

skopgehäuse befestigt ist, so geschaltet wird, daß die erste zu messende Zelle mit der Meßapparatur verbunden ist.

Das Plastikröhrchen dient auch als Sollbruchstelle, um bei einer möglichen Störung eine Beschädigung des Scantischs oder Meßrahmens zu vermeiden.

Auf den ausgewählten Zellpositionen werden dann die Zellen nacheinander vermessen, wobei immer die der Meßrahmenposition zugeordnete Schalterstellung programmgesteuert eingestellt wird.

Nach dem Abschluß der Messungen werden die Meßdateien im Wurzelverzeichnis abgespeichert. Jede Meßdatei erhält einen Dateinamen, der sich aus dem Meßserienamen und der automatisch angefügten Meßrahmenposition zusammensetzt.

Für größere Zellen und Module wurde ein weiterer Meßrahmen entwickelt, der dem oben beschriebenen sehr ähnlich ist, aber eine einzelne Öffnung von $9\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ besitzt (Abb.10.5).

Bei der Messung von IN-Modulen wurden diese mit Cyanacrylat-Kleber² an den vier Eckpunkten auf den Rahmen geklebt, wodurch eine starre und trotzdem wieder lösbare Verbindung erhalten wurde. Die Positionen der Zellen dieser Module sind wieder im Programm i-Scan abgespeichert, und werden vor Beginn der Messung in einem Programmfenster („K-Schalter“) ausgewählt. Während der Messung wird wieder zwischen den einzelnen Zellen programmgesteuert umgeschaltet.

Da sich der Schiebeschalter als nicht wiederbeschaffbares Unikat erwies, wurde für diesen Meßrahmen auf drei leicht erhältliche Kippschalter mit jeweils 2×2 Umschaltkontakten zurückgegriffen. Mit den drei Schaltern können $2^3 = 8$ unterschiedliche Schalteinstellungen verwirklicht werden, von denen zur Zeit aber nur sechs genutzt werden. Die programmgesteuerte Umschaltung erfolgt wieder mit Hilfe des Plastikröhrchens, das für den Kippschalter-Rahmen aber an einer veränderten Position am Mikroskopgehäuse angebracht werden muß.

Für diesen Rahmen gibt es einen weiteren Meßmodus („FKS-Serie“) im Meßprogramm i-Scan, in dem jeder Schalterstellung frei wählbare Meßbereichskordinaten und Schrittweiten zugeordnet werden können. Mit entsprechenden Probenhaltern wurde er in diesem Modus für die Messung von CuInS_2 -Dünnschichtzellen eingesetzt.

10.4 Einfluß der Titandioxid-Schichtdicke

Schon zu Anfang wurden bei einigen der ersten mit dem neuen SMSC-Aufbau vermessenen Zellen streifen- oder kreisflächenförmige Muster in den Photostromabbildungen festgestellt, die zunächst unerklärbar waren. Da sie auch bei wiederholten Messungen über längere Zeiträume reproduziert wurden, konnten mögliche Störungen während der Messungen ausgeschlossen werden.

Besonders eindrucksvoll zeigt sich dieses Phänomen in der in Abb.10.6 b dargestellten Photostromaufnahme einer Zelle, deren TiO_2 -Schicht vom Hersteller durch Siebdruck aufgebracht wurde. Selbst ohne Anpassung der Photostromskala im Sinne

²Pattex Blitz flüssig; Henkel KGaA, Düsseldorf.

