierende Prozess bei der Thermalisierung identifiziert.

Das Modell wurde somit bei tiefen Temperaturen getestet und dann nach Raumtemperatur extrapoliert. Dort wurde es eingesetzt, um bei Raumtemperatur die Elektronendichte und Energieverteilung nahe der Grenzfläche zu bestimmen. Nahe der Grenzfläche ist die Elektronenverteilung bei 300 K nicht-thermisch. Werden Elektronen näher als 100 nm zur Grenzfläche erzeugt, ist deren Besetzungsdichte entlang der LO-Kaskade erhöht. Der Anteil der heißen Elektronen steigt bei einem Abstand von 10 nm auf bis zu 68%. Für weiter entfernte Elektronen ist die Verteilung weitgehend thermalisiert.

Nahe der Grenzfläche erzeugte Elektronen erreichen diese mit einer mittleren kinetischen Energie, die nicht konstant $3/2 k_B T$ ist, sondern von der Anfangsenergie der Elektronen abhängt. Auf diese Weise kann bei InP:Zn über die Elektronen im Mittel bis zu 26% der Anfangsenergie an die Grenzfläche transportiert werden.

Für die Photovoltaik ergibt sich aus dieser Arbeit: In hochabsorbierenden Halbleitern mit hoher Beweglichkeit der Minoritätsladungsträger sind die nahe der Oberfläche erzeugten Ladungsträger nicht per se thermisch verteilt. Bei diesen Materialien, zu denen die III-V-Halbleiter mit direkter Bandlücke wie GaAs oder InP gehören, kann deshalb ein nennenswerter Anteil der optisch erzeugten Elektronen die Grenzfläche als "heiße" Elektronen erreichen.

Bei indirekten Halbleitern wie Si oder Ge spielt dieser Effekt eine stark untergeordnete Rol-

le. Bei diesen Halbleitern erfolgt die Absorption der Photonen tief im Kristallgitter. Die Transportzeiten zur Grenzfläche übersteigen hier die Thermalisierungszeiten deutlich.

Die hier durchgeführte Untersuchung hat den Charakter einer prinzipiellen Betrachtung. Deswegen wurde die Simulation des Ladungsträgertransportes in InP auf den einfach beschreibbaren sphärisch-parabolischen Bereich der Bandstruktur beschränkt. Dadurch wird natürlich ein großer Teil der hochenergetischen Anregung aus dem Sonnenspektrum nicht berücksichtigt. Die ermutigenden Ergebnisse dieser Arbeit lassen es aber nun als sinnvoll erscheinen, die Simulation auf den gesamten Spektralbereich auszudehnen. Dies ermöglicht eine direkte Aussage über die maximal nutzbare Überschussenergie in einer realen Solarzelle. Dann wird ein direkter Effizienzvergleich mit dem Solarkonverter von Ross möglich.

In diesem Fall ist es auch interessant, Halbleiter zu untersuchen, die deutlich niedriger dotiert sind als in der vorliegenden Arbeit. Bei niedrig dotierten Halbleitern mit einer höheren Beweglichkeit der Elektronen ist dann auch ein stark ausgeprägter Effekt von heißen Ladungsträgern zu erwarten, die tiefer im Kristall erzeugt wurden.