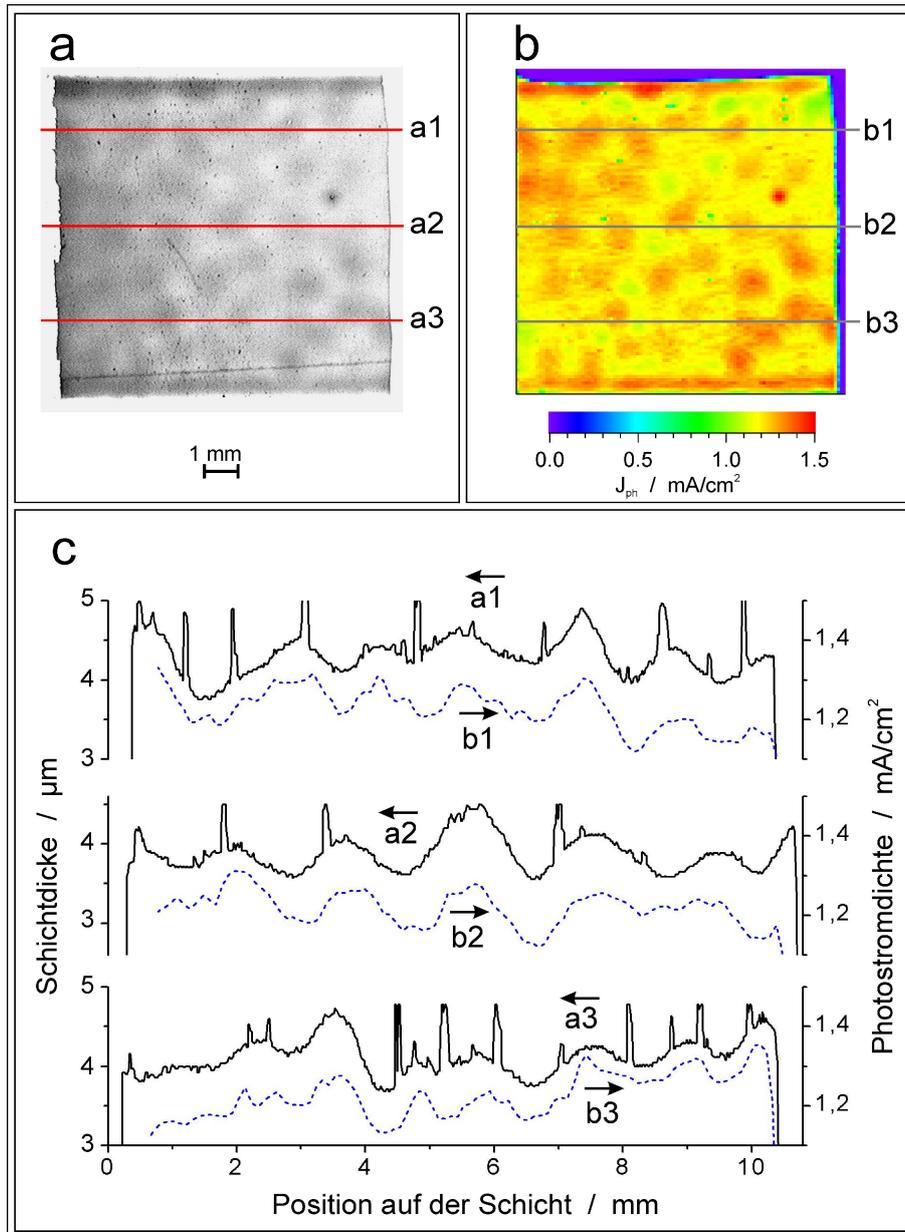


Abb. 10.6: Photoaktivitätsmuster mit korrelierender Schichtdicke in einer durch Siebdruck hergestellten Injektionszelle;
 a) Videoaufnahme mit starker Kontraststeigerung. Rote Linien: Positionen von Schichtdickenprofilmessungen mit dem Step-Profilometer;
 b) Ortsaufgelöste Photostromaufnahme. Graue Linien: ausgelesene Photostromprofile; ($I_{\text{Licht}} 96,8 \text{ mW/cm}^2$; $\varnothing_{\text{spot}} 200 \mu\text{m}$; $l_{\text{step}} 100 \mu\text{m}$.)
 c) Jeweils drei Schichtdickenprofile (schwarz) und Photostromprofile (blau gestrichelt), die an gleichen Positionen der Zelle gemessen wurden (siehe a) und b)), zeigen die Korrelation von Photoaktivität und Schichtdicke.

einer Kontraststeigerung sind die annähernd runden Flecken erhöhter Photoaktivität deutlich zu erkennen.

Mit dem bloßen Auge konnte im Gegenlicht ebenfalls ein leicht fleckiges Muster beobachtet werden. Eine unterschiedliche Verteilung der Färbung der TiO_2 -Schicht oder ihrer Schichtdicke oder eine Veränderung in der Platinrückkontaktschicht hätte als Ursache angenommen werden können. Da die Titandioxidschicht bei dieser Zelle im Siebdruckverfahren aufgebracht wurde, erschien ein Einfluß der Schichtdicke am wahrscheinlichsten.

Nach dem Zerlegen der Zelle in ihre zwei Glashälften wurde klar, daß der Effekt nur von der Absorberschichtseite hervorgerufen wird. In Abb.10.6 a ist ein in Transmission aufgenommenes Videobild dieser Zellhälfte gezeigt. Deutlich sind dunklere Flecken zu erkennen, die mit den Bereichen höherer Photoaktivität in Abb.10.6 b korrelieren.

Ursprünglich war der optische Kontrast in der Videoaufnahme wesentlich geringer und die Schicht noch vom Sensibilisator rot-violett gefärbt. Um die Unterschiede besser zu verdeutlichen, wurde der optische Kontrast mit einem Bildverarbeitungsprogramm maximiert und die Abbildung in ein Graustufenbild umgewandelt, um die entstandenen starken Farbverzerrungen auszublenden.

Entlang der roten Linien in Abb.10.6 a wurden mit einem Step-Profilometer³ Messungen des Schichtdickenprofils durchgeführt. Dabei wurde die Zelle auf dem Scantisch des DekTak-Gerätes langsam unter einer mit wenigen Milligramm belasteten winzigen Nadel bewegt. Dabei wurde die vertikale Auslenkung der Nadel gemessen und über der Position entlang der Bewegungslinie aufgezeichnet. Diese Höhenprofile sind als schwarze Kurven in Abb.10.6 c aufgetragen. Ihre Maxima stimmen mit den dunklen Flecken in der Durchlichtvideoaufnahme (Abb.10.6 a) überein. Zum Vergleich wurden an den gleichen Positionen entlang der in Abb.10.6 b markierten Linien drei Photostromprofile aus der Photostromaufnahme ausgelesen und als blau gestrichelte Kurven in Abb.10.6 c eingetragen. Die entsprechenden Schichtdicken- und Photostromprofile sind jeweils fast deckungsgleich.

Die räumlich eng begrenzten starken Höhenänderungen, in den Schichtdickenprofilen als Zacken zu erkennen, werden von kleinen Kriställchen, vermutlich Lithiumdiodid, aus Elektrolytresten hervorgerufen, die auch in der Videoaufnahme (Abb.10.6 a) als winzige schwarze Pünktchen zu erkennen sind.

Aus den oben beschriebenen Messungen kann entnommen werden, daß die TiO_2 -Schichtdicke in einem Bereich von ca. 3,5 bis 5,0 μm variiert. Der mit der Schichtdicke zunehmende entsprechende Photostrom liegt im Bereich von 1,1 bis 1,3 mA/cm^2 . Daher könnte der Kurzschlußstrom der Zelle mit einer gleichmäßigeren und dickeren Schicht gesteigert werden, was sich wahrscheinlich auch in einer Steigerung des Wirkungsgrades niederschlagen würde. Die optimale Schichtdicke könnte sogar noch über 5 μm liegen.

³Sloan DekTak 3030; Veeco Instruments Inc., Woodbury, NY, USA.

Ergebnis

Bei einer Injektionszelle mit einer im Siebdruckverfahren aufgetragenen TiO_2 -Schicht wurde in bildgebenden Photostrommessungen mit dem SMSC ein fleckiges Muster verschieden hoher Photoaktivität abgebildet. Es stimmt mit dem Muster eines in Transmission aufgenommenen Videobildes der TiO_2 -Schicht überein.

Der Vergleich von Photostromprofilen, ausgelesen aus den SMSC-Photostrombildern, mit Schichtdickenprofilen, die mit einem Step-Profilometer gemessen wurden, zeigte eine weitestgehende Übereinstimmung der Form beider Profiltypen. Das Muster in der Photostromaufnahme wurde damit durch die Dickenschwankungen der Absorberschicht von $3,5\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$ hervorgerufen. Der Photostrom ist proportional zur Schichtdicke.

Die maximal mögliche Photostromdichte könnte bei dieser Zelle durch eine dickere TiO_2 -Schicht vergrößert werden, wahrscheinlich würde dabei auch der Wirkungsgrad anwachsen.

10.5 Degradationsuntersuchungen

Der wichtigste Aspekt der Untersuchungen an Injektionssolarzellen war die Frage nach ihrer Langzeitstabilität. Mit orts aufgelösten Photostrommessungen konnten bei Langzeitbelichtungen über knapp ein Jahr, entgegen der nach bisheriger Auffassung erwarteten Stabilität [180], Veränderungen des Elektrolyten, der Absorberschicht und des Platinrückkontaktes beobachtet und voneinander getrennt werden.

Besonders interessant sind die Experimente an einem Modul (IN-Modul) aus fünf Solarzellen, an denen verschiedene Effekte zu beobachten sind. Es wurde von einem anderen Forschungsinstitut erhalten, das diese Module schon in größerem Maßstab herstellt. Diese wurden wiederholt im Sonnensimulator⁴ belichtet, und es wurden von ihnen unter genau gleichen Bedingungen orts aufgelöste Photostromaufnahmen angefertigt.

In Abb.10.7 wird ein Gesamtüberblick über die an diesem Modul während eines Zeitraums von 282 Tagen beobachteten Änderungen der einzelnen Zellen gegeben. Später wird auf die einzelnen Effekte getrennt eingegangen.

Die fünf Zellen wurden für 158 Tage mit simuliertem Sonnenlicht unter Kurzschluß belichtet, anschließend wurde nach weiteren 121 Tagen der Lagerung im Dunkeln eine Kontrollmessung gemacht. Die fünf orts aufgelösten Photostromaufnahmen der fünf einzelnen Zellen des Moduls wurden nacheinander zu den angegebenen Zeitpunkten unter den gleichen Bedingungen aufgenommen. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen wurden sie so skaliert, daß die gemeinsame Skala von 0 bis $4,5\ \text{mA}/\text{cm}^2$ verwendet werden kann.

Die als Bezeichnungen verwendeten Zellnummern sind links oben in Abb.10.7 neben die Zellen in der ersten, noch vor dem Belichtungsexperiment aufgenommenen, Photostromaufnahme eingetragen. Die Aufnahmen der Zellen wurden, um Platz

⁴Sonnensimulator Typ STF-4; Solaronix SA, Aubonne, Schweiz.